

Pour la Science

Janvier 1998

■ POUR LA

SCIENCE

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Les inondations

Les armes nucléaires

Les virus informatiques

Les guêpes parasitoïdes

Le riz modifié génétiquement

Zimbabwe, cité africaine

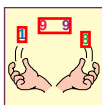
Sommeils et insomnies



Canada : \$ 8,75

Les Araméens

BLOC-NOTES de Didier Nordon



JEU-CONCOURS

Jongler avec des chiffres

par Pierre Tougne

TRIBUNE DES LECTEURS



POINT DE VUE

Le handicap de la diversité

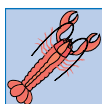
par Jacques Hourdry et Claude Caussanel



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La machine des frères Carissan

par François Morain



SCIENCE ET FINANCE

La grande peur de l'inconnu

par Christian Walter



MÉTIER DE L'INGÉNIEUR

Culture scientifique et efficacité

par Pierre Castillon



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Dérivés d'ailoli

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Pour lire plus aisément l'ancien français

■ La vérification des programmes d'Ariane

■ Toxines de serpent ■ Modélisation de la baie du Mont-Saint-Michel ■ Prévoir les cultures ■ Patronymes traceurs

■ Les drogués du jeu ■ Enzymes de réparation

■ Un billard réversible ■ Les femmes en politique

■ Disparition dans un trou noir



VISIONS MATHÉMATIQUES

Dissections et métamorphoses

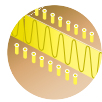
par Ian Stewart



LOGIQUE ET CALCUL

Le monde des machines

par Jean-Paul Delahaye



SAVOIR TECHNIQUE

Écrans à cristaux liquides

par Samuel Musa



ANALYSES DE LIVRES

■ Dieu face à la science, de Claude Allègre

■ Dinosaures Story, de Dominique Leglu

et Catherine Mallaval

■ Fractales et finance, de Benoît Mandelbrot

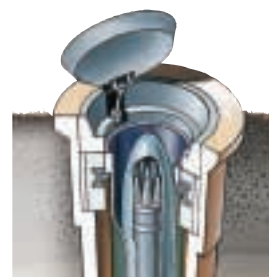
■ Impostures intellectuelles, de Alan Sokal et Jean Bricmont

■ Le fleuve de la vie, de Richard Dawkins

Péril nucléaire

par Bruce Blair,
Harold Feiveson
et Frank von Hippel

Le risque de déclenchement accidentel d'une guerre nucléaire est excessif. Les nations doivent cesser d'être en état d'alerte permanent.



Prévenir les inondations

par Yvette Veyret
et Gérald Garry

Les crues et les inondations sont généralement prévisibles. On prévientra plus efficacement les risques en tenant mieux compte du passé lors des aménagements.



Les armes secrètes des guêpes parasitoïdes

par Nancy Beckage

Les guêpes parasitoïdes se développent à l'intérieur de chenilles vivantes. Pour survivre, elles introduisent dans les chenilles parasitées des virus qui en inhibent le système immunitaire.



Comment combattre les virus informatiques

par Jeffrey Kephart,
Gregory Sorkin,
David Chess et Steve White

La biologie éclaire le comportement des virus informatiques et aide à concevoir des parades.

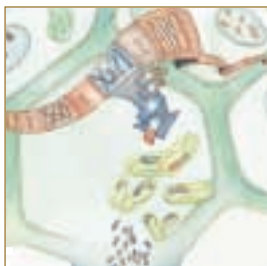


Le riz génétiquement modifié

68

par Pamela Ronald

Les biologistes utilisent le génie génétique pour protéger le riz contre les maladies et augmenter le rendement des cultures.

**Zimbabwe, cité africaine**

74

par Webber Ndoro

Du XII^e au XVII^e siècle, la cité de Zimbabwe fut le principal centre commercial d'Afrique australe. Les colons européens, méprisant le passé de l'Afrique, en ont effacé de nombreuses traces.

**Sommeils et insomnies**

80

par Jean-Louis Valatx

On ne commande pas le sommeil. Les différents réseaux de neurones qui assurent l'éveil doivent être mis au repos par d'autres neurones. Les mauvais fonctionnements de ce système anti-éveil sont responsables d'insomnies.

**Les Araméens**

88

par Luc Bachelot

Dans des sites bientôt noyés par la construction d'un barrage, les découvertes archéologiques renouvellent notre vision du monde araméen, de son organisation sociale, de ses coutumes et de ses écritures.

**ÉDITORIAL****Enterrer le gaz carbonique?**

L'homme n'est plus un animal darwinien : pour survivre au réchauffement de la Terre dû à l'accumulation des gaz à effet de serre, principalement le gaz carbonique, il ne peut attendre qu'une mutation aléatoire transforme son génome en une forme mieux adaptée à un nouvel environnement.

La conquête du feu a fait l'*Homo technologicus*. Les remèdes aux problèmes posés par la maîtrise incomplète des produits de combustion seront technologiques. «Et tu seras pareil, Nathanaël, à qui suivrait, pour le guider, une lampe que lui-même tiendrait en sa main», ironisait Gide. À tort. Cette lampe éclaire les solutions, quand elles sont nécessaires.

Le gaz carbonique résulte de l'oxydation du carbone stocké dans les combustibles fossiles et le bois. La réinsertion de ce carbone atmosphérique dans le bois par une reforestation massive est une vieille idée, irréaliste par l'ampleur du reboisement nécessaire.

Des scientifiques proposent d'injecter le gaz carbonique au fond des océans. Ce serait échanger une forme de pollution pour une autre, mais relativement moins importante : l'océan contient 50 fois plus de gaz carbonique que l'atmosphère. De plus, le gaz mettrait plusieurs siècles à remonter à la surface.

D'autres chercheurs pensent réinsérer le gaz carbonique, d'où il vient, des profondeurs de la Terre. Les gisements de gaz naturel contiennent des proportions importantes de gaz carbonique, et le remplissage des gisements épuisés n'aurait pas d'effet écologique.

Enfin la dispersion dans l'atmosphère du gaz carbonique n'est pas une fatalité : un mélange sous pression de charbon en présence de vapeur d'eau produirait de l'hydrogène qui serait le combustible de centrales électriques, et le gaz carbonique serait séparé et séquestré sous terre. Le surcoût de cette méthode est évalué à 30 pour cent.

Ces solutions techniques nous feraient sortir de l'impasse : les pays développés ne peuvent interdire aux pays en voie d'industrialisation une augmentation de leurs émissions de gaz à effet de serre.

Philippe BOULANGER

Concours de citations

Chasles – en voilà un qui sait faire jouer sa relation : grâce à elle, tous les lycéens connaissent son nom. Peut-être détient-il même un record : être, de tous les savants, celui dont le nom est le plus souvent prononcé. À moins que le détenteur de ce record ne soit Fourier, moins fréquenté par les écoliers certes, mais qui a donné son nom à une foule d'objets scientifiques, utilisés dans des branches variées ? Ou Arago, vu l'importance du boulevard qui porte son nom à Paris ? Ou encore les frères Lumière ? Non, écartons ces derniers : ce sont des tricheurs, qui se sont arrangés pour que leur patronyme coïncide avec un mot usuel, dans l'espoir que le bon peuple croie citer leur nom chaque fois qu'il utilise un terme dont, en fait, l'étymologie remonte au latin.

En tout cas, il n'est pas sûr *a priori* que le savant nommé le plus souvent figure parmi ceux qu'on tient généralement pour grands parmi les grands – Newton, Gauss ou Einstein. L'histoire présente si souvent des bizarreries... D'où ce jeu-concours que je me permets de proposer. Il tient en une seule question : « Quel est le savant dont le nom est le plus souvent prononcé de par le monde ? » L'originalité de mon jeu-concours est que je n'aurai jamais la moindre idée de la réponse correcte. Même si les milliers de

lettres que je ne manquerai pas de recevoir convergeaient vers un seul et même savant, cela ne suffirait pas à lui faire prendre indiscutablement la tête du peloton au niveau mondial.

Dans ces conditions, faire miroiter une promesse de récompense au vainqueur serait de la pure mauvaise foi. C'est juste pour l'honneur...

Noyaux de discorde

Ouf ! Quand les Américains, les Russes et les Allemands se querellent, on peut craindre une nouvelle guerre mondiale. Grand merci, le danger semble écarté. Merci qui ? Merci l'Union internationale de chimie pure et appliquée. Cette dernière vient – enfin – de baptiser officiellement les éléments transuraniens de la table de Mendeleïev de numéro atomique entre 104 et 109. Le 104 s'appellera rutherfordium ; le 105, dubnium ; le 106, seaborgium ; le 107, bohrium ; le 108, hassium ; le 109, meitnerium. Sous ces élégantes dénominations, il m'a semblé pouvoir repérer l'Anglais Rutherford, l'Américain Seaborg, le Danois Bohr, le Norvégien Hassel, l'Autrichienne Meitner et – mon savoir en histoire de la chimie étant ce qu'il est – l'inconnu Dubny. (Renseignements pris, il semblerait qu'il s'agisse du laboratoire russe de Dubna.)

La décision de l'Union internationale de chimie a bel et bien « mis fin à vingt ans de polémiques entre des laboratoires américains, russes et allemands ». Il n'est pas de querelle si futile qu'elle ne puisse dégénérer en véritable guerre. Dire que, pendant tout ce temps, inconscients du danger, nous dormions sur nos deux oreilles...

Aveuglément sourd

« L'hostilité fut sourde, c'est-à-dire muette », écrit le premier, évoquant une rencontre glaciale entre son père et lui. « François Bayrou a souffert, vis-à-vis de mes propositions, d'une sorte de cécité auditive volontaire », déclare le second.

Le premier, c'est François Weyergans, écrivain réputé pour son humour, mais dont le dernier roman m'a plutôt ennuyé, mis à part le bon mot cité ci-dessus. Le second, c'est Roger Fauroux, homme politique tout ce qu'il y a de sérieux et respectable, mais dont le concept de cécité auditive – qui témoigne chez son auteur d'une exceptionnelle surdité visuelle ! – m'a bien fait rire (*Libération*, 21 octobre 1997).

Bref, les hommes, tout comme les sens, jouent à contre-emploi.

Le b a ba du babou

Qu'est-ce qu'un « sol à dégradation négative » ? C'est, évidemment, un sol dont la qualité s'améliore. Le terme « sol à dégradation négative » est forgé par Jacques Weber, qui proteste ainsi contre le pessimisme, systématique selon lui, des considérations touchant l'écologie de la planète. Il reproche en particulier à la FAO d'avoir un département « dégradation des sols ». Au passage, notons que Weber repose implicitement la question de la valeur de « moins par moins ». Formellement, ça fait plus : un sol à dégradation négative est un sol qui s'améliore. Aucun doute. Mais psychologiquement, moins par moins, ça fait moins – et plutôt deux fois qu'une ! Aucun doute non plus. On imagine fort bien des titres alarmistes dans les journaux : « La dégradation des sols est de plus en plus négative. » (*Axiales*, ASTS, n° 24, 3^e trimestre 1997.)

Continuons d'enrichir notre vocabulaire. Cette fois, il s'agit d'établir de fines nuances entre trois types de langages savants. « Le langage scientifique, le jargon et le babouisme sont trois choses différentes. Le langage scientifique, c'est de nommer de nouveaux concepts : théorie des promenades, théorie des catastrophes... Le jargon consiste à désigner par des termes scientifiques ce qu'on pourrait appeler d'une manière normale ; au lieu de dire « envie d'apprendre », on dit « pulsion épistémophilique ». Le « babou » est un homme qui utilise le langage scientifique sans en connaître la signification, mais parce que cela marque bien. » (Bruno Lussato, *Les nouvelles technologies*, ASTS, 3^e trimestre 1997.) Pédañt pour pédañt, il me reste une question : d'où vient le mot babou ?

Timbrés

Terribles lapsus... Ils vous échappent quand vous vous croyez tranquille, que vous relâchez votre attention. Il faut vraiment une toute petite rubrique, toute modeste dans son coin, celle de la philatélie, pour que *Le Monde* se laisse aller à dire ce qu'il pense vraiment de notre plus vénérable Institution. « Lundi 20 octobre 1997, La Poste a mis en vente deux timbres aux thèmes très différents : Le Collège de France, à 4,40 F, et La Qualité, à 4,50 F. »

Que La Poste estime qu'il manque dix centimes au Collège de France pour atteindre à la Qualité, passe encore. Mais que le journal favori des intellectuels vienne en rajouter ! En tout cas, je sais désormais quoi répondre aux nombreux collègues qui s'étonnent de voir que – à mon âge ! – je ne sois pas encore titulaire d'une chaire audit Collège. C'est que je vise un but « très différent » : la Qualité, bien sûr.

JEU-CONCOURS N° 43

PIERRE TOUGNE

Jongler avec des chiffres

L'art de jouer avec les lettres et de jongler avec les mots est une caractéristique des membres de l'Oulipo. Ce mois-ci, je voudrais transposer aux chiffres deux idées de deux de ses membres hélas disparus : Raymond Queneau et Georges Pérec. R. Queneau dans son livre *Exercices de style* raconte de 99 manières différentes la même histoire. Pour nous, «l'histoire» sera le millésime de la nouvelle année soit 1998 quel 'on devra écrire en utilisant les chiffres 1, 2, 3, ... 8, 9 dans l'ordre et les symboles mathématiques

$+$, $-$, $*$, $/$, $^$, $\sqrt{}$, $!$, $()$. En voici un exemple :
 $1998 = (1+2)*3/4*(5*6+7)*8*\sqrt{9}$
 qui utilise 13 symboles. Notez que la concaténation de chiffres n'est pas licite et que les parenthèses ne sont nécessaires que pour lever une ambiguïté. Au lieu de «raconter» 1998 de 99 façons

différentes, nous nous contenterons de neuf styles. L'idée du style, nous l'emprunterons à Georges Pérec qui, dans son livre *La disparition*, réussit la gageure de raconter une histoire sans utiliser la lettre e! Nos neuf histoire devront être écrites en supprimant successivement un chiffre de 1 à 9 (en utilisant les autres chiffres toujours dans l'ordre). Serez-vous écrire ces neuf «histoires» de façon concise, c'est-à-dire en utilisant le moins de symboles mathématiques possibles?

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de janvier 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 41

Les lecteurs assidus de *Pour la Science* ont reconnu une forme déguisée du problème de Steiner décrit dans l'article *Le réseau le plus court* de M. Berne et R. Graham (*Pour la Science*, mars 1989). En effet, pour améliorer le patron proposé, il s'agissait de trouver un chemin reliant les quatre sommets de la face supérieure du cube (et de la face inférieure) de longueur plus petite que $2\sqrt{2}$. Le chemin de la figure 1 répond à la question. Sa longueur obtenue par un calcul trigonométrique élémentaire est $(1 + \sqrt{3}) < 2\sqrt{2}$. Ceci conduit aux deux patrons des figures 2 et 3 dont la longueur totale à coller n'est que $6 + 4\sqrt{3} = 12,928...$ Ces patrons sont en fait minimaux pour la longueur à coller, mais la démonstration dépasse le cadre de cette solution. Enfin le titre du jeu-concours *Patron de périmètre minimum pour un cube* était ambigu, ce qui a conduit deux lecteurs à me proposer le patron de la figure 4 (où les parties ombrées pliées autour des pointillés forment des «soufflets») dont le périmètre est $8\sqrt{2} = 11,613...$ bien inférieur à celui des patrons des figures 2 et 3, mais dont la longueur totale à coller est néanmoins de $8 + 4\sqrt{2} = 13,653...$

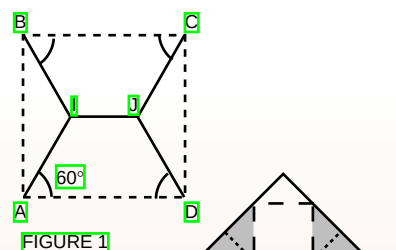


FIGURE 1

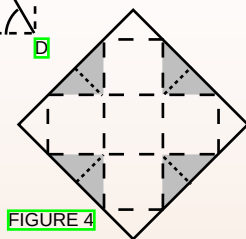


FIGURE 4

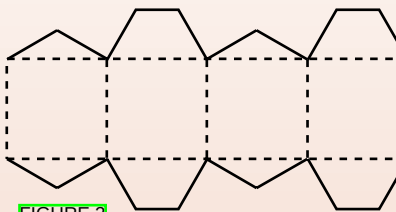


FIGURE 2

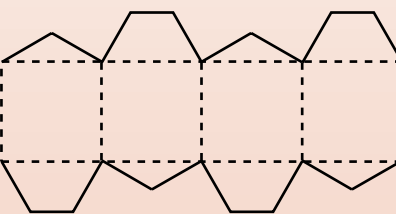


FIGURE 3

Colle abusive

Qui a eu l'idée de coller un encart à la page 35 du numéro de décembre de *Pour la Science* ? Après un premier essai rapide et infructueux de décollage à la réception du numéro, j'avais réservé cette délicate opération à un après-midi de surveillance d'un devoir : je disposais de trois heures sans rien d'autre à faire que de surveiller une centaine d'élèves, par ailleurs calmes. Malgré un outillage adapté, trois heures plus tard, la page est tailladée et quelques lambeaux de l'encart y restent attachés.

Le meilleur était pour la fin : en repartant, et après avoir mis l'encart ou ce qu'il en restait à la poubelle, je referme le journal et je le mets dans mon cartable. Arrivé chez moi, les pages 34 et 35 sont solidement collées l'une à l'autre ! J'ai certes enlevé l'encart, mais pas la colle... Je réserve donc cette opération pour un prochain après-midi de surveillance.

Paul COLIN, Douai

De nombreux lecteurs ont connu des mésaventures semblables. *Pour la Science* leur présente ses excuses. L'article *Les faux souvenirs*, d'Elisabeth Loftus, dans lequel l'encart était placé, a été réimprimé : il est agrafé au centre de ce numéro.

Brouillage et cryptographie

Le logiciel «Transform», proposé par Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu pour brouiller des images (voir *Images brouillées, images retrouvées*, *Pour la Science*, décembre 1997) pourrait-il être utilisé en cryptographie ? En choisissant une image assez grande et de rapport largeur sur hauteur convenable, il devrait être possible de rendre le temps de décodage assez long pour décourager toute tentative.

David BLUM

Réponse de Jean-Paul Delahaye

Je ne pense pas que ce logiciel puisse faire de la cryptographie. En calculant la longueur du cycle suivi par chaque point, il serait assez facile de retrouver l'image. Pour obtenir une méthode de cryptographie, il faudrait introduire d'autres idées.

Guerre de l'information

L'essai de «destruction» d'un satellite à l'aide d'un laser situé sur Terre, réalisé par l'armée américaine (voir *MIRACL, le laser destructeur de satellites*, *Pour la Science*, décembre 1997), souligne que le contrôle de

l'information est aujourd'hui aussi important, sinon plus, que celui du territoire. Supprimons les moyens d'observation et de communication de l'ennemi : il deviendra aveugle, sourd et muet. Détruisons son système de positionnement par satellite : ses armées ne sauront plus se repérer. Cela conduira-t-il à des guerres plus «humaines» ? On peut hélas en douter au vu des conflits récents, y compris de la Guerre du golfe où la technique était omniprésente.

François CHÈNE, Montauban

Concours et sélection

Rainier Lanselle indique dans *Les concours mandarinaux* (voir *Pour la Science*, décembre 1997), que les examens «égalitaires» qui se sont développés en France depuis le XIX^e siècle ont été, au moins en partie, inspirés par les concours mandarinaux. Il souligne le paradoxe : l'idée de démocratie et d'égalité était pourtant étrangère à la Chine des mandarins. Depuis une trentaine d'années, des sociologues ont montré un autre paradoxe : le système égalitaire et méritocratique français favorise l'immobilisme social. L'origine sociale a en effet un poids statistique déterminant dans la réussite scolaire et professionnelle : l'égalité des chances semble presque aussi étrangère à la France républicaine actuelle qu'à la Chine des Han.

Christine JEAN, Roubaix

Dans le numéro de décembre de *Pour la Science*, l'éditorial commente sur tout l'article *Les concours mandarinaux*. Sa dernière phrase : «On dit que cet examen a inspiré l'institution du baccalauréat» est toutefois inexacte, car le grade de bachelier existait déjà comme premier niveau des universités médiévales lorsqu'elles furent créées au début du XIII^e siècle. L'esprit qui y régnait alors était celui d'une communauté maîtres-étudiants : l'université avait le caractère d'un «compagnonnage», d'une corporation d'intellectuels jalouse de son autonomie vis-à-vis du pouvoir politique, et même de l'autorité religieuse dont elle émanait pourtant. On était donc à l'opposé du système chinois qui sélectionnait des fonctionnaires soumis au pouvoir.

Comme il est dit dans l'article, ce n'est qu'au XVIII^e siècle que les pays occidentaux ont cherché à imiter le système chinois. En France, Louis XV, craignant l'influence des Jésuites qui avaient créé de nombreux collèges d'enseignement secondaire, les évinça vers 1762. Les enseignants recrutés pour les remplacer furent sélectionnés selon le

modèle de recrutement des mandarins chinois (décrit justement par les Jésuites, implantés en Chine...) : ce fut la première mouture du concours de l'agrégation.

Après la suppression, sous la Révolution, de ce qui restait des universités françaises, ce type de modèle s'imposa aussi pour le recrutement dans les Grandes Écoles nouvellement créées. En dehors de l'élite restreinte qu'elles formaient, c'étaient les lycées de type napoléonien, qui ne voyaient que par elles, qui assuraient la quasi-totalité de l'enseignement postélémentaire au siècle dernier. De sorte que le baccalauréat se calqua aussi sur ce modèle, bien que ce ne soit pas un concours. Il est pourtant resté formellement le premier grade des universités : c'est obligatoirement un docteur de l'université qui préside les jurys de baccalauréat. Cette histoire est en rapport étroit avec le problème de coexistence de deux systèmes antinomiques pour l'enseignement supérieur dans notre pays.

Maurice PASDELOUP, Labarthe sur Lèze

Dioxines et risques

Il est facile d'ironiser, comme le fait Jean-Jacques Duby (voir *Risques réels et risques négligeables*, *Pour la Science*, novembre 1996), sur la petitesse des doses de dioxine. Toutefois ces composés n'agissent pas comme des toxiques ordinaires, mais comme les plus puissants «dérégulateurs du système hormonal», ainsi que l'a souligné un volumineux rapport de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis. Cette action se produit donc à l'échelle de la molécule. Une molécule gramme de dioxine, soit environ 322 grammes, représente 6×10^{23} molécules. Un picogramme (10^{-12} gramme) de dioxine contient donc environ deux milliards de molécules, ce qui est un seuil pas tout à fait négligeable.

Claude BLOCH, Montsérêt

Réponse de Jean-Jacques Duby

Je n'ironise pas sur la dioxine : je m'étonne que les dioxines soient perçues comme une telle menace pour la santé publique alors qu'elles n'ont causé qu'un seul décès en 50 ans, ce qui tend à prouver que les concentrations auxquelles la population est exposée doivent bien être inférieures au seuil de toxicité. Que ces concentrations soient exprimées en picogrammes ou en molécules par litre ne change rien à l'affaire, même si deux milliards de molécules peuvent faire plus peur qu'un picogramme.



Le handicap de la diversité

JACQUES HOURDRY • CLAUDE CAUSSANEL

Préservez les sciences naturelles, sciences de demain.

Zoologistes, botanistes, paléontologues se plaignent des restrictions de leurs crédits de recherche et du délabrement de leurs disciplines. Réclamations corporatistes ? Sans doute pas : c'est un fait que l'on ne trouve plus de successeurs pour remplacer les systématiciens ou les spécialistes des divers groupes animaux ou végétaux. Ainsi, pour le secteur de l'entomologie seulement, aucun spécialiste en activité ne connaît plus la systématique du groupe des drosophiles, qui sont pourtant l'animal de choix de la biologie moléculaire ; de même, il n'existe plus qu'un seul spécialiste au monde de certains groupes d'araignées et d'acariens.

Les sciences naturelles n'ont pas la faveur des bailleurs de crédits de recherche, qui considèrent que les activités de classification, prétendument antiques et poussiéreuses, devraient laisser la place à une biologie moléculaire brillante et universelle. Cependant la connaissance des organismes, de leur physiologie, de leurs relations avec les biotopes, ne pourrait-elle renforcer les apports déjà fascinants de cette biologie moléculaire ?

De surcroît, les films animaliers passant en salle (comme *Microcosmos*) ou programmés par la télévision font invariablement de superbes audiences, prouvant que le public est intéressé par la diversité de la vie qui nous entoure. Les crédits attribués à ces recherches ne sont pas à la mesure de leur succès !

Les services d'aménagement du territoire font de plus en plus appel à des naturalistes, afin d'harmoniser activités économiques et ressources naturelles. Les agronomes ont besoin de spécialistes des faunes et flores sauvages, afin de protéger ou d'améliorer les faunes et flores domestiques. Un rendement accru des plantes vivrières, par exemple, suppose une connaissance approfondie de la biologie des espèces «souches» et des paramètres physico-chimiques de leurs milieux de vie. Des étudiants

seront-ils encore formés à ces travaux dans les institutions universitaires ?

Apparemment pas. Pourtant notre pays peut-il sacrifier des compétences indispensables, mais devenues si rares ? Quand on devra parer rapidement aux attaques d'un groupe d'insectes ou lutter contre des algues envahissantes, pourra-t-on attendre d'avoir formé de nouveaux spécialistes de groupes hélas négligés ? Plus généralement, des activités de recherche peuvent-elles être sacrifiées sur l'autel des modes ? La biologie moléculaire doit-elle évincer les botanique et zoologie classiques pour se développer ? Les sciences naturelles ne doivent-elles pas vivre, pour assurer la poursuite des progrès de la biologie moléculaire ?

DIVERSITE ET UNITE

Les sciences naturelles sont des préoccupations de toujours. L'animal, par exemple, fut tour à tour source de nourriture, de décorations, motif de culte, objet de crainte, d'émerveillement... Sous l'impulsion des Réaumur, Buffon, Lamarck ou Linné, les premières classifications apparurent, et, bientôt, l'invention du microscope montra que la diversité macroscopique s'accompagnait d'une remarquable unité à l'échelle cellulaire. Les avancées méthodologiques amenèrent aussi l'avènement de la génétique, et prolongèrent l'unité dégagée jusqu'au niveau moléculaire. Comme Janus, la zoologie et la botanique sont bifaces : elles séduisent par leur diversité et par leur unité.

Aujourd'hui les aspects unitaires font oublier que le monde vivant est également varié ; la zoologie et la botanique risquent de s'affaiblir dangereusement, et de perdre leur âme. Malgré les avancées moléculaires, le patrimoine naturel est un trésor dont nous n'avons pas fini d'évaluer les structures et les composants, loin s'en faut. L'exploration de ce patrimoine a permis d'établir des classifications dites naturelles, de construire des arbres phylétiques, mais

que d'espèces nous échappent encore, pas seulement dans les contrées reculées d'Amazonie, mais aussi dans la litière de la forêt de Fontainebleau ! Les techniques actuelles, de plus en plus sensibles et spécifiques, devraient progressivement améliorer nos connaissances des organismes, pour ce qui concerne les plans d'organisation, les événements cellulaires, et conduire à une meilleure compréhension des mécanismes évolutifs. Il pourrait en résulter des retombées d'ordre médical et pharmacologique : les recherches sur les venins, par exemple, ont éclairé le fonctionnement des synapses inter-neuronales dans le cerveau ; les études des peptides et alcaloïdes cutanés de grenouilles vénéneuses d'Amérique ont fourni de nouveaux analgésiques et antibiotiques. On pourrait multiplier les exemples ; les espoirs sont immenses.

Signalons enfin que cette diversité biologique qui caractérise notre planète est actuellement en danger. Certes, l'extinction fait partie intégrante de l'évolution : toutes les espèces que la Terre a portées ou porte aujourd'hui se sont éteintes ou s'éteindront, mais nous accélérons le processus et menaçons les grands équilibres de la biosphère par manque de respect des mécanismes régulateurs.

Les naturalistes doivent intervenir : pouvons-nous demeurer silencieux face aux pollutions dues au plomb ou au mercure, sur les côtes, quand on sait que les moules consommées concentrent les métaux ? Ne devons-nous pas avertir le pays de la surexploitation des populations de poissons dans les océans, et des graves problèmes de renouvellement que cela posera ?

Jacques HOURDRY est professeur à l'Université Paris Sud. Claude CAUSSANEL est directeur du Laboratoire d'entomologie et professeur au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.



La machine des frères Carissan

FRANÇOIS MORAIN

A la recherche des machines qui décomposaient les grands nombres en facteurs premiers.

Pourquoi est-il facile de multiplier deux nombres entiers et si ardu de trouver deux entiers dont le produit est donné ? Le problème de la factorisation occupe les mathématiciens depuis longtemps ; dès le XIX^e siècle, ils ont cherché à construire des machines facilitant les calculs répétitifs et fastidieux de la factorisation.

Dans certaines branches de la théorie des nombres, les calculs peuvent être assez aisément automatisés. C'est le cas des cribles. Le plus connu d'entre eux est le crible d'Ératosthène, qui permet de trouver tous les nombres premiers dans un intervalle donné (on écrit tous les nombres de 0 à 100, par exemple ; on élimine ensuite tous les multiples de 2, puis tous les multiples de 3, puis de 5, etc ; après avoir passé tous les nombres «au crible», on ne conserve ainsi que 2, 3, 5, 7, 11, 13, etc. qui sont premiers). Une extension de cette notion de crible permet de résoudre les équations en nombres entiers du type $N = x^2 - y^2$: c'est le cas de la méthode de Fermat (voir l'encadré). La méthode est efficace quand

les diviseurs ont des valeurs voisines et elle est adaptable à des dispositifs mécaniques.

Le mathématicien anglais Frederick Lawrence semble avoir été le premier à préconiser la construction d'un crible pour factoriser des entiers, en 1896. Bien qu'il ait écrit comment fabriquer une telle machine, elle ne vit pas le jour. L'idée de Lawrence fut oubliée jusqu'en 1910, quand André Gérardin publia une traduction française de son article dans sa revue de «mathématiques amusantes», *Sphinx-Ceïpe*. Cet article semble avoir inspiré à l'ingénieur Maurice Kraitchik, l'idée de construire un prototype d'une telle machine, en 1912.

Pierre Carissan, professeur de mathématiques est aussi rédacteur à la revue *Sphinx-Ceïpe*, et il s'intéresse à la fabrication d'une telle machine. Après avoir occupé différents postes de professeur de mathématiques, il est nommé, en 1914, au Collège Dumont-d'Urville, près de Caen. Certains de ses proches le considèrent comme un «original fini».

Son frère, Eugène Olivier, entre à l'École spéciale militaire, en 1900. En

1912, les deux frères construisent une machine à factoriser les grands nombres, mais ni leur prototype, ni celui de Kraitchik ne donne de résultats intéressants. Eugène entreprend la fabrication d'un nouveau prototype en 1913, mais le projet est interrompu par la guerre.

Héroïque, il est blessé trois fois durant la guerre (en juillet 1915, il refuse même d'être évacué et continue à se battre). Après la guerre, il est nommé professeur à l'École militaire de Saint-Maixent, et reprend la construction de la machine, dite machine à congruences. Elle sera achevée en 1919 par la maison *Château Frères*, spécialisée dans la fabrication d'instruments scientifiques. Elle permettra la résolution de plusieurs problèmes de la théorie des nombres.

Eugène Carissan meurt en 1925 sans avoir eu le temps de faire exécuter les modifications qu'il jugeait nécessaires. Il voulait notamment entraîner la machine par un petit moteur électrique et non plus à la main. Aucune modification n'est entreprise, et la machine disparaît.

A LA RECHERCHE DE LA MACHINE DE CARISSAN

Avec mes collègues Jeffrey Shallit, à l'Université canadienne de Waterloo et Hugh Williams, à l'Université du Manitoba, nous apprenons l'existence de la machine des frères Carissan à l'automne 1989. Sherlock Holmes des mathématiques, nous cherchons la machine dans toute la France : nous enquêtons pour retrouver la maison *Château Frères*, et visitons les musées techniques français. La première piste aboutit rapidement à une impasse : la maison *Château Frères* n'existe plus. Les pistes du Conservatoire national des arts et métiers, de l'École normale supérieure, de l'Institut Henri Poincaré ou encore de la Bibliothèque nationale échouent.

Après une année de recherches infructueuses, J. Shallit décide d'employer les grands moyens : avec l'aide de Jean-Paul Allouche, de l'unité CNRS URA 410, il écrit à tous les Carissan de

La factorisation de 611

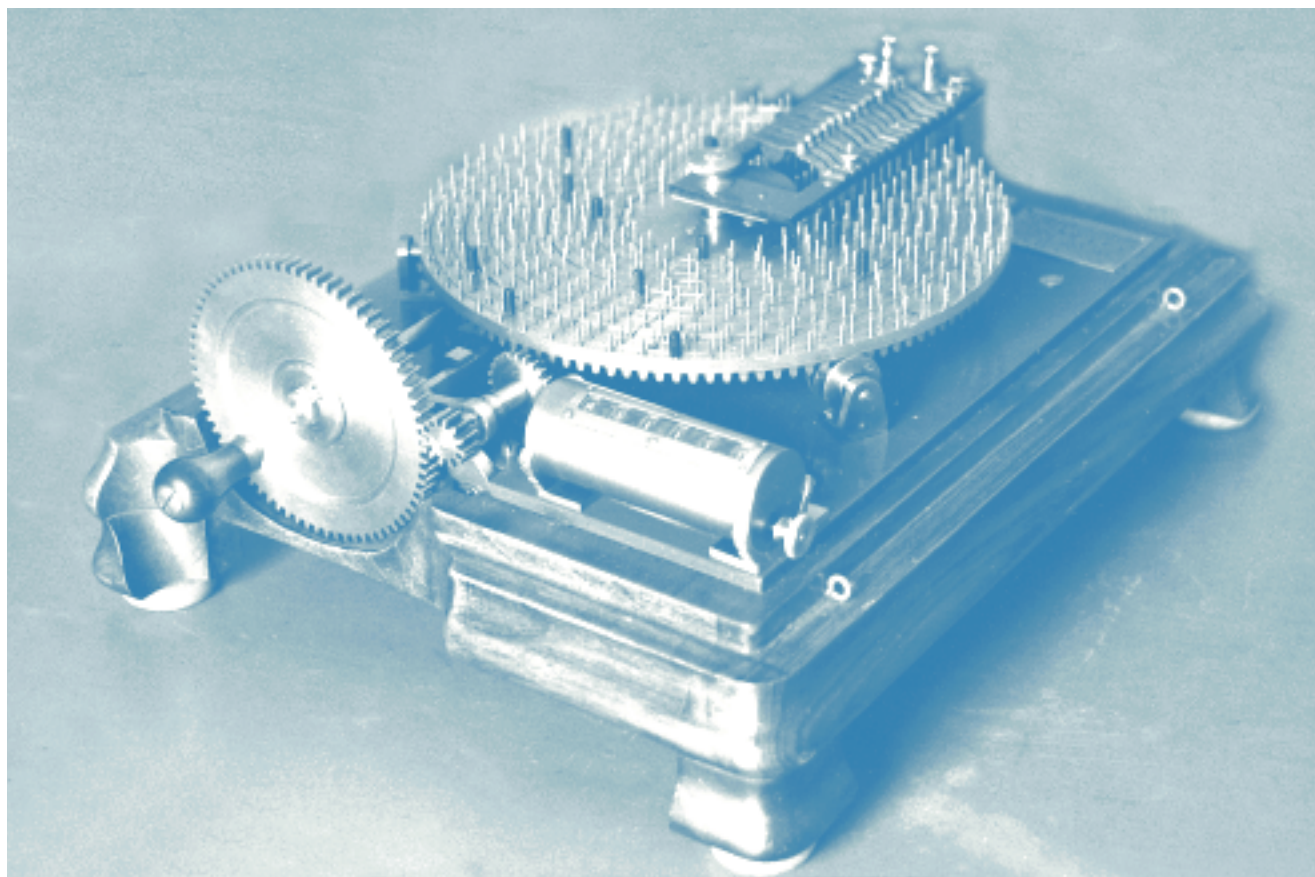
Supposons que l'on veuille factoriser 611. S'il existe deux nombres x et y tels que $611 = x^2 - y^2$, on peut alors factoriser la différence :

$611 = x^2 - y^2 = (x - y)(x + y)$
Pour trouver x et y , on fait varier x et on cherche à quelles conditions $x^2 - 611$ est un carré parfait. Pour que cette expression soit un carré, il faut que $x^2 - 611$ soit positif, de sorte que l'on commence la recherche à partir du nombre immédiatement supérieur à la racine carrée de 611, soit 25. On essaye alors les nombres 26, 27, 28, etc. jusqu'à trouver une valeur de x pour laquelle $x^2 - 611$ est le carré d'un entier. Pour $x = 30$, on obtient :

$x^2 - 611 = 289 = 17^2$; on en déduit que $611 = 30^2 - 17^2 = (30 - 17)(30 + 17) = 13 \times 47$.

On limite le nombre d'essais en rassemblant les conditions que doit remplir $x^2 - 611$ pour être un carré parfait. Ainsi, le carré d'un entier, en base 10, doit nécessairement se terminer par 0, 1, 4, 5, 6, ou 9.

Quand on essaye $x = 27$, on obtient $x^2 - 611 = 118$ qui, terminé par un 8, n'est pas un carré parfait : 27 n'est pas acceptable. Les frères Carissan ont généralisé la méthode : leur machine, permettait de trouver les carrés parfaits, égaux à $x^2 - N$, où N est le nombre à factoriser (voir la figure de la page suivante).



Jean V. Jans

La machine à congruences des frères Carissan. Une manivelle fait tourner la roue dentée qui entraîne d'une part un compteur et d'autre part 14 couronnes de laiton, chacune avançant d'un picot à l'autre pour la rotation d'une dent de pignon (le compteur avance d'une unité à chaque rotation d'une dent). Avant de tourner la roue, toutes les couronnes sont en position «0». À chaque couronne est associé un nombre (19, 21, 23, 26, 29, 31, 34, 37, 41, 43, 47, 53, 55 et 59) matérialisé par autant de picots. Soit N le nombre à factoriser. On utilise la relation $N = x^2 - y^2$ et l'on cherche les conditions que doit remplir x pour

que y^2 soit un carré parfait. Si des valeurs permises de x sont 1, 7, 8, 13, 14 et 20 modulo 21, on place un capuchon métallique sur les picots n° 1, 7, 8, etc. de la couronne 21. De même pour les autres couronnes utilisées. On tourne la manivelle et quand les capuchons métalliques (les plots noirs) des différentes couronnes sont alignés, un contact électrique s'établit sous la barrette métallique, et un signal retentit. Le nombre indiqué sur le cadran a alors des chances d'être un carré parfait. La machine factorise des nombres de treize chiffres en moins de 18 minutes, tâche qui demanderait plusieurs jours à la main.

France et de Navarre pour leur demander s'ils connaissent la machine que nous recherchons. Au cours de l'été 1991, les 85 Carissan référencés sur notre liste reçoivent une lettre, où on leur demande tous les renseignements possibles sur cette machine et sur ses inventeurs.

Les premières réponses ne tardent pas à arriver, mais elles sont toutes décevantes. Enfin, nous recevons un appel téléphonique d'une des filles d'Eugène Carissan : la machine existe toujours et elle est entreposée près de Bordeaux. Apparemment, la machine est restée en possession de la famille jusque vers 1940, quand Jean Dubois, astronome et ami de la famille Carissan, la fit transférer à l'Observatoire de Floirac, près de Bordeaux. Elle y a été entreposée jusqu'en 1992.

Elle fonctionne parfaitement bien. La famille de l'inventeur, étonnée de voir trois chercheurs remuer ciel et terre pour retrouver la machine due au génie paternel a donné la machine au Conservatoire national des arts et métiers, où elle est désormais installée.

Avons-nous achevé – avec les honneurs – notre carrière de détectives ? Non, car il existe d'autres machines, notamment celle d'Édouard Lucas. On doit à ce mathématicien français les premières méthodes permettant de montrer de façon rigoureuse la primalité des entiers. Son résultat le plus connu est le test qu'il a établi pour prouver la primalité des nombres de Mersenne, c'est-à-dire des nombres que l'on peut écrire sous la forme $M_n = 2^n - 1$. Aujourd'hui, les programmes utilisés de par le monde pour trouver le plus grand nombre premier utilisent tous le test de Lucas (les mathématiciens trouvent régulièrement un nouveau « plus grand nombre premier » : le plus récent est $M_{2976221} = 2^{2976221} - 1$, composé de 895 932 chiffres).

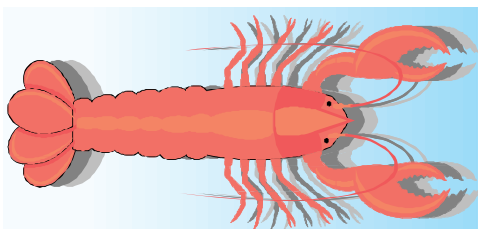
Lucas aurait utilisé son théorème pour prouver, à la main, la primalité de M_{127} , un nombre de 39 chiffres en base 10. Cela aurait représenté quelque 300 heures de travail. En fait, pour tester la primalité des nombres de Mersenne, Lucas s'est servi d'un échiquier inspiré des métiers à tis-

ser qui le fascinaient : il faisait glisser les lignes de chiffres à la façon dont le peigne tasse la laine sur le métier. Il y travaillait en base 2 : les 1 étaient représentés par des pions et les 0 par des cases vides.

En 1887, il écrivit qu'Henri Genaille, ingénieur aux Chemins de fer français et lui construisaient une machine mécanique pour tester la primalité des nombres de Mersenne (un « piano arithmétique »). Ils ont aussi collaboré à l'invention de plusieurs dispositifs de calcul, dont beaucoup sont au Musée du Conservatoire national des arts et métiers.

Malheureusement, Lucas est mort accidentellement, quelques semaines après cet article, à l'issue d'un banquet, et l'on a perdu la trace de la machine construite par Genaille et Lucas. Peut-être dort-elle dans quelque grenier ?

François MORAIN, ingénieur de l'armement, enseigne l'informatique à l'École Polytechnique.



Incertitude, ô mes délices,
Vers toi nous nous en allons,
Comme s'en vont les écrevisses,
À reculons, à reculons.

Guillaume Apollinaire

La grande peur de l'inconnu

CHRISTIAN WALTER

La peur de perdre, plutôt que l'espérance de gains, détermine le comportement des individus.

Comment se décide-t-on face à une alternative ? En théorie micro-économique, on suppose que les individus classent «rationnellement» leurs préférences en fonction de valeurs monétaires des différentes possibilités. Ainsi devant des éventualités dont ils connaissent les probabilités, ils choisiraient, indifférents aux risques, en fonction de l'espérance mathématique de gain (la somme des valeurs des différents gains possibles multipliés par leur probabilité). Penser ainsi ne tient pas compte de la psychologie des acteurs.

R. Shiller, de Yale, reprenant les travaux issus des arguments avancés par Maurice Allais, montre que les individus n'ont pas ce comportement calculatoire «rationnel». La rationalité doit inclure les motivations de l'individu. Ces travaux amènent à réviser certaines hypothèses de base utilisées dans les axiomatisations des comportements individuels. L'altération vient de la «peur de l'inconnu» ou de la «peur de perdre».

Le paradoxe d'Allais, que nous allons examiner, montre que les individus en situation de choix financiers préfèrent la sécurité quand ils se trouvent au voisinage de la certitude.

Examinons comment l'ordre des préférences des individus (dans ce cas entre deux perspectives aléatoires) est modi-

fié par la proximité de la certitude. Supposons que vous ayez à choisir entre les deux situations suivantes. Situation A : certitude de recevoir 1 million (espérance mathématique 1), ou situation B : 10 chances sur 100 de gagner 5 millions, 89 chances sur 100 de gagner 1 million, une chance sur 100 de ne rien gagner (espérance mathématique 1,39). Que choisissez vous ? Une majorité d'individus préfèrent l'hypothèse A bien que son espérance mathématique soit plus faible que celle de B.

Allons plus loin : vous devez choisir entre deux nouvelles options. Situation C : 11 chances sur 100 de gagner 1 million, 89 chances sur 100 de ne rien gagner (espérance mathématique égale à 0,11), ou situation D : 10 chances sur 100 de gagner 5 millions, 90 chances sur 100 de ne rien gagner (espérance mathématique : 0,5). Quelle option préférez-vous ? Dans cette alternative, la majorité préfère D à C).

Rationnellement, elle a tort ! B est à A ce que D est à C. En effet, dans le choix A/B, comme dans le choix C/D, on passe d'une situation à l'autre par la même opération de diminution de 11 chances pour le gain de 1 million, en répartissant ces 11 chances de la même manière, soit 10 pour le gain de 5 millions, et une seule

pour le cas «gain nul». La variation de l'espérance mathématique entre A et B et entre C et D est la même, égale à 0,39.

Préfère-t-on disposer de ce stock de 11 chances sur le seul gain intermédiaire de un million, ou bien préfère-t-on les répartir en 10 pour le gain maximum et une pour un risque de ne rien gagner ? La préférence de A sur B doit conduire à la préférence de C sur D et inversement. Or ce n'est pas le cas : les individus préfèrent A à B, mais préfèrent D à C. Il y a modification de l'ordre des préférences. Le second choix indique que les individus acceptent le déplacement des 11 chances, le premier indique exactement le contraire. Les préférences sont donc modifiées par la proximité de l'état certain A. C'est le paradoxe d'Allais, d'où découle la règle explicative, «la préférence pour la sécurité au voisinage de la certitude».

Tout se passe comme si les individus imaginaient que l'incertain contient le pire et que le pire adviendra, comme si l'inconnu était pour notre psychologie, chargé de l'inquiétude maximale, de l'angoisse la plus forte.

La situation est encore compliquée par l'existence de seuils monétaires psychologiques personnels qui donnent à une même valeur nominale des valeurs psychologiques différentes. Ainsi, le remplacement d'un million de francs par 100 francs, ou par 100 millions de francs, va changer les réponses des mêmes individus, dans le sens d'une angoisse croissante à la pensée de perdre une somme plus importante. Les études montrent qu'à l'approche d'un seuil psychologique de référence, la peur de perdre prédomine, tandis que l'éloignement de ce seuil produit, au contraire, une désensibilisation affective devant les gains ou les pertes.

Peur de l'inconnu, peur de perdre... Et si c'était la peur, plutôt que la rationalité, qui déterminait les comportements économiques individuels ?

LE PARADOXE DE MAURICE ALLAIS

	SITUATION A	SITUATION B	SITUATION C	SITUATION D
5 MILLIONS		10 CHANCES SUR 100	10 CHANCES SUR 100	10 CHANCES SUR 100
1 MILLION	CERTITUDE	89 CHANCES SUR 100	11 CHANCES SUR 100	11 CHANCES SUR 100
GAIN NUL		1 CHANCE SUR 100	1 CHANCE SUR 100	90 CHANCES SUR 100

CHOIX	
5 MILLIONS	10 CHANCES
1 MILLION	11 CHANCES
GAIN NUL	1 CHANCE

Le comportement des individus est modifié par la présence proche de la sécurité. La proximité de cette certitude modifie l'ordre des préférences en inversant le choix «rationnel». Les gens préfèrent A à B et, par conséquent, devraient préférer D à C, puisque, dans les deux cas, on distribue de la même façon 11 chances sur 100. Or C est préféré à D.



Culture scientifique et efficacité

PIERRE CASTILLON

L'ingénieur moderne assemble, au cours de son travail, différents savoirs orchestrés autour d'une compétence de base.

En quelques dizaines d'années, l'ingénieur est devenu réaliste et pluraliste. Réaliste parce qu'il intègre les coûts de sa recherche dans son évaluation de l'intérêt de son projet et que la pression de la rentabilité l'oblige à interroger tous les matins son miroir sur la valorisation de son travail. Nous le regrettons tous, mais la concurrence mondiale a réduit le coin de ciel bleu scientifique que l'ingénieur pouvait explorer il y a encore quelques années. Il n'y a plus de savants Cosinus dans nos laboratoires de recherches : ils ont pris...la tangente !

Pluraliste parce qu'il est un assembleur de techniques : l'ingénieur est aujourd'hui maître d'œuvre et aussi maître d'ouvrage. Cette nécessité est apparue avec la généralisation d'un outil informatique indispensable à la modélisation des phénomènes et au perfectionnement des procédés. Après l'informatique, l'ingénieur a appris à amalgamer d'autres disciplines. Ainsi, en prospection pétrolière, l'ingénieur associe les techniques optiques, les programmes informatiques de traitement d'image, la géologie et la géochimie, et des connaissances de mécanique ; le pharmacien utilise les mêmes techniques, en substituant la chimie fine et la physiologie à la géologie. La diminution des méga-gisements de pétrole et la nécessité d'optimisation des principes actifs imposent une recherche plus fine et à cette fin, des associations de compétence. D'où la constitution d'équipes pluridisciplinaires. Là aussi, plus de savant Cosinus travaillant isolé dans le silence de son officine.

Les considérations environnementales, les contraintes de sécurité, la pression des consommateurs amplifient les exigences dont il faut tenir compte en amont du développement. La culture de l'ingénieur s'est élargie.

Bel et bon. Nécessité fait loi. J'ai toutefois une certaine nostalgie des

spécialistes chevronnés de naguère. D'autant que je reste persuadé que la compétence initiale de base dans un domaine bien maîtrisé est une nécessité initiale pour l'efficacité du travail de l'ingénieur. La réalité reste d'exploration difficile et sans connaissance fine initiale, il n'est pas de bonnes réalisations.

La pluri-orientation vient avec l'expérience et il me semble désolant de voir certains ingénieurs papillonner trop jeunes et se disperser dans des orientations multiples. S'il est bon de connaître un minimum de gestion, cette connaissance peut être acquise plus tard dans le cours de leur carrière. L'industrie désire des ingénieurs immédiatement opérationnels et cette efficacité repose initialement sur des bases scientifiques et techniques solides.

Même l'informatique, indispensable, est devenue la langue d'Ésope. Les possibilités documentaires qu'elle procure ne remplacent pas les connaissances de base. Socrate s'inquiétait déjà de la prolifération de textes écrits ; cette prolifération incitait, selon lui, à la paresse intellectuelle et à la non-mémorisation : «L'écrit est un orphelin dont le père ne peut reporter» écrivait-il.

La découverte, ou plus modestement la résolution d'un problème, résulte d'une alchimie cérébrale encore mal connue, mais qui est le fruit d'une combinatoire personnelle des connaissances. Savoir que la documentation existe n'est pas suffisant. À cet égard, je suis dubitatif quant à l'efficacité de l'implantation d'Internet trop tôt dans le cursus scolaire, universitaire ou même dans l'entreprise. Internet est, pour l'industrie, un formidable atout si l'utilisateur maîtrise la technique et si son niveau de connaissance lui permet d'en tirer parti.

En une phrase, la pluridisciplinarité apparaît au cours de la carrière par des spécialisations successives où l'exigence de rigueur et de savoir-faire est préservée. Mon souhait en tant qu'industriel est que ces exigences soit maintenues dans l'enseignement universitaire et dans les écoles d'ingénieur.

Bien entendu, il nous faut insister sur les qualités de flexibilité, de créativité et d'innovation auxquelles ne prépare pas un savoir mémorisé : il faut privilégier les études permettant l'expérimentation, les remises en cause, les parcours d'obstacles. Citons là-dessus un ministre de l'Éducation nationale :

«Les délégués des différents ministères se sont trouvés d'accord sur tous les points essentiels : développement du côté expérimental de l'enseignement des sciences, la mécanique, la physique, la chimie ; suppression de toutes les questions qui n'ont pas un caractère scientifique élevé, ou qui ne comportent aucune application importante.»

De qui est ce texte, qui a des connotations actuelles ? De Paul Appell. Et il date de... 1904.

Confrontés à la mise au point de procédés et de produits, souvent même à leur prospection sur les marchés internationaux, les ingénieurs doivent assortir leurs capacités créatives d'un rôle d'interface avec les scientifiques de la recherche publique et universitaire, permettant d'assurer une valorisation efficace des avancées de la science. Il faut en citant encore Appell, «... que chacun travaille à développer sa compréhension, sa volonté, son initiative...»

Pierre CASTILLON est Directeur de recherche, technologie, environnement du groupe Elf Aquitaine.



Dérivés d'aïoli

HERVE THIS

De délicieuses émulsions faites à partir de n'importe quel végétal, viande ou poisson.

Partons de l'aïoli, le vrai, celui qu'on fait, en Provence, en pilant de l'ail auquel on ajoute de l'huile d'olive, sans addition de jaune d'œuf. C'est une émulsion, c'est-à-dire une dispersion de gouttelettes d'huile dans l'eau de l'ail.

Pourquoi cette sauce est-elle stable (relativement), alors que le mélange d'huile et d'eau se sépare ? Parce que l'ail apporte des molécules dites tensioactives qui enrobent les gouttelettes d'huile et préviennent leur fusion. L'aïoli est une sauce apparentée à la mayonnaise, où les molécules de lécithines, provenant du jaune d'œuf, sont tensioactives.

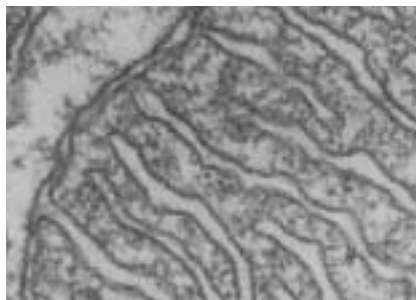
Eloignons-nous de la recette traditionnelle pour inventer nos premières variations : l'échalote, qui appartient à la même famille végétale que l'ail, contient-elle également des molécules tensioactives qui nous permettraient de faire de l'«échalotoli» ? Et de l'«oignonli» à partir d'oignons ? La réponse expérimentale est concluante : il suffit de pilonner l'échalote ou l'oignon avec de l'huile pour obtenir ces nouvelles émulsions. Au pire doit-on ajouter un peu d'eau, afin de faciliter la réalisation (dans certaines recettes d'aïoli, on conseille, ainsi, d'ajouter un morceau de pain trempé dans du lait). Restera ensuite à imaginer des plats où l'on utilisera ces deux nouvelles sauces. Aux Chefs de jouer...

D'autres végétaux que les liliacées contiennent-ils également des tensioactifs ? Les cuisinières et cuisiniers savent que la moutarde permet, quand on s'y prend bien, de réaliser des vinaigrettes émulsionnées : la moutarde, aussi, contient des molécules tensioactives utiles à la stabilisation des émulsions. Mais dans les autres végétaux ?

Toutes les cellules, qu'elles soient végétales ou animales, contiennent des compartiments limités par des membranes : ces dernières sont composées de molécules de phospholipide, avec une queue lipidique, insoluble dans l'eau, et une partie soluble dans l'eau. Dans les cellules vivantes, ces molécules de phospholipides forment des doubles couches, parce que les queues hydrophobes se regroupent, tandis que leurs têtes hydrophiles sont au contact de l'eau, dans les

divers compartiments cellulaires. Ces molécules abondent et ce sont de bons tensioactifs. Pourrait-on les utiliser pour monter une émulsion ?

Pilons, par exemple, une courgette, en ajoutant de l'huile goutte à goutte : nous obtenons une sauce épaisse que, par analogie, nous nommerons «courgettoli». Puis, passons du règne végétal au règne animal : les cellules animales contiennent aussi des membranes. Pilons un cube de viande bœuf en ajoutant de l'huile : nous obtenons du «boeufoli». Ainsi, de n'importe quel végétal ou animal, nous savons que nous pouvons faire une sauce



Les cellules végétales ou animales sont pleines de membranes, composées de molécules tensioactives (en haut, les membranes d'une mitochondrie, organe de respiration des cellules). Ces molécules se disposent de sorte que les parties insolubles dans l'eau ne soient pas au contact de l'eau (en bas).

émulsionnée, pour peu que nous libérions les molécules de phospholipides, en les pilonnant, par exemple, avec de l'huile (nous devons ajouter un peu d'eau, en début de préparation, quand les ingrédients choisis en contiennent trop peu).

Notons que les molécules de phospholipides ne sont pas les seules molécules tensioactives des cellules végétales ou animales : les protéines, également, ont souvent de bonnes propriétés émulsifiantes. La preuve : un blanc d'œuf fouetté avec de l'huile forme une émulsion remarquablement stable... mais d'une piètre saveur : le blanc d'œuf et l'huile n'ont rien

de bien savoureux. En revanche, les molécules de protéines contribuent à la stabilité des diverses sauces que nous pouvons confectionner à partir de viande, de poisson ou de végétaux.

Des émulsions, passons maintenant à des systèmes physiques analogues : les mousses, composées de bulles d'air dispersées dans un liquide ou dans un solide. Il y a quelques mois, nous avons considéré dans cette rubrique une mousse de chocolat, le «Chocolat Chantilly», que l'on obtient par fouettage d'une émulsion de chocolat. Pourrait-on généraliser le procédé ?

La proposition, ce mois-ci, est l'utilisation du fromage, qui contient une grande quantité de matière grasse et des molécules tensioactives, les caséines, qui servent à disperser les gouttelettes de matière grasse du lait dans celui-ci. Pour obtenir une mousse de fromage, confectionnons d'abord une émulsion de fromage, en chauffant une casserole où nous aurons placé de l'eau et du fromage, par exemple des crottins de Chavignol. Agitons doucement : nous obtenons une sauce lisse et épaisse, que le microscope révèle composée de gouttelettes dispersées dans l'eau (pour avoir un goût plus relevé, nous pouvons remplacer l'eau par du vinaigre concentré par ébullition) : par analogie avec la sauce béarnaise, nous nommerons cette préparation «béarnaise de fromage».

Pour obtenir la mousse souhaitée, reprenons le procédé qui permet de passer de crème (une émulsion de matière grasse du lait dans l'eau) à une crème fouettée : on refroidit en fouettant. Ici, on met la casserole au congélateur pendant une dizaine de minutes, puis on fouette vigoureusement : on obtient alors un «Crottin de Chavignol Chantilly». L'essai a été également réussi à partir de Roquefort, qui a donné du Roquefort Chantilly.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 25 janvier 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Pour lire plus aisément l'ancien français

Réalisation informatique d'un dictionnaire des verbes de l'ancien français.

Seuls quelques rares textes d'ancien français sont compréhensibles : la *Chanson de Roland* ou *Tristan et Iseult* sont parmi les plus connus. Qui traduira les nombreux manuscrits oubliés dans le ventre de la Bibliothèque de France ? Le déchiffrement d'un texte prend plusieurs années

à un philologue averti, et les progrès resteront lents... sauf si l'on établit un programme d'aide à la traduction. C'est là l'entreprise de Hava Bat-Zeev Shyldkrot, de l'Université de Tel Aviv, et de l'équipe de Maurice Gross, à l'Université Paris VII.

Aujourd'hui les dictionnaires d'ancien français ne sont abordables que par des experts et très difficilement utilisables. Dans les différents textes, les mots ont des orthographes différentes : la graphie unique du français ne s'impose qu'au XVII^e siècle et, jusqu'au XIX^e siècle, les incertitudes orthographiques subsistent. On écrit aussi bien *je poise* que *je pèse*, pour la pre-

mière personne du singulier du verbe *peser*, et le relatif moderne *qui* s'écrit indifféremment *chi*, *qui* ou *ki*. Pis encore, ces différences de graphie résultent de variations de dialectes, qui s'exprimaient également par des changements de construction de formes conjuguées, par exemple.

Comment faciliter l'édition des textes anciens ? En utilisant les ordinateurs. La première tâche sera d'enrichir le *corpus* des textes analysables.

Afin de rassembler un *corpus* aussi étendu que possible, H. Bat-Zeev Shyldkrot et ses collègues normalisent les textes déjà saisis par d'autres chercheurs ou éditeurs, et ils saisissent directement de nouveaux textes, soit par frappe, soit par un système de lecture optique.

Puis, à l'aide du programme *INTEX*, mis au point à l'Université Paris VII, H. Bat-Zeev Shyldkrot extrait les formes qui se retrouvent également en français moderne, et elle constitue ainsi la base d'un dictionnaire informatique de verbes qu'elle enrichit des formes analysées ensuite une à une.

Dans un tel fichier, on trouve, à côté de chaque forme verbale, le modèle de conjugaison auquel elle correspond. Seront énumérés tous les verbes qui apparaîtront dans les textes dépouillés, les verbes qui existent encore en français contemporain tout comme ceux qui ont disparu de la langue.

Chaque forme rencontrée est accompagnée de sa forme de base et du texte où on l'a trouvée. Par exemple, *aparlé* qui signifie «dit», vient de *aparer*, la forme du participe passé masculin singulier d'un verbe du premier groupe, le verbe *aparer*. Il figure dans le dictionnaire avant les entrées *apartient* et *apartint* :

Aparlé, *aparer*. V : Kms
Apartient, *apartenir*. V : P3s
Apertint, *apartenir*. V : J3s.

Dans une telle entrée, les abréviations signifient : V, verbe ; P, présent, K, participe passé ; m, masculin ; J, parfait ; s, singulier.

Sept textes ont été ainsi indexés, et toutes les constructions possibles des verbes ont été réunies sous la forme de graphes, qui montrent les relations entre les formes équivalentes. Plus les textes déjà analysés seront nombreux, plus l'analyse des nouveaux textes sera aisée.



Le *Roman de Renart* est un texte célèbre, traduit depuis longtemps, mais bien d'autres trésors littéraires attendent une traduction.

La vérification des programmes d'Ariane

Une gestion d'ensemble de la fiabilité des programmes utilisés sur le lanceur Ariane 5.

En 1996, l'échec du premier vol d'Ariane 5, dû à une erreur de logiciel, plonge l'industrie spatiale européenne dans le désarroi. L'Aérospatiale est alors dotée d'une mission d'architecte logiciel : les ingénieurs doivent gérer l'ensemble des logiciels des équipements du lanceur, alors qu'auparavant, ces logiciels étaient gérés indépendamment.

A l'Institut national de recherche en informatique et automatique (INRIA), nous avons mis au point de nouvelles méthodes de vérification de programmes. Durant la préparation au tir Ariane 502, nous avons appliqué ces méthodes aux programmes du calculateur de bord ainsi qu'à ceux de la centrale à inertie.

Le calculateur de bord traite les données de la navigation, de guidage, de pilotage, du séquentiel de vol (la succession des phases de vol), ainsi que la gestion des étages et des redondances d'équipements. La centrale à inertie calcule, à partir des mesures des gyromètres et des accéléromètres, la position et la vitesse du lanceur. Les programmes qui gèrent l'ensemble de ces tâches sont composés de près de 100 000 lignes.

Le travail principal de l'architecte logiciel est d'assurer la compatibilité entre les différents logiciels dans tous les modes de fonctionnement, y compris en présence de panne, et d'apporter la preuve du bon fonctionnement. Cette preuve

consiste à montrer que le logiciel premièrement ne provoque pas d'erreur d'exécution, par exemple, de dépassement de la capacité de calcul sur des nombres réels ou un conflit d'accès à une variable ; deuxièmement produit les résultats en temps voulu, en particulier, ne boucle pas indéfiniment ; troisièmement donne des résultats conformes à sa spécification lorsque l'exécution du logiciel se déroule sans erreur et sans boucle infinie.

La vérification d'un programme commence par des tests. On réalise des tests unitaires, où chaque sous-programme du logiciel est testé indépendamment, des tests d'intégration qui examinent le bon fonctionnement de l'ensemble du logiciel et, enfin, des tests de validation fonctionnelle, où l'on vérifie le bon fonctionnement en situation réelle, lorsque les capteurs, les vérins qui commandent les tuyères et les logiciels sont interconnectés. Malheureusement ces tests ne permettent pas d'affirmer qu'un logiciel est correct, car on ne teste qu'un sous-ensemble fini des exécutions possibles.

Pour les programmes d'Ariane 5, nous avons utilisé l'analyse statique : nous avons construit un logiciel qui calcule automatiquement des propriétés du programme à vérifier, par exemple, les valeurs possibles des variables du programme lors de son exécution. Si i est une variable entière du programme, une propriété ainsi calculée est, par exemple, que i est un entier premier, impair, compris entre un et dix. Formellement, toutes les propriétés du programme sont solutions d'un système d'équations dont la résolution demande un temps de calcul infini. Aussi, remplace-t-on ce système par un système approché qui ne donne qu'une partie des propriétés du programme, telle que celle mentionnée précédemment. Pour cette

BRÈVES

Le concerto qui n'existait pas

Peut-on ressusciter le génie de Mozart en composant une fausse symphonie? David Cope, de l'Université de Santa Cruz, et son ordinateur ont réalisé ce prodige. D. Cope sépare un ensemble de partitions en une série de fragments. Le programme détermine ensuite comment ces fragments peuvent se combiner. Avec cette grammaire musicale, le programme compose des morceaux dont le style ressemble à celui de Mozart. À s'y tromper...



L'origine du blé

L'épeautre, céréale sauvage dont le blé est issu, a été domestiqué il y a environ 10 000 ans dans la zone du Croissant fertile au Proche-Orient. Où exactement? Manfred Heun, de l'Université agricole de Norvège, a déterminé les différences génétiques entre 260 variétés actuelles d'épeautre. Une dizaine d'entre elles se distinguent, et sont très proches des variétés domestiques. Elles sont originaires du Karacadag, massif montagneux au Sud-Est de la Turquie : là serait le foyer d'origine de l'agriculture européenne.

Mammographie sans risque

Des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont conçu une méthode de détection du cancer du sein plus sûre que la mammographie classique à rayons X. Le rayonnement infrarouge utilisé traverse les tissus humains sans provoquer de dommage, mais les images produites sont peu contrastées. Pour y remédier, les médecins injectent un colorant dans le sein et utilisent un programme informatique qui augmente le contraste, de sorte que l'on distingue les tumeurs malignes des tissus sains.

L'irradiation de la viande

Les autorités américaines ont autorisé la mise sur le marché de viandes rouges irradiées. Cette technique, qui utilise le rayonnement gamma, stérilise les viandes en détruisant toute contamination par des bactéries, notamment par *Escherichia coli*. Les délais légaux de publication et la mise en place d'unités de traitement adaptées font que les premières viandes rouges irradiées ne seront pas sur le marché, aux États-Unis, avant l'été 1998.

Suite page 22



Outre les tests où l'on vérifie, en situation réelle, le bon fonctionnement de l'ensemble des logiciels (à gauche, la tuyère du moteur d'Ariane 5), l'analyse statique permet une vérification automatique des programmes.

Néandertal cannibale?

Les ossements d'hommes ayant vécu il y a 130 000 ans découverts au début du siècle dans la grotte de Krapina, en Croatie, sont-ils les reliefs d'un repas de Néandertaliens anthropophages? Marylène Patou-Mathis, de l'Institut de paléontologie humaine, a réexaminé ces restes, qui appartenaient à environ 80 individus: ils portent des marques de décharnement analogues à celles que l'on trouve habituellement sur le gibier, et des os longs ont été fracturés, comme pour en extraire la moelle. En outre, cette population est anormalement jeune: les individus jeunes étaient-ils plus faciles à capturer?

Autoréplication

La vie passe par la reproduction. Takanori Shibata, de l'Université de Tokyo, a observé la reproduction, non de cellules, mais de molécules: des molécules de la classe des 1,2-amino-alcools participent à des réactions où elles sont dupliquées. Ces réactions conservent la «chiralité» des molécules. Est chiral une molécule qui n'est pas superposable à son image dans un miroir, comme un gant gauche n'est pas superposable à un gant droit. La chiralité est une importante caractéristique de la vie: pourquoi tous les acides aminés, par exemple, sont-ils chiraux? Les réactions observées à Tokyo nous éclairent sur l'apparition de la vie et confèrent aux chimistes un nouveau moyen de synthétiser des molécules chirales, importantes en pharmacie.

Pas d'oscillations des neutrinos

Selon les résultats de l'expérience menée à la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, les neutrinos électroniques n'«oscillent» pas. Les neutrinos existent en trois «saveurs»: électronique, muonique et tauique. Si les neutrinos ont une masse, ils peuvent se changer les uns en les autres, autrement dit «osciller». Pour le vérifier, les physiciens ont enregistré le flux de neutrinos à un kilomètre du réacteur de la centrale, une puissante source de neutrinos électroniques. Le flux mesuré fut celui qui était attendu: aucun neutrino électronique ne s'était perdu en route, en changeant sa saveur. Toutefois, il est possible que les neutrinos muoniques oscillent, ce qui expliquerait que l'on observe moins de neutrinos solaires muoniques qu'attendu.

Suite page 24

propriété énoncée, une propriété «approchée» extraite de l'analyse serait que i est un entier impair, compris entre un et dix (on a abandonné la contrainte que i est premier).

Le système résolu, on utilise ces propriétés du programme pour vérifier l'absence d'erreurs. Aux points du programme où ces propriétés approchées sont vérifiées, il n'y aura pas d'erreur. Par exemple, l'analyse permet d'affirmer qu'il n'y aura pas d'erreur lorsque le programme utilise i comme indice d'un tableau à neuf éléments, car, dans ce cas, l'ensemble des valeurs que peut prendre i , $\{1, 3, 5, 7, 9\}$, est inclus dans l'ensemble des indices licites du tableau $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. En revanche, si i est utilisé en un point du programme comme indice d'un tableau à huit éléments, l'erreur en ce point est possible, car l'ensemble $\{1,$

$3, 5, 7, 9\}$ n'est pas inclus dans l'ensemble des valeurs licites $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$. L'existence d'une incorrection aux points du programme où les propriétés ne sont pas vérifiées sert de signal d'alarme: il faut vérifier les passages du programme incriminés. Ces analyses limitent le travail de vérification «manuelle» à quelques pour cent du programme.

Contrairement aux tests qui vérifient un programme dans un nombre fini de cas, cette analyse dite statique vérifie le bon fonctionnement d'un programme pour un nombre de cas non borné. Cette étude constitue une première, car elle est appliquée à des programmes industriels de grande taille: elle a contribué à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des logiciels d'Ariane 5.

M. TURIN, *Aéropatiale*, Les Mureaux
A. DEUTSCH, G. GONTHIER, INRIA, Paris.

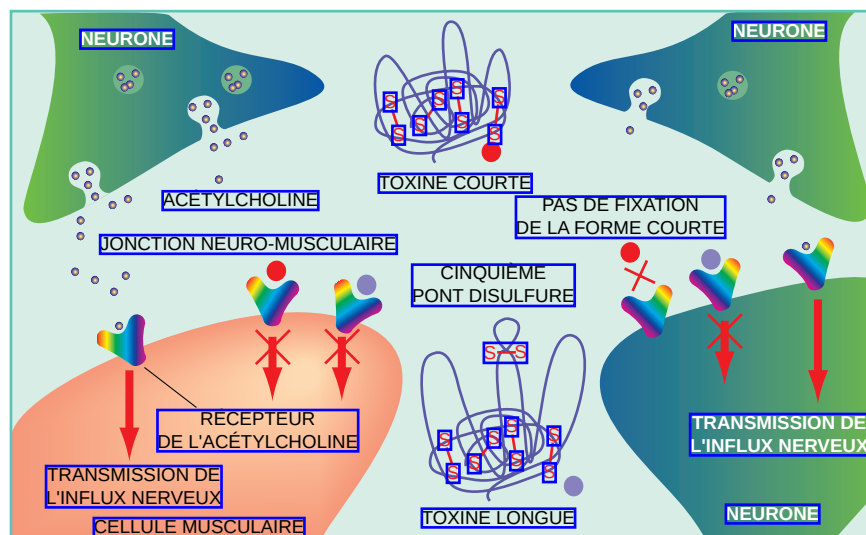
Toxines de serpent**L'identification des cibles des toxines permettra de mieux prévenir leurs effets.**

Les serpents capturent leurs proies et les immobilisent grâce aux toxines de leur venin. Certaines toxines endommagent les capillaires, nécrosent les tissus ou déclenchent des hémorragies; d'autres bloquent le fonctionnement des systèmes nerveux et cardio-vasculaire ou encore des muscles. Certains serpents produisent deux types de toxines

qui semblaient avoir la même fonction, redondance qui laissait les biologistes perplexes. En collaboration avec une équipe suisse, André Ménez et ses collègues du CEA ont montré qu'une des classes de toxines a une propriété dont l'autre classe est dépourvue.

L'acétylcholine est un neuromédiateur qui assure la transmission de l'influx nerveux entre les neurones, et entre les neurones et les cellules des fibres musculaires. L'acétylcholine transmet l'influx nerveux aux récepteurs des muscles et déclenche leur contraction.

Les venins des serpents hydrophiidés (des serpents des mers chaudes) et éla-



L'acétylcholine est un neuromédiateur qui assure la transmission de l'influx nerveux vers les cellules musculaires (à gauche). Quand les toxines (sphères rouges pour les courtes et sphères bleues pour les longues) se fixent sur les récepteurs de l'acétylcholine, le neuromédiateur n'agit plus, les contractions musculaires sont bloquées, notamment les contractions spontanées du diaphragme, qui assurent la respiration. Les toxines longues agissent sur les récepteurs des muscles et des neurones, les toxines courtes uniquement sur les récepteurs des muscles.

pidés (le cobra, par exemple) produisent des toxines qui, comme le curare, se fixent sur les récepteurs de l'acétylcholine des jonctions neuro-musculaires, où elles bloquent la transmission nerveuse et, par conséquent, la contraction musculaire ; elles paralysent l'ensemble des muscles, dont le diaphragme, ce qui entraîne un arrêt respiratoire.

Les toxines curarisantes sont classées en deux familles : les toxines à chaîne courte et celles à chaîne longue. Les deux types de toxines agissent sur les récepteurs de l'acétylcholine des cellules musculaires.

A. Ménez et ses collègues ont découvert que les toxines longues ont une deuxième cible : elles se fixent aussi sur un autre type de récepteurs de l'acétylcholine présent sur la membrane des neurones (pour le moment, on l'a isolé chez le poulet, mais il existe vraisemblablement chez tous les vertébrés). En se liant à ce second type de récepteurs, la toxine bloque la transmission du message nerveux entre les neurones. Les toxines à chaîne courte ne reconnaissent pas ce récepteur.

Cette différence tient à la structure des toxines : elles sont constituées de trois boucles adjacentes qui émergent d'une zone centrale stabilisée par quatre ponts disulfure (des liaisons entre deux atomes de soufre) ; le site curarisant des toxines courtes ou longues, c'est-à-dire la région qui reconnaît les récepteurs musculaires, est constitué d'une dizaine d'acides aminés. Seules les chaînes longues ont une petite boucle supplémentaire maintenue par un cinquième pont disulfure au bout de la boucle centrale (voir la figure). C'est le site de reconnaissance des récepteurs neuronaux. En éliminant ce pont, les biologistes ont obtenu une toxine à chaîne longue qui se comporte comme une toxine à chaîne courte : elle agit toujours sur les récepteurs musculaires, mais ne reconnaît plus les récepteurs neuronaux.

Si la fixation des toxines sur les récepteurs des jonctions neuro-musculaires entraîne une paralysie musculaire, la fixation des chaînes longues sur les récepteurs de type neuronaux serait, peut-être, partiellement responsable de l'état de prostration des personnes mordues par un cobra.

Cette découverte devrait aider les neurobiologistes à identifier d'autres récepteurs de l'acétylcholine neuronaux : en réalisant des mutations aléatoires sur la toxine longue, ils espèrent créer toute une série de molécules «hameçons» qui se fixeront sur des récepteurs neuronaux encore inconnus.

Catherine PERRIN

Modélisation de la baie du Mont-Saint-Michel

Une maquette de la baie évalue les variations de l'ensablement.

Intégré au patrimoine mondial par l'UNESCO, le Mont-Saint-Michel est menacé par la progression de la végétation. Progressivement, les sables rapportés par la mer risquent de combler la baie. Or, les principales constructions de l'abbaye datent des XII^e et XIII^e siècles, mais l'ensablement est récent. Quelle en est la cause ? La digue construite il y a une centaine d'années pour faciliter l'accès à l'abbaye est-elle responsable de l'ensablement progressif ? Le cours du Couesnon qui se jette dans la baie a été perturbé par la digue ; l'élimination de cette dernière permettrait-elle au Couesnon d'évacuer à nouveau les sédiments ? Pour le savoir, les ingénieurs de la Société grenobloise d'études et d'applications hydrauliques, la SOGREAH, ont construit une maquette de la baie ; ils modélisent les courants et l'évolution des fonds de la maquette.

La maquette de la baie – la zone ensablée et la côte – mesure 48 mètres sur 24. Si l'échelle sur le plan est au 1/400, elle est supérieure pour les dénivellations verticales (1/65). En effet, les ingénieurs ont dû adapter les dimensions de la maquette et les matériaux utilisés pour que les phénomènes de turbulence soient convenablement modélisés.

Ainsi, la densité et la granulométrie du «sable» et des sédiments utilisés ont été adaptées aux débits d'eau : le sable aurait été trop lourd, si bien que des particules de nacre, plus légères, mais de diamètre voisin, simulent le sable et que de la sciure simule les sédiments

en suspension transportés par la mer. A chaque «marée», 150 mètres cubes d'eau sont déversés par des pompes dont le débit est constant et évacués par des vannes de débit variable (l'eau est recyclée). Grâce à ces vannes, on simule le flot (la marée montante, dont le débit est rapide) et le jusant (la marée descendante, plus lente). Si, dans la baie du Mont-Saint-Michel, la mer monte en cinq heures, elle descend en plus de sept heures ; sur la maquette, 15 minutes séparent deux marées hautes. Les pompes d'alimentation et les vannes d'évacuation sont pilotées par un micro-ordinateur qui impose une loi de variation de la hauteur de l'eau dans la baie. Sur un cycle annuel, on simule aussi les périodes de vives eaux et celles de mortes eaux.

Au cours de la période de validation du modèle, Éric de Crouette et ses collègues de la SOGREAH ont adapté les différents paramètres pour que les courants, qui ont été relevés en 1975, soient correctement reproduits. Ils ont notamment adapté la charge de sédiments à injecter dans l'eau «montante» pour reproduire la situation réelle. En comparant le relevé des fonds réalisés en 1997 et celui de 1975, ils ont vérifié que le sol de la maquette évolue comme les fonds de la baie du Mont-Saint-Michel.

Lorsque le modèle aura été définitivement validé, les ingénieurs évalueront l'évolution de la baie d'ici 40 ans, si la digue reste en l'état. Puis, ils étudieront comment la baie se comporterait dans diverses configurations, notamment le retrait partiel de la digue, le remplacement de la digue actuelle par une digue sur piles (un pont passerelle) ou encore une nouvelle gestion du barrage du Couesnon, augmentant l'entrée d'eau de mer dans le fleuve. Les résultats de ce projet, partenariat entre l'État et diverses collectivités locales, devraient être connus au cours de l'été 1998.



La maquette de la baie du Mont-Saint-Michel, à «marée basse».

Éric de Crouette/SOGREAH

Froids les dinosaures!

Les dinosaures avaient-ils le sang chaud? Non, répond une équipe dirigée par John Ruben, de l'Université Corvallis, qui a examiné les poumons miraculeusement fossilisés d'un dinosaure



théropode découvert l'an dernier en Chine. Ils ressemblent à ceux des crocodiles actuels : ils sont formés d'une seule poche, dont le gonflement est assuré par un mouvement de piston du diaphragme. Cet appareil respiratoire n'est pas assez efficace pour assurer les fonctions musculaires vitales d'un animal à sang chaud.

Ordinateur cérébral

Les programmes informatiques aideront-ils à comprendre le fonctionnement du cerveau humain? C'est ce qu'espèrent Stanislas Dehaene, de l'INSERM, et Jean-Pierre Changeux du CNRS. Ils ont programmé un réseau de neurones numérique dont l'architecture est proche de celle du cerveau : ce programme résout facilement un casse-tête très simple, la Tour de Londres, où il faut déplacer des boules de différentes couleurs enfilées sur des tiges, mais surtout, lorsque l'on altère certaines fonctions de ce programme, il se trompe comme les personnes qui ont des lésions cérébrales analogues.

Nouvelle confirmation

En physique classique, l'effet d'une masse sur son satellite est identique, que la masse tourne sur elle-même ou qu'elle ne tourne pas. En relativité générale, en revanche, l'espace temps est entraîné, ce qui modifie les effets gravitationnels. Des astronomes ont analysé les rayons X émis par les disques de matière, autour de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, et ils pensent avoir observé les effets de la rotation du corps massif sur la matière du disque d'accrétion. Ils ont observé une variation des émissions X du disque, et cette variation de luminosité résulterait d'une oscillation des disques d'accrétion. L'oscillation correspond à celle prévue par la théorie de la relativité. Si cette observation est confirmée, elle constitue une nouvelle confirmation de la relativité générale.

Prévoir les cultures**L'agriculture assistée par ordinateur.**

Comment les rendements des champs évolueront-ils quand changeront les conditions de production? Au Centre INRA de Grignon, J.-M. Attonaty, C. Aubry, M.-H. Chatelin et F. Garcia mettent au point des programmes qui simulent le déroulement d'une culture et permettent de tester de nouveaux modes de conduite des cultures agricoles.

L'agriculture est bouleversée : les quotas de production et les charges financières que la réglementation impose pour rénover l'environnement, par exemple, forcent les agriculteurs à changer, parfois rapidement, leurs méthodes de travail. Cela ne s'improvise pas! Gustave Flaubert a montré comment *Bouvard et Pécuchet* en firent la dure expérience : «Partant de ce principe qu'on ne saurait avoir trop de blé, ils supprimèrent la moitié environ de leurs prairies artificielles ; et, comme ils n'avaient pas d'engrais, ils se servirent de tourteaux qu'ils enterrèrent sans les concasser, si bien que le rendement fut pitoyable. L'année suivante, ils firent les semailles très dru. Des orages survinrent. Les épis versèrent (...) Après force méditations, Bouvard eut le délire de l'engrais (...) Le colza fut chétif, l'avoine médiocre, et le blé se vendit fort mal, à cause de son odeur.» Plus prudents, les agriculteurs de métier s'en tiennent à des recettes éprouvées, qu'ils font évoluer.

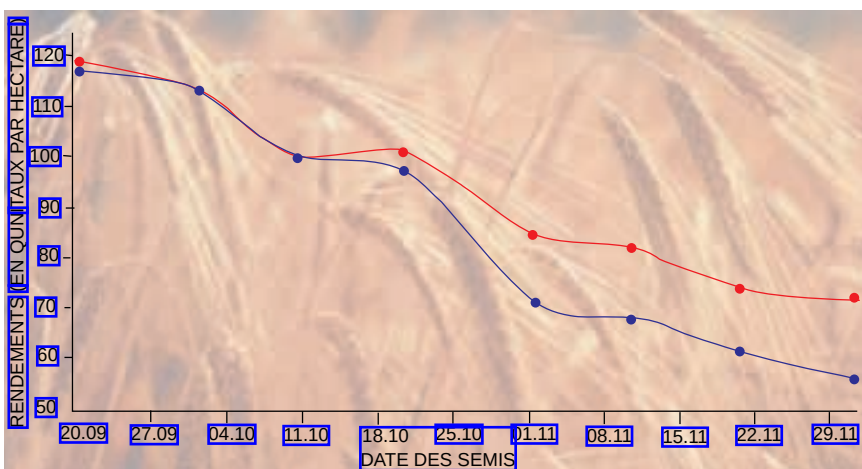
Toutefois les changements sont aujourd'hui si rapides que cette pratique est insuffisante. Comment décider la densité de semis pour les nouvelles varié-

tés? Comment prévoir l'effet sur les rendements, la qualité et les risques de pollution, d'un décalage de l'épandage d'engrais azotés? J.-M. Attonaty et ses collègues se sont d'abord intéressés à la culture du blé d'hiver : le premier programme qu'ils ont construit simule la culture de ce blé, en tenant compte des diverses conditions de production.

Ce programme a été établi sur la base de connaissances agronomiques et d'observations faites en France dans les champs d'expérimentation ou lors des tests réalisés pour les inscriptions au Catalogue des variétés (qui recense toutes les variétés disponibles). Il intègre différents sous-modèles, par exemple un sous-modèle de constitution de la biomasse aérienne dû à Jean-Marc Ménard, de Grignon : pour diverses régions et pour de nombreuses années, ce sous-modèle indique comment la masse hors de terre du blé d'hiver dépend de la densité du semis, de la somme des températures enregistrées depuis le semis, de la durée entre le semis et la récolte, de la quantité d'azote apportée, de la variété semée...

Ce premier programme, enrichi de modèles analogues pour le maïs et pour le colza, a servi de base à la constitution d'un second programme, d'aide au pilotage agronomique. Dans ce dernier, complé au précédent, les agronomes représentent sous forme de règles de décision les connaissances des agriculteurs ou des agronomes qui avaient été réunis et dont on avait formalisé le raisonnement. Une règle sur la densité de semis, par exemple, stipule que, pour une date du semis postérieure au 15 octobre, la densité de semis doit être augmentée ; une règle de fertilisation azotée préconise de réduire la dose d'engrais apporté aux blés qui risquent de se coucher.

Quand on interroge le programme par une question du type : «Que se passe-



Rendements en fonction des dates de semis, pour deux stratégies d'apport d'engrais azotés : apports à dates fixes (en bleu), ou apports calés sur le développement du blé (en rouge).

rait-il si, en cas de pluies abondantes en octobre, on retardait les semis de deux semaines en changeant de variété et de densité ?», il enchaîne les règles et simule l'évolution de la culture, afin de connaître les rendements, la qualité de la récolte et les nuisances écologiques. Les premiers tests, auprès d'une dizaine d'ingénieurs régionaux de l'Institut technique français des céréales et des fourrages, ont montré que le programme de pilotage

correspond aux attentes des utilisateurs et facilite l'invention de solutions agronomiques nouvelles parce qu'il les teste aussitôt, sans attendre la sanction du champ.

La mise en application de ces solutions donnera-t-elle des résultats conformes aux prévisions ? Les expérimentations en champ, qui commencent, ont déjà montré que les quantités d'engrais azotés peuvent être notablement réduites par une utilisation plus judicieuse de ces pro-

campagnes, enrichissant les grandes villes en patronymes, et les migrations nationales et internationales vers les bassins d'emplois (migrations des Italiens, des Polonais, des Espagnols...).

Le potentiel patronymique, nombre de patronymes pour 100 naissances, est un premier indicateur de migration. Les départements à forte immigration tels l'Aube, la Seine-et-Marne ou le Lot-et-Garonne, avaient, avant 1940, un potentiel supérieur à 20 patronymes différents pour 100 naissances, tandis que des départements isolés, tels la Lozère ou le Finistère, en comptaient moins de 10. Ce paramètre ne permet toutefois pas une comparaison absolue, car il est minoré dans les départements où le nombre moyen d'enfants par famille est grand, puisque plus d'enfants y partagent le même patronyme.

Une autre approche consiste à calculer, à partir des fréquences des patronymes rencontrés dans chaque département, une distance patronymique entre ceux-ci. La distance est faible entre deux départements qui forment une unité cohérente ou qui ont entretenu beaucoup de migrations réciproques au cours du temps : dans ce cas, les fréquences des différents patronymes sont proches. En revanche, la distance patronymique est grande entre deux départements culturellement ou linguistiquement contrastés ou entre lesquels les mouvements de populations ont été faibles. Lorsqu'on remplace sur une carte les distances géographiques par les distances patronymiques, les particularismes régionaux de la Bretagne, de l'Alsace, du Pays Basque ou du Roussillon sont exacerbés (ces régions sont plus éloignées des autres que sur la carte géographique), tandis que les zones d'échange, tels le couloir Rhône-Saône et le Bassin Parisien, se retrouvent dans des espaces rétrécis.

Des analyses patronymiques beaucoup plus fines permettent de cartographier les flux de migrants et de préciser leurs origines. C'est le cas des migrations des patronymes italiens avant et après la Première Guerre mondiale. Elles montrent deux phénomènes : l'augmentation des immigrants dans la zone traditionnelle d'échange de la Savoie et du Dauphiné, dont la frontière avec le Piémont italien ne s'est stabilisée qu'au XIX^e siècle, et l'augmentation des migrations, vers le bassin de la Garonne qui a reçu préférentiellement des patronymes vénitiens, ou vers la Lorraine et le Nord qui ont accueilli surtout des migrants aux patronymes lombards ou vénitiens. Les originaires d'Émilie-Romagne (la région de Bologne) s'installaient plutôt dans la région parisienne.

Pierre DARLU et Anna DEGIOANNI, INSERM U155, Univ. Denis Diderot

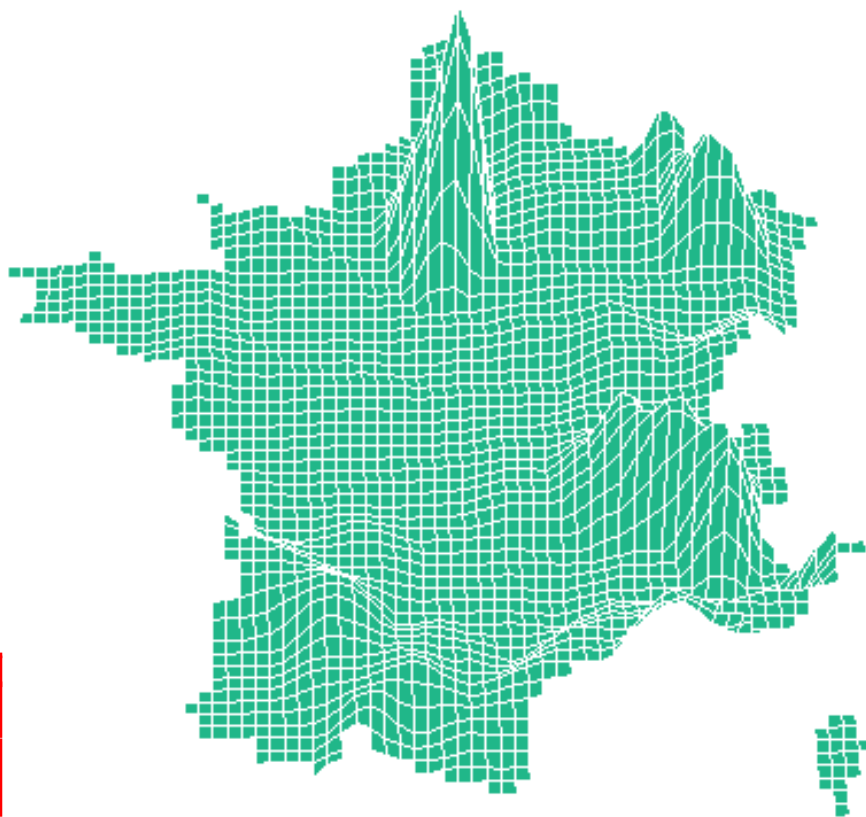
Patronymes traceurs

Les noms de famille témoignent de mouvements de populations.

Le nom de famille a de nombreux points communs avec un gène. Il est héréditaire, puisqu'il se transmet par le nom du père dans nos pays. Il mute, par des erreurs dans les registres par exemple, et ces mutations sont sélectivement neutres puisque le nombre d'enfants ne dépend pas du patronyme. Il a un grand nombre de formes différentes, la France en posséderait près de 500 000.

Enfin, la fréquence de ces différentes formes varie selon les régions. Comme, en outre, nous disposons de registres de naissances depuis près de 400 ans dans certaines régions, les patronymes constituent une sorte d'«ADN fossile». Ils permettent l'étude de la distribution géographique des patronymes et son évolution de génération en génération.

Les patronymes propres à chaque région ou à chaque pays diffusent avec plus ou moins d'intensité vers les régions voisines, souvent dans des directions privilégiées, déterminées par les échanges matrimoniaux traditionnels. Cette diffusion traduit aussi le dépeuplement des



Pierre Darlu et Anna Degioanni

Les reliefs de cette carte de France correspondent aux nombres d'enfants nés entre 1916 et 1940 de parents italiens ayant immigré entre 1891 et 1940, repérés par leurs noms de famille. Outre la Savoie et le Dauphiné, régions traditionnelles d'échange avec l'Italie, les principales régions d'accueil sont le bassin de la Garonne, l'Île-de-France (où le pic est le plus élevé) et la Lorraine.

Les drogués du jeu

La dépendance vis-à-vis du jeu est aussi redoutable que celle qu'éprouvent les toxicomanes.

Le jeu de hasard fut d'abord divinitoire. Parce qu'il était soumis à des procédures sacrées et qu'il représentait une façon d'interroger Dieu, le jeu était interdit au commun des mortels. Il était une profanation puisqu'il utilisait les instruments des devins : les dés ou les osselets. Les théologiens ont tenté d'interdire le jeu, car quand on jette les dés, on consulte Dieu, ce qui, selon eux, Le fatigue. Puis Thomas d'Aquin a dissocié le jeu et les divinations ; la notion de hasard a évolué. Ainsi, quand un père tire au sort lequel de ses fils héritera de sa terre, la réponse n'est pas d'essence divine ; elle ne passe pas par Dieu, et l'homme peut s'en remettre au hasard.

En France, cette libéralisation aboutit à l'«Âge d'or du jeu», de la Renaissance à la Révolution. Pour récupérer des fonds, l'État et l'Église organisent des loteries. Ainsi, l'Église Saint-Sulpice, à Paris, est construite avec les fonds collectés au cours d'une loterie. Tous les États européens en organisent pour financer de grands travaux.

Après la Révolution, de nouveaux interdits sont posés sur le jeu, pour des motifs non plus d'ordre religieux, mais d'ordre moral. L'État démocratique naissant valorise les qualités morales de l'homme, et le jeu, où l'on peut gagner sans efforts de grosses sommes d'argent, est immoral. Au fil des siècles, l'attitude des États vis-à-vis du jeu évolue : dans les années 1930, la crise économique pousse les États à encourager le jeu et les loteries. En 1931, les jeux de hasard sont légalisés dans le Nevada : c'est le début de la prospérité de Las Vegas.

En 1980, l'économiste français Alain Cotta estime que cinq pour cent du produit national brut des grandes nations provient des jeux d'argent et que la moitié de la population adulte joue au moins une fois de temps en temps. Les jeux sont encouragés par l'État, qui y trouve une source de revenus notable. Heureusement, la proportion des joueurs occasionnels qui deviennent des drogués du jeu est infime, même si, en France, plusieurs dizaines de milliers de personnes seraient concernées. En Espagne, où les machines à sous sont légales, un pour cent de la population adulte serait touchée.

C'est en 1494 que l'on trouve la première mention de jeu pathologique. Dans



REUTERS/DAZ

Comme les drogues, les jeux de hasard rendent parfois dépendants.

La *Nef des fous*, Sebastian Brant écrit : «Je trouve aussi des fous qui n'ont d'autres passions que les dés et les cartes.» Le jeu pathologique est démesuré, tel que l'a décrit Dostoïevski ; on y mise toute sa fortune.

Le premier article français sur la psychologie du joueur est publié en 1929. Les auteurs décrivent un mécanisme en cinq phases : une phase d'initiation (où le joueur est fasciné par le gain), une phase d'accoutumance (le joueur s'habitue), une phase de besoin (le joueur ne peut plus

s'empêcher de jouer et commence à avoir besoin de rejouer pour regagner l'argent perdu), une phase de souffrance (la dépendance devient un cauchemar) et la phase de la déchéance sociale (le joueur a perdu tout son argent, sa famille, ses amis).

Dans la littérature scientifique, le jeu pathologique n'a été décrit comme une maladie que depuis 1980. Il est classé dans la catégorie des «troubles des impulsions non classés ailleurs», avec la cleptomanie et la pyromanie. Le jeu pathologique est considéré comme une toxi-

comanie sans drogue. Comme chez les toxicomanes, la dépendance finit par envahir la vie psychique et sociale du joueur ; les sensations que recherche le joueur ressemblent à celles que produisent les drogues. Tous les jeux, qu'ils soient de hasard ou de stratégie, peuvent déclencher cette dépendance. Les joueurs, comme les alcooliques et les toxicomanes, voient leur dépendance évoluer inexorablement ; la rémission n'est possible qu'avec une aide extérieure.

Connaissant les neuromédiateurs sur lesquels agissent les drogues, les neurobiologistes recherchent des perturbations du même type chez les joueurs pathologiques. Les joueurs deviendraient dépendants de la noradrénaline que l'organisme libère pendant le stress (ici la peur déclenchée, par exemple, au moment où la roulette s'arrête).

Selon Marc Valleur, psychiatre au Centre médical Marmottan, les drogués du jeu présentent souvent plusieurs dépendances simultanées ou alternées (le jeu, l'alcool, la drogue ou le sexe). Plus le nombre de joueurs épisodiques croît, plus le risque de déclencher des comportements pathologiques augmente. Les jeux présentant le plus de risques sont les jeux solitaires qui, comme les machines à sous, rapportent immédiatement. Les jeux de hasard sur l'Internet, où le joueur est seul avec son ordinateur, pourraient multiplier les conduites pathologiques.

Enzymes de réparation

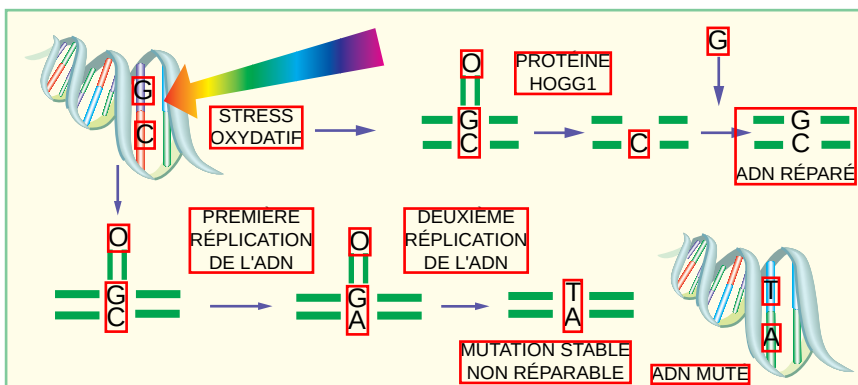
Elles éliminent les effets néfastes de la respiration cellulaire.

Les cellules respirent : elles absorbent de l'oxygène qui engendre des molécules très réactives. Ces dernières risquent d'endommager tant l'ADN, que les protéines ou les lipides de la membrane cellulaire. L'ensemble de ces réactions préjudiciables constitue le stress oxydatif endogène, auquel s'ajoute le stress oxydatif d'origine externe dû, par exemple, aux composés chimiques ou aux rayonnements ionisants. Serge Boiteux et Pablo Radicella, du Laboratoire de radiobiologie de l'ADN du CEA, ont montré que les cellules se protègent contre ces mécanismes d'oxydation : ils ont isolé un gène codant une protéine qui répare l'ADN endommagé par le stress oxydatif endogène.

Ces lésions engendrent des mutations dont l'accumulation perturbe l'expression des gènes et le fonctionnement des cellules ; elles participent aussi au

déclenchement des cancers et accélèrent le vieillissement. Les organismes se défendent contre les molécules oxydantes et les radicaux libres, engendrés lors de la respiration cellulaire, grâce à des enzymes de prévention, qui les

inactivent avant qu'ils n'agissent. Toutefois, certaines de ces molécules nocives réussissent à franchir cette première ligne de défense et à endommager l'ADN. Quand la lésion est notable, la cellule cesse de fonctionner et meurt. Quand la



Lors d'un stress oxydatif, la guanine (G) est oxydée en 8-oxoguanine (G=O). La protéine de réparation codée par le gène *hogg1* élimine la 8-oxoguanine, laquelle est ensuite remplacée par une guanine, et l'ADN est réparé (en haut). Quand cette enzyme de réparation est inactive, l'ADN polymérase place, au moment de la réplication de l'ADN, une adénine à la place d'une cytosine en face des 8-oxoguanines (en bas). À la réplication suivante, une thymine est positionnée en face de l'adénine, et des mutations non réparables apparaissent ainsi dans l'ADN (des paires thymine-adénine sont présentes à la place de paires guanine-cytosine).

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**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

lésion est infime, la vie cellulaire continue, mais les mécanismes insidieux de la cancérogenèse s'enclenchent.

Ainsi, l'une des modifications possibles de l'ADN est l'oxydation d'un de ses éléments, la guanine, transformée en 8-oxoguanine. Au cours de la division cellulaire, l'enzyme ADN polymérase recopie l'ADN de façon que le brin en cours de synthèse soit une copie rigoureuse de l'ADN initial. Quand la guanine est devenue une 8-oxoguanine, l'enzyme se trompe et ajoute à la chaîne d'ADN en construction une adénine à la place d'une cytosine. Cette anomalie dans le message génétique perturbe ensuite la synthèse de la protéine codée par le gène muté : celle-ci est alors plus ou moins fonctionnelle ; parfois, elle n'est même pas synthétisée.

La cellule dispose d'une deuxième ligne de défense visant à éliminer ces lésions d'oxydation : les enzymes de réparation. L'équipe de S. Boiteux a découvert une de ces enzymes, l'ADN glycosylase, qui découpe spécifiquement les 8-oxoguanines de l'ADN avant toute répllication. Les biologistes ont cloné le gène codant cette enzyme chez l'homme, et ont isolé le gène correspondant, nommé *hogg1* (pour *human oxoguanine glycosylase 1*). La protéine codée par *hogg1* est exprimée dans tous les tissus de l'organisme.

Connaissant le rôle du gène équivalent chez la levure, les biologistes supposent que le gène *hogg1* répare certaines mutations et prévient ainsi les mécanismes tumoraux : il serait un gène suppresseur de tumeurs. En effet, chez les patients atteints de cancer du poumon, un autre gène suppresseur de tumeur, *p53*, contient de nombreuses mutations où une adénine remplace une cytosine ; cela laisse supposer que le gène *hogg1* n'a pas éliminé les 8-oxoguanines présentes dans le gène *p53*. De surcroît, les remaniements chromosomiques sont fréquents dans les cellules des tumeurs pulmonaires, et l'extrémité du chromosome 3, où est localisé le gène *hogg1*, est souvent absente. Enfin, la fumée de cigarette contient de nombreux agents oxydants, de sorte que les cellules pulmonaires subiraient un stress oxydatif répété, alors même que la protéine de réparation codée par *hogg1* n'est pas synthétisée, est anormale ou inefficace.

L'intégrité de l'ADN étant vitale, d'autres enzymes de réparation assurent vraisemblablement la stabilité de l'information génétique. Leur identification aidera les biologistes à mieux comprendre les conséquences néfastes de l'oxydation.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Un billard réversible

**On renverse le temps
dans les billards ondulatoires.**

Après la chute d'une pierre dans une mare, les ronds formés dans l'eau s'éloignent du point d'impact. Si l'on passait le film de la chute à l'envers, on verrait les ronds se rapprocher et la pierre jaillir de l'eau. Peut-on retourner temporellement tous les mouvements de sorte qu'ils se comportent comme le mouvement direct observé en inversant le temps ? C'est en général difficile pour le mouvement des particules, mais plus aisé pour des ondes.

Certains billards dont le bord comprend une partie circulaire et une partie droite ont un comportement chaotique ; la trajectoire d'une boule qui rebondirait parfaitement sur les bords est très sensible aux conditions initiales : deux boules lancées sur des trajectoires voisines suivent des trajectoires qui s'écartent suivant une loi exponentielle. Cette sensibilité aux conditions initiales empêche la réalisation d'une expérience de renversement du temps. Si, après une dizaine de rebonds, on renverse le mouvement d'une boule unique, celle-ci ne revient pas à son point de départ, car la moindre erreur de mesure est amplifiée.

En revanche, une telle expérience de renversement du temps peut être réalisée, non avec des particules, mais avec des ondes, car leur évolution est régie par des équations linéaires (aucun produit des fonctions ou de leurs dérivées n'y apparaît) ; une petite erreur commise lors du renversement ne s'amplifie pas au cours du temps. En utilisant des ondes élastiques se propageant sur la surface d'une galette de silicium, nous avons montré qu'après de nombreuses réflexions, une onde renvoyée en sens inverse, même imparfaitement, convergeait avec précision vers son point de départ.

Le plus curieux dans cette expérience est qu'un billard dont le comportement est chaotique simplifie le renversement du temps : dans le cas de la propagation d'ondes sur ce type de billard, un unique capteur piézo-électrique suffit à renverser le temps de manière efficace alors que habituellement, des centaines sont nécessaires. Pourquoi cette simplification ? Parce qu'en plus d'être chaotiques, ces billards sont ergodiques, de sorte que toute l'information sur l'histoire du champ ondulatoire est contenue, après une durée caractéristique, dans

L'UNIVERS DES SCIENCES



LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

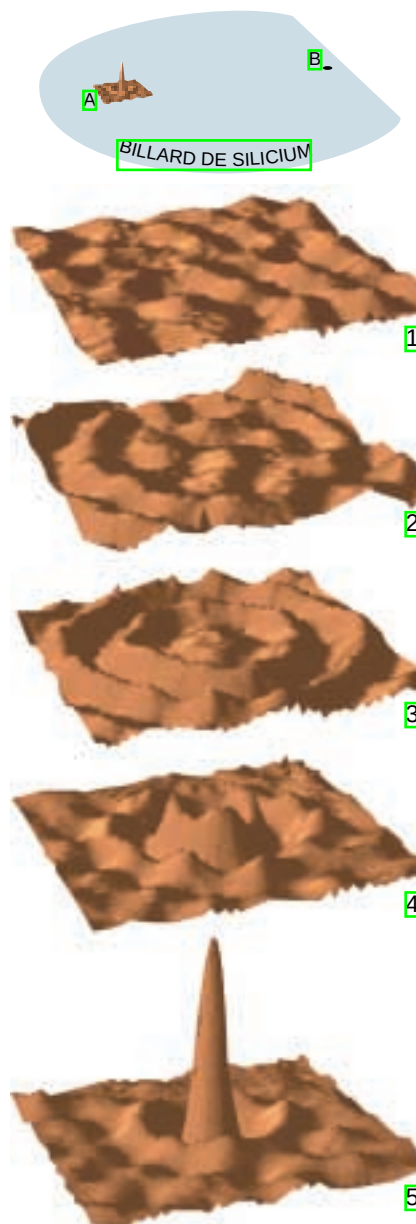
272 pages - 220 F
code 1892

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

l'évolution temporelle de l'onde en chaque point du billard. Grâce à cette propriété, la mesure de l'évolution du champ en n'importe quel point du billard donne les informations suffisantes pour renverser le champ ondulatoire dans tout le billard.

Pour réaliser cette expérience, nous produisons une onde élastique à la surface d'un disque de silicium tronqué. Cette géométrie assure l'ergodicité du billard. En un point A du billard, la pointe d'un cône d'aluminium solidaire d'un trans-



A intervalles réguliers, on mesure la déformation du silicium due au passage de l'onde de surface inverse renvoyée du point B. On visualise ainsi le champ ondulatoire dans un carré de 15 micromètres de côté autour du point d'émission des ondes (A). Alors que le champ ondulatoire semble d'abord désordonné (1), l'onde renvoyée se focalise en son point d'émission initiale (5).

ducteur piézo-électrique est en contact avec la plaque de silicium. Elle oscille brièvement, engendrant ainsi des ondes de surface durant une microseconde. Une seconde pointe couplée à un capteur piézo-électrique, placée au point B, enregistre les oscillations produites par le passage de l'onde. Le signal observé en ce point est long : le signal direct qui arrive du point A est suivi des ondes qui ont subi une, puis plusieurs réflexions sur les bords du billard. La superposition de ces signaux produit un champ ondulatoire d'aspect aléatoire. L'avantage des ondes de surface engendrées est leur faible atténuation : durant le temps de l'enregistrement (plusieurs dizaines de millisecondes), les ondes parcourent plusieurs centaines de mètres et elles traversent le billard des centaines de fois.

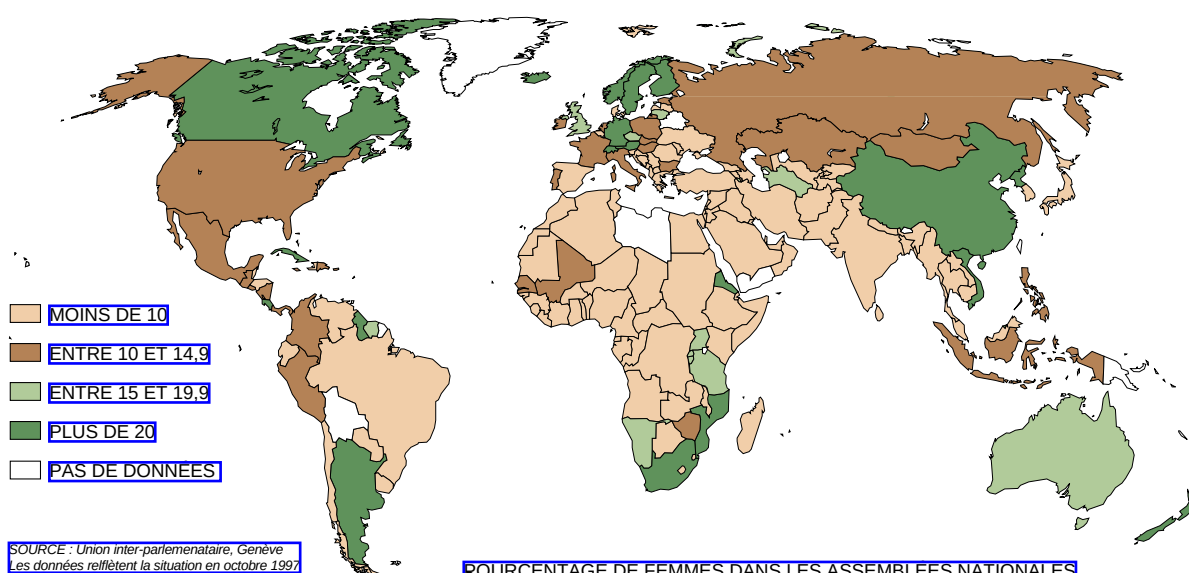
Du signal enregistré en B, nous extrayons une partie (deux millisecondes) que nous renvoyons du même point, selon une chronologie inversée. À l'aide d'une sonde optique qui mesure les déplacements de la surface de silicium à quelques dixièmes de nanomètre près, on suit la progression de l'onde de surface inversée. Après quelques millisecondes, l'onde revient à son point de départ, comme si nous passions le film de la propagation initiale à l'envers. La focalisation de l'onde en A est optimale lorsque le temps durant lequel l'onde est renvoyée est au moins égal au temps d'ergodisation du billard, le temps nécessaire pour que toute l'information sur le champ ondulatoire atteigne le point B.

De tels systèmes ondulatoires intéressent les physiciens qui cherchent à comprendre l'émergence du chaos à la frontière entre physique classique et physique quantique. En raison de l'analogie entre l'équation de Schrödinger, qui décrit l'évolution des systèmes quantiques, et l'équation de propagation des ondes, les notions de chaos quantique et de chaos ondulatoire sont fortement couplées.

Nos expériences confortent l'idée qu'en mécanique quantique, les systèmes ne sont pas sensibles aux conditions initiales. Pourtant, lorsque la constante de Planck est négligeable, le monde quantique se rapproche du monde classique, et nous devrions observer l'apparition du chaos caractérisé par la sensibilité aux conditions initiales. Des expériences d'acoustique menées en utilisant des longueurs d'onde de plus en plus petites pourraient simuler cette transition entre le monde quantique et le monde classique.

Carsten DRAEGER et Mathias FINK
Laboratoire ondes et acoustique,
ESPCI et Université Denis Diderot, Paris

Les femmes en politique



POURCENTAGE DE FEMMES DANS LES ASSEMBLEES NATIONALES

Dans le monde, la participation des femmes en politique est disparate. La carte représente la proportion de femmes dans les assemblées politiques de chaque pays. Les chiffres concernent uniquement l'équivalent de l'Assemblée nationale, laquelle est, en général, élue au suffrage universel.

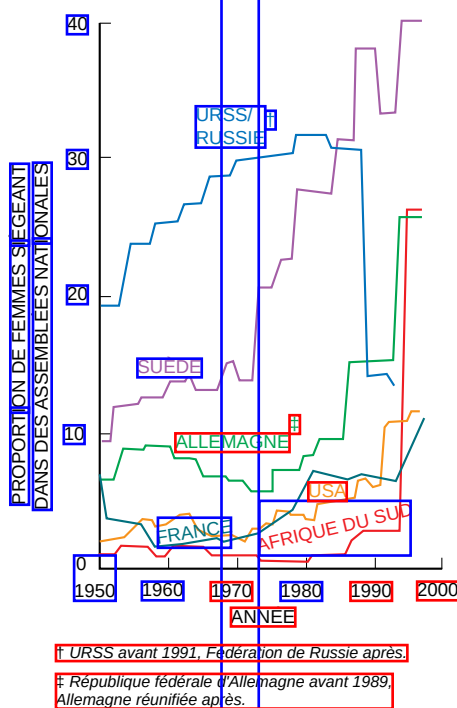
Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la participation des femmes dans les assemblées politiques des démocraties occidentales a augmenté. Dans certains pays, cette croissance fut lente, alors que, dans d'autres, comme la Suède, elle fut extrêmement rapide. En France, aux États-Unis, en Italie et en Irlande, moins de 12 pour cent des sièges sont aujourd'hui occupés par des femmes. Dans les pays nordiques, en Allemagne et aux Pays-Bas, cette proportion est supérieure au quart.

Cette différence reflète directement des traditions culturelles : aux États-Unis, la tendance religieuse cantonne la femme dans son rôle traditionnel. Les Américains mettent l'accent sur la liberté au détriment de l'égalité, de sorte qu'ils négligent les groupes économiquement désavantagés, tels les Noirs ou les femmes. À l'inverse, les pays scandinaves placent la justice sociale de groupe avant la liberté économique individuelle. D'autres facteurs favorisent le nombre de femmes, comme la représentation proportionnelle et un système parlementaire avec de nombreux partis. En Suède, ces facteurs sont réunis : lors des élections législatives de 1994, chacun des sept partis a reçu suffisamment de voix pour

faire siéger plusieurs représentants, dont des femmes. Ces dernières décennies, le nombre de représentants de sexe féminin a augmenté sous les régimes de gauche et de centre gauche. En 1997, l'augmentation du nombre de femmes à la Chambre des communes britannique a coïncidé avec le retour au pouvoir du parti travailliste, après 18 ans de régime conservateur ; la croissance du nombre de femmes en Suède a perduré tant que le parti social démocrate était au pouvoir. Cette règle n'est toutefois pas absolue : en Allemagne, la représentativité féminine a augmenté lors du mandat du conservateur Helmut Kohl (voir le graphique).

Une exception notable à l'augmentation de la participation des femmes en politique est l'Europe de l'Est où, sous le régime communiste, les femmes occupaient 20 à 35 pour cent des sièges. Avec l'avènement de la démocratie, les hommes reprirent leur hégémonie. La participation des femmes a chuté de plus de la moitié en Pologne, en Bulgarie, en Hongrie, en Roumanie et en ex-Tchécoslovaquie. En Russie, leur participation a diminué des deux tiers comparée à ce qu'elle était en Union soviétique.

En Afrique, en Asie, en Amérique latine et surtout dans les pays arabes, le nombre de femmes en politique est particulièrement faible (excepté sous des régimes communistes), ce qui traduit en partie un conservatisme social. Une exception de taille est l'Afrique du Sud, où le gouvernement de Nelson Mandela a promu les droits de la femme, et l'Argentine, où la loi impose un quota de 30 pour cent de femmes candidats.



Disparition dans un trou noir

Première observation des phases de la vie d'un trou noir.

En 1992, le télescope spatial *Sigma* découvrait GRS 1915+105, un microquasar de notre Galaxie. Cet objet est constitué d'un trou noir entouré d'un disque de matière autour duquel gravite une étoile géante. En observant cette source à plusieurs longueurs d'onde, nous avons mis en évidence plusieurs phases : le moment où la matière du disque d'accrétion disparaît dans le trou noir, suivi par le remplissage du disque d'accrétion par la matière issue de l'étoile et par la formation d'un nuage de particules de grande énergie au voisinage du trou noir.

À la fin de leur vie, les étoiles les plus massives s'effondrent en un trou noir, une région de l'espace d'où ne s'échappe ni matière ni lumière. Le trou noir est délimité par un horizon, une surface immatérielle dont rien ne peut s'échapper. Dès lors, comment s'assurer de la présence d'un tel astre d'où rien ne sort ? Selon la théorie, un trou noir est caractérisé par sa masse : un astre dense de masse supérieure à trois fois la masse du Soleil est un trou noir.

Cependant, des incertitudes demeurent et certaines étoiles à neutrons subsisteraient avec une masse supérieure à cette limite. La présence d'un horizon est une manière de caractériser un trou noir sans ambiguïté. Peut-on voir cet horizon ? Pas directement, mais on peut

observer la disparition de la matière à l'intérieur.

La taille du disque d'accrétion autour d'un trou noir est proportionnelle à la masse de ce dernier. Le temps caractéristique de l'évolution de la matière dans le disque d'accrétion est ainsi d'autant plus grand que le trou noir est massif. Les quasars lointains ont des masses voisines de un milliard de masses solaires, et la durée typique d'une variation dans le disque est de plusieurs milliers d'années. La découverte du microquasar GRS 1915+105 dans notre Galaxie fut une aubaine : la masse du trou noir est de quelques masses solaires et les variations attendues durent de quelques secondes à quelques minutes, aisément mesurables lors d'une campagne d'observation.

Déjà des observations de cette source dans le domaine X, à l'aide du Télescope spatial *Rossi*, avaient révélé des oscillations attribuées à la disparition et au remplissage du disque d'accrétion du trou noir. D'autre part, des observations dans le domaine radio avaient montré des bouffées de gaz chaud (du plasma) éjectées dans deux directions opposées. Pour comprendre l'enchaînement de ces événements, des observations à plusieurs longueurs d'onde étaient nécessaires.

Le 15 mai, puis le 9 septembre 1997, nous avons pointé les antennes du VLA (*Very Large Array*, ou «Très grand réseau»), qui observe à des longueurs d'onde centimétriques, en direction de GRS 1915+105. Simultanément, avec le télescope britannique infrarouge UKIRT, nous avons observé cette source dans l'infrarouge, à 2,2 micromètres. Les rayonnements X de longueur d'onde comprise entre 0,0206 et 0,62 nanomètre (ce qui correspond à une énergie comprise entre 2 et 60 kiloélectronvolts) furent également enre-

gistrés à l'aide du Télescope *Rossi*. Le rayonnement X est émis par le gaz chaud du disque d'accrétion.

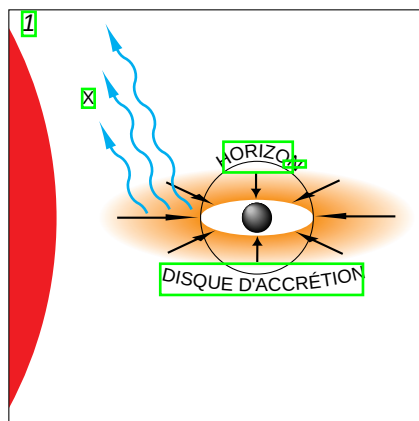
Ces observations simultanées détaillent l'évolution de la matière autour du trou noir. Tout d'abord, la brusque diminution de la luminosité dans le domaine X atteste la disparition de la matière du disque d'accrétion : la région interne du disque d'accrétion tombe au-delà de la dernière orbite stable ; elle est happée par le trou noir et n'émet plus de rayonnement.

Ensuite, l'émission X s'intensifie lentement : le disque d'accrétion se remplit de matière apportée par l'étoile compagne. Simultanément, alors que l'émission de rayons X varie, ce qui traduit des mouvements turbulents dans le disque, l'émission infrarouge augmente. Une partie de la matière qui remplit le disque serait éjectée sous la forme d'un nuage de plasma émettant un rayonnement infrarouge.

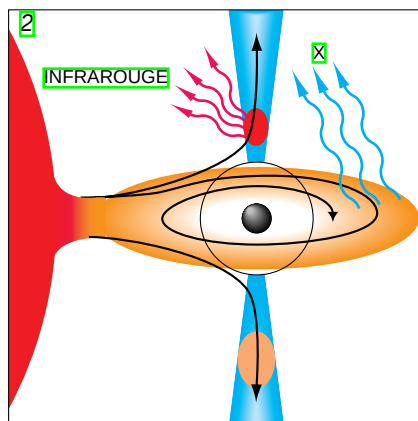
En s'éloignant du trou noir, ce plasma se dilate et sa densité diminue : il devient si ténu que les ondes radio émises par les électrons du plasma, jusqu'alors absorbées dans le nuage, s'échappent. Le décalage d'une quinzaine de minutes dans le spectre, entre l'augmentation dans le domaine infrarouge puis en ondes radio, indique cette dilatation.

À partir des émissions radio, on déduit le nombre d'électrons du plasma éjecté. Si l'on suppose qu'à chaque électron correspond un proton (un plasma étant globalement neutre), on déduit la masse du nuage : toutes les 20 minutes, un nuage de plasma de masse égale à celle du Mont Everest est éjecté à 92 pour cent de la vitesse de la lumière.

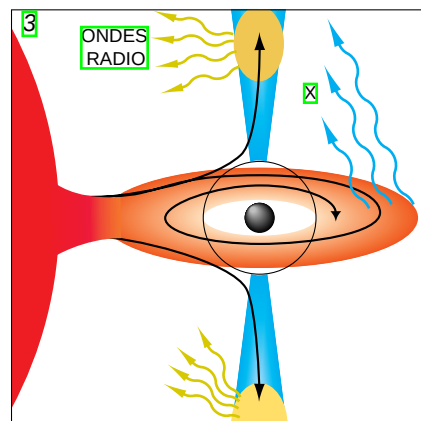
Sylvain CHATY, Josef MARTI et Félix MIRABEL
Service d'astrophysique, Saclay



Trois phases de la vie du microquasar GRS 1915+105. Dans un premier temps, la matière du disque d'accrétion disparaît, happée par le trou noir, et le rayonnement X, produit par le gaz chaud du disque d'accrétion, diminue fortement (1). Le disque se remplit ensuite de matière apportée par l'étoile compagne. Une partie de cette matière,



chauffée dans le disque, émet des rayonnements X, tandis qu'une autre partie est éjectée perpendiculairement au disque, à 92 pour cent de la vitesse de la lumière. Le nuage de gaz éjecté rayonne d'abord dans l'infrarouge (2), puis, après expansion, dans le domaine radio (3). Le cycle dure un vingtain de minutes.



Péril nucléaire

BRUCE BLAIR • HAROLD FEIVISON • FRANK VON HIPPEL

*Le risque de déclenchement accidentel d'une guerre nucléaire est excessif.
Les nations doivent cesser d'être en état d'alerte permanent.*



DÉBUT D'UNE CATASTROPHE

Une extrapolation fondée sur l'alerte du 25 janvier 1995

Lancement d'une fusée scientifique au large des côtes norvégiennes

Les officiels russes évaluent le danger et décident une riposte

Détection par les radars d'alerte avancée russes

Le 25 janvier 1995, les contrôleurs de plusieurs stations radar du Nord de la Russie aperçoivent une tache lumineuse inquiétante sur leurs écrans : une fusée, mise à feu au large de la Norvège, s'élève rapidement dans le ciel nocturne. Conscients qu'un

seul missile envoyé par un sous-marin américain croisant dans ces eaux peut larguer huit bombes nucléaires au-dessus de Moscou en un quart d'heure, les contrôleurs alertent immédiatement leurs supérieurs. Les autorités militaires transmettent le message au président Boris Eltsine, qui, tenant à la

main la mallette électronique de commande des missiles nucléaires russes, téléphone de toute urgence à ses plus hauts conseillers. Pour la première fois, cette «mallette nucléaire» est activée en vue d'une utilisation imminente.

Pendant quelques minutes, les officiels russes n'ont aucune information

1. L'ARSENAL NUCLEAIRE russe et américain comprend des bombardiers à longue portée, des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins, des missiles balistiques intercontinentaux basés à terre, des radars

et des satellites de détection avancée. Malgré la fin de la guerre froide, les deux anciens adversaires restent prêts à tirer des milliers d'ogives nucléaires en quelques minutes (leur nombre est indiqué en rouge sur la carte).



Le président russe ordonne la mise à feu des missiles balistiques (le scénario est fictif à partir de ce point)

7 minutes 8 minutes 9 minutes 10 minutes 11 minutes 12 minutes 13 minutes

L'ordre de lancement du président russe est transmis aux commandants des missiles balistiques

Les missiles lancés par les sous-marins

Pour se conformer aux limitations prévues par le traité START II, les États-Unis vont démanteler quatre de leurs 18 sous-marins nucléaires lanceurs d'engins balistiques et réduire de huit à cinq le nombre d'ogives portées par les missiles de ces sous-marins. Puis, pour atteindre les objectifs fixés par le traité START III, les États-Unis désarmeront probablement quatre autres sous-marins et réduiront à quatre le nombre d'ogives par missile. Toutes ces mesures devraient être entreprises immédiatement. La Russie pourrait alors enlever les ogives qu'elle prévoit de supprimer conformément aux accords START.

Sans moyen de vérification élaboré, aucun des deux pays ne pourrait déterminer le statut des sous-marins en mer des forces adverses. Cependant, les deux nations devraient réduire l'état d'alerte de lancement. La moitié des sous-marins que les États-Unis conservent en mer aujourd'hui



Ce sous-marin américain lanceur d'engin transporte 24 missiles nucléaires à têtes multiples.

sont dans un état de semi-alerte : il faut environ 18 heures à l'équipage pour réaliser les procédures nécessaires à la mise en état d'alerte maximale du sous-marin, comme, par exemple, enlever les plaques d'immersion des tubes de lancement.

Les États-Unis pourraient mettre la plupart de leurs sous-marins en mer dans cet état. Le niveau d'alerte pourrait même être réduit davantage par l'élimination des systèmes de guidage des missiles et leur stockage à bord. Cette mesure n'est pas envisageable pour les sous-marins russes, car leurs missiles ne sont pas accessibles de l'intérieur du vaisseau.

La Russie devrait également s'engager à mettre hors d'état d'alerte les missiles des sous-marins à quai (les États-Unis n'ont pas de sous-marins à quai en état d'alerte). Les Américains devraient être en mesure de vérifier les niveaux d'alerte des sous-marins russes, à condition que les Russes facilitent la vérification.

sur la trajectoire de la fusée. L'anxiété s'accroît lorsque la séparation des multiples étages de la fusée fait craindre une attaque par plusieurs missiles. Les équipes de contrôleurs continuent de surveiller leurs écrans et, après environ huit minutes (à peine quelques minutes avant l'expiration du délai prévu par la procédure de réponse à une attaque nucléaire), il apparaît que la fusée se dirige vers la mer et ne menace pas la Russie : c'est une sonde scientifique américaine, envoyée dans le cadre d'une étude des aurores boréales. Plusieurs semaines avant l'incident, les autorités norvégiennes avaient dûment averti les autorités russes qu'ils lanceraient cette fusée, à partir de l'île d'Andøya, située près de leurs côtes, mais le message qui annonçait cette expérience de haute altitude n'avait pas atteint les bons destinataires.

Cet incident inquiétant et quelques fausses alarmes antérieures du côté américain montrent le danger que fait courir à l'humanité le maintien d'un

arsenal nucléaire en état d'alerte permanente : une panne technique ou une erreur humaine risquent de provoquer un tir accidentel des missiles nucléaires.

Pour prévenir une telle catastrophe, les autorités russes et américaines ont, depuis longtemps, institué des procédures de sécurité. En Russie, des systèmes de commande élaborés avec une extrême minutie assurent un contrôle central strict des armes nucléaires. Toutefois, les équipements russes ne sont pas infaillibles, et les systèmes d'alerte avancée et de commande nucléaire se détériorent : en février 1997, les responsables de la conception des systèmes de commande des missiles stratégiques ont fait une journée de grève pour réclamer leurs arriérés de salaire et pour protester contre le manque de moyens dans la mise à jour de leur équipement. Trois jours plus tard, le ministre de la Défense russe, Igor Rodionov, affirmait que, si la pénurie de moyens persistait, les missiles et les systèmes nucléaires russes seraient bientôt incontrôlables.

L'intervention de I. Rodionov était peut-être en partie une manœuvre visant à obtenir un budget supérieur. Cependant, des rapports récents de la CIA confirment que les équipes stratégiques russes sont en crise. À plusieurs reprises, l'électricité a été coupée dans des installations nucléaires, parce que l'armée n'avait pas payé ses factures. Pis encore, les systèmes de commande des armes nucléaires sont défectueux, et les systèmes électroniques ainsi que les ordinateurs décifés passent parfois en mode de combat sans raison apparente. Au cours de l'automne 1996, des centres d'armement nucléaire ont été perturbés lorsque des voleurs ont essayé de « récupérer » le cuivre des câbles de communication importants.

De nombreux radars, construits du temps de l'Union soviétique pour détecter les attaques par des missiles balistiques, ne fonctionnent plus. On raconte même que les mallettes nucléaires qui accompagnent le pré-

Les missiles balistiques intercontinentaux russes sont lancés contre les sites nucléaires et les postes de commandement américains

Le NORAD (l'acronyme de *North American Air Defense Command*, soit "Commandement de défense aérienne Nord-américain") informe les officiels américains de l'attaque russe

14 minutes

15 minutes

16 minutes

17 minutes

18 minutes

19 minutes

20 minutes

Les satellites américains détectent la chaleur et la fumée des propulseurs des missiles russes

sident, le ministre de la Défense et le chef d'état-major sont en piteux état.

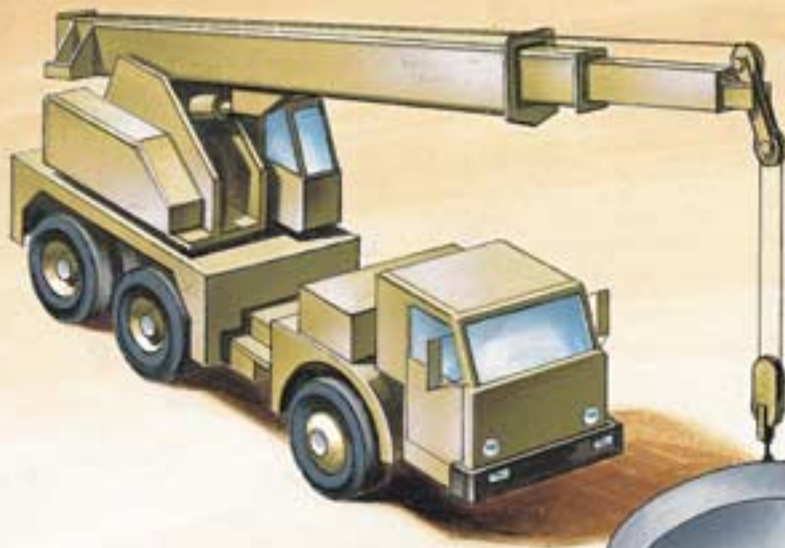
À ces difficultés techniques s'ajoutent de nombreux problèmes humains et administratifs. Par manque d'entraînement, les militaires manient moins sûrement les armes nucléaires que naguère. Malgré les engagements pris par B. Eltsine pour améliorer cette situation, le surpeuplement des casernes et le manque de nourriture ont démoralisé et démotivé les forces stratégiques, le personnel des sous-marins nucléaires et les personnels responsables de l'entretien des stocks d'armes nucléaires russes. Des sous-officiers désespérés risquent d'oublier les règles de sécurité ou, pire encore, de prendre le contrôle des armes nucléaires – un acte qu'un pouvoir central affaibli ne pourrait ni empêcher ni contrer. Bien que la réception de codes détenus par le chef d'état-major soit le plus souvent nécessaire au lancement des missiles, des agents de la CIA ont observé que certains équipages de sous-marins étaient en mesure de lancer leurs missiles sans ces codes.

Un déclenchement instable

Les tensions entre le gouvernement et l'armée pourraient aggraver la situation, car les militaires détiennent les codes de lancement : au cours d'une crise, le commandement militaire pourrait décider la mise à feu des missiles balistiques. En août 1991, lors du coup d'État contre le président Mikhaïl Gorbatchev, les coalitions au plus haut niveau changèrent soudainement, et la chaîne de commandement normale de l'arsenal nucléaire russe fut rompue. Pendant trois jours, le pouvoir nucléaire se trouva entre les mains du ministre de la Défense, Dimitri Yazov, et du chef d'état-major, Mikhaïl Moïsseïev. Cette situation de crise pourrait se reproduire.

Bien que la fin de la guerre froide ait modifié les relations internationales, la Russie et les États-Unis conservent l'essentiel de leurs missiles nucléaires en état d'alerte permanente. Ainsi,

206 en Brema

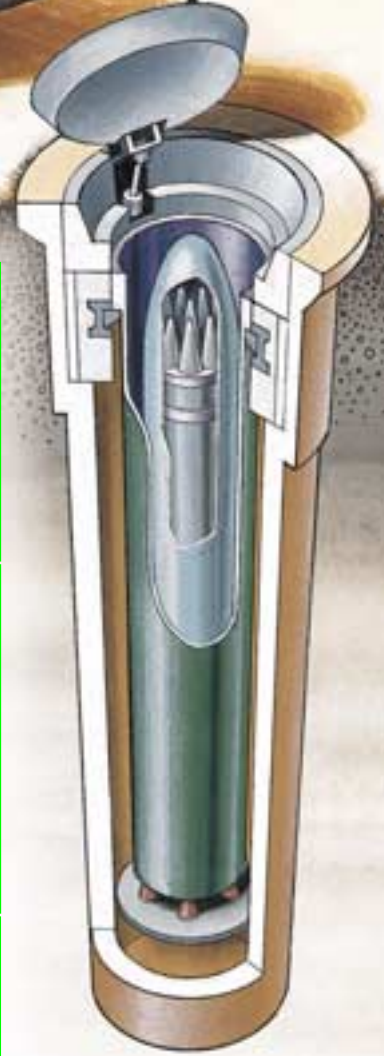


Les missiles des silos

L'interdiction par le traité START II des missiles à ogives multiples basés à terre entre en vigueur dans dix ans au maximum, mais pourquoi les États-Unis et la Russie attendraient-ils si longtemps pour désactiver la plupart de leurs ogives basées dans des silos ? La méthode la plus simple consisterait à ouvrir physiquement les contacts permettant le démarrage des moteurs des fusées. Ainsi, avant de pouvoir commander à distance le tir des missiles, des équipes de maintenance devraient entrer dans chaque silo, retirer manuellement des goupilles de sûreté et refermer les contacts.

Les négociateurs du sommet d'Helsinki ont envisagé des procédures de désactivation encore plus longues à inverser. Ils ont accordé cinq années supplémentaires à la Russie et aux États-Unis pour démanteler les missiles à têtes multiples qui doivent être éliminés dans le cadre de START II, à condition que ces missiles soient « désactivés par élimination des ogives nucléaires ou par d'autres mesures prises d'un commun accord ». Les États-Unis préfèrent que la Russie désactive ses missiles en enlevant les ogives nucléaires, qu'il faudrait plusieurs semaines pour remettre en place. Ces actions seraient observables par des satellites de surveillance, et l'absence d'ogives sur les missiles pourrait être vérifiée dans le cadre des inspections prévues par les traités.

Cependant les experts russes disent que leur pays ne possède pas les installations adéquates pour stocker en grand nombre les ogives nucléaires enlevées des missiles. Ils proposent d'autres mesures, telle l'immobilisation des couvercles des silos des missiles, de manière que des équipements lourds soient nécessaires pour les ouvrir, ou encore la suppression des batteries qui alimentent les systèmes de guidage des missiles en vol. Une troisième possibilité serait de remplacer le nez aérodynamique des missiles par des couvercles plats, ce qui protégerait les ogives, mais empêcherait les missiles de voler.



Une grosse grue serait nécessaire pour soulever le couvercle des silos russes si le système de production de gaz à haute pression qui permet de manœuvrer les gonds par des vérins pneumatiques était enlevé à dessein.

Les radars de détection avancée américains repèrent les missiles qui s'approchent ; le NORAD donne une seconde évaluation de l'attaque

21 minutes 22 minutes 23 minutes 24 minutes 25 minutes 26 minutes 27 minutes

Les missiles mobiles basés à terre

La désactivation des missiles mobiles russes basés à terre (les États-Unis n'en possèdent pas) pourrait commencer par la suppression des ogives des 36 missiles mobiles sur rail qui doivent être éliminés dans le cadre des accords START II. Pour ce qui concerne les missiles mobiles sur camion, on pourrait modifier leurs garages. Actuellement, le toit de ces abris s'ouvre pour permettre au lanceur situé à l'intérieur de se dresser et de lancer le missile. D'autres mesures consisteraient à mettre les lanceurs eux-mêmes hors service, de sorte qu'il faille quelques heures pour les rendre opérationnels.



Les missiles russes SS-25 peuvent être tirés d'un camion.

quelques minutes après un ordre de lancement, une grande partie des fusées russes et américaines basées au sol (armées respectivement de 3 500 et de 2 000 ogives nucléaires) pourraient entamer leur vol de 25 minutes au-dessus du pôle Nord en direction de leurs cibles. Moins de 15 minutes après avoir reçu l'ordre d'attaquer, six sous-marins nucléaires lanceurs d'engins américains de la classe Trident (des sous-marins dotés de missiles balistiques) pourraient lancer quelque 1 000 ogives, et plusieurs sous-marins nucléaires lanceurs d'engins russes pourraient en expédier 300 à 400. Au total, en une demi-heure, les deux superpuissances nucléaires s'enverraient plus de 5 000 ogives nucléaires.

Pourquoi deux pays en paix conservent-ils une position agres-

sive qui perpétue le danger d'un déclenchement accidentel ou non autorisé? Parce que, des deux côtés, les stratèges envisagent encore une attaque surprise de leur ancien adversaire. Ils supposent que l'attaque serait d'abord dirigée contre leurs propres armements nucléaires stratégiques et contre leurs centres de commandement. Afin de dissuader son adversaire, chacun des deux pays a prévu de riposter contre l'ensemble des cibles militaires localisées sur le territoire de l'autre, ce qui inclut l'ensemble des installations stratégiques. Autrement dit, la riposte s'apparente à l'attaque : elle doit détruire rapidement des milliers de cibles disséminées à l'intérieur d'un continent distant.

Pour avoir cette capacité, les Américains comme les Russes se fondent

sur des stratégies de lancement sur alerte : chacun se tient prêt à envoyer une salve massive de missiles dès la détection d'une attaque par des missiles ennemis, et avant que les ogives ne soient arrivées. Bien qu'ils possèdent des milliers d'ogives déployées en mer à l'abri d'une attaque, les États-Unis s'en tiennent à cette position de lancement rapide du fait de la vulnérabilité de leurs silos de missiles et de leur système de commande, ainsi que celle du pouvoir politique et militaire, à Washington.

Les Russes sont encore plus sur le qui-vive : ils craignent qu'après une attaque américaine d'envergure seules quelques dizaines de leurs missiles resteraient fonctionnels. En cas d'attaque massive, les postes de commandement et les silos de missiles russes sont tout aussi vulnérables que leurs homologues américains.

Les difficultés actuelles des Russes accroissent leur inquiétude. Le manque de moyens et de personnel qualifié a forcé la marine russe à ralentir considérablement ses opérations. Aujourd'hui, en moyenne, seuls deux de ses 26 sous-marins lanceurs d'engins patrouillent en même temps. Les mêmes contraintes matérielles empêchent l'armée de terre de camoufler sur le terrain plus de deux régiments de missiles mobiles. Les 40 autres régiments, qui contrôlent chacun neuf missiles à ogive unique, gardent leurs camions stationnés dans leurs garages. Ces missiles sont plus exposés aux attaques que ceux qui sont stockés dans des silos souterrains. Enfin, 36 missiles équipés de dix têtes nucléaires et portés par des wagons de chemin de fer sont regroupés dans une même gare. Normalement, ces missiles devaient être dispersés sur le réseau ferroviaire russe, mais une décision prise en 1991 par M. Gorbatchev les a immobilisés, ce qui les rend vulnérables.

Cette vulnérabilité a conduit la Russie à maintenir en état d'alerte certains de leurs missiles, soit dans les sous-marins à quai, soit dans des garages,

Le président américain reçoit les recommandations finales des commandants militaires et du secrétaire de la Défense

28 minutes

29 minutes

30 minutes

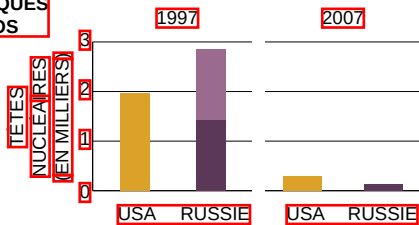
31 minutes

32 minutes

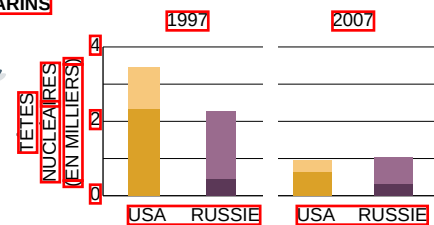
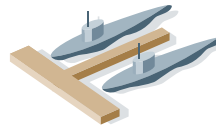
33 minutes

34 minutes

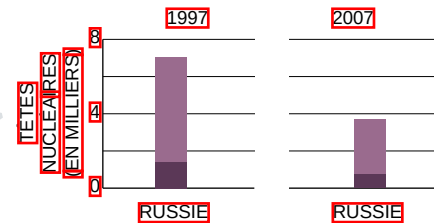
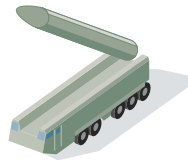
MISSILES BALISTIQUES DANS DES SILOS



MISSILES SUR DES SOUS-MARINS



MISSILES MOBILES



2. LES TRAITES DE RÉDUCTION DES ARMES STRATÉGIQUES (START) prévoient une réduction du nombre total de missiles stratégiques américains et russes au cours de la prochaine décennie. Cependant, selon ces accords, chaque pays pourrait conserver entre 500 et 1 000 ogives en état d'alerte (la partie sombre des histogrammes indique le nombre d'ogives maintenues en état d'alerte permanente).

soit, enfin, dans des silos. La crainte est aggravée par la présence de sous-marins américains, britanniques et français dans l'Atlantique Nord, à seulement 3 200 kilomètres de Moscou : les Russes auraient moins de 15 minutes pour décider d'un lancement (quelques minutes pour détecter l'attaque, quelques minutes pour la prise de décision au plus haut niveau, et quelques minutes pour répercuter l'ordre). Les dirigeants et les forces stratégiques russes s'entraînent régulièrement pour réagir en moins de 15 minutes. Les forces nucléaires américaines opèrent avec des délais semblables.

La brièveté de la procédure augmente le risque d'une erreur catastrophique. De surcroît, seulement un tiers des radars stratégiques fonctionnent, tandis que deux des neuf satellites d'alerte avancée n'ont pas été remplacés : les Russes distinguent plus difficilement les phénomènes naturels survenant dans l'espace d'une éventuelle attaque par missiles.

Certes, la fin de la guerre froide a amélioré la situation : le relâchement des tensions Est-Ouest compense partiellement le danger émanant du déclin des capacités techniques russes. Dans un climat politique plus serein, les décideurs peuvent douter de messages qui leur signaleraient une attaque nucléaire. Néanmoins, un déclenche-

ment involontaire d'une guerre nucléaire reste possible, et l'éventualité d'un accident apocalyptique ne peut être exclue.

Durant la guerre froide, on acceptait de tels risques, parce qu'on voulait dissuader un ennemi que l'on pensait prêt à déclencher une attaque nucléaire. Aujourd'hui, cet argument n'est plus tenable. Alors que les anciens ennemis signent des accords de coopération économique et militaire, la prolongation de l'état d'alerte nucléaire relève de l'imprudence.

L'accord START (l'acronyme de *Strategic Arms Reduction Treaties* soit «Traité de réduction des armes stratégiques») devrait réduire la menace d'un échange nucléaire accidentel. Toutefois, les changements programmés seront progressifs : selon le projet d'accord START III, signé à Helsinki au printemps 1997 par B. Eltsine et William Clinton, les arsenaux stratégiques de la Russie et des États-Unis devraient diminuer jusqu'à 2 000 ogives nucléaires de chaque côté d'ici l'an 2007. Cependant, si les consignes de ripostes actuelles ne sont pas modifiées, l'état du monde dans dix ans restera précaire, car la moitié de ces armes nucléaires pourrait toujours être tirées en quelques minutes.

Comment réduire la possibilité d'un déclenchement accidentel? En désac-

tivant les missiles, c'est-à-dire en augmentant le temps nécessaire pour les préparer au lancement. Les États-Unis et la Russie ne pourraient-ils s'engager ensemble dans cette voie qui conduirait à un monde plus sûr?

À la fin du mois de septembre 1991, le président George Bush a créé un précédent notable : lorsque l'Union soviétique a commencé de se désunir, à la suite de la tentative de coup d'État du mois d'août, il a ordonné que les nombreux bombardiers stratégiques qui, depuis des décennies, se tenaient prêts à décoller dans les quelques minutes suivant une alerte, soient désarmés. Peu après, les armes nucléaires de ces avions furent déchargées et stockées. De surcroît, G. Bush mit fin à l'état d'alerte des missiles stratégiques destinés à être démantelés dans le cadre des accords START I, soit 450 fusées sol-sol Minuteman II, ainsi que les missiles de dix sous-marins de la classe Poseidon. Cette vaste opération ne prit que quelques jours.

Une semaine plus tard, M. Gorbatchev suivit le mouvement, ordonnant la désactivation de plus de 500 fusées basées à terre et de six sous-marins stratégiques. Il promit également de maintenir ses bombardiers stratégiques à un niveau d'alerte minimum et de stocker les missiles sur rails dans les casernes. Dans les mois qui

Le président américain donne l'ordre de lancer des missiles balistiques vers la Russie

Les missiles MX et Minuteman sont mis à feu

35 minutes 36 minutes 37 minutes 38 minutes 39 minutes 40 minutes 41 minutes

Les instructions de lancement sont transmises aux sous-marins et aux missiles basés dans les silos

suivirent, les deux pays retirèrent et stockèrent également plusieurs milliers d'ogives nucléaires tactiques de faible portée que leurs armées de terre et de mer avaient déployées.

En 1994, W. Clinton et B. Eltsine ont fait un pas de plus lorsqu'ils ont cessé de pointer leurs missiles straté-

giques l'un vers l'autre. Même si le geste est amical, ce changement n'est pas militairement significatif : les responsables des missiles peuvent recharger les coordonnées des cibles dans les ordinateurs de guidage en quelques secondes. En outre, un missile non programmé qui serait tiré s'orienterait automatiquement

vers sa cible principale de temps de guerre, à savoir un silo de missiles Minuteman dans le Montana ou un centre de commandement à Washington, Londres, Paris ou Beijing. Enfin, les missiles russes, comme les missiles américains, ne peuvent recevoir d'ordre d'auto-destruction une fois lancés.

Le cas français

Si les risques qu'entraînent les procédures d'alerte ultrasensibles des forces nucléaires «stratégiques» russes et américaines sont effectivement considérables, les procédures préconisées par B. Blair et ses collègues sont mal adaptées au cas français. À l'instar des autres puissances nucléaires moyennes – Chine et Royaume-Uni – la France est en effet dans une position particulière : trop vulnérable à une attaque-surprise ou à un simple chantage pour se permettre de réduire sensiblement ses procédures d'alerte, elle a de plus une posture de dissuasion spécifique, qui semble porteuse de risques moindres.

Soulignons tout d'abord que, depuis 1990, les gouvernements successifs ont procédé à un désarmement nucléaire notable : réduction du nombre de sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de six à quatre, mise hors service et non-remplacement des 30 Mirages IV-P porteurs de missiles à moyenne portée, retrait des missiles sol-sol à courte portée Hadès, enfin démantèlement des 18 missiles stratégiques S-3D du plateau d'Albion. Outre leur impact purement quantitatif, puisqu'elles réduisent d'environ 15 pour cent l'arsenal français, ces mesures contribuent aussi à la réduction des niveaux d'alerte. La fermeture du plateau d'Albion est particulièrement significative, puisque ces missiles sol-sol étaient les plus puissants et les plus vulnérables à une «première frappe désarmante» – ceux donc pour lesquels des niveaux d'alerte ultra-sensibles étaient jugés les plus nécessaires. De surcroît, la France a déjà partiellement réduit les niveaux d'alerte de ses forces à la fin de la guerre froide en limitant, par exemple, le nombre de sous-marins en mer. Elle a également annoncé sa participation au «déciblage» des têtes nucléaires, désormais non pointées en permanence vers un adversaire désigné.

La situation géographique de la France et la dimension réduite de son arsenal ne permettent sans doute pas d'appliquer les mesures préconisées dans l'article : on imagine mal le gouvernement français envoyant les deux seuls sous-marins nucléaires lanceurs d'engins qu'il tient à la

mer dans l'Atlantique Sud. Ne pouvant s'appuyer sur la «redondance» de ses systèmes d'armes, contrairement aux États-Unis ou à la Russie, la France serait alors très vulnérable à une première frappe désarmante, même non nucléaire, qui détruirait les centres de commandement et les deux autres sous-marins encore à quai. Compte tenu des distances géographiques entre, par exemple, Paris et Moscou, les délais sont en effet très courts ; la plupart des mesures visant à réduire les niveaux d'alerte altérerait donc gravement la crédibilité de la dissuasion française.

De plus, la problématique développée par B. Blair et ses collègues tombe en partie «à plat» dans le cas de la France : contrairement aux États-Unis et à la Russie, la France ne s'est jamais lancée dans une gigantesque course aux armements. Elle a donc mis au point une doctrine dite du faible – la France – au fort – l'Union soviétique –, par laquelle elle menaçait l'URSS de représailles nucléaires en cas d'attaque. Ces représailles étaient «ultimes» en ce qu'elles visaient les grands centres urbains soviétiques : la France n'avait de toute façon pas les moyens de développer un arsenal autorisant une éventuelle «première frappe désarmante», c'est-à-dire menaçant les armes nucléaires de l'Union soviétique. Pour que la dissuasion produise ses effets inhibiteurs, estimait-on, il suffisait d'être en mesure d'opérer une frappe en second, c'est-à-dire postérieure à une attaque soviétique. En vertu de ce principe dit de «suffisance» dans le jargon de la doctrine française, l'arsenal nucléaire national est de pure dissuasion et ne menace pas les armes nucléaires – et donc les capacités dissuasives – des autres puissances nucléaires.

En définitive, les propositions avancées paraissent spécifiquement adaptées aux postures et aux arsenaux des États-Unis et de la Russie ; les puissances nucléaires moyennes, dont la France, ne sont pas véritablement partie prenante à ce débat. Elles pourraient le devenir ultérieurement dans des conditions qui restent à définir.

Étienne de DURAND,
Groupe de sociologie de la défense, EHESS, Paris

La première ogive nucléaire russe détruit la ville de Washington

42 minutes

44 minutes

45 minutes

46 minutes

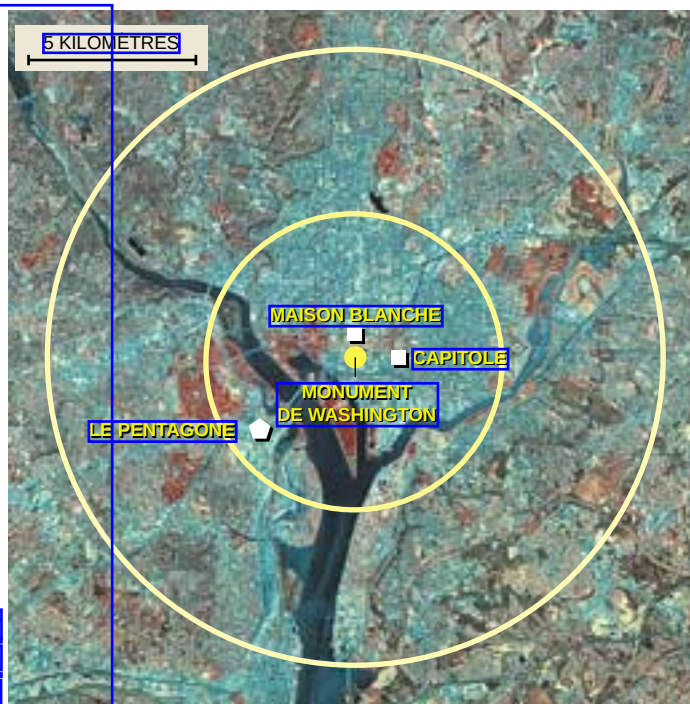
47 minutes

48 minutes

Le gouvernement américain, qui a la plus forte capacité nucléaire et un commandement plus efficace, devrait prendre une nouvelle initiative et proposer de retirer les ogives américaines qui menacent le plus les forces de dissuasion russes (notamment celles qui visent les silos de missiles russes et les postes de commandement souterrains). Les ogives les plus menaçantes sont celles qui équipent les 50 missiles MX placés dans des silos, armés de dix ogives chacun, ainsi que les 400 ogives W-88 de forte puissance qui arment certains des missiles des sous-marins de la classe Trident. Nous recommandons également d'immobiliser tous les missiles Minuteman III basés à terre (soit environ 500 missiles), armés de trois ogives chacun, de diminuer de moitié le nombre de sous-marins déployés en temps de paix, et de porter de huit à quatre le nombre d'ogives de chacun des missiles de ces sous-marins. Le mode de fonctionnement des sous-marins lanceurs d'engins devrait être également modifié, de manière que les équipages aient besoin d'environ une journée pour préparer les missiles au lancement.

Ces mesures laisseraient près de 600 ogives américaines à l'abri en mer, chacune susceptible de détruire le centre d'une grande ville. Avec de telles forces, les États-Unis préserveraient leur capacité de dissuasion, mais ils montreraient bien qu'ils ne veulent pas attaquer la Russie. La Russie continuerait alors sans doute la désactivation de la plupart de ses missiles, et le désarmement stipulé par les traités START II et III serait accéléré : il pourrait s'achever en moins de deux ans.

Comment vérifier l'application de ces mesures ? On peut surveiller le nombre de sous-marins à quai et prévoir des inspections surprises des sites, conformément à l'accord START I. À plus long terme, on peut chercher de nouveaux moyens techniques pour vérifier fréquemment que les missiles nucléaires ne constituent pas une menace immédiate. Par exemple, des



3. PLUSIEURS CENTAINES DE KILOMETRES CARRES seraient détruits, autour de Washington, si une ogive nucléaire de 500 kilotonnes explosait au-dessus du Monument de Washington. Le cercle intérieur délimite la zone où la plupart des personnes seraient directement tuées par l'explosion. Le cercle extérieur délimite la surface où les habitants périeraient en raison des incendies dévastateurs provoqués dans les zones construites. Il y aurait des victimes sur une étendue plus vaste encore.

«scellés» électroniques garantiraient qu'un composant enlevé d'un missile n'a pas été remis en place. L'intégrité de ces scellés serait vérifiée à distance par des systèmes de communication codée par satellite.

Le niveau zéro d'alerte globale

Ce plan de désactivation des forces nucléaires américaines et russes, qui réduirait notablement le risque d'une attaque, aurait un double avantage : il éviterait le maintien de missiles prêts à être lancés sur alerte et supprimerait toute raison de les maintenir ainsi. Les chefs d'État seraient contraints d'attendre la confirmation d'une attaque avant de décider d'une riposte, ce qui réduirait beaucoup le risque d'un lancement accidentel ou non autorisé.

Les dirigeants militaires russes et américains insisteront sans doute pour garder une partie de leur arsenal en état d'alerte maximale, quelques centaines d'ogives chacun, jusqu'à ce que les autres puissances nucléaires – la France, la Grande-Bretagne et la Chine – adoptent des mesures semblables. Cependant, si les États-Unis et la Russie

aspirent à des normes de sécurité stricte pour leurs armes nucléaires, ils devraient s'empressement de retirer toutes leurs forces nucléaires de l'état d'alerte et de prendre ensuite des mesures supplémentaires pour augmenter le temps nécessaire à la réactivation de ces armes.

L'objectif ultime serait de séparer la plupart, sinon toutes les ogives nucléaires de leurs missiles, puis, à terme, d'éliminer la majorité des ogives et des missiles en stock. Un programme aussi vaste nécessite le renforcement des moyens de vérification : chaque puissance nucléaire doit pouvoir repérer si un autre pays est en train de préparer ses missiles nucléaires pour un lancement rapide.

Ceux dont l'inquiétude majeure demeure une attaque surprise rechigneront naturellement à s'engager dans un tel programme global de désarmement nucléaire. La conception des procédures exactes de désactivation nucléaire doit tenir compte de cette crainte pour que l'on supprime le risque le plus immédiat : le lancement accidentel ou non autorisé de missiles nucléaires.

Bruce BLAIR est conseiller stratégique à l'Institut Brookings, à Washington. Harold FEIVESON, professeur à l'Université Princeton, a travaillé à l'Agence américaine pour le contrôle des armements et le désarmement. Franck von HIPPEL, également professeur à l'Université Princeton, a été, en 1994, directeur adjoint de la sécurité militaire américaine.

Bruce G. BLAIR, *The Logic of Accidental Nuclear War*, Brookings Institution, 1993.

Bruce G. BLAIR, *Global Zero Alert for Nuclear Forces*, Brookings Institution, 1995.

Lucien POIRIER et Gérard CHALIAND, *Le chantier stratégique*, Hachette-Pluriel, 1997.

The Future of U.S. Nuclear Weapons Policy, National Academy of Sciences, National Academy Press, 1997.

Prévenir les inondations

YVETTE VEYRET • GÉRALD GARRY

Les crues et les inondations sont généralement prévisibles. On préviendra plus efficacement les risques en tenant mieux compte du passé lors des aménagements.

Les inondations, les avalanches et les mouvements de terrain sont des phénomènes naturels qui, régulièrement, font des victimes, et endommagent des biens et des équipements. Le nombre et la localisation des inondations survenues ces dernières années rappellent l'ampleur des crues en France. Ainsi, en janvier 1995, près de 2 700 communes ont fait l'objet d'un arrêté de catastrophe naturelle, dont 236 dans le seul département des Ardennes ; dans le Finistère, on en a compté 184 en un seul mois, contre 207 au cours des 12 années précédentes. Les dégâts ont surtout lieu dans les villes ou dans les périphéries urbaines, souvent installées au bord de grands cours d'eau : Paris, Lyon, Bordeaux, Toulouse, Orléans, Tours, Nancy... Toutefois, les inondations atteignent aussi des agglomérations plus petites, implantées dans des vallées, en contrebas de plateaux occupés par des activités agricoles. Plus généralement, elles n'épargnent pas les zones rurales.

Les risques d'inondation ont-ils augmenté, en cette fin de XX^e siècle ? Une telle question n'est pas nouvelle : elle a déjà été posée au XIX^e siècle devant la fréquence des écoulements torrentiels, sans qu'une réponse concluante lui soit donnée. En admettant que la fréquence et l'étendue des crues augmente effectivement, comment distinguer la part des causes naturelles et celle des causes d'origine humaine ? La crise climatique du Petit Âge glaciaire en Europe, qui aurait augmenté la fréquence des pluies torrentielles en montagne entre le XIV^e et le XIX^e siècle, est-elle à l'origine des inondations importantes des XVIII^e et XIX^e siècles ? Pendant la même période, l'homme a fortement déboisé, ce qui aurait eu pour conséquence d'augmenter le ruissellement.

Bien que nous ne sachions pas répondre de façon générale à ces questions, nous connaissons l'origine de la plupart des inondations, et nous savons les prévoir. Les archives, les études hydrologiques et l'analyse géomorphologique indiquent où et comment des crues se produisent : elles se répètent, irrégulièrement, dans les mêmes zones. L'analyse de l'occupation des sols et des étapes de l'aménagement des vallées permettent l'évaluation des risques actuels pour les personnes et les biens. De telles études, essentiellement qualitatives, fondent aujourd'hui la politique nationale de prévention des catastrophes, par un aménagement du territoire qui prend en compte les risques naturels et s'y adapte.

Crues et ruissellement

Les inondations ne se manifestent pas de la même façon sur l'ensemble du territoire. La nature des précipitations et les caractéristiques des bassins versants (taille, topographie, géologie, sols et aménagements) conduisent à une typologie des crues en trois grandes catégories.

Les crues à montée lente dans les plaines alluviales, comme celle de la vallée de la Meuse en 1993 (voir la figure 1), résultent de successions de pluies sur l'Europe de l'Ouest produites par les masses d'eau océaniques en automne ou en hiver. La lenteur de la montée des eaux laisse le temps de prévenir la population et de la mettre à l'abri, et ces crues

ont surtout un impact sur les biens et sur les activités économiques.

À l'opposé, les crues du Sud de la France et des montagnes surviennent rapidement : elles sont provoquées par de violentes averses méditerranéennes ou par de brusques fontes des neiges. Elles sont dommageables pour les biens, mais surtout dangereuses pour les hommes.

La plus célèbre de ces dix dernières années est celle de l'Ouvèze, à Vaison-la-Romaine, en septembre 1992. Le petit bassin versant montagneux de 580 kilomètres carrés en amont de Vaison a un sol mince qui absorbe peu les eaux de pluie. Les fortes précipitations, localement supérieures à 300 millimètres en trois heures, se sont donc déversées rapidement dans l'Ouvèze, dont le débit à Vaison a été estimé entre 700 et 1 100 mètres cubes par seconde au maximum de la crue (il est ordinairement de 20 à 30 mètres cubes par seconde).

Les conséquences de cette crue ont été dramatiques : le camping, installé sur une zone anciennement connue comme inondable, au confluent de l'Ouvèze et du Lauzon, a été submergé, tout comme le pont romain, dont le parapet avait déjà été emporté par une crue en 1616. Une zone d'activités et des lotissements, construits dans le lit d'inondation de la rivière, ont été partiellement détruits ; le bâtiment occupé par les sapeurs-pompiers et une école ont été envahis par plusieurs mètres d'eau. En aval, la crue a touché d'autres localités, telles Bédarrides et

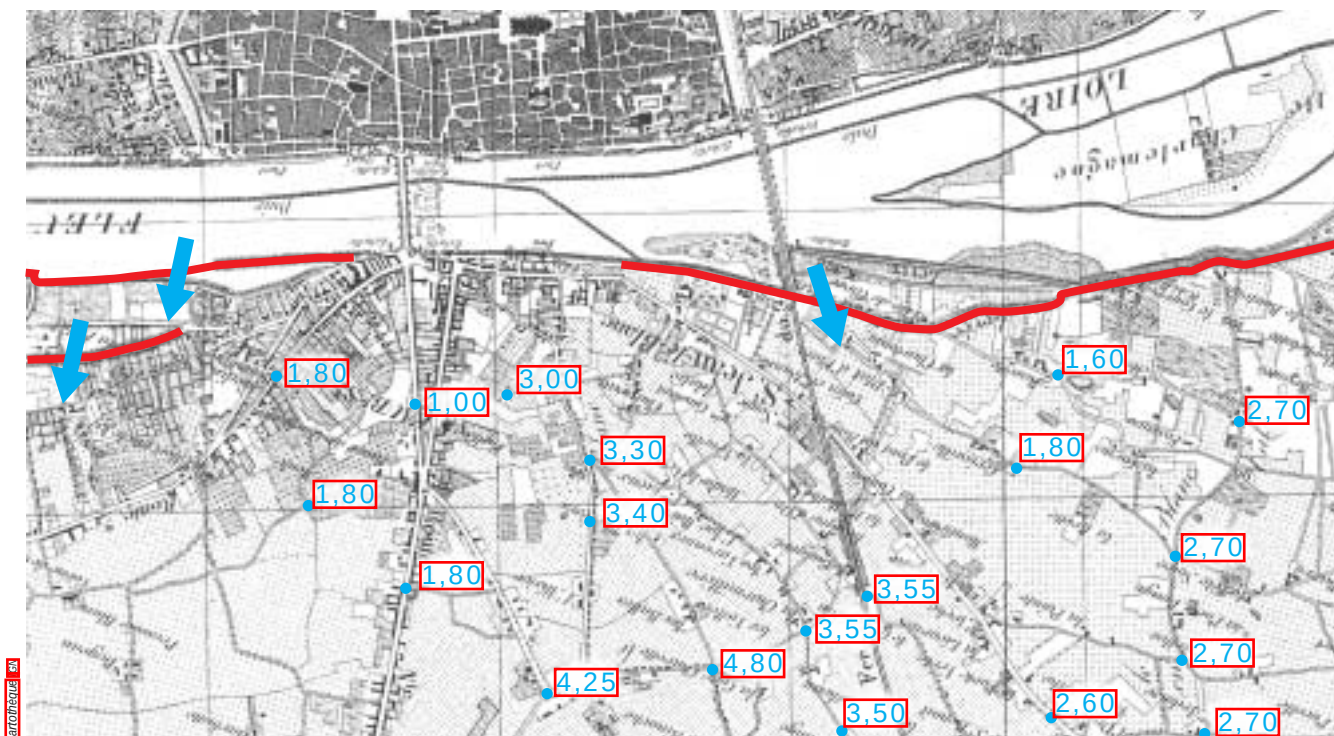
1. LES FLEUVES ET LES RIVIÈRES inondent les villes construites dans les plaines alluviales. À Paris, la dernière grande inondation s'est produite en 1910 (en haut). Le jour où le bassin de la Seine recevra des quantités d'eau proches de celles tombées en 1910, l'imperméabilisation des sols, qui résulte de l'urbanisation et des méthodes de culture sur les plateaux, risque d'accroître les quantités d'eau à écouler dans le fleuve. Si les barrages construits en amont sont remplis au moment des fortes pluies, ils ne suffiront pas à empêcher l'inondation. La crue de la Meuse à Charleville-Mézières en 1993 (en bas) montre que le problème des inondations est toujours d'actualité.



STANLEY LEE



AGENCE FRANCE PRES



2. LA RIVE SUD DE LA LOIRE face à Orléans a été urbanisée depuis le milieu du XIX^e siècle avec une prise en compte insuffisante des risques d'inondation. Les crues de 1846, 1856 et 1866, les plus hautes que l'on connaisse, ont recouvert toute la plaine alluviale, partielle-

ment représentée sur les deux cartes ci-dessus. La carte de gauche, relevée en 1848 (la toponymie est inscrite à l'envers), montre les hauteurs d'eau atteintes ponctuellement en 1856 (chiffres bleus) ainsi que les brèches (flèches bleues) ouvertes dans les digues construites

Aubignan. Au total, cette catastrophe a provoqué une quarantaine de morts.

Le troisième type d'inondations correspond au ruissellement urbain. En moyenne, la perméabilité des sols est réduite de 30 à 40 pour cent dans les secteurs d'habitat individuel, de 50 à 90 pour cent dans les zones industrielles, et de plus de 60 pour cent en centre-ville. Le ruissellement des pluies intenses peut alors conduire à des catastrophes, telle celle survenue à Nîmes, le 3 octobre 1988, après la chute de 300 millimètres d'eau en quelques heures. À la moindre absorption de l'eau par le sol s'est ajoutée l'obstruction des cadereaux, anciens chenaux naturels d'écoulement des eaux sur le flanc du plateau karstique qui domine la ville : on y a construit des routes et des bâtiments. Des arbres et des automobiles, entraînés par l'écoulement torrentiel, se sont accumulés derrière ces obstacles et ont formé des retenues dont les ruptures ont provoqué l'arrivée de l'eau par vagues dans les parties basses de la ville. Enfin, le réseau urbain d'évacuation des eaux de pluie, de trop faible capacité, n'a évacué l'eau que lentement, provoquant son accumulation au fond de la vallée.

À ces trois phénomènes s'en ajoutent d'autres, plus rares. Ainsi, quelques villes du littoral (Bordeaux, Quimper)

situées sur des estuaires, seraient partiellement inondées dans le cas où une crue du fleuve se conjuguait avec des vents dominants soufflant dans l'axe de l'estuaire, avec une marée de fort coefficient et avec des pluies localisées.

De brusques torrents boueux

Les travaux récents du ministère de l'Environnement prennent aussi en compte les laves torrentielles, fréquentes en montagne : des torrents de boue, composés de roches de taille variable emballées dans une matrice argileuse, se forment après des averses violentes ou par la fonte rapide des neiges, et empruntent le chenal torrentiel sur des pentes fortes. Ces laves peuvent être très dommageables, comme à La Ravoire en Savoie, en 1981, ou au Grand-Bornand en Haute-Savoie, en 1987.

Les inondations sont-elles plus fréquentes ou plus dévastatrices que par le passé? Nous ne disposons pas d'observations précises sur une durée assez longue pour en dégager des tendances statistiques. De ce fait, notre seul moyen d'évaluer une éventuelle aggravation consiste à étudier les facteurs responsables des inondations et leur évolution au cours du temps.

Toutes les inondations ont une cause naturelle commune : la pluie. Toutefois, l'ampleur et la fréquence des inondations ne sont pas directement associées aux totaux pluviométriques annuels : les averses importantes qui sont à l'origine de certaines inondations n'augmentent pas toujours ces totaux, puisqu'elles peuvent être compensées par une pluviosité moindre à d'autres périodes de l'année. L'évolution des moyennes annuelles, faute d'un recul statistique suffisant, ne permet pas non plus de discerner une tendance dans l'évolution du climat. Les précipitations ayant provoqué les inondations les plus graves étaient fortes, mais rarement exceptionnelles : c'est plutôt une occupation des sols favorisant le ruissellement qui est à l'origine des catastrophes.

Une cause importante de l'accroissement du ruissellement est la diminution de la surface en herbe au profit des cultures (en Charente, par exemple, la part des terres cultivées dans les terres labourables est passée de 60 à 80 pour cent entre 1970 et 1980, au détriment des prairies), notamment des cultures de printemps (betterave, lin, céréales de printemps). Celles-ci sont en effet accompagnées, entre une récolte et la culture suivante, d'une longue période durant laquelle le sol est à nu (environ



pour protéger la plaine des inondations (en rouge). Les dégâts ont toutefois à cette époque été limités car la zone était peu construite. Depuis, la commune de Saint-Jean-le-Blanc et les communes alentours se sont développées comme le montre la carte de droite, relevée en

1991. Cette urbanisation n'est pas arrêtée : les structures en rouge sur la carte correspondent aux constructions érigées entre 1984 et 1991. Peu resteraient hors d'eau en cas de crue centennale : il n'est pas certain que les levées résisteraient mieux aujourd'hui.

de l'automne à la fin du printemps). La généralisation de la culture du maïs, planté en lignes espacées, est aussi favorable au ruissellement rapide, au détriment de l'infiltration. Sur les surfaces nues, en particulier sur les sols limoneux du Bassin parisien, les impacts des gouttes de pluie font éclater les particules de surface, libérant ainsi des microfragments qui bouchent les pores du sol. La surface devient lisse et quasi imperméable (on parle de «surface battante») : le ruissellement augmente. Sur un sol limoneux battant, la capacité d'infiltration ne dépasse pas un à trois millimètres par heure, tandis qu'elle est de 30 à 50 millimètres par heure sur un sol non battant.

Dans les vallées du Soissonnais, de Picardie, du Nord ou de Normandie, la mécanisation participe aussi à l'accroissement des inondations : elle tasse les sols, réduit l'infiltration et favorise l'érosion. Les particules fines du sol, transportées par les eaux de ruissellement, augmentent le volume de celles-ci et accroissent les dégradations en se déposant sous forme de boue. En outre, ces particules sont, pour une part importante, de la matière organique du sol, dont le départ favorise les phénomènes de battance, donc le ruissellement ultérieur.

Des travaux expérimentaux, effectués dans le Bassin parisien, indiquent l'importance du ruissellement et des quantités de matériaux déplacés. Pour une pente de 16 degrés, les transports solides sur une parcelle nue ont été de 30 à 60 tonnes par hectare et par an, selon les hauteurs de précipitations. Sur des parcelles voisines portant une forêt peu dense de pins et une prairie, les transports solides étaient respectivement de 0,2 et de 0,1 tonne par hectare et par an. Ces données sont difficilement généralisables à des bassins versants, mais elles fournissent des indications très proches de celles qui sont obtenues dans des situations réelles, y compris sous d'autres climats, en Amérique latine, en Afrique du Nord ou en Afrique tropicale. Une couverture végétale dense constitue généralement une bonne protection contre le ruissellement, l'érosion et les inondations associées.

L'arrachage des haies

Le remembrement, agrandissement des parcelles pour faciliter l'exploitation agricole, a conduit à la destruction des haies et à la suppression des irrégularités des versants qui freinaient le cheminement de l'eau : il est souvent accusé de favoriser les inondations.

Certains talus absorbent effectivement beaucoup d'eau : en Bretagne, des haies associées à des fossés retiennent 200 à 300 litres d'eau par mètre linéaire, soit une pluie de cinq à six millimètres. Il est tentant d'extrapoler ces chiffres aux 8 000 kilomètres de talus et de haies qui ont été détruits en Bretagne par le remembrement en 20 ans, mais toutes les haies détruites n'avaient pas cette capacité d'absorption.

La discussion est posée dans les mêmes termes à propos de la déforestation, qui dénude les sols : les hydrologues et les géographes débattent du rôle réel des surfaces boisées dans la régulation des écoulements et, notamment, des crues. L'ouverture du couvert végétal forestier pour l'aménagement touristique en montagne augmente le ruissellement, mais l'extrapolation de mesures ponctuelles à l'ensemble d'un bassin versant est une simplification excessive. Des travaux conduits dans la région Centre, sur des bassins versants de la Loire dont la surface boisée a augmenté de 60 pour cent entre 1862 et aujourd'hui ne montrent pas de rarefaction corrélative de crues.

Le mauvais entretien et l'aménagement des cours d'eau sont aussi à l'origine d'inondations ou responsables de leur aggravation. La végétation qui

occupe certains fonds de vallées ralentit l'écoulement des eaux, dont l'accumulation provoque l'expansion des crues. Les souches, entraînées par les flots, constituent des embâcles qui surélèvent le niveau de l'eau en amont ou détournent les flots vers d'anciens chenaux de la plaine alluviale. L'extraction de granulats, d'une ampleur parfois considérable, et la transformation de la géométrie du fond et des berges modifient l'écoulement des rivières et des fleuves : dans certains cas, elles augmentent localement le débit du cours d'eau et contribuent à l'évacuation plus rapide des crues fréquentes et de faible ampleur ; en revanche, elles aggravent parfois les inondations de secteurs à l'aval où l'eau arrive plus vite. L'ensemble du fonctionnement du cours d'eau doit être pris en compte lorsque l'on réalise des aménagements ou que l'on implante des ouvrages de protection contre les crues : certains d'entre eux peuvent modifier les écoulements de façon catastrophique pour les populations installées en aval.

L'urbanisation et la construction d'infrastructures, enfin, perturbent les écoulements de plusieurs façons. Leur

extension augmente l'imperméabilisation des sols et le ruissellement. L'implantation des bâtiments et des ouvrages accélère les eaux en les canalisant ou, au contraire, les freine en s'y opposant. Or, au XX^e siècle, les villes et les zones d'activités se sont surtout développées dans les plaines alluviales, exposant toujours plus d'hommes et de biens aux inondations éventuelles. Ainsi, la population des communes périphériques d'Orléans, largement inondées au XIX^e siècle (voir la figure 2), a doublé entre 1851 et 1954, puis a encore été multipliée par 2,6 entre 1954 et 1981. Par ailleurs, certains ouvrages de défense contre les crues participent à l'aggravation de leurs effets, en laissant croire que le risque a disparu. Il en a été ainsi de la construction des levées le long de la Loire, qui ont poussé les hommes à occuper la plaine alluviale, en principe protégée par les digues. La rupture des ouvrages ou leur insuffisance ont été notamment à l'origine d'inondations catastrophiques en 1846, en 1856 et en 1866.

Comment prévenir les inondations et, surtout, les dégâts qu'elles occa-

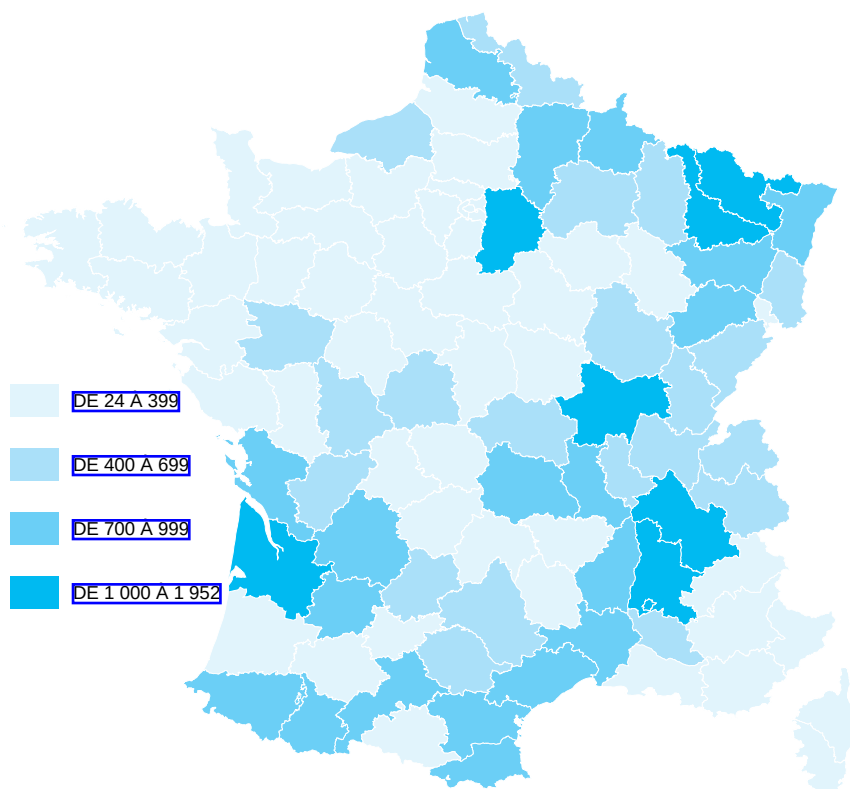
sionnent ? Une prise de conscience collective a progressivement émergé en France depuis la fin du XIX^e siècle sur la nécessité de cette prévention, à court et à long terme. Depuis le début des années 1980, elle s'est traduite par plusieurs mesures qui visaient à la maîtrise du risque et à la précision des compétences respectives de l'État, des collectivités territoriales et des populations riveraines.

L'alerte d'urgence

L'annonce des crues, destinée à alerter les populations, est ancienne. L'État, sans en avoir l'obligation, l'a mise en place depuis 1854 sur les bassins de la Seine et de la Loire, et depuis 1857 sur celui de la Garonne. Les services d'annonce des crues, qui ont été renouvelés par un arrêté interministériel de 1984, couvrent aujourd'hui 16 000 kilomètres de cours d'eau. Ils collectent des données relatives aux précipitations, au niveau de l'eau dans la rivière et à d'autres paramètres météorologiques, grâce à un réseau de capteurs propres ou appartenant à d'autres organismes, et ils les intègrent dans des modèles numériques de prévision ; ils alertent ensuite, en cas de besoin, le préfet, qui répercute les informations auprès des services de protection civile et des maires des communes concernées.

En 1994, la modernisation des réseaux de mesure a été décidée : 950 stations de mesure automatiques transmettent aujourd'hui leurs relevés par radio, téléphone ou satellite, assurant le recueil des données en temps réel. Parallèlement, la surveillance par radar des masses nuageuses au-dessus des zones menacées de crues rapides est étendue, et les modèles de prévision de crue sont améliorés. En outre, grâce à une convention passée avec Météo France, les services d'annonce de crue disposent désormais d'informations précises sur les phénomènes pluvieux, qui leur permettent d'affiner leurs prévisions.

Ce système a toutefois des limites, douloureusement révélées à Vaison-la-Romaine en 1992 ou à Nîmes en 1987 : il ne couvre pas la totalité du territoire, et la mise en œuvre des procédures d'évacuation est toujours suspendue à une décision prise dans l'urgence par le préfet. La réglementation de l'occupation des sols réduit plus efficacement le risque, voire l'annule, en intervenant très tôt sur les orientations de l'aménagement.



3. LE NOMBRE D'INONDATIONS dans chaque département, compté ici par le nombre d'arrêts de catastrophes naturelles inondations entre août 1982 et février 1994, montre qu'aucune partie du territoire français n'est épargnée. Les départements les plus inondés sont aussi bien situés en montagne que dans les grandes plaines alluviales, et aussi bien en France méditerranéenne, souvent perçue comme la région où le risque est le plus grand, que dans la France du Nord.

Le principal outil réglementaire de gestion de l'urbanisme est le plan d'occupation des sols, créé en 1967. Il détermine les modes d'occupation et d'utilisation du sol en tenant compte notamment des risques naturels. Il est élaboré à l'initiative et sous la responsabilité du maire, en relation avec un représentant de l'État. Certains secteurs inondables y sont classés en zones naturelles inconstructibles. Jusqu'à présent toutefois, très peu de plans d'occupation des sols ont directement intégré les risques, notamment parce que cela réduit la valeur des terrains et des constructions, et parce que de nombreux élus locaux redoutent les limitations possibles au développement de leur commune.

S'effacer devant les crues

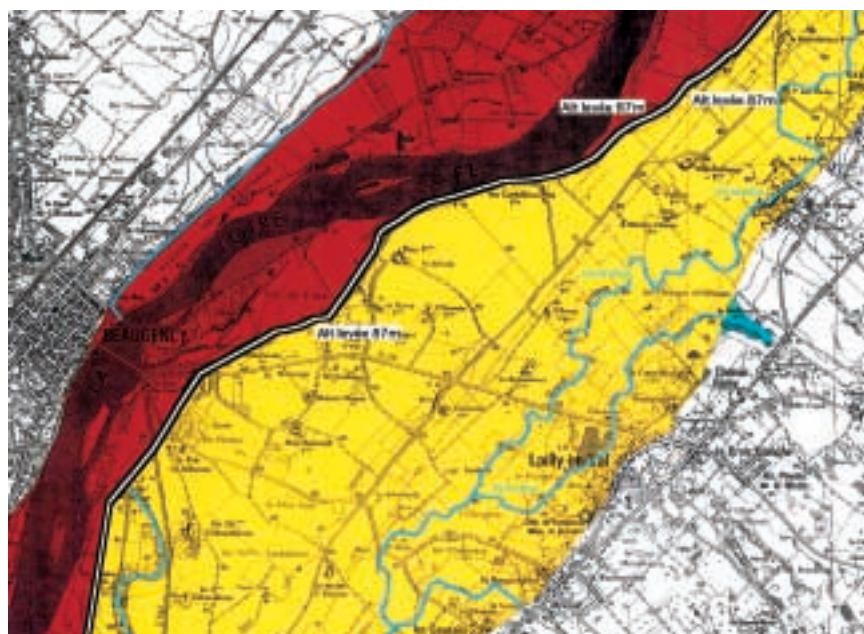
Parallèlement à ce règlement local d'urbanisme, l'État a élaboré depuis une cinquantaine d'années plusieurs documents, les uns spécifiques aux risques, les autres à vocation d'urbanisme (voir la figure 5). Le plan de surfaces submersibles, créé par un décret-loi de 1935, était destiné à assurer le libre écoulement des eaux dans les principales vallées. Ce plan indiquait les zones inondables, en distinguant les secteurs de grands débits, inconstructibles, et les champs d'expansion des crues, constructibles avec certaines réserves (voir la figure 4).

À partir de 1955, le périmètre de risque (qui a depuis donné lieu à l'article R 111-3 du Code de l'urbanisme) a interdit, autorisé ou subordonné à des conditions spéciales la construction sur des terrains exposés à des risques naturels, dont les inondations. Le Code de l'urbanisme permet aussi, au cas par cas, d'interdire ou de soumettre à condition des constructions ou des utilisations du sol là où n'existe aucune réglementation spécifique des risques.

Les plans d'exposition aux risques, créés en 1982, ont marqué la volonté de renforcer la prévention et, surtout, de réduire le coût des dommages, par l'évaluation des conséquences économiques des inondations. L'État devait élaborer et mettre en application ces plans qui déterminaient notamment « les zones exposées et les techniques de prévention à y mettre en œuvre ». Ils constituaient une servitude d'utilité publique : ils s'imposaient aux plans d'occupation des sols, auxquels ils étaient annexés.

Ces plans, qui contenaient une cartographie à grande échelle (1/5 000), avaient un caractère quantitatif, et leur élaboration était relativement longue. Elle s'appuyait sur une modélisation hydraulique, destinée à calculer les

inondations de risque centennal (en cent ans, on a deux chances sur trois environ d'observer une crue centennale), et sur une évaluation socio-économique des dommages prévisibles. Par ailleurs, l'opposition d'une com-



4. LE PLAN DE SURFACES SUBMERSIBLES, créé en 1935, indique, sur une carte au 1/25 000 (ici réduite au 1/50 000) des zones de grand débit, inconstructibles (en rouge), des zones dites complémentaires (en jaune), d'expansion des crues, où les constructions sont soumises à certaines contraintes, et des zones submersibles non réglementées (en bleu). Son principal objectif était d'empêcher qu'une urbanisation intempestive ne perturbe l'écoulement des eaux dans les vallées lors des crues importantes.

Réglementation	Date	Objectifs	Base d'élaboration	Zones concernées
Plan de surfaces submersibles	1935	Assurer le libre écoulement des eaux. Préserver les champs d'expansion des crues.	Limite des plus hautes eaux connues.	Vallées des principaux cours d'eau.
Périmètre de risque	1955	Réglementer l'urbanisation.	Généralement, limite des plus hautes eaux connues.	Toutes les zones où le risque existe.
Plan d'exposition aux risques	1982	Mettre en œuvre la loi d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.	Etude quantitative des risques et modélisation hydraulique.	12 000 communes exposées ; 400 plans approuvés.
Plan de prévention des risques	1995	Renforcer la protection de l'environnement. Simplifier et remplacer toutes les autres procédures.	Analyse surtout qualitative. Recours ponctuel à la modélisation, pour les zones à forts enjeux.	2 000 communes prioritaires avant l'an 2000. 330 plans déjà adoptés.

5. LA RÉGLEMENTATION NATIONALE pour la prévention des inondations a évolué vers la prise en compte des enjeux économiques et humains. Les plans de surfaces submersibles instaurés en 1935 n'avaient pour but que d'empêcher l'obstruction de l'écoulement par des constructions. Depuis les années 1980, la valeur des installations à protéger et les risques pour les populations ont été pris en compte, d'abord dans les plans d'exposition aux risques, puis, depuis 1995, dans les plans de prévention des risques.



6. LE PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES (ici pour la commune de Laval, en Isère) a été décidé en 1995 en remplacement de tous les autres documents réglementant les risques naturels. Il distingue en rouge les zones non constructibles et en bleu les zones constructibles sous conditions (la nature des différents risques est indiquée par les lettres : *M* et *m* pour les marécages, *T* et *t* pour les crues des torrents, *V* et *v* pour le ruissellement sur les versants, *G* et *g* pour les glissements de terrain, *P* et *p* pour les chutes de pierres). Établi à partir de la connaissance des événements passés et prévisibles, ce plan devrait être réalisé pour 2 000 communes prioritaires d'ici à la fin du siècle.

munie à ce plan (motivée par exemple par le refus de classer des terrains en zone inconstructible) obligeait à recourir au Conseil d'État pour l'approuver, ce qui allongeait encore la procédure. Sur les 12 000 communes initialement répertoriées comme soumises à un ou plusieurs risques, à peine 400 plans d'exposition aux risques ont été approuvés et tous ne concernent pas des secteurs inondables.

Face à cette lenteur, et en réaction aux fortes inondations de 1992 et 1993, le gouvernement a affirmé en 1994 quelques grands principes, qui fondent la politique actuelle de prévention : l'interdiction des implantations humaines dans les zones les plus dangereuses et leur limitation dans les autres zones inondables ; la préservation des capacités d'écoulement et d'expansion des crues ; la sauvegarde de l'équilibre des milieux naturels qui dépendent des petites crues et de la

qualité des paysages. La conséquence la plus importante de ces principes est la création, en 1995, du plan de prévention des risques.

Place au qualitatif

Ce plan présente plusieurs nouveautés. Il privilégie une évaluation qualitative des risques : les simulations quantitatives ne sont réalisées que lorsqu'elles sont nécessaires. Sa réalisation est aussi plus rapide : sa prescription et son approbation ne dépendent que du préfet, qui peut même l'appliquer partiellement par anticipation si l'urgence et les enjeux le justifient (la concertation avec les élus est toutefois recherchée pour aboutir autant que possible à un consensus). Ce plan, enfin, est élaboré à l'échelle d'un bassin versant ou, tout au moins, de tronçons homogènes de cours d'eau. Il prend ainsi en compte le fonctionne-

ment global du système et réglemente, le cas échéant, des aménagements qui provoqueraient ou aggraveraient des risques dans d'autres communes.

Annexé au plan d'occupation des sols, le plan de prévention des risques se substitue à toutes les autres procédures. Ces documents, d'élaboration plus simple et dont le contenu précis est adapté aux réalités locales, doivent couvrir 2 000 communes, jugées prioritaires, d'ici à la fin du siècle : plus de 300 ont déjà été approuvés, et un millier sont en cours d'élaboration.

Le plan de prévention des risques relève d'une démarche naturaliste. Il contient une carte au 1/25 000 qui montre les hauteurs d'eau et les vitesses pour la plus forte crue connue encore significative vis-à-vis de l'évolution de la vallée et qui soit au moins d'occurrence centennale. L'établissement de cette carte s'appuie sur des éléments déjà disponibles ou facilement accessibles : l'analyse de la géomorphologie et de l'hydrologie, l'étude des crues historiques. Deux zones sont définies : une zone inconstructible correspondant aux secteurs d'expansion des crues et aux secteurs d'aléas les plus forts en milieu naturel, et une zone constructible sous réserves : le développement est autorisé dans les secteurs déjà urbanisés, lorsque la sécurité des individus n'est pas en danger (voir la figure 6).

L'élaboration de ces différentes réglementations s'est accompagnée d'une réflexion sur la notion de risque acceptable et de seuils admissibles pour délimiter les zones inconstructibles ou constructibles sous conditions. Qu'est-ce qu'une zone inondable ? La référence retenue aujourd'hui pour la prévention des risques d'inondation est la ligne des plus hautes eaux connues ou, au minimum, la cote des crues centennales. Mais la ligne d'eau, mesurée ou estimée à partir des données historiques, correspond parfois à un écoulement qui s'est effectué dans une vallée moins urbanisée qu'aujourd'hui, et qui bénéficiait notamment de zones naturelles d'expansion des crues. L'analyse doit donc tenir compte de l'évolution de l'urbanisation, comme nous l'avons vu dans l'exemple de Nîmes. La définition statistique des crues décennales ou centennales ne signifie pas non plus que celles-ci soient périodiques : deux crues centennales ont eu lieu sur l'Oise en 1993 et 1995.

Dans bien des cas, l'accroissement de la vulnérabilité n'est pas dû à l'évo-

lution des conditions naturelles, mais plutôt à l'oubli ou à la non prise en compte des données du milieu physique lors des aménagements. Tout au long de son histoire, la géographie de la France s'est largement construite à proximité des cours d'eau, nécessaires pour la défense, pour l'approvisionnement en eau, pour les transports des hommes et des marchandises. L'eau a aussi été utilisée comme source d'énergie pour diverses activités artisanales et industrielles. Les vallées elles-mêmes offrent des terres fertiles qui ont très tôt fixé les cultures et les pâturages. Dans le passé toutefois, les villes ont surtout été établies sur des hauteurs échappant aux inondations et la question des risques ne se posait guère. La croissance urbaine du XX^e siècle qui s'est partiellement au moins effectuée dans les lits d'inondation explique l'attention actuelle accordée aux risques et aux catastrophes.

Faut-il donc exclure tout aménagement des secteurs inondables? Pas de façon systématique, à condition de bien connaître le risque, par le retour aux événements passés, par l'étude détaillée des lits des rivières et de leurs différents tracés. La prise de conscience de l'existence et de l'ampleur des risques par les autorités locales et par les populations permet alors l'adaptation des aménagements, pour une protection qui évite tout discours excessivement catastrophiste.

Yvette VEYRET est professeur de géographie à l'Université Denis Diderot à Paris. Gérard GARRY est chargé des risques naturels au Ministère de l'équipement, des transports et du logement.

Gérard GARRY, *Le risque d'inondation en France. Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et de sa traduction cartographique dans une perspective de prévention*, Thèse de doctorat de l'Université Paris I, 1993.

Yvette VEYRET et Pierre PECH, *L'homme et l'environnement*, PUF, 1993.

Gérard GARRY, *Évolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France*, Mappemonde, vol. 4, p. 1016, 1994.

Les Français dans leur environnement, sous la direction de René Neboit-Guilhot et Lucette Davy, Comité national français de géographie, éditions Nathan, Paris, 1996.

Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide général, La documentation française, Paris, 1997.



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. Maints 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

Les armes secrètes des guêpes parasitoïdes

NANCY BECKAGE

Les guêpes parasitoïdes se développent à l'intérieur de chenilles vivantes. Pour survivre dans cet environnement hostile, elles introduisent dans les chenilles parasitées des virus qui en inhibent le système immunitaire.

La chenille ci-contre ne deviendra jamais un papillon. Elle est tapie au cœur d'un plant de tomates, bien cachée des prédateurs, mais elle n'a dénichée. à la recherche d'une pouponnière, une guêpe parasitoïde a repéré sa victime, guidée par l'odeur du lépidoptère et de son repas. La guêpe perce la cuticule protectrice de la chenille et y injecte quelques œufs : les larves se développeront en mangeant la chenille de l'intérieur. Puis elles sortiront des flancs de la chenille et tisseront leur cocon à sa surface. Leur métamorphose terminée, les guêpes adultes s'envoleront, abandonnant la chenille.

Si la bataille interspécifique se jouait à un contre un, la chenille aurait ses chances : son système immunitaire détruirait les œufs de guêpes avant qu'ils ne créent des dommages irréversibles. Toutefois, la guêpe injecte, en même temps que ses œufs, d'innombrables particules virales qui annihilent le système immunitaire de la chenille. Doublement parasitée, cette dernière cesse progressivement de se nourrir, ne se métamorphose pas et meurt prématurément.

Les relations qui s'établissent entre la guêpe, le virus et la chenille condamnée sont parmi les plus complexes de la nature. La guêpe est un endoparasite : elle se développe à l'intérieur de l'organisme qu'elle parasite. Quand la chenille meurt avant que les larves de guêpe aient reçu suffisamment de nour-

riture, celles-ci meurent également. La chenille ne doit donc pas mourir prématurément, elle ne doit pas non plus gagner la partie grâce à ses défenses immunitaires ; c'est à son complice viral que la guêpe doit l'équilibre précaire qui permet le développement de ses œufs. Comme cette guêpe, de nombreux parasites d'insectes se sont associés à des bactéries et à des virus qui les aident à perpétrer leurs forfaits.

Armes biologiques

Une telle association existe également entre certains vers parasites d'insectes dont le tube digestif abrite une bactérie virulente qui colonise leur tube digestif. Ces vers régurgitent les bactéries dans les organismes qu'ils parasitent et qui meurent quelques jours après l'infection. Les bactéries, qui prolifèrent rapidement, sont une source de nourriture pour les vers en croissance ; de surcroît, elles sécrètent des enzymes digestives qui transforment le cadavre de l'hôte en une soupe que les vers peuvent consommer. En contrepartie, les bactéries profitent des vers pour se déplacer et envahir d'autres hôtes. Les partenaires sont dits indépendants, parce qu'ils n'ont aucun gène commun.

En revanche, l'interaction entre les guêpes parasitoïdes et les virus qu'elles hébergent est plus étroite : le sort de la guêpe est étroitement lié à celui du virus, et leurs matériels géné-

tiques se mêlent en permanence ; ils ont même des gènes qui se ressemblent. D'où la question : la guêpe et son virus forment-ils une même entité ou deux entités distinctes ?

La découverte de cette étrange association date de 1965, quand George Salt, de l'Université de Cambridge, soupçonna que les guêpes parasitoïdes du genre *Venturia* avaient, dans leur arsenal, une arme inhabituelle : au cours de l'oviposition (l'injection des œufs), les femelles transmettraient également des substances qui assureraient le bon développement de leur progéniture. G. Salt observa notamment que les ovaires des guêpes contiennent des substances qui empêchent les cellules immunitaires de la chenille de détruire les œufs de guêpe.

1. LES GUÊPES ET LES CHENILLES sont les David et Goliath du monde des insectes. La guêpe pond ses œufs dans la chenille, qui doit rester vivante tant que les parasites ne sont pas parvenus à maturité. Toutefois, le système immunitaire de la chenille menace les œufs. Pour l'inhiber, les guêpes utilisent une arme mortelle : un virus.



Normalement, les œufs injectés flottent dans un liquide semblable à du sang, l'hémolymph, qui emplit la cavité interne de la chenille. Lorsque G. Salt lava les œufs de guêpe avant de les injecter, ils furent rapidement attaqués et détruits par les cellules immunitaires de la chenille parasitée : le lavage avait éliminé un facteur protecteur inconnu. En 1973, des photographies prises au microscope électronique ont montré qu'au cours de l'oviposition, lors de leur passage à travers l'oviducte, les œufs de *Venturia* s'imprègnent de particules qui ressemblent à des virus.

Près d'une dizaine d'années plus tard, une vaste étude taxonomique des guêpes parasitoïdes montra que certaines espèces de guêpes qui se développent sous la forme de parasites internes de lépidoptères contiennent toujours des particules virales. Ces virus se répliquent seulement dans le tissu ovarien des guêpes femelles. Au cours de l'oviposition, la guêpe en injecte des milliers dans la chenille, en même temps qu'un ou plusieurs œufs.

Ces virus étaient-ils les substances d'origine ovarienne que la guêpe injecte en même temps que ses œufs et qui bloquent les réactions immu-

nitaires de l'animal parasité? L'hypothèse fut confirmée, en 1981, par des expériences où l'on injectait des œufs lavés, ainsi que des virus isolés. Restait une question : comment ces virus, aujourd'hui nommés virus à ADN multiple, désactivent-ils le système immunitaire des chenilles parasitées?

Déficit immunitaire

Pour le savoir, nous avons étudié la guêpe parasitoïde *Cotesia congregata*, qui dépose des centaines d'œufs par chenille. Ces œufs deviennent des larves qui se nourrissent de l'hémolymph de la chenille, et non de ses tissus, permettant ainsi à la chenille infectée de survivre longtemps après l'éclosion des œufs de la guêpe. Nous avons mis en présence ces guêpes et les chenilles du tabac *Manduca sexta* : quiconque cultive des tomates a probablement dû lutter contre ces grosses chenilles vertes qui ravagent les tomates, le tabac et le *Datura stramonium* (le *Datura* est une mauvaise herbe de la même famille que le tabac, qui pousse souvent à proximité des plantations de tabac). Ces chenilles sont pratiques pour les études en laboratoire, parce qu'elles sont à peu près de la taille d'un auriculaire : on pré-

lève leur sang aussi aisément que sur une souris.

Nous avons d'abord observé la transformation rapide des hémocytes de la chenille (des cellules qui circulent dans son sang), quelques heures après une oviposition de la guêpe *Cotesia* : les hémocytes s'arrondissent et n'adhèrent plus aux œufs de parasites ni au verre ; ils se boursoufflent et perdent des lambeaux de membrane, ainsi que du matériau intracellulaire. Puis, les hémocytes endommagés s'agglutinent et sont éliminés de la circulation sanguine. Ces modifications ressemblent beaucoup à celles qui accompagnent le suicide cellulaire, ou apoptose, des cellules de mammifères.

Les granulocytes et les plasmocytes sont les hémocytes de chenille les plus perturbés par le parasitisme. Les granulocytes, notamment, meurent par apoptose. Or, ce sont précisément les cellules immunitaires qui réagissent aux intrus, tels les œufs de *Cotesia*. Lors d'une réaction immunitaire normale, les granulocytes libèrent d'abord des granules qui recouvrent l'œuf ; puis les plasmocytes adhèrent à la surface des œufs, s'empilant en une capsule épaisse qui finit par tuer l'œuf. Le retrait sélectif des granulocytes et des plasmocytes de la circulation sanguine supprime les premières défenses de la chenille. Chez l'homme, un phénomène de même nature se produit lors d'une infection par le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) : les virus infectent les lymphocytes, qui s'agglutinent et meurent par apoptose. Divers agents infectieux opportunistes envahissent alors les malades, créant des ravages, tout comme la progéniture de la guêpe qui se développe au détriment de la chenille.

Lorsque nous injectons des virus à ADN multiple dans des chenilles saines, leurs hémocytes se modifient, comme lors du parasitisme. Quand le virus est inactivé chimiquement avant son injection, les hémocytes ne sont pas lésés : seuls des virus produisant des particules virales inhibent les réactions immunitaires.

Les protéines virales sont rapidement produites dans la chenille hôte : les gènes viraux sont activés dans la demi-heure qui suit l'oviposition. Au cours de cette demi-heure, les particules virales envahissent tout l'organisme parasité et pénètrent dans

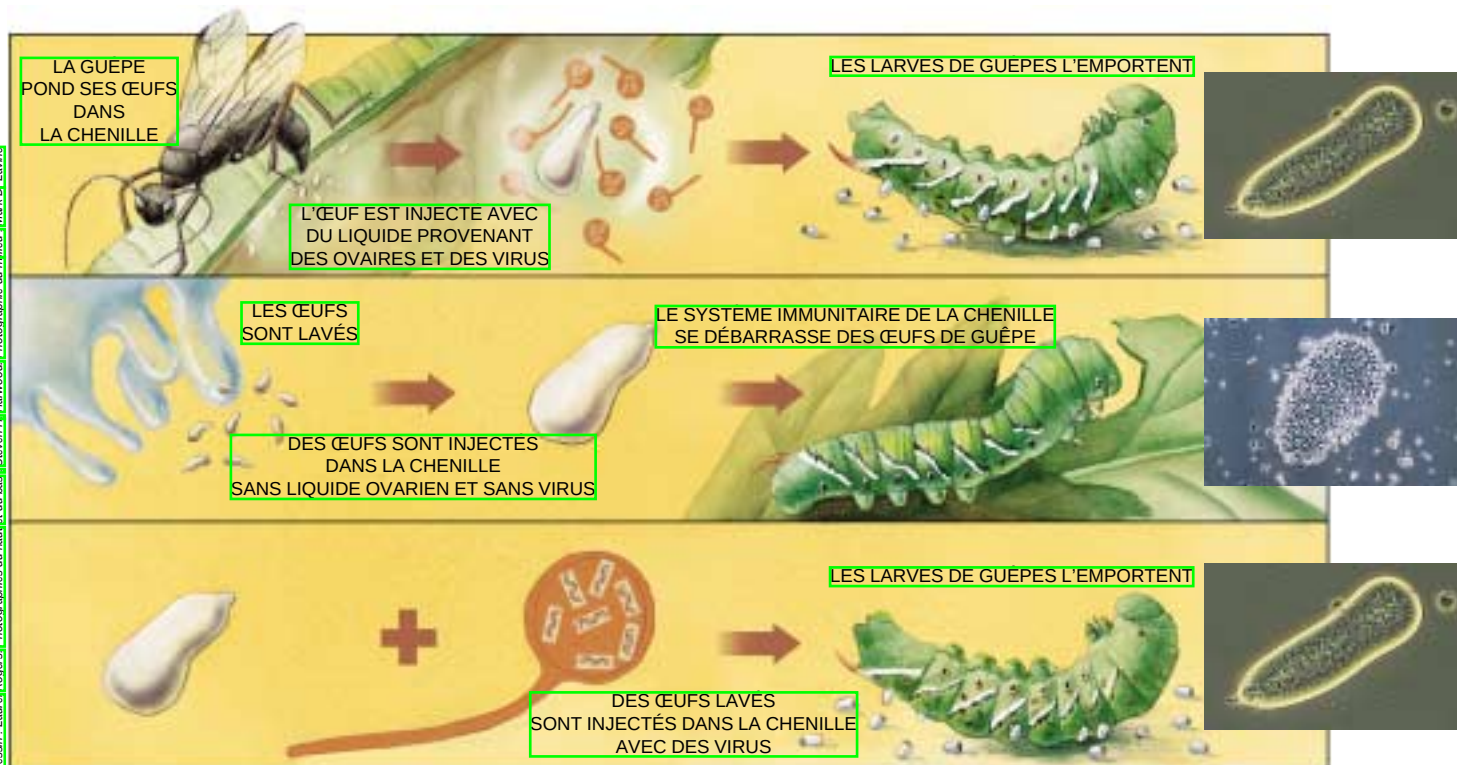
Des insectes contre les mauvaises herbes

Les guêpes et les virus ne sont pas les seuls organismes utilisant des tactiques violentes : les hommes sont passés maîtres en la matière. Récemment, des biologistes ont transformé des chenilles et leurs parasites en armes fatales contre des mauvaises herbes, notamment contre le *Pueraria lobata*, ou kudzu, une plante grimpante à croissance rapide, qui couvre près de trois millions d'hectares, au Sud des États-Unis. Le kudzu est une plante originaire du Japon, qui a été introduite aux États-Unis comme plante ornementale, mais qui est envahissante. Elle n'existe pas en Europe.

David Orr et ses collègues de l'Université de Caroline du Nord ont utilisé des chenilles du soja contre le kudzu. Dans des champs expérimentaux, les chenilles mangent les feuilles de la mauvaise herbe, et D. Orr pense que les efforts fournis par la plante pour remplacer ses feuilles finiront par épuiser l'énorme réseau de racines (les racines d'une seule plante

présent parfois jusqu'à 150 kilogrammes). Comme les chenilles du soja se nourrissent de cultures aussi bien que de kudzu, elles sont toutes équipées d'un système de sécurité qui les empêche de s'échapper : des guêpes parasitoïdes qui exécutent la chenille tandis qu'elle tisse son cocon (on n'a ainsi aucun risque qu'un papillon naisse et aille se reproduire sur les cultures). De surcroît, les chenilles parasitées dévorent davantage de kudzu : les guêpes augmentent la durée de la période d'alimentation des chenilles et leur appétit !

Comment les œufs de la guêpe *Copidosoma truncatellum* résistent-ils au système immunitaire de la chenille ? On l'ignore, car cette guêpe n'a pas de virus à ADN multiple. Différentes guêpes portant des virus à ADN multiple ont également été utilisées dans des stratégies de lutte biologique, souvent contre des populations d'insectes nuisibles, tels des drosophiles, des papillons et des pucerons.



2. LA GUERRE DES CHENILLES ET DES GUEPES. Les œufs de guêpe échappent à l'attaque du système immunitaire de la chenille grâce à un virus que la guêpe injecte dans la chenille avec ses œufs (a). Le virus inhibe les cellules immunitaires de la chenille, ce qui permet aux œufs (photographie supérieure) de se développer en larves normales de guêpes. En revanche, la chenille meurt rapidement avant

sa métamorphose. En laboratoire, des œufs de guêpe qui ont été lavés perdent leur virus protecteur (b) : ils sont rapidement détruits par les cellules immunitaires de la chenille (photographie du centre) : aucune guêpe ne survit. Quand on injecte du virus purifié en même temps que les œufs lavés (c), ces derniers se développent (photographie inférieure), et des larves de guêpe «émergent» de la chenille.

les cellules, y compris dans les hémocytes. Nous avons également montré qu'une protéine virale, la protéine EP1, est produite dans les hémocytes infectés.

Deux hypothèses se présentaient : soit la protéine EP1 était une protéine codée par le génome du virus, soit c'était une protéine de la chenille dont le gène était activé par le virus. Pour le savoir, nous avons établi partiellement la séquence du gène codant la protéine EP1, puis nous avons recherché cette séquence dans divers organismes. Nous ne l'avons pas trouvée chez le ver *Manduca*, mais l'avons détectée dans le génome du virus à ADN multiple. La protéine est produite au moment même où les effets du parasitisme sur les hémocytes de la chenille infectée sont les plus graves.

Un jour après l'oviposition, nous avons mesuré des concentrations élevées en protéine EP1 dans les hémocytes, qui avaient perdu leurs propriétés immunitaires. Pendant six jours, la protéine EP1 est encore présente en faible concentration dans la chenille ; au huitième jour, les hémocytes ont retrouvé un fonctionnement

normal, mais il est trop tard pour que la chenille puisse tuer les larves de guêpes.

Lors d'une autre association hôte-parasite, les hémocytes sont endommagés pendant la courte période où la protéine virale est produite, puis les réactions immunitaires se normalisent en deux ou trois jours. Nous pensons que les hémocytes sont endommagés tant que des protéines virales persistent ; dès que leur concentration diminue, les hémocytes endommagés sont réparés ou remplacés.

Ainsi, les réactions immunitaires de la chenille redeviennent efficaces avant que les guêpes ne soient prêtes à partir. Toutefois, contrairement aux œufs vulnérables ou aux jeunes larves, les larves plus âgées semblent capables de résister aux cellules immunitaires actives. Bien que l'inhibition du système immunitaire par les virus à ADN multiple ne soit que temporaire, elle est assez longue pour permettre aux guêpes de se développer et d'acquiescer leurs propres moyens de défense.

Les guêpes ont d'autres façons d'inhiber le système immunitaire de leur hôte, qui réagit quasi immédiatement,

alors même que les protéines virales ne sont pas encore synthétisées. Pendant la période sensible qui suit l'oviposition, les œufs sont protégés par des protéines ovariennes : injectées avec les œufs, ces protéines confèrent une protection immédiate, mais de courte durée, contre l'action des cellules immunitaires ; les virus à ADN multiple prolongent cette protection en produisant des protéines virales.

Cessation de développement

Je me suis particulièrement intéressée aux relations entre *Manduca*, *Cotesia* et les virus à ADN multiple, parce qu'on avait observé que le parasite modèle à son gré le développement de l'hôte : les larves d'endoparasites ont intérêt à faire durer la période durant laquelle l'hôte reste une chenille nourricière, et elles utilisent à cette fin des stratégies variées. Pourquoi la croissance de la chenille reste-t-elle bloquée même après le départ de la progéniture de la guêpe parasitoïde ? Pourquoi les chenilles dépérissent-elles souvent pendant deux semaines, avant de mourir ?

Comme la croissance des lépidoptères résulte de l'action du système endocrinien, j'ai voulu examiner comment la concentration d'une hormone indispensable au bon déroulement de la métamorphose est perturbée lorsque la chenille du tabac est parasitée par *Cotesia congregata*. La concentration en hormone juvénile augmente notablement chez les chenilles parasitées et ne redescend jamais à la valeur adaptée à la métamorphose. Cette concentration excessive en hormone juvénile résulte sans doute d'une réduction d'une autre hormone, l'enzyme estérase juvénile, qui dégrade l'hormone juvénile. Le parasitisme semble réduire durablement les concentrations en estérase, de sorte que la métamorphose n'a pas lieu, même après le départ des guêpes.

L'arrêt de la croissance semble imputable aux virus à ADN multiple, bien que la présence de la guêpe elle-même soit indispensable pour que l'arrêt soit total : quand nous injectons de faibles doses de virus à ADN multiple dans des chenilles non parasitées, la métamorphose ne se déroule pas normalement. La quantité de virus nécessaire pour retarder la croissance semble être inférieure à celle qui inhibe les réactions immunitaires. En fait, des œufs qui sont lavés avant d'être injectés gardent des traces de particules ou de protéines virales, mais celles-ci sont insuffisantes pour empêcher les cellules immunitaires de détruire les œufs ; en revanche, elles sont suffisantes pour interrompre la croissance normale de l'hôte. Les virus à ADN multiple perturbent la croissance, même après le départ des guêpes : le virus semble rester dans la chenille, à l'état latent, inhibant la croissance.

Ainsi, les virus à ADN multiple perturbent de plusieurs façons la croissance et les réactions immunitaires des chenilles hôtes : ils sont indispensables au succès du parasitisme. Cette relation entre les guêpes parasitoïdes et les virus à ADN multiple apparaît encore plus étroite quand on compare les patrimoines génétiques des deux partenaires.

Les virus à ADN multiple ont un génome plus grand et plus complexe que les autres virus à ADN : chaque particule virale contient jusqu'à 28 boucles d'ADN. Or, ce génome viral complexe est intégré dans le génome des guêpes mâles et femelles. L'ADN viral semble

dispersé dans les chromosomes de guêpe, et il se transmet chez la guêpe selon les lois de Mendel : les séquences virales sont recopiées et transmises de génération en génération, comme s'ils faisaient partie intégrante des chromosomes de guêpe. Chez les espèces qui ont des virus à ADN multiple, on n'a jamais trouvé de guêpes dépourvues de virus : virus et guêpe semblent être des partenaires permanents et systématiques.

Des partenaires systématiques

Contrairement aux virus classiques, qui usurpent le système de réplication des organismes infectés pour se reproduire, le succès de la reproduction des virus à ADN multiple nécessite la survie de toutes les guêpes : un nouveau type de chromosome viral est produit à chaque fois qu'une guêpe naît (la guêpe porte dans toutes ses cellules une copie de ce chromosome, mais toutes les copies sont identiques). Cette étroite association des génomes de la guêpe et du virus explique le rôle apparemment bénéfique du virus dans le parasitisme des guêpes. La multiplication des virus à ADN multiple dépend de la reproduction des guêpes, laquelle repose sur l'efficacité de la relation entre la guêpe et les chenilles qu'elle parasite. Tout ce qui favorise la reproduction du parasite assure la production d'une nouvelle génération de virus.

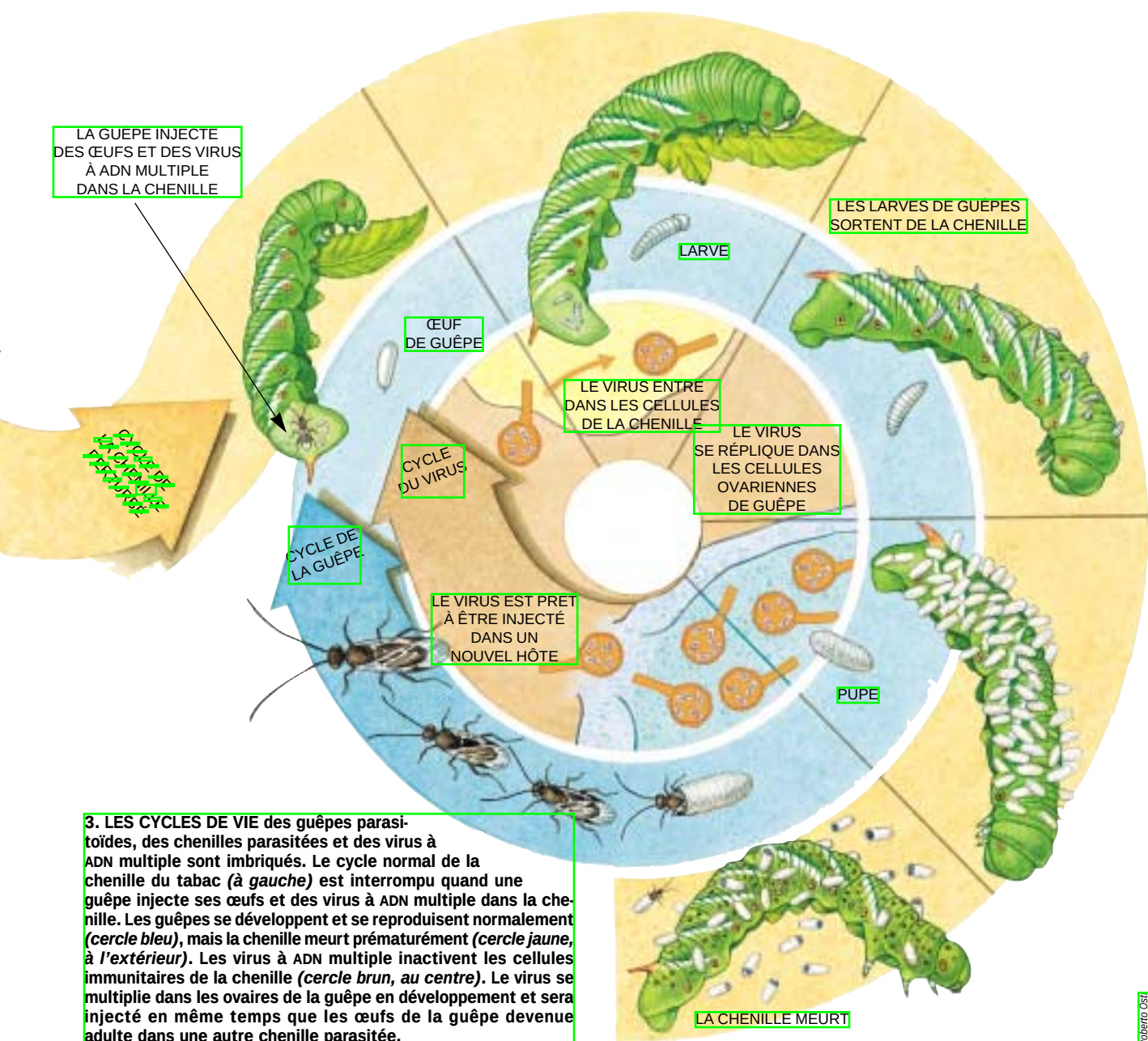
Puisque le transfert des virus entre guêpes se fait par la transmission héréditaire d'un virus intégré dans les chromosomes, pourquoi tant de virus sont-ils produits dans les ovaires de la guêpe ? Les virus ainsi produits ne se répliquent pas, mais ils se dispersent, pénètrent dans les cellules de l'hôte et en perturbent le fonctionnement. Au cours de l'évolution, la production des protéines virales utiles semble s'être adaptée aux cellules de la chenille et, grâce à elle, les guêpes modulent la biologie des animaux qu'elles parasitent.



Quelle est l'origine de ces virus à ADN multiple qui intègrent leur génome dans les chromosomes des guêpes ? On pourrait supposer que les virus ont d'abord été des agents pathogènes indépendants des chenilles, voire des guêpes elles-mêmes, et qu'ils se seraient ultérieurement intégrés à l'ADN des guêpes. Toutefois, l'association de l'ADN viral et de l'ADN de guêpe est si systématique et exclusive qu'on peut aussi penser qu'il n'y eut jamais d'entité virale distincte. Peut-être les guêpes ont-elles acquies la faculté de recopier un groupe de gènes utiles, pour l'introduire dans les cellules de chenille ?

Des travaux sur le venin des guêpes semblent l'indiquer : certains gènes codant des protéines qui figurent dans le venin de guêpe sont identiques à certains gènes des virus à ADN multiple. De plus, des anticorps dirigés contre ce venin reconnaissent également des protéines virales qui adaptent la biologie des chenilles au profit des guêpes. Ainsi les gènes du venin de guêpe et les gènes viraux auraient une parenté évolutive, résultat d'autant plus intéressant que certaines protéines de venin de guêpe jouent un rôle dans les modifications de la physiologie des chenilles.

Une possibilité serait que, au cours de l'évolution, les virus à ADN multiple, d'abord autonomes, aient prélevé dans le génome des guêpes des



3. LES CYCLES DE VIE des guêpes parasitoïdes, des chenilles parasitées et des virus à ADN multiple sont imbriqués. Le cycle normal de la chenille du tabac (à gauche) est interrompu quand une guêpe injecte ses œufs et des virus à ADN multiple dans la chenille. Les guêpes se développent et se reproduisent normalement (cercle bleu), mais la chenille meurt prématurément (cercle jaune, à l'extérieur). Les virus à ADN multiple inactivent les cellules immunitaires de la chenille (cercle brun, au centre). Le virus se multiplie dans les ovaires de la guêpe en développement et sera injecté en même temps que les œufs de la guêpe devenue adulte dans une autre chenille parasitée.

gènes de venin qui leur auraient été utiles. Selon une autre hypothèse, les guêpes auraient trouvé un moyen efficace d'utiliser leurs propres protéines de venin en recopiant leurs gènes, en les regroupant et en les transférant dans les cellules de chenille où elles continuent à agir. Dans les deux cas, la synergie entre les guêpes et les virus augmente, et l'origine de la caractéristique est effacée.

Quelle que soit l'origine des virus à ADN multiple, leur association avec les guêpes et les chenilles permet aux biologistes de préciser les mécanismes de l'évolution. La redoutable tactique des guêpes parasitoïdes et de leurs complices viraux contredit l'hypothèse selon laquelle les parasites les plus évolués sont peu virulents vis-

à-vis de leurs hôtes : les guêpes parasitoïdes tuent tous leurs hôtes sans exception, en suivant un scénario bien réglé où elles gagnent toujours. À l'inverse, les guêpes et les virus à ADN multiple entretiennent une association mutuellement bénéfique si étroite

que les frontières génétiques entre ces deux espèces s'estompent. Pourquoi la chenille ne devient-elle pas un papillon? La question reste ouverte et continue d'intriguer les biologistes et les endocrinologues.

Nancy BECKAGE est professeur d'entomologie à l'Université de Riverside.

Jo-Ann G.W. FLEMING, *Polydnnaviruses: Mutualists and Pathogens*, in *Annual Review of Entomology*, vol. 37, pp. 401-426, 1992.

James H. TUMLINSON, W. Joe LEWIS et Louise E.M. VET, *Comment certaines guêpes détectent leurs hôtes*, in *Pour la Science*, mai 1993.

M.D. LAVINE et N.E. BECKAGE, *Polydnnaviruses: Potent Mediators of Host Insect Immune Dysfunction*, in *Parasitology Today*, vol. 11, n° 10, pp. 368-378, 1995.

Donald L.J. QUICKE, *Parasitic Wasps*, Chapman & Hall, 1997.

J. van BAAREN, G. BOIVIN et J.-P. NÉNON, *Guêpes et apprentissage*, in *Pour la Science*, août 1997.

Comment combattre les virus informatiques

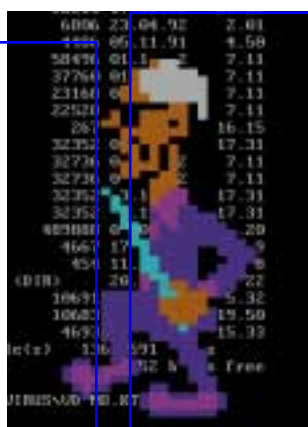
JEFFREY KEPHART • GREGORY SORKIN • DAVID CHESS • STEVE WHITE

La biologie éclaire le comportement des virus informatiques et aide à concevoir des parades.

Naguère, les épidémies redoutées étaient la peste, le choléra ou la grippe espagnole. À l'ère des autoroutes de l'information, les œuvres de fiction grouillent de virus informatiques qui se dupliquent et détruisent les ordinateurs à travers les réseaux. Si les virus infectent effectivement un nombre croissant d'ordinateurs, ils ne sont pas la menace que dépeignent les auteurs de science-fiction. Est-ce pour cette raison qu'ils n'ont pas encore été beaucoup étudiés par les informaticiens ?

Leur notoriété est due à une particularité qu'ils partagent avec les véritables virus : ils se lient à un système dont ils utilisent les ressources pour se répliquer (les virus biologiques se lient à une cellule, les virus informatiques à un programme ou à un ordinateur). Leurs effets sont variables : certains virus informatiques sont inactifs, d'autres gênants, et d'autres encore désastreux. À la manière des virus biologiques qui infectent les individus d'une communauté, les virus informatiques se déplacent de programme en programme, d'ordinateur en ordinateur.

Avec mes collègues du Centre de recherche IBM de Yorktown Heights nous avons trouvé qu'une analogie avec la biologie aide à comprendre les épidémies de ces virus et à élaborer des défenses. En utilisant les outils mathématiques mis au point ces dernières décennies par les épidémiologistes, nous avons compris certains facteurs qui gouvernent leur vitesse de propagation. Nos découvertes de



immunitaire des vertébrés et de sa remarquable capacité à repousser et à détruire des agents pathogènes.

Le plus ancien ancêtre des virus informatiques n'a existé que théoriquement : en 1940, John von Neumann étudie l'autoréplication des automates cellulaires. Si l'idée de programmes capables d'infecter des ordinateurs date de 1970, le premier cas d'infection répertorié date du mois d'octobre 1987, lorsqu'un petit programme nommé *Brain* («cerveau») apparut sur plusieurs dizaines de disquettes à l'Université du Delaware. Aujourd'hui, les virus infectent au moins un million d'ordinateurs par an, et les utilisateurs dépendent chaque année plusieurs centaines de millions de francs en réparations et en logiciels antivirus.

La plupart des virus s'attaquent à des micro-ordinateurs de type PC, c'est-à-dire des compatibles avec les ordinateurs

méthodes de détection efficaces de ces virus et des relations entre virus doivent beaucoup aux techniques de recherche d'homologie mises au point en biologie moléculaire. De surcroît, nous avons trouvé des parades contre ces logiciels dangereux en nous inspirant du système

IBM. Près de 15 000 virus ont déjà vu le jour, et six nouveaux virus apparaissent quotidiennement. Heureusement, seuls quelques-uns d'entre eux se sont disséminés.

Il existe trois types principaux de virus : les virus qui contaminent les programmes exécutable, les virus de secteur de démarrage et les virus de macros. Environ 85 pour cent des souches virales contaminent des programmes, comme des tableurs ou des jeux, mais cela ne représente que 20 pour cent des infections. Lorsque l'utilisateur exécute un programme infecté, les lignes du programme viral s'exécutent en premier et se copient dans la mémoire vive de l'ordinateur, de façon à se recopier toutes seules, dans un autre programme qui sera lancé plus tard. Une fois installé dans la mémoire, le virus redonne le contrôle au programme infecté, si bien que l'utilisateur ne peut déceler sa présence. Lorsque le programme infecté atteint un autre ordinateur par l'intermédiaire d'une disquette ou d'un réseau, le cycle d'infection recommence.

Les virus de secteur de démarrage représentent cinq pour cent de l'ensemble des virus connus. Ils résident dans une zone des disquettes ou des disques durs qui est lue quand l'ordi-



nateur est allumé et dont les programmes sont exécutés automatiquement. Habituellement, le secteur de démarrage contient les instructions de chargement du système d'exploitation, le système qui gère le fonctionnement de l'ordinateur et qui permet notamment l'affichage des données ou la lecture d'ordres tapés par l'utilisateur. Une fois installé, un tel virus peut contaminer toute disquette non protégée en écriture introduite dans le lecteur. Il infecte aussi le disque dur, de sorte qu'il se trouve chargé dans la mémoire vive de l'ordinateur à chaque redémarrage. Les virus de démarrage sont très efficaces et, bien que moins de 1 000 souches différentes existent, ils sont pour le

moment plus répandus que les virus qui infectent les programmes exécutables (30 pour cent des infections).

La troisième catégorie, les virus de macros, sont indépendants des systèmes d'exploitation, de sorte qu'ils infectent aussi bien des ordinateurs compatibles PC que des *Macintosh* ; ils infectent des fichiers de données plutôt que des programmes. Beaucoup de tableurs, de programmes de bases de données et de traitement de texte peuvent exécuter des séquences de commandes nommées «macros», qui automatisent des tâches fastidieuses : certaines macros de traitement de texte placent automatiquement un mot long ou une expression toute entière quand l'utilisateur tape seulement quelques

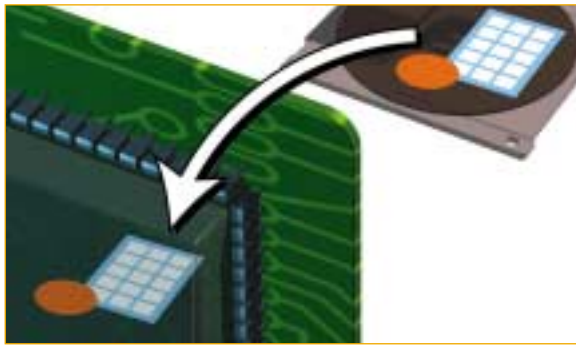
lettres ; des macros de tableurs effectuent de longs calculs. Des concepteurs de virus ont programmé des macros qui se recopient dans d'autres documents. De tels virus se propagent beaucoup plus vite que les autres formes de virus, parce que de nombreuses personnes s'échangent des fichiers de données, lorsque, par exemple, ils rédigent un document en commun. Le premier virus de macros détecté, un virus nommé *Concept*, fut trouvé fin 1995 dans un document créé par le programme de traitement de texte *Word*, et c'est aujourd'hui l'un des virus les plus répandus (dix pour cent des infections), avec un nouvel arrivant, *CAP.A*, qui représente 20 pour cent des infections. En tout, on a recensé plus de 1 500



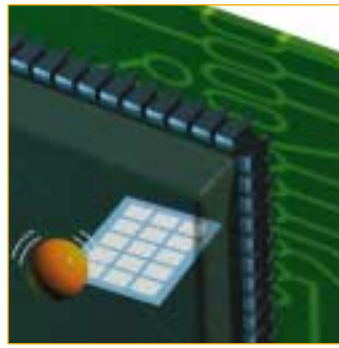
1. PRES DE 15 000 VARIÉTÉS DE VIRUS INFORMATIQUES infectent les ordinateurs du Globe, mais quelques centaines seulement sont répandues. Les écrans reproduits ci-dessus et sur la page ci-contre

montrent les effets de quelques virus colorés mais peu répandus : *Chad*, *Walker* («marcheur») et *Rescue* («Secours»). Certains virus sont inoffensifs, mais d'autres détruisent irrémédiablement les don-

Le cycle d'un virus qui infecte les programmes



Lorsqu'un utilisateur lance un programme infecté, l'ordinateur copie le programme du disque, où il est stocké et inactif, dans la mémoire vive, où il peut être exécuté.



Le programme viral s'exécute en premier, tandis que le programme infecté reste au repos.



Le virus se recopie dans une zone de la mémoire vive séparée du programme, de sorte qu'il peut rester actif même après que l'utilisateur a lancé d'autres logiciels.

virus de macros, responsables de la moitié de toutes les attaques virales.

En plus des séquences qui assurent la recopie, les virus contiennent des séquences variées : certains virus impriment un message ou affichent une image ; d'autres effacent des programmes ou des données. Même ceux qui ne sont potentiellement pas nuisibles peuvent créer des dégâts quand ils se placent dans des configurations différentes de celle où ils avaient été créés. Par exemple, le virus *Form*, qui ne produit habituellement qu'un léger cliquetis chaque mois, écrit sur une partie du disque qui est inoccupée dans les vieux ordinateurs, mais qui contient des données cruciales dans les nouvelles machines, où les répertoires sont agencés différemment.

Techniques immunitaires

Les logiciels contre les virus sont apparus peu après les virus. Des programmes généraux de détection de virus surveillent si le comportement d'un ordinateur est modifié par la présence d'un virus (par exemple, si le virus modifie certains fichiers importants ou des parties de la mémoire) et cherchent périodiquement des modifications suspectes des programmes. Ils détectent les virus sans les connaître, mais ils peuvent aussi déclencher de fausses alarmes, car des activités normales de l'ordinateur ressemblent parfois à celles de virus en action.

En revanche, des programmes d'analyse recherchent dans les fichiers,

dans les secteurs de démarrage ou dans la mémoire de l'ordinateur, des morceaux de programmes (nommés aussi signatures virales) caractéristiques de virus déjà connus. Pour rester efficaces, ils doivent être mis à jour régulièrement, mais ils ne déclenchent que rarement de fausses alarmes. Ces programmes ont la même efficacité que les récepteurs biologiques du système immunitaire : ces derniers reconnaissent les protéines virales en se liant à de courtes séquences (8 à 15 acides aminés seulement, contre des milliers pour la protéine virale complète) ; de même, les signatures virales reconnues par les programmes d'analyse sont très courtes, de 16 à 30 octets (un octet représente huit bits), parmi les quelques milliers qui constituent un virus informatique complet. La recherche de petits segments, au lieu du virus complet, accélère l'analyse, d'autant que des virus différents partagent parfois la même signature. La plupart des programmes d'analyse utilisent des algorithmes issus des techniques d'appariement en biologie, qui cherchent plusieurs signatures en même temps. Le plus rapide de ces programmes vérifie la présence de 10 000 signatures dans 10 000 programmes en moins de dix minutes.

Comment éliminer un virus qui a été détecté ? Une technique brutale, mais efficace, consiste à effacer le programme contaminé. La technique est identique à celle qui est utilisée par

certain types de cellules immunitaires, qui détruisent les cellules infectées ; mais si les cellules du corps sont aisément remplacées, il n'en est pas de même des programmes et des documents informatiques. Les programmes antivirus perfectionnés essaient plutôt de réparer les fichiers infectés. Cette tâche est facilitée par le fait que les virus informatiques ne se transmettent que s'ils n'éveillent pas l'attention de l'utilisateur, de sorte qu'ils laissent leur programme hôte intact.

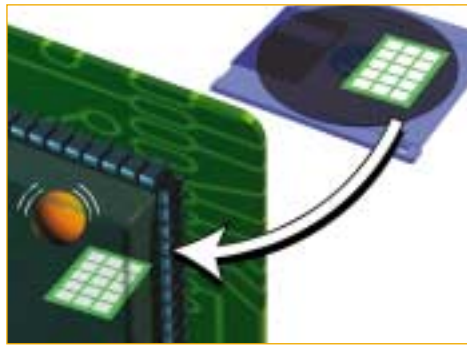
Lorsqu'un programme d'analyse détecte un fichier infecté, il exécute habituellement une ordonnance détaillée, fournie par ses concepteurs, afin d'ôter le code viral et de reconstruire une copie opérationnelle du programme original. D'autres techniques de désinfection générale fonctionnent aussi bien sur des virus connus que sur des virus inconnus. Nous avons mis au point un programme qui élabore un résumé mathématique (nommé somme de contrôle) de chacun des programmes du système, de sorte que l'on peut reconstituer une copie de l'original lorsqu'un programme est infecté.

Les techniques de détection et d'éli-

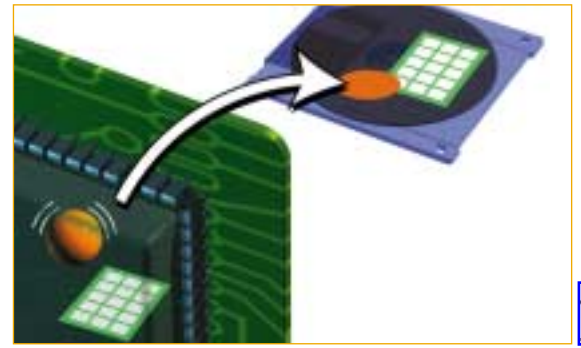
2. SUR LE CHAMP DE BATAILLE NUMERIQUE, des programmes antivirus recherchent les programmes malfaisants (virus, vers ou chevaux de Troie) et réparent les dégâts qu'ils causent. Les nombreux types de virus informatiques qui existent peuvent être reconnus à leur action et à leur structure caractéristique. Les programmes antivirus protègent aussi les programmes ordinaires en les analysant et en prévenant les utilisateurs de tout changement.



Son travail initial effectué, le virus redonne le contrôle au programme infecté.



Lorsque l'utilisateur lance un autre programme, le virus dormant se réveille.



Il se copie dans le logiciel sain et peut aller infecter un autre ordinateur ou une disquette.

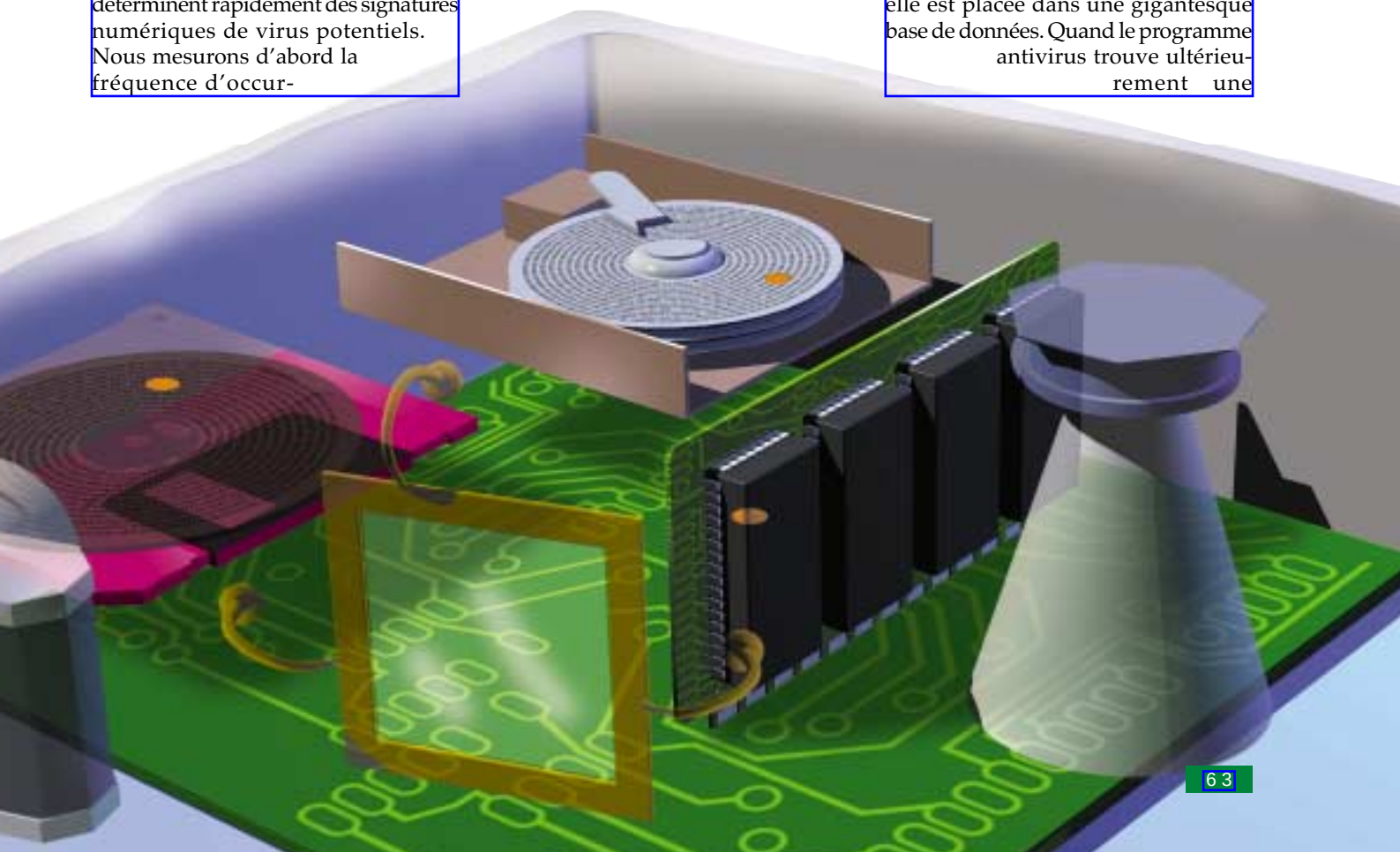
mination de virus spécifiques nécessitent une analyse détaillée de chaque nouveau virus. Des spécialistes doivent identifier des séquences inhabituelles d'instructions qui apparaissent dans le programme viral, mais pas dans les programmes normaux. Ce processus est fondé sur une bonne connaissance des virus, mais aussi sur l'intuition. Ces spécialistes élaborent également les prescriptions pour enlever le virus de n'importe quel ordinateur hôte. Comme six nouveaux virus sont créés chaque jour, nous avons mis au point des outils et des procédures automatiques, afin d'aider les spécialistes humains, voire de les remplacer.

Fondées sur des méthodes statistiques, ces techniques automatiques déterminent rapidement des signatures numériques de virus potentiels. Nous mesurons d'abord la fréquence d'occur-

rence de certaines courtes séquences d'octets dans un grand nombre de programmes normaux. Quand on nous envoie un nouveau virus, notre logiciel le détecte en trouvant la séquence qu'il est statistiquement le moins probable de rencontrer dans les programmes légitimes. Cette méthode est beaucoup plus rapide qu'une analyse manuelle, et les signatures identifiées conduisent à moins de fausses alarmes que les signatures choisies par des experts humains. Cette méthode heuristique, initialement mise au point par Fridrik Skulason et Franz Veldman, ressemble à un mécanisme qui avait semblé être celui du système immunitaire : on croyait naguère que les anti-

corps se modelaient d'après les envahisseurs ; de même, nos signatures sont réalisées spécifiquement pour chacun des nouveaux virus rencontrés.

Avec ses collègues, Stephanie Forrest a mis au point une autre méthode, copiée sur la «sélection clonale», qui semble être le mécanisme du système immunitaire : le corps produit d'emblée une grande variété de cellules immunitaires, mais seules prolifèrent les cellules qui reconnaissent l'agent pathogène. De même, dans le programme fondé sur cette méthode, des signatures sont engendrées au hasard, et chaque signature est ensuite comparée à tous les programmes de l'ordinateur non infecté ; quand une signature ne ressemble à rien de connu, elle est placée dans une gigantesque base de données. Quand le programme antivirus trouve ultérieurement une

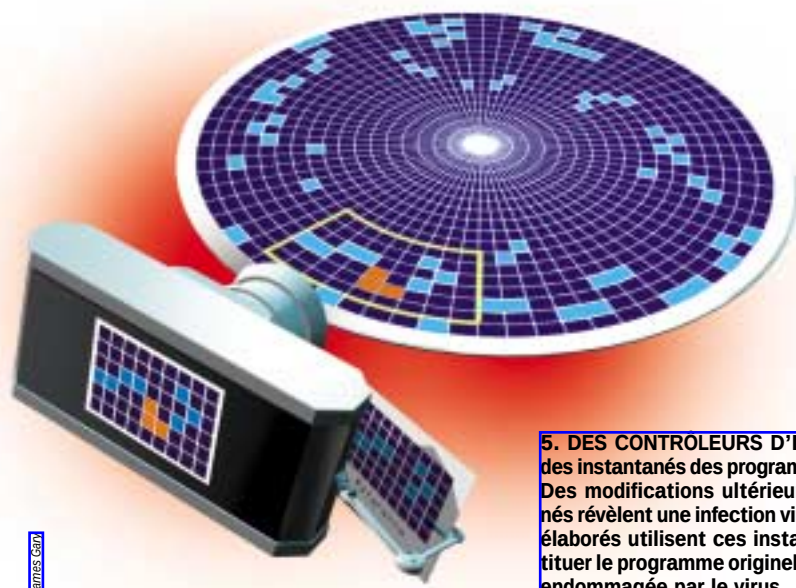




3. UN PROGRAMME ANTIVIRAL GENERAL surveille les comportements qui peuvent être dus à un virus en action, telle la modification de certaines zones de la mémoire vive ou de fichiers particuliers du disque dur. En bloquant ces comportements illicites, il n'élimine pas le virus, mais peut l'empêcher d'infecter d'autres programmes ou de perturber le fonctionnement de l'ordinateur.



4. UN ANALYSEUR DE SIGNATURES recherche sur les disques des fragments de programme qui apparaissent dans les virus connus.



5. DES CONTROLEURS D'INTEGRITE prennent des instantanés des programmes et des données. Des modifications ultérieures de ces instantanés révèlent une infection virale. Des algorithmes élaborés utilisent ces instantanés pour reconstituer le programme original à partir de la version endommagée par le virus.

telle signature dans un programme, il sait que le programme a été modifié, bien qu'une analyse ultérieure soit requise pour déterminer si un virus en est la cause.

La biologie est également à la base d'une autre technique antivirale : on recherche des parentés entre les nouveaux et les anciens virus. En effet, les programmeurs de virus utilisent souvent des parties de virus existants pour en créer de nouveaux. Ces parties, ou «gènes» viraux, permettent de retracer l'évolution historique des virus informatiques, comme le font les biologistes lorsqu'ils établissent les relations entre espèces vivantes. En étudiant de nombreux virus, nous construisons automatiquement un ensemble de signatures valables pour tous les membres de la famille virale, incluant des variantes précédemment inconnues. Cette technique réduit les problèmes de stockage des signatures : une seule signature de 20 octets peut reconnaître des dizaines de virus différents.

Nous avons également mis au point des techniques pour reconnaître des virus en analysant la présence de très courts segments de programme, chacun de trois à cinq octets de longueur. Ces segments minuscules représentent des instructions dont l'exécution est spécifique d'une infection virale. Bien que des logiciels classiques puissent en contenir certains, leur répétition témoigne d'une infection virale. Les logiciels antiviraux en détectent la présence et, ce qui est plus important, reconnaissent de nombreux virus sans les avoir rencontrés auparavant.

La propagation des virus en milieu naturel

Depuis 1990, nous avons étudié les virus sur une population de plusieurs centaines de milliers d'ordinateurs qui nous avaient été confiés par des clients. Nous enregistrons le lieu et la date de chaque incident, le nombre d'ordinateurs ou de disquettes infectés et l'identité des virus. Ces statistiques nous ont permis de comprendre la propagation des infections virales dans le milieu naturel. Seulement cinq pour cent des virus connus ont été observés dans notre échantillon, et certains n'ont été vus qu'une seule fois. Les dix virus les plus fréquents déclenchent deux tiers des incidents, et leur prévalence est semblable : au cours du temps, le nombre de ces virus à succès augmente

linéairement jusqu'à atteindre un plateau ; ensuite, ils continuent d'apparaître à un rythme constant dans les ordinateurs, et quelquefois ils disparaissent complètement.

Afin de comprendre ces caractéristiques, nous avons utilisé des modèles mathématiques élaborés par les épidémiologistes. Les modèles les plus simples prédisent l'évolution

d'une infection à partir d'un petit nombre de paramètres : le «taux de naissance», c'est-à-dire la vitesse à laquelle les individus malades infectent les autres, et le «taux de mortalité», la vitesse à laquelle un individu malade meurt ou est guéri. Lorsque le quotient de ces deux quantités est inférieur à un seuil, l'infection disparaît rapidement. Plus ce quotient est élevé et plus, en l'absence de mesures prophylactiques ou de réactions immunitaires, le nombre de personnes infectées augmente rapidement.

Toutefois, cette théorie simple ne rend pas bien compte de l'évolution des virus informatiques, car elle stipule que, sauf quand le quotient des naissances et des morts est proche de la valeur critique, les virus disparaissent ou se propagent à toute la population. Or, de nombreux virus infectent une très faible proportion de la population et restent à ce niveau. Pourquoi cette évolution ? Parce que la théorie suppose qu'un individu a la même chance de contaminer n'importe quel autre individu de la population à risque. En informatique, ce n'est pas le cas, et l'on doit compliquer la théorie pour décrire la structure en groupes fermés de la population qui utilise les ordinateurs : en moyenne, chaque personne ne partage des logiciels et des données qu'avec un petit nombre de personnes, et tous les échanges prennent place à l'intérieur de groupes. Si Philippe échange des logiciels avec Pascale et Pascale avec Françoise, alors, il est raisonnable de penser que Philippe et Françoise peuvent échanger des virus.

Des simulations informatiques ont montré que la proximité des contacts ralentit la croissance des épidémies conformément à nos observations. Des échanges peu fréquents réduisent la probabilité d'une épidémie et abaissent le niveau du plateau, mais n'expliquent pas complètement les données.

L'évolution en action

De même que les disettes, les campagnes de santé publique ou les migrations modifient le cours des épidémies biologiques, des changements de l'environnement informatique sont responsables de plusieurs époques distinctes dans l'histoire de la virologie informatique. Jusqu'en 1992, les virus infectant les programmes ou les secteurs de démarrage se trouvaient

Les virus de messagerie électronique

La croissance rapide du réseau Internet accroît proportionnellement les menaces liées au contenu des messageries électroniques, et plus particulièrement, aux virus informatiques. Un message électronique qui transite sur le réseau peut être séparé en trois parties : l'en-tête, le corps du message et les fichiers attachés. La principale cible des virus informatiques est le fichier attaché. Ces fichiers sont soit des programmes exécutables, soit des documents. Aujourd'hui, on se prémunit contre ce type d'infection informatique par deux approches principales : la protection répartie et la protection centralisée.

Dans la protection répartie, chaque poste susceptible de recevoir un message est protégé. La plupart des programmes antiviraux du marché disposent de modules de surveillance. Ces derniers détectent la présence du virus lorsque les éléments attachés sont exécutés ou ouverts. Malheureusement, cette méthode n'empêche pas la propagation du virus sur l'ensemble des postes des destinataires de messages : si, sur certains postes infectés, le virus n'est pas éradiqué, l'épidémie peut s'étendre. De surcroît, la détection n'intervient qu'à l'ouverture du fichier. Dès lors, un fichier attaché infecté pourra être transmis d'un utilisateur à l'autre sans qu'aucune alerte soit donnée.

Certains programmes antiviraux possèdent des modules spécifiques pour la messagerie électronique. Ces programmes décomposent le message et l'analysent sans ouvrir ni exécuter le fichier attaché. Si cette détection précoce évite l'épidémie, elle dépend du type de messagerie électronique et n'empêche pas la propagation d'un virus infecté à de nombreux utilisateurs. Ainsi, une note de service envoyée à l'ensemble du personnel d'une société entraînera de nombreuses alertes.

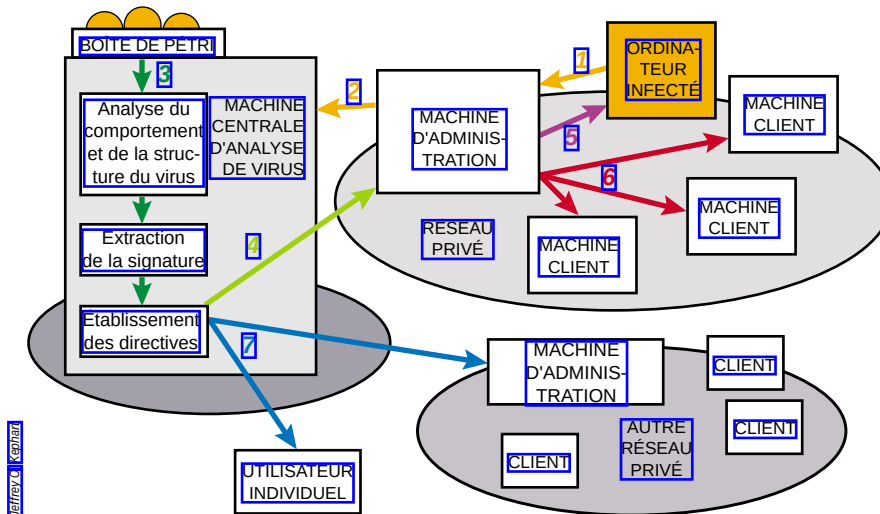
L'autre approche, nommée protection centralisée, consiste à utiliser une machine de contrôle. Tous les messages qui transitent passent par cette machine. À leur arrivée, les messages sont décomposés et décompressés (les fichiers attachés sont souvent compressés). Sur la machine centrale, des logiciels antivirus éradiquent alors les éventuels virus avant de faire suivre le message. Cette solution a l'avantage d'être préventive et centralisée : la note de service infectée envoyée à l'ensemble du personnel sera bloquée avant d'atteindre ses destinataires. Malheureusement, ces solutions ne fonctionnent qu'avec certains types de messageries.

La dernière approche qui s'apparente également à de la protection centralisée, n'est pas préventive : elle consiste à analyser tous les messages présents sur une machine centrale. Cette machine centrale, ou serveur de messagerie, vérifie l'innocuité des messages avant qu'ils ne parviennent à l'utilisateur. Cette solution est encore peu répandue, mais elle présente l'intérêt d'être économique en terme de ressource mémoire et de système.

Quelle que soit la solution mise en œuvre, l'utilisation de l'Internet et des messageries électroniques doit se faire avec une extrême prudence. Sans protection adéquate, quelques règles élémentaires de conduite peuvent éviter le pire : ne pas ouvrir un message en provenance d'un expéditeur inconnu, ne pas exécuter de programmes ni ouvrir de document attaché sans en connaître l'origine et le but, sauvegarder sur disquette les zones et les fichiers sensibles.

Sans ces précautions, le *surf and buy* («se promener sur l'Internet et acheter») peut rapidement se transformer par un *surf and die* («se promener» sur l'Internet et mourir) pour les disques durs et les informations des internautes non avertis.

Stéphane BOUCHÉ, Société OMNISET



6. DANS LES RÉSEAUX, des systèmes immunitaires informatiques empêcheront la prolifération des virus. Un ordinateur infecté envoie une copie du programme suspect à une machine d'administration (1) qui, à son tour, envoie ce programme, sous forme codée, à une machine centrale d'analyse de virus (2). Cette machine cultive le virus dans une «boîte de Pétri» informatique, où il analyse son fonctionnement et sa structure (3). Les recommandations qui en résultent sont renvoyées vers la machine d'administration (4), qui les renvoie tout d'abord vers l'ordinateur infecté (5), puis vers les autres machines du réseau local (6). Les autres abonnés du monde entier reçoivent périodiquement des remises à jour d'antivirus qui les protègent des nouveaux virus (7).

en quantités égales, et leur nombre croissait légèrement. Puis, les virus de programmes sont devenus moins fréquents, tandis que le nombre de virus de secteur de démarrage continuait à augmenter. Entre fin 1992 et fin 1995, ces derniers régnèrent sans partage. Pourquoi les virus de programmes se sont-ils éteints?

Nous supposons qu'ils ont été bloqués par l'avènement du système d'exploitation *Windows 3.1*, une amélioration du système *MS-DOS* utilisé sur les ordinateurs compatibles PC à partir de 1992 : en présence de certains virus qui infectent les programmes, le système *Windows 3.1* se bloque, de sorte que les utilisateurs se sont débarrassés des virus (parfois en vidant le contenu du disque dur et en installant à nouveau tous les logiciels), même quand ils ignoraient que leurs problèmes provenaient d'un virus. En revanche, les virus de démarrage coexistent pacifiquement avec *Windows 3.1*, ils ne gênent pas leur hôte avant que l'infection ne se déchaîne.

L'utilisation générale de *Windows 95*, un autre système d'exploitation, a provoqué le brusque déclin des virus de démarrage. Ce système d'exploitation prévient l'utilisateur de la plupart des changements survenant dans la zone de démarrage, si bien que les virus ne peuvent s'y développer. Lors de notre recensement, nous avons observé quelques virus de démarrage spécifiques à *Windows 95*

et à d'autres systèmes d'exploitation à 32 bits, mais ils ont peu de chances de se multiplier.

Aujourd'hui, l'ère des virus de macros a commencé. Ces virus, attachés aux fichiers de données, sont échangés plus fréquemment que les virus attachés aux programmes : ils se transmettent plus rapidement que les autres virus. À l'heure des réseaux, des programmes de courrier électronique et de transfert de fichiers élaborés permettent de partager des programmes et des documents plus rapidement et plus facilement qu naguère, ce qui amplifie le problème.

Les virus de macros sont aussi les premiers qui exploitent la tendance croissante à l'interopérabilité des ordinateurs : un virus qui infecte des fichiers *DOS* ne met pas en danger un *Macintosh*, par exemple, parce que les instructions de copie des systèmes *DOS* diffèrent de celles des *Macintosh* ; en revanche, un virus de macros peut infecter n'importe quel ordinateur du moment qu'il possède un programme vulnérable. Le fait que le traitement de texte *Word* fonctionne sur une grande variété d'ordinateurs permet à *Concept*, ainsi qu'à d'autres virus de macros, de franchir les frontières entre systèmes.

Aujourd'hui, les virus se déplacent d'un ordinateur à un autre quand les utilisateurs s'échangent volontairement et manuellement des disquettes ou d'autres supports numériques ;

on parvient à enrayer les épidémies, car même les virus les plus efficaces mettent des mois, voire des années, pour se propager. Dans les réseaux, les virus se propagent beaucoup plus vite. En 1988 déjà, Robert Tappan Morris avait lancé le «vers de l'Internet», un programme qui exploitait les défauts de sécurité du système d'exploitation *UNIX* et qui a envahi des centaines d'ordinateurs sur toute la Terre en moins d'une journée.

Un système immunitaire numérique

Les nouvelles techniques de chargement automatique des programmes et des données aggravent le problème. Les programmes de courrier électronique permettent l'envoi de textes ou de feuilles de calcul à des messages : lorsque l'on ouvre le document attaché, le programme adapté s'ouvre, et tous les virus de macros contenus dans le document sont exécutés. Plus grave encore, des «agents intelligents», c'est-à-dire des programmes qui parcourent le réseau à la place des utilisateurs, enverront périodiquement des courriers électroniques et ouvriront automatiquement les documents attachés ; les virus se propageront à des vitesses bien supérieures à celles d'aujourd'hui.

Ces changements de l'écosystème numérique imposent la recherche rapide d'une parade automatique aux problèmes posés par les virus. Les Sociétés *IBM*, *Symantec* et *McAfee* mettent au point des techniques d'analyse et d'éradication automatiques des nouveaux virus. Chez *IBM*, nous créons une sorte de système immunitaire pour les réseaux. De même que le système immunitaire des vertébrés crée des cellules qui reconnaissent et combattent de nouveaux agents pathogènes après quelques jours d'exposition, un système immunitaire informatique peut donner, en quelques minutes, des directives pour reconnaître et éradiquer des virus nouveaux. Dans notre prototype, des ordinateurs compatibles PC, connectés par un réseau à un ordinateur central, exécutent tous le programme *AntiVirus* d'*IBM*. Pour détecter la présence d'un virus, le programme *AntiVirus* utilise diverses méthodes heuristiques : il observe des modifications du comportement de l'ordinateur, recherche des modifications

suspectes des programmes ou analyse des signatures ; il utilise le réseau pour envoyer tout programme suspect à un ordinateur d'administration du réseau.

À la réception d'un programme potentiellement infecté, l'ordinateur d'administration l'envoie à un ordinateur d'analyse de virus qui se comporte comme une «boîte de Pétri» numérique : les programmes de cette machine de test piègent le virus à l'aide de programmes spécialement conçus, nommés «leurres», qui sont exécutés, copiés ou manipulés. Cette phase est particulièrement utile pour faire se découvrir les virus polymorphes. Ces virus sont des virus de macros dont les lignes de programme sont cryptées, de sorte qu'un logiciel antiviral classique est en général incapable de reconnaître sa signature. De plus, lorsqu'ils se dupliquent, les virus polymorphes utilisent un code de chiffrement généré aléatoirement : les signatures sont modifiées à chaque copie. Pour se propager, un virus doit infecter des programmes qui sont souvent utilisés, si bien que l'activité des leurres fait ressortir le code du virus. Ainsi le virus se découvre, et on peut l'éradiquer. Pendant cette phase, on peut aussi comprendre d'autres caractéristiques du virus.

Les leurres infectés sont analysés par d'autres éléments du système immunitaire, qui extraient la signature du virus et fournissent des directives pour le détecter et l'enlever. À partir d'un programme infecté, l'analyseur de virus met généralement moins de cinq minutes pour engendrer ses directives. La machine d'analyse envoie cette information à l'ordinateur qui a demandé de l'aide ; ce dernier incorpore l'information dans une base de données perma-

nente contenant les remèdes à utiliser pour les virus connus. Il peut alors localiser et enlever toutes les copies du virus, et il est définitivement protégé de futures rencontres.

Lorsque l'ordinateur infecté est relié à d'autres machines par l'intermédiaire d'un réseau local, il est tout à fait possible que le virus les ait également envahis. Aussi les nouvelles directives de surveillance et d'éradication sont-elles envoyées automatiquement aux ordinateurs voisins, de sorte que chaque machine peut vérifier immédiatement la présence éventuelle du nouveau virus. Puisque les virus informatiques utilisent le réseau pour se répandre rapidement, l'utilisation du réseau fournit l'antidote aux machines qui en ont besoin. En envoyant aux clients d'un site infecté les dernières directives, on peut, en principe, immuniser très rapidement toute la population des ordinateurs contre l'émergence d'un nouveau virus.

Malgré les efforts, les virus informatiques cohabiteront avec nos ordinateurs. Chaque type de virus évoluera à sa façon, mais, collectivement, la coévolution des virus informatiques et des techniques antivirales se poursuivra comme, en biologie, le font les parasites et leurs hôtes. Ces deux composantes évolueront aussi en réaction aux changements de l'environnement informatique. Par exemple, les agents logiciels itinérants devront être protégés des ordinateurs qu'ils traversent, tout comme ces derniers de la malveillance de certains agents logiciels. Peut-être les virus et les systèmes immunitaires informatiques sont-ils les précurseurs d'un riche écosystème de vie artificielle où les proies et les prédateurs vivront, mourront et coopéreront.

Jeffrey KEPHART, Gregory SORKIN, David CHESS et Steve WHITE travaillent au Centre de recherche Thomas Watson de la Société IBM, à Yorktown Heights.

Rogue Programs : Viruses, Worms and Trojan Horses, sous la direction de Lance J. Hoffman, Van Nostrand Reinhold, 1990.

Frederick B. COHEN, *A Short Course on Computer Viruses*, deuxième édition, John Wiley & Sons, 1994.

Robert SLADE, *Robert Slade's Guide to Computer Viruses*, Springer-Verlag, 1994.

Jeffrey O. KEPHART, Gregory B. SORKIN, William C. ARNOLD, David M. CHESS, Gerald J. TESAURO et Steve R. WHITE, *Biologically Inspired Defenses against Computer Viruses*, in *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montréal, 20-25 août 1995, Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

Mark LUDWIG, *Du virus à l'antivirus : guide d'analyse*, Éditions Dunod, 1997.

Des liens vers de nombreux sites qui traitent des virus sont sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com>

Le riz génétiquement modifié

PAMELA RONALD

Les biologistes utilisent le génie génétique pour protéger le riz contre les maladies.

Le riz est l'aliment le plus important du Globe : près de deux milliards de personnes ont une alimentation essentiellement à base de cette céréale. Les rizières couvrent plus de 144 millions d'hectares et procurent 560 millions de tonnes de grains par an. Toutefois on ne récolte pas tout le riz qui pousse : les insectes, les bactéries, les virus et les moisissures prélèvent une dîme notable.

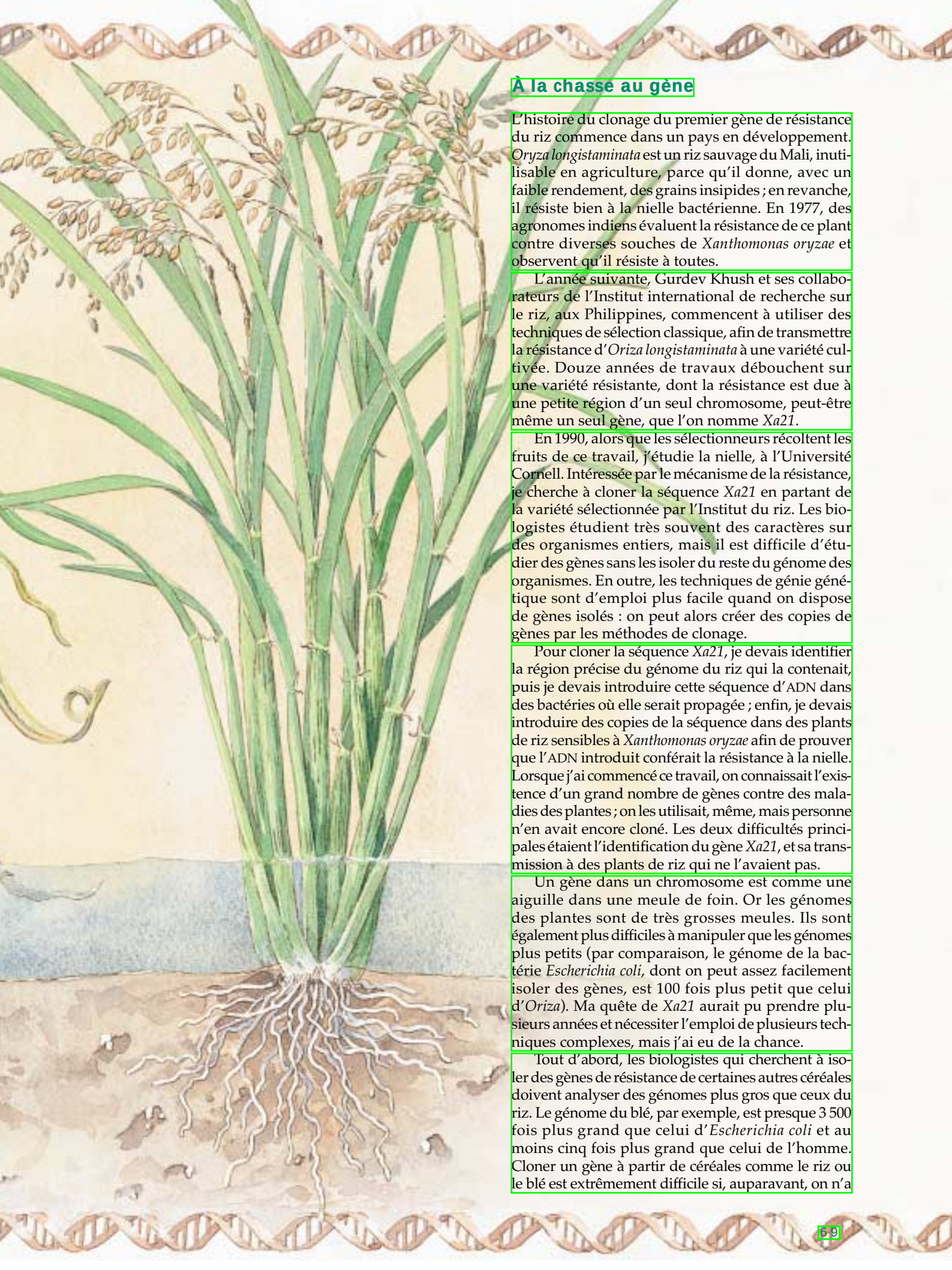
La nielle bactérienne, notamment, est un des pires fléaux de l'Asie et de l'Afrique : cette maladie est due à des bactéries *Xanthomonas oryzae*, qui se propagent rapidement par l'intermédiaire de l'eau, de plant à plant, de champ à champ. Une fois infectées, les feuilles se couvrent de lésions, puis jaunissent et se flétrissent en quelques jours. Dans les champs le plus gravement touchés, la nielle détruit jusqu'à la moitié de la récolte.

Cependant les plants de riz possèdent parfois des gènes qui les protègent contre de nombreuses maladies, notamment contre la nielle. Les agriculteurs admettent qu'aucune variété n'a tous les gènes de résistance contre toutes les maladies ; certains plants sont plus résistants que d'autres à certaines maladies, moins à d'autres. Aussi, depuis près d'un siècle, les agronomes cherchent à conférer les performances des variétés rustiques aux variétés cultivées, mais la sélection par la génétique classique est lente, et les sélectionneurs mettent des décennies à transmettre des caractères d'une variété à une autre.

Grâce aux techniques du génie génétique, on introduit aujourd'hui des gènes de résistance directement dans des plants de riz, et l'on gagne ainsi des années de travail. Mes collègues et moi avons récemment cloné le premier de ces gènes de résistance du riz – un gène protégeant contre des formes classiques de nielle –, puis nous l'avons utilisé pour créer des plants résistants.

1. LES PLANTS DE RIZ sont sensibles à de nombreuses maladies, telle la nielle bactérienne, qui se manifeste par des lésions des feuilles et un rendement réduit (à gauche). La maladie se propage par les gouttelettes d'eau contaminée par les bactéries, qui s'introduisent par des lésions des feuilles. En quelques jours, des lésions jaunes se développent sur les feuilles infectées. Les plants les plus jeunes succombent généralement à la maladie, sauf quand ils possèdent des gènes de résistance (à droite).





À la chasse au gène

L'histoire du clonage du premier gène de résistance du riz commence dans un pays en développement. *Oryza longistaminata* est un riz sauvage du Mali, inutilisable en agriculture, parce qu'il donne, avec un faible rendement, des grains insipides ; en revanche, il résiste bien à la nielle bactérienne. En 1977, des agronomes indiens évaluent la résistance de ce plant contre diverses souches de *Xanthomonas oryzae* et observent qu'il résiste à toutes.

L'année suivante, Gurdev Khush et ses collaborateurs de l'Institut international de recherche sur le riz, aux Philippines, commencent à utiliser des techniques de sélection classique, afin de transmettre la résistance d'*Oryza longistaminata* à une variété cultivée. Douze années de travaux débouchent sur une variété résistante, dont la résistance est due à une petite région d'un seul chromosome, peut-être même un seul gène, que l'on nomme *Xa21*.

En 1990, alors que les sélectionneurs récoltent les fruits de ce travail, j'étudie la nielle, à l'Université Cornell. Intéressée par le mécanisme de la résistance, je cherche à cloner la séquence *Xa21* en partant de la variété sélectionnée par l'Institut du riz. Les biologistes étudient très souvent des caractères sur des organismes entiers, mais il est difficile d'étudier des gènes sans les isoler du reste du génome des organismes. En outre, les techniques de génie génétique sont d'emploi plus facile quand on dispose de gènes isolés : on peut alors créer des copies de gènes par les méthodes de clonage.

Pour cloner la séquence *Xa21*, je devais identifier la région précise du génome du riz qui la contenait, puis je devais introduire cette séquence d'ADN dans des bactéries où elle serait propagée ; enfin, je devais introduire des copies de la séquence dans des plants de riz sensibles à *Xanthomonas oryzae* afin de prouver que l'ADN introduit conférerait la résistance à la nielle. Lorsque j'ai commencé ce travail, on connaissait l'existence d'un grand nombre de gènes contre des maladies des plantes ; on les utilisait, même, mais personne n'en avait encore cloné. Les deux difficultés principales étaient l'identification du gène *Xa21*, et sa transmission à des plants de riz qui ne l'avaient pas.

Un gène dans un chromosome est comme une aiguille dans une meule de foin. Or les génomes des plantes sont de très grosses meules. Ils sont également plus difficiles à manipuler que les génomes plus petits (par comparaison, le génome de la bactérie *Escherichia coli*, dont on peut assez facilement isoler des gènes, est 100 fois plus petit que celui d'*Oryza*). Ma quête de *Xa21* aurait pu prendre plusieurs années et nécessiter l'emploi de plusieurs techniques complexes, mais j'ai eu de la chance.

Tout d'abord, les biologistes qui cherchent à isoler des gènes de résistance de certaines autres céréales doivent analyser des génomes plus gros que ceux du riz. Le génome du blé, par exemple, est presque 3 500 fois plus grand que celui d'*Escherichia coli* et au moins cinq fois plus grand que celui de l'homme. Cloner un gène à partir de céréales comme le riz ou le blé est extrêmement difficile si, auparavant, on n'a



pas une vague idée de sa localisation dans le génome ou de sa séquence (il est plus facile de retrouver un ami à Paris si l'on connaît son adresse ou, au moins, son nom de famille et son prénom).

En 1990, toutefois, j'ai jugé que le clonage de la séquence *Xa21* était possible, car Steven Tanksley et Susan McCouch, à l'Université Cornell, venaient d'établir une carte qui pouvait guider l'exploration de l'énorme génome du riz. La technique de clonage que j'ai utilisée est «cartographie» : comme son nom l'indique, elle nécessite de connaître approximativement la position de repères, ou marqueurs, sur l'ADN. La carte génétique élaborée par S. Tanksley et S. McCouch indiquait l'existence de plusieurs centaines de marqueurs utiles sur les douze chromosomes du riz.

Pendant quelques années, nous avons utilisé cette carte pour pister *Xa21*. Nous avons examiné plus d'un millier de plants de riz, afin de mesurer à quelle fréquence les marqueurs connus de l'ADN étaient couplés avec une résistance à la nielle bactérienne. Nous examinions les échanges et les réarrangements entre chromosomes qui ont lieu au cours de la reproduction sexuée : plus deux sites sont proches sur un chromosome, moins ils ont de chances d'être séparés pendant la recombinaison génétique qui accompagne la reproduction sexuée. Ainsi plus la fréquence de transmission d'une résistance couplée à celle d'un marqueur donné était élevée, plus le gène de résistance devait être proche de ce marqueur.

Par un extraordinaire coup de chance, le premier marqueur chromosomique dont nous avons montré la proximité de *Xa21* fut particulièrement utile. Un dimanche de mai 1994, deux ans après avoir créé mon laboratoire à

2. LES METHODES CLASSIQUES DE SELECTION ne procurent que très lentement des variétés de riz résistant aux maladies. Quand on féconde un plant sensible à une maladie, mais qui possède un caractère utile (production d'un nombre élevé de grains ou bien de grains à goût agréable), avec le pollen d'un plant résistant, les descendants reçoivent un mélange aléatoire du matériel génétique des deux parents (*barres colorées*). Si l'on croise ensuite les descendants résistants avec le plant sensible initial, on obtient des descendants qui possèdent en proportion supérieure des caractères utiles des parents d'origine. À chaque croisement, la sélection des descendants résistants garantit la présence du gène de résistance (ici le gène *Xa21*).

l'Université de Davis, je découvris que la séquence du marqueur était identique à celle de nombreux gènes de résistance récemment clonés à partir de plants de tabac, de tomate, de lin et de moutarde. Seule au laboratoire ce matin-là, j'appelai mon collègue et ami John Salmeron, de l'Université de Berkeley, et lui demandai de comparer minutieusement ma séquence avec celle de son gène de résistance de tomate. Nous étions surpris et excités de trouver tant de ressemblances entre des gènes de plantes aussi différentes.

Avec mon équipe, nous avons alors passé toute l'année qui a suivi à cloner des séquences qui pouvaient être la séquence *Xa21* que nous cherchions et à préparer leur insertion dans des plants de riz. Nous savions que le test décisif serait le transfert de la séquence isolée dans un plant de riz normalement sensible à *Xanthomonas oryzae* : si nous avions cloné le bon gène, les plants transgéniques obtenus seraient résistants à la nielle bactérienne. Nous étions impatients de commencer ces expériences, mais nous devions résoudre un problème de taille : nous ne savions pas introduire des gènes dans des cellules de riz, et très peu de laboratoires savaient pratiquer ce procédé de «transformation» du riz.

Dans la ligne de mire

Le transfert de gènes dans des cellules de plantes est une opération difficile : de nombreux types de cellules végétales sont réfractaires à l'incorporation d'ADN étranger. Toutefois, en 1987, à l'Université Cornell, John Sanford mit au point un canon capable de projeter des particules microscopiques dans des cellules intactes (voir *Les plantes transgéniques*, par Charles Gasser et Robert Fraley, *Pour La Science*, août 1992). Les premiers prototypes de J. Sanford fonctionnaient à la poudre noire, mais les modèles ultérieurs utilisaient de l'hélium comprimé pour tirer de petites billes d'or d'un diamètre inférieur au centième de millimètre ; recouvertes d'ADN, elles apportaient ainsi l'ADN au cœur des cellules.

En 1991, personne n'avait encore appliqué cette technique au riz, mais, quand nous fûmes prêts à tester nos séquences clonées, le Laboratoire international de biotechnologie agricole tropicale accepta de nous aider : une équipe utilisa le canon de J. Sanford pour transformer des cellules de riz de

la variété *Taipei 309* (une variété ancienne qui n'est plus cultivée, mais que nous avons choisie, car elle est sensible à la bactérie *Xanthomonas oryzae* et facilement transformable) avec notre ADN cloné. Nous avons cultivé 1 500 plants transformés ; chacun contenait dans son génome l'ADN cloné. Après six semaines de culture, nous avons testé leur résistance à la nielle bactérienne.

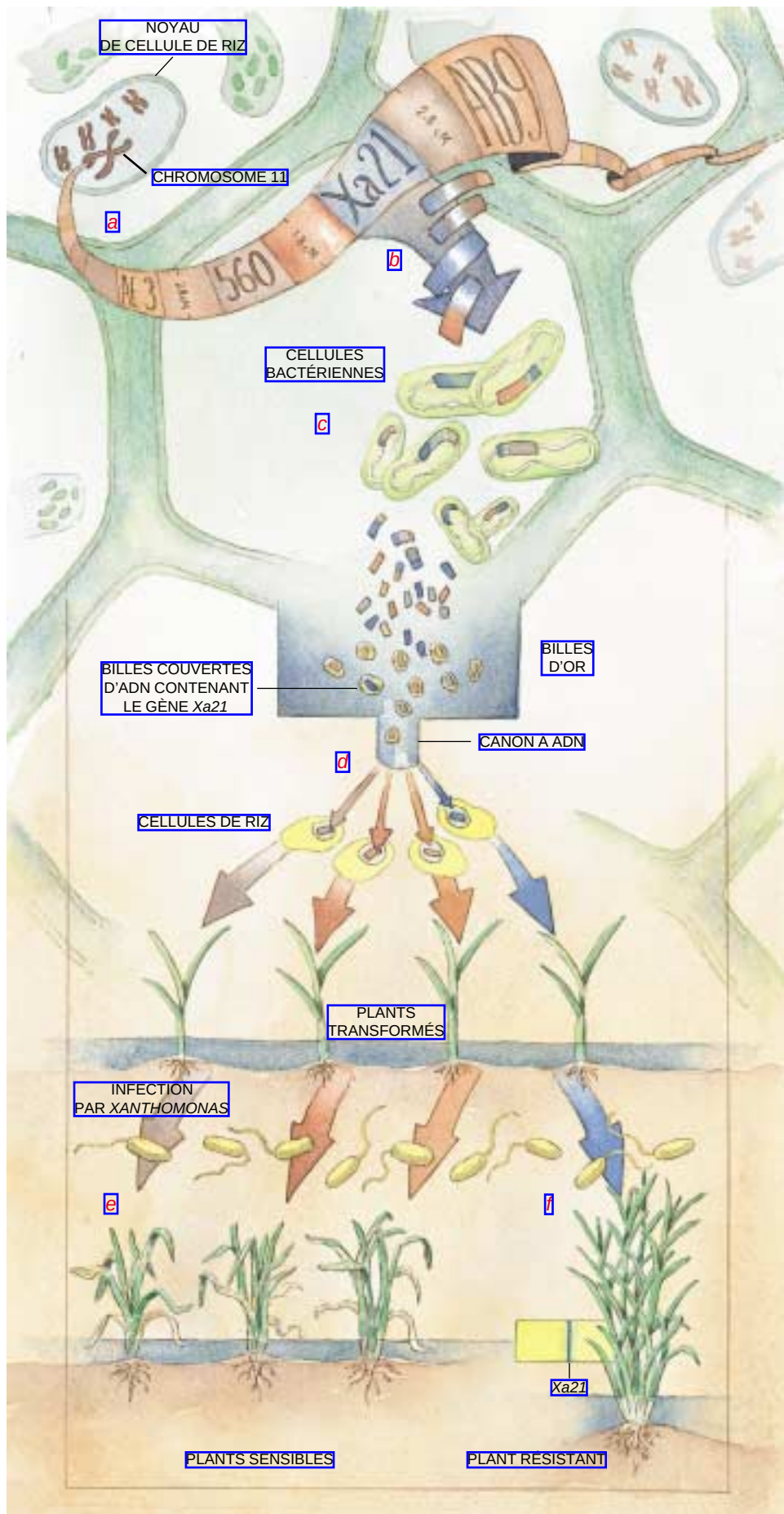
Nous avons infecté chaque plant transgénique en taillant ses feuilles à l'aide de ciseaux préalablement trempés dans une suspension bactérienne. Puis, dix jours plus tard, nous avons examiné les plants à la recherche de lésions dues aux bactéries. Cinquante des 1 500 plants transgéniques étaient résistants : leurs lésions étaient 75 à 90 pour cent plus réduites que celles des plants non transformés. Dans chacun des 50 plants résistants, le segment d'ADN transformé contenait un gène intact de résistance à la nielle.

La résistance distribuée

Ayant ainsi cloné la séquence *Xa21*, nous avons montré qu'elle se transmettait dans la descendance des plants transgéniques par autofécondisation. Nous avons soumis nos plants transgéniques à l'action de 31 souches différentes de *Xanthomonas oryzae* provenant de huit pays, d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine. Les plants résistèrent à l'infection par 29 de ces souches, exactement comme le riz sauvage africain.

Nous cherchons maintenant à introduire la séquence *Xa21* dans des variétés qui, contrairement à *Taipei 309*, sont importantes sur le plan agricole. En collaboration avec le Laboratoire international de biotechnologie agronomique tropicale, nous avons introduit la séquence *Xa21* dans deux variétés courantes – *IR64* et *IR72* – cultivées sur

3. LE GENIE GENETIQUE permet de transmettre une résistance à une maladie quand on connaît les gènes responsables de cette résistance. Pour isoler le gène *Xa21*, l'auteur a déterminé sa position approximative sur le chromosome 11 du riz (a), puis a fabriqué des segments d'ADN qui comprenaient cette région (b). L'ADN a ensuite été reproduit dans des bactéries (c), les copies ont été placées sur de petites billes en or, puis projetées dans les cellules de variétés de riz sensibles (d). Certaines cellules ont intégré l'ADN introduit, mais pas le gène de la résistance (e) ; quelques-unes seulement ont effectivement intégré dans leur génome le gène *Xa21* intact et ont formé ultérieurement des plants résistants (f).



environ neuf millions d'hectares en Asie et en Afrique. Nos nouveaux plants transgéniques résistent à la nielle. De même, nous avons communiqué la résistance à la variété *Ming Hui 63*, cultivée en Chine.

Simultanément, nous avons envoyé la séquence *Xa21* à de nombreux biologistes d'Europe, d'Afrique, d'Asie et des États-Unis, afin qu'ils fassent eux-mêmes l'insertion dans les variétés de riz locales, mieux adaptées aux conditions de culture des diverses régions du Globe. Ces variétés possèdent de précieuses qualités, telles que résistance à la sécheresse, tolérance au froid, petite taille (pour résister au vent), ou résistance à des maladies et à des fléaux locaux. Les versions génétiquement modifiées seront identiques aux plants d'origine, à l'exception du transgène cloné, qui confère la résistance à la nielle bactérienne.

Les agronomes devront ensuite tester l'intérêt des variétés transgéniques, afin de déterminer si les modifications n'ont pas réduit les rendements, le goût des grains ou la robustesse des plants ; si les variétés transformées se comportent aussi bien que les variétés initiales de chaque région, des programmes de reproduction pourront être mis en place. Le gène de résistance à la maladie étant transmissible, les fermiers des pays en développement recevront des semences qu'ils feront eux-mêmes pousser pour obtenir leurs propres semences pour la saison suivante.

Les récoltes du futur

Le génie génétique est bien plus rapide et flexible que la sélection classique : quelques mois de travail procurent des variétés améliorées, à condition que l'on ait initialement cloné les gènes utiles que l'on veut introduire. Aucune compatibilité n'est requise entre donneur et receveur : les gènes peuvent provenir de variétés, voire d'espèces différentes.

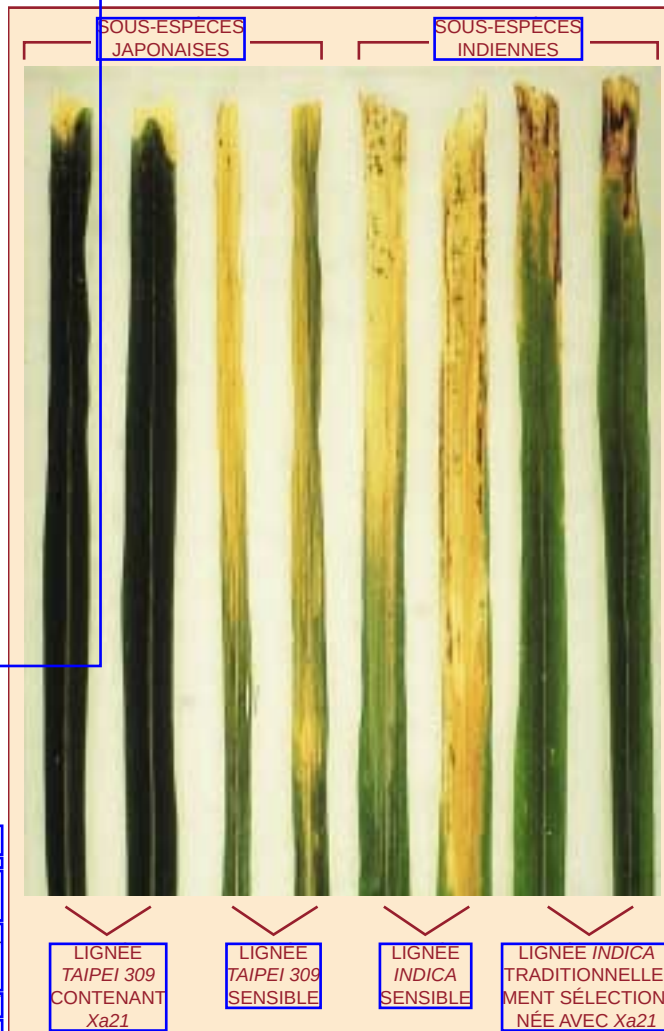
Aujourd'hui on peut protéger contre la nielle d'autres céréales que le riz. Une espèce de *Xanthomonas* infecte la plupart des cultures. En Floride, 99 pour cent des cultures d'arbres du genre *Citrus* y sont sensibles : les planteurs doivent surveiller de très près les infections bactériennes pour éviter les épidémies et, au milieu des années 1980, ils ont dû brûler plus de 20 millions d'orangers pour écarter tout risque d'épidémie. L'État américain a dépensé plus de 200 millions de francs pour éradiquer la maladie, et les pertes de production qui ont touché des centaines de producteurs ont été encore supérieures. Protégera-t-on les citronniers et les autres cultures en manipulant les gènes de résistance à la nielle bactérienne du riz ?

Le génie génétique peut également aider les agriculteurs à lutter contre

des maladies qui menacent les plants résistants en champ : après des mutations, certains agents pathogènes vainquent les défenses des plantes, de sorte que les producteurs doivent en permanence identifier les gènes utiles et les introduire, aussi bien par les techniques classiques que par génie génétique, afin de minimiser la sensibilité aux maladies. Comme on connaît aujourd'hui de nombreux gènes de résistance, on peut les cloner et, éventuellement, trouver des combinaisons de gènes qui conféreront une résistance renforcée ; de même, des combinaisons d'antibiotiques ou de médicaments antiviraux combattent plus efficacement que des médicaments isolés des micro-organismes tels que les bactéries de la tuberculose ou le virus de l'immunodéficience humaine.

Nous espérons également faire acquérir, en une seule transformation, une résistance à plusieurs agents pathogènes. Il arrive que des agriculteurs ne puissent pas utiliser des variétés de riz dotées de la résistance à la nielle bactérienne parce qu'elles ne résistent pas à d'autres agents pathogènes qui sévissent localement. L'un des plus graves fléaux est le criquet brun, un insecte qui cause des ravages considérables aux plants de riz dont il se nourrit, transmettant du même coup des agents pathogènes tels que les virus du rabougrissement. Nous collaborons avec des collègues chinois et anglais pour introduire une double résistance à la nielle bactérienne et au criquet brun dans plusieurs variétés importantes de riz, grâce à des gènes clonés, dont *Xa21*. Actuellement les biologistes clonent de plus en plus de gènes de résistance, et le nombre des combinaisons possibles s'accroît donc de façon exponentielle.

Les plantes transgéniques résistant aux maladies sont prometteuses. Bien que les agriculteurs n'en cultivent pas encore,



4. DES FEUILLES DE RIZ exposées à la bactérie *Xanthomonas oryzae* résistent à l'infection quand elles possèdent le gène *Xa21*, aussi bien dans notre variété transgénique *Taipei* (paire de gauche) que dans des plants sélectionnés de façon classique (paire de droite). D'importantes lésions jaunes (paires du centre) apparaissent sur les feuilles des plants sensibles qui sont infectées.

Pruniers et virus

Le maïs est la première plante génétiquement modifiée autorisée à la culture en France : c'est la preuve que les autorités ont accepté l'application du génie génétique pour l'amélioration des plantes. À Bordeaux, nous avons appliqué cette méthode à la lutte contre une maladie virale, la sharka.

Cette maladie, qui frappe surtout les arbres fruitiers à noyau (abricotiers, cerisiers, pêchers et pruniers), a été découverte en Bulgarie (en bulgare, son nom signifie «variole»), et elle s'est rapidement propagée dans tous les pays voisins. Les pays d'Europe centrale et les pays balkaniques en sont des foyers endémiques. La France a aujourd'hui une politique d'éradication très stricte : tout fruitier malade est arraché.

L'agent pathogène est un virus nommé plum pox virus (PPV). Les maladies à virus sont graves, parce que les plantes ne guérissent pas. Sélectionner des variétés résistantes semblait une démarche longue et incertaine, d'autant que l'on doutait de la nature monogénique ou polygénique des résistances. Entre temps, les arboriculteurs choisissaient des variétés fruitières tolérantes, dont la production fruitière n'est pas amoindrie par la maladie, mais qui propagent le virus.

Les progrès réalisés dans l'analyse du génome viral nous ont conduit à mettre en place une nouvelle stratégie de lutte, fondée sur la transgénèse, et qui consiste à intégrer le gène codant la protéine de capsid (l'«enveloppe») d'un virus, dans le génome d'une plante, afin de

produire des plantes résistantes. L'origine du travail est liée à l'identification de ce gène de capsid viral : nous avons découvert qu'une grosse protéine virale est traitée, après sa synthèse, par trois enzymes virales afin de former dix protéines, dont la protéine de capsid. C'est le gène qui code cette dernière qui nous intéressait. Nous l'avons identifié, puis intégré dans la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*, en 1992.

Puis nous avons utilisé la bactérie transformée pour modifier la plante hôte herbacée *Nicotiana benthamiana*, au cycle végétatif court. Nous avons ainsi observé que le gène transféré conférait la résistance contre la sharka. Encouragés par ce succès, nous sommes passé aux plantes ligneuses : en collaboration avec Ralph Scorza, des services agronomiques américains, nous avons transformé des cellules de prunier avec les bactéries génétiquement modifiées. Des cals se sont développés sur un milieu de régénération, puis les cals se sont différenciés en plantules. L'inoculation des pruniers par les virus de la sharka a révélé leur résistance : le virus ne se réplique pas dans la plante, parce que les cellules de la plante rejettent le transgène et le virus envahisseur. Les pruniers résistants ont été plantés dans divers pays frappés par la sharka ; les résultats de ces essais devraient permettre de valider la résistance de ces plantes dans les conditions naturelles d'infection.

Michel RAVELONANDRO

Station de pathologie végétale INRA, Bordeaux

des sociétés américaines entreprennent la commercialisation de diverses plantes transgéniques. Par exemple, la Société *Calgene* a produit la première tomate à pourrissement retardé (la tomate *Flavr Savr*), et un soja résistant à l'herbicide *Roundup* est commercialisé depuis 1996. Enfin, un maïs résistant aux herbicides a récemment reçu une autorisation de mise sur le marché aux États-Unis et au Canada.

Les pays industrialisés seront sans doute les premiers à profiter des produits transgéniques, car les agriculteurs des pays en développement n'ont généralement pas les moyens d'utiliser des techniques qui imposent l'emploi d'herbicides coûteux. En revanche, les pays industrialisés comme les pays en développement accepteront sans doute mieux les graines transgéniques résistant aux maladies que les plantes transgéniques résistant aux herbicides ou produisant des insecticides (on craint que ces dernières ne favorisent rapidement l'apparition d'insectes résistants aux insecticides).

Les promesses commerciales des

cultures transgéniques résistant aux maladies soulèvent des questions de propriété. En 1996, l'Université de Davis a créé un fonds international pour reconnaître la contribution des pays en développement au succès des programmes de recherche tel le clonage de la séquence *Xa21*, breveté par l'université. Financé par les revenus tirés de la commercialisation des plantes transgéniques dans le Tiers-Monde, ce fonds subventionne les études dans les pays en développement et garantit que les planteurs de ces régions obtiendront des semences transgéniques au même prix que des semences classiques. Le fonds

permettra ainsi aux chercheurs de l'université de breveter leurs inventions et de les convertir en produits commerciaux, tout en reconnaissant la valeur des contributions du Tiers-Monde.

Les possibilités du génie génétique sont bien supérieures à la transmission de gènes de résistance aux maladies. Elles devraient permettre le clonage de nombreux gènes végétaux utiles, tel le gène de la tolérance au froid ou à la sécheresse. Les biologistes disposent d'une palette très large : en y puisant, ils permettront aux agriculteurs de récolter davantage à partir de ce qu'ils auront semé.

Pamela RONALD est professeur adjoint de biologie végétale à l'Université de Davis.

G. SCHUMANN, *Plant Diseases : Their Biology and Social Impact*, American Phytopathological Society, 1991.

Peter T. WHITE, *Rice, the Essential Harvest*, in *National Geographic*, vol. 185, n° 5, pp. 48-79, mai 1994.

B.J. STASKAWICZ et al., *Molecular Genetics of Plant Disease Resistance*, in *Science*, vol. 268, pp. 661-667, 5 mai 1995.

Wen-Yuan SONG et al., *A Receptor Kinase-like Protein Encoded by the Rice Disease Resistance Gene, Xa21*, in *Science*, vol. 270, pp. 1804-1806, 15 décembre 1995.

B. BAKER et al., *Signaling in Plant-Microbe Interactions*, in *Science*, vol. 276, pp. 726-733, 2 mai 1997.

Zimbabwe, cité africaine

WEBBER NDORO

Du XII^e au XVII^e siècle, la cité de Zimbabwe fut le principal centre commercial d'Afrique australe. Les colons européens, niant le passé de l'Afrique, en ont effacé de nombreuses traces.



Le plus beau et le plus grand site archéologique de l'Afrique subsaharienne est à la limite Sud du plateau du Zimbabwe, dans la zone de partage des eaux entre les fleuves Limpopo et Zambèze : une haute tour conique, de longs murs circulaires en pierre et des objets provenant d'Asie témoignent de la prospérité ancienne de la ville qui domina le commerce et la vie culturelle du Sud de l'Afrique entre le XII^e et le XVII^e siècle. La civilisation qui s'est développée à Zimbabwe a produit une architecture et des sculptures caractéristiques, tels ces énigmatiques oiseaux, taillés dans la stéatite, que l'on ne retrouve nulle part ailleurs. C'est en mémoire de ce passé prestigieux que le nom de Zim-

babwe a été donné à l'ex-Rhodésie, lors de l'accession à l'indépendance de cette colonie britannique, en 1980.

Zimbabwe est entré dans la légende. Au XVI^e siècle, des marchands portugais qui reviennent de leur visite des comptoirs fondés en Angola et au Mozambique mentionnent un royaume à l'intérieur de l'Afrique : s'agit-il d'Ophir où, selon la Bible, le roi Salomon avait envoyé ses vaisseaux s'approvisionner en or? En 1667, dans son *Paradis perdu*, le poète anglais John Milton place d'ailleurs Ophir quelque part entre le Congo et l'Angola. Cette légende tenace, qui attribuait la construction de Zimbabwe à des populations sémites, a longtemps gêné l'étude archéologique de la cité ; puis le colo-

niaisme a empêché de reconnaître que la ville avait été créée par la culture shona, à l'Âge du fer africain.

Le contrôle de l'or

Construit entre 1100 et 1600, Zimbabwe ne semble pas avoir eu de plan directeur : la cité s'est adaptée aux évolutions de ses activités et de sa population. Beaucoup plus grand que les autres sites de la région, tels Danamombe, Khami, Naletale ou Domboshava, au Nord du Botswana, Manikweni, au Mozambique, ou Thulamela, au Nord de l'Afrique du Sud, Zimbabwe était une capitale économique et politique, sur la route la plus directe entre les gisements d'or du Nord, où les orpailleurs tamisaient

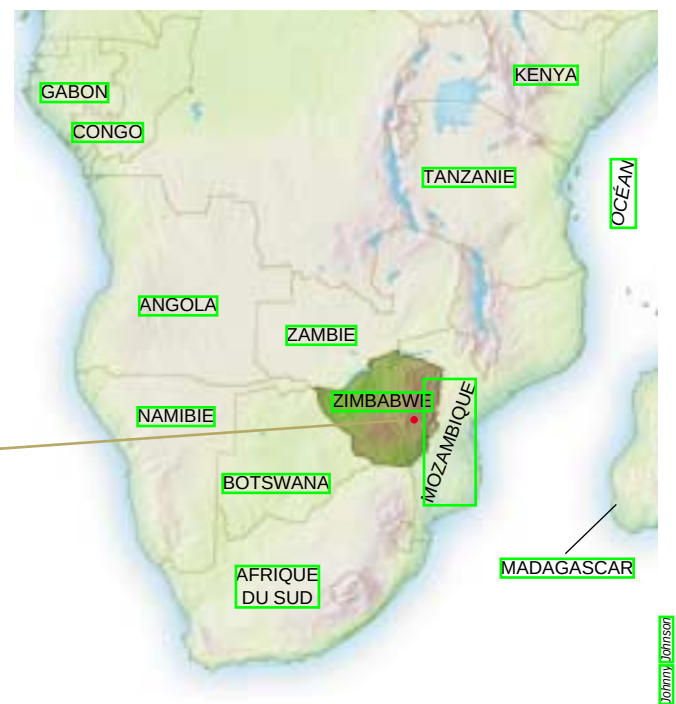
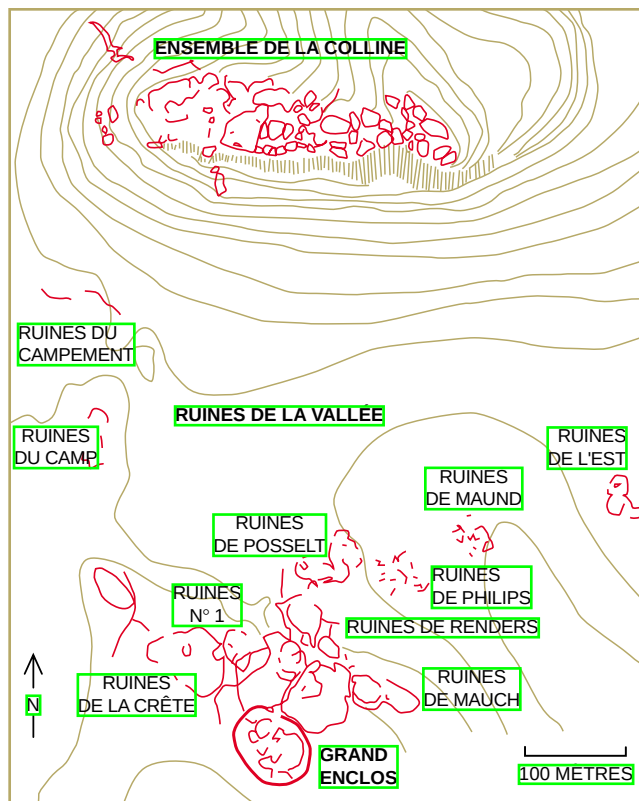
1. LES RUINES DE ZIMBABWE, sur le plateau de Zimbabwe, témoignent d'une civilisation et d'une culture florissante entre le XII^e et le XVII^e siècle. Les constructions les plus imposantes sont le Grand Enclos (au centre) et les ruines de la colline (en haut à gauche).

les rivières, et l'océan Indien. Ses dirigeants contrôlaient ainsi le florissant commerce de métal précieux.

Avec une superficie de 7,2 kilomètres carrés, Zimbabwe comprenait

trois principaux ensembles de constructions : l'ensemble de la colline, le Grand Enclos et les ruines de la vallée. L'ensemble de la colline, surnommé l'Acropole, est la partie la plus

ancienne du site : elle a été occupée, au moins depuis le V^e siècle, par des paysans et par des chasseurs. Perchés à près de 80 mètres au-dessus de la vallée, ses occupants apercevaient de



2. LE ZIMBABWE, au Sud-Est de l'Afrique, contient 35 000 sites archéologiques répertoriés. Celui de Zimbabwe (à gauche) est le plus important : les ruines couvrent plus de sept kilomètres carrés.



3. LES MURS DE PIERRE ont donné son nom à Zimbabwe (dzimbabwe signifie « maison de pierre » en langue shona). Les éléments les plus caractéristiques de l'architecture de cette cité sont la tour conique (a), des escaliers aux marches circulaires (b) et (c), les

loin d'éventuels intrus. Une muraille de près de 11 mètres de haut délimite une enceinte ovale, de 100 mètres de long et 45 mètres de large, qui abrite des maisons *daga*, des huttes en boue, en terre séchée et en pierres.

Au Sud de cette colline se dresse le Grand Enclos, la construction la plus étonnante de Zimbabwe. Au XIX^e siècle, les habitants de la région nommaient ce monument *Imbahuru*, ce qui signifie «la maison de la grande femme» ou «la grande maison» dans le dialecte karanga, le plus répandu de la langue shona. Le mur extérieur, long de 240 mètres, s'élève par endroits à près de 10 mètres. Il était composé d'un million de blocs de pierre. Une enceinte intérieure suit une partie de cette muraille, créant un étroit passage de 54 mètres de long.

À quoi cette construction servait-elle? Était-ce un palais royal ou la résidence des nombreuses épouses du souverain? La présence de rainures verticales dans les murs, interprétées comme des symboles de féminité, et de structures phalliques a conduit des archéologues à proposer que les lieux étaient utilisés pour des rites initiatiques ou pour des cérémonies. La grande tour conique, de 9 mètres de haut et de 5,4 mètres de diamètre à

la base, ne semble pas avoir eu d'autre fonction que symbolique.

Enfin, un ensemble de constructions plus petit s'étend dans la vallée. Les murs en semblent plus récents : ces constructions dateraient de l'expansion démographique de Zimbabwe.

La «maison de pierre»

Zimbabwe tire son nom du matériau des constructions principales, des blocs de granite taillés dans des affleurements proches : en langue shona, *dzimbabwe* signifie «maison de pierre». Ces blocs sont disposés en couches successives sans mortier. Les murs circulaires sont généralement deux fois plus hauts que larges. À la base de nombreux murs, des structures ressemblent à des contreforts, mais elles ne soutiennent rien : servaient-elles à adoucir l'accès à une porte, à rendre plus difficiles les accès ou à boucher la vue directe dans les pièces? Dans certains endroits, elles auraient permis le contrôle du passage, restreignant celui-ci à une seule personne à la fois. Par endroits, les pierres sont disposées de façon recherchée : des marches arrondies décorent des entrées ; des frises de chevrons parcourent des murs, qui sont aussi percés de systèmes

d'écoulement ; des portes larges de 1,20 mètre s'ouvrent sous des linteaux de bois.

Quelle était la vie à Zimbabwe? Nous pouvons l'imaginer à partir de ce que nous connaissons de la culture Mapungubwe, qui aurait dominé la région vers l'an 1000. Les plus grands sites Mapungubwe, dans la zone Shashi-Limpopo, ressemblent beaucoup à Zimbabwe. L'économie reposait sur l'élevage et sur le commerce de l'ivoire et de l'or. La répartition des vestiges de poterie appartenant au style «léopard's kopje» démontre que la culture Mapungubwe s'est répandue à l'Ouest du Zimbabwe actuel. L'essor de Zimbabwe correspondrait au déclin des centres Mapungubwe.

Les vestiges mis au jour à Zimbabwe soulignent son originalité par rapport aux autres sites de l'Âge du fer. Ainsi, on ne connaît nulle part ailleurs le style des oiseaux sculptés dans la stéatite. Certains de ces oiseaux ont plus de 40 centimètres de haut et sont posés au sommet de colonnes de un mètre de haut. Chaque oiseau porte une marque originale, et aucun ne représente un animal de la région. En observant les rites funéraires actuels du peuple Shona et l'utilisation par plusieurs tribus de petites marques de fer pour tenir le compte de leurs



frises en chevrons dans le mur du Grand Enclos (d) et un passage intérieur, un second mur longeant celui du Grand Enclos sur une cinquantaine de mètres (e). La fonction d'autres monuments, telles ces pierres dressées au milieu d'une cour (f), reste inconnue.

disparus, des archéologues ont imaginé que ces oiseaux sculptés rappellent les ancêtres dans des cérémonies.

D'autres objets confirment que Zimbabwe était une cité commerciale florissante dès le XIV^e siècle. Les échanges avec des pays lointains sont attestés par la présence de verres de Syrie, d'assiettes chinoises de la dynastie Ming (de 1368 à 1644), de bols en faïence de Perse, de coraux, de cloches en bronze et d'une cuillère de fer, objet qui n'était pas utilisé par le peuple Shona. On ne trouve pas de porcelaine chinoise bleue et blanche, couramment fabriquée à partir du XV^e siècle : l'importance économique de Zimbabwe a déjà décliné à cette époque. Vers 1700, le site est quasi abandonné.

Pourquoi Zimbabwe a-t-il décliné ? Plusieurs hypothèses sont avancées. Vers 1600, l'épuisement des rivières aurifères du Nord aurait déplacé vers l'Ouest le commerce du métal précieux : l'économie de la cité, qui ne bénéficiait plus d'une position centrale, n'aurait pas résisté à la raréfaction des revenus et du commerce. Une explosion démo-

graphique pourrait aussi avoir provoqué ce déclin : certains estiment la population de Zimbabwe à son apogée à 10 000 personnes, voire 17 000 (d'autres estimations, plus modestes, la situent autour de 2 000 personnes au plus). L'élevage et la culture trop intensifs ou, comme le suggèrent des données environnementales récentes, une succession de sécheresses ont-ils désertifié la région ? Une dernière hypothèse, celle de guerres, ne peut être rejetée totalement, bien que les vestiges d'armement soient peu nombreux.

Pendant les deux siècles suivants, Zimbabwe n'est probablement utilisé, irrégulièrement, que pour des cérémonies religieuses. À la fin du XIX^e siècle, les Européens arrivent, attirés par la légende des mines du roi Salomon : ils bouleversent alors les vestiges archéologiques, effaçant le passé du site.

Le racisme archéologique

Un explorateur allemand, Karl Mauch, étudie le premier le site, en 1871. Il y est amené par un compatriote, Adam

Render, qui s'était intégré à la tribu Karanga du chef Pika, où il avait deux épouses. Mauch décide que la cité n'a pas été construite par des Africains, car le style de la construction est trop élaboré : c'est l'œuvre de colons phéniciens ou juifs. Un échantillon de bois pris sur un encadrement de porte confirme son analyse rapide : il a la même odeur que son crayon, donc il est en cèdre et provient du Liban.

Mauch est suivi de Willi Posselt, qui dérobe un des oiseaux de stéatite et en cache d'autres, en attendant de revenir les chercher. Parmi les visiteurs ultérieurs, certains travaillent pour W.G. Neal, de la Société des ruines anciennes, créée en 1895. Quand Cecil Rhodes, fondateur de la Société britannique Sud-africaine, autorise Neal à exploiter toutes les ruines rhodésiennes, Zimbabwe est pillé, ainsi que les autres sites de l'Âge du fer : l'or et tous les objets de valeur sont emportés, sans aucun respect pour les constructions ni pour les objets sans valeur marchande (poteries, objets en argile et figurines).



4. LES OISEAUX SHONA, la plupart placés au sommet de colonnes, ne sont connus qu'à Zimbabwe. Ces sculptures de stéatite ne représentent pas des espèces locales. Ils symbolisaient peut-être les ancêtres disparus.

Le premier archéologue officiel à venir sur le site est l'Anglais Theodore Bent. Il amplifie malheureusement le désastre : creusant autour de la tour conique, il bouleverse les dépôts sédimentaires, interdisant toute datation ultérieure. Bent se débarrasse aussi des objets d'argile et de métal, inutiles selon lui. Ils prouvent pourtant des relations commerciales avec la Perse et avec les Arabes. L'archéologue conclut que Zimbabwe a été construit par une race «bâtarde», descendant d'envahisseurs blancs venus du Nord, puisque, comme Rhodes et la plupart des colons européens le supposent, des Noirs n'auraient jamais pu le construire. En 1902, Neal cosigne avec le journaliste Richard Hall un rapport qui reprend ces conclusions :

l'architecture est évidemment d'inspiration phénicienne ou arabe. Cette attitude est caractéristique de l'état d'esprit des Européens qui ont colonisé l'Afrique : le continent n'a ni histoire ni culture ; sa population, incapable d'évoluer, est restée dans un état «originel», et la colonisation est donc légitime.

Quelques archéologues, malheureusement isolés, ont une autre vision du passé. Ainsi, en 1905, l'égyptologue David Randall-MacIver découvre à Zimbabwe des restes d'outils analogues à ceux qui sont couramment utilisés par les Shona de la région : il conclut que les constructions sont l'œuvre de populations locales. Pour la première fois, un Européen recherche l'origine et l'usage de Zimbabwe dans une culture africaine.

Randall-MacIver démontre aussi que les indices de présence perse et arabe ne sont pas antérieurs au XIV^e siècle et n'ont donc aucun rapport avec la légende biblique des mines du roi Salomon. Il réfute enfin le style arabe des constructions : les murs sont courbes et non géométriques ou symétriques, comme dans l'architecture arabe.

J.F. Shofield, en 1926, et Gertrude Caton-Thompson, en 1929, sont du même avis. En fouillant les ruines de Maund, encore intactes dans la vallée, à l'opposé du Grand Enclos, cette



5. LE GRAND ENCLOS (vu du côté opposé de la photographie des pages 74 et 75) était-il la demeure royale de Zimbabwe ? Il a été construit à l'apogée du développement de la cité. Cette enceinte a 240 mètres de long ; un million de blocs de pierre ont été taillés pour sa construction.

dernière trouve d'autres preuves de l'origine africaine des constructions. Ses croquis détaillés et une étude stratigraphique rigoureuse sont des éléments essentiels dans la reconstitution du passé de Zimbabwe.

En dépit de ces travaux, la plupart des colons européens en Rhodésie nient l'évidence. De 1965 jusqu'à l'indépendance, en 1980, le Front rhodésien, parti fondé par le Premier ministre Ian Smith et qui défend un système d'apartheid, censure tous les ouvrages et documents qui décrivent Zimbabwe ; les archéologues qui défendent l'origine africaine de Zimbabwe sont emprisonnés et expulsés ; les Africains qui soutiennent des positions similaires perdent leur travail ; les populations locales n'ont plus le droit d'y célébrer des cérémonies rituelles ; même les visites du site sont interdites.

Aujourd'hui, Zimbabwe est un symbole du développement culturel africain, que des ouvrages de grande diffusion ont popularisé. Cependant, une grande partie de son passé reste inaccessible, car les erreurs des archéologues l'ont effacé ; en outre, l'archéologie au Sud de l'Afrique est si peu développée qu'on ne doit pas attendre d'informations nouvelles. Bien que les ruines, sous la tutelle des Musées et monuments nationaux du Zimbabwe, aient été classées par l'Unesco dans le patrimoine mondial de l'humanité,

seuls deux conservateurs et moins de dix archéologues sont affectés à leur protection et à leur étude. En outre, les deux conservateurs sont aussi responsables de la conservation et de l'entretien des monuments, et de l'accueil des visiteurs sur 5 000 des 35 000 sites répertoriés dans le pays.

Cette situation est générale au Sud du Sahara : selon Pierre de Maret, de l'Université libre de Bruxelles, moins de 900 000 francs sont dépensés annuellement pour l'archéologie des dix pays subsahariens, où il y a moins de 20 archéologues permanents. En revanche, le chiffre d'affaires annuel de la vente des objets du patrimoine africain est de plusieurs millions de francs. L'héritage culturel africain est ainsi doublement perdu, par la dégradation des monuments et par la dispersion des objets d'art dans les autres pays.

L'archéologie africaine doit être développée, afin que les cultures fragmentées et étouffées par des siècles de colonisation se reconstituent et retrouvent leurs racines. Zimbabwe n'est pas seulement important parce qu'il est monumental : c'est aussi la preuve du prestigieux passé africain.

Webber NDORO est professeur de muséographie et de gestion du patrimoine culturel à l'Université du Zimbabwe.

D.N. BEACH, *The Shona and Zimbabwe. 900-1850*, Africana, 1980.

J. ROUMEGUÈRE-EBERHARDT, *Le signe du début de Zimbabwe*, Éditions Publisud, Paris, 1982.

A.D. KEN MUFUKA, *Zimbabwe : Life and Politics in the Golden Age. 1100-1500*, Harare Publishing House, 1983.

M. CORNEVIN, *L'archéologie africaine*, éditions Maisonneuve et Larose, Paris, 1993.

Culture and Development in Africa, sous la direction d'Ismail Serageldin et June Taboroff, International Bank for Reconstruction and Development/World Bank, 1994.

William H. STIEBING, Jr., *Uncovering the Past : A History of Archaeology*, Oxford University Press, 1994.

Sommeils et insomnies

JEAN-LOUIS VALATX

Pour s'endormir, il ne suffit pas d'éteindre la lumière. Les différents réseaux de neurones qui assurent l'éveil doivent être mis au repos par d'autres neurones. Des dysfonctionnements de ce système anti-éveil sont responsables d'insomnies.

Entre le mois d'avril et le mois de novembre 1918, la grippe espagnole a tué 25 millions de personnes dans le monde, dont plusieurs centaines de milliers de Français. Certains malades avaient des lésions cérébrales (des encéphalites) qui se manifestaient soit par des insomnies, soit par une léthargie. À Vienne, le médecin Konstantin von Economo, observa chez des personnes décédées, que l'insomnie était associée à des lésions de l'hypothalamus antérieur et la léthargie à des lésions de l'hypothalamus postérieur. L'hypothalamus antérieur était-il le centre du sommeil et l'hypothalamus antérieur celui de l'éveil ?

Les observations cliniques de von Economo ont été confirmées sur des animaux où l'on pratiquait des lésions par électrocoagulation. Puis, à la fin des années 1950, Michel Jouvet observa, chez l'animal endormi, une phase étonnante du sommeil, qu'il nomma le sommeil paradoxal, pendant laquelle surviennent les rêves. La localisation de l'activité onirique permit l'essor des recherches sur le sommeil. Enfin, la découverte des neurotransmetteurs du système nerveux central conjuguée à l'amélioration des techniques d'exploration du cerveau et à la miniaturisation des dispositifs d'enregistrement de l'activité des neurones ont aidé les neurobiologistes à élucider le fonctionnement des réseaux neuronaux du sommeil. N'oublions cependant pas que, malgré tout l'arsenal de techniques performantes dont on dispose, l'observation du comportement est la seule méthode de validation des résultats.

Les neurobiologistes ont récemment montré que l'éveil, indispensable à la survie, est garanti par tout un réseau de structures redondantes. Ils ont précisé les circuits neuronaux acti-

vés pendant l'éveil, ceux qui prennent le relais pour l'endormissement et le sommeil, et les perturbations qui engendrent des insomnies. Nous décrirons les structures qui maintiennent l'éveil, et comment la mise au repos de ces circuits déclenche le sommeil et le rêve, et enfin pourquoi Hypnos, le dieu du sommeil, refuse parfois de toucher les mortels de sa branche de pavot, leur refusant sommeil et rêves.

Qu'est-ce que le sommeil ?

Chez le chat, des enregistrements de l'activité électrique du cerveau ont permis l'analyse des différentes phases du sommeil. Après une période d'éveil où cette activité électrique est rapide et de faible amplitude, l'animal présente les signes précurseurs du sommeil : il bâille, cligne des paupières, fait sa toilette. Il cherche son lieu habituel pour dormir et prend la posture en sphinx, caractéristique de l'espèce féline, mais qui varie avec la température ambiante : le chat se met en boule quand il fait froid et s'allonge quand il fait chaud.

L'endormissement et le sommeil calme se caractérisent par la fermeture des paupières, l'immobilité et le ralentissement progressif des fonctions végétatives (la respiration, la fréquence cardiaque, la température et le tonus musculaire). Sur l'électroencéphalogramme, on distingue deux stades de sommeil calme : le sommeil léger et le sommeil profond. Le sommeil calme dure entre 20 et 25 minutes (voir l'encadré page 84).

Ensuite, le sommeil paradoxal associe des signes de sommeil profond, telle une absence de tonus musculaire, et des signes d'éveil, tels qu'un électroencéphalogramme rapide, des mouvements oculaires et une respiration irrégulière. Le sommeil paradoxal a une

durée moyenne de cinq à six minutes. Ainsi, un cycle de sommeil du chat dure environ une demi-heure. Après un bref éveil, un autre cycle commence.

Deux phénomènes caractérisent le sommeil paradoxal : les rêves et l'érection pénienne. On croyait ce dernier phénomène spécifique du sommeil paradoxal de l'homme, mais Markus Schmidt, dans notre laboratoire, l'a récemment mis en évidence chez le rat, réalisant ainsi le premier modèle expérimental pour l'étude des mécanismes de l'érection au cours du sommeil paradoxal (il utilise un capteur miniature de la pression sanguine, dans le pénis). Il a ainsi montré que les neurones de l'érection au cours du sommeil sont situés dans une région de l'hypothalamus antérieur, proche (mais différente) de celle qui est responsable de l'érection durant l'éveil.

Seuls les vertébrés supérieurs, les oiseaux et les mammifères ont des cycles complets de sommeil, avec des phases de sommeil lent et des phases de sommeil paradoxal. Les durées de ces cycles varient d'une espèce à l'autre, et à l'intérieur même d'une espèce donnée. Chez l'homme adulte, la durée physiologique du sommeil varie de 3 à 12 heures. L'environnement physique (la température ou la lumière) et social (l'isolement, le stress, les périodes d'apprentissage) agit sur la durée du sommeil.

Toutefois, ces facteurs n'expliquent pas toute la variabilité. En utilisant des lignées pures de souris, nous avons montré que certains facteurs, tels que la durée du sommeil, le nombre des mouvements oculaires pendant le sommeil paradoxal et la quantité de sommeil au cours de la récupération qui suit une privation de sommeil, sont héréditaires. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de vrais jumeaux.

Les circuits de l'éveil

L'hypothalamus a longtemps été considéré comme le «centre de l'éveil». Puis, en 1949, Giuseppe Moruzzi et Horace Magoun déclenchent un coma, chez le chat, en lésant la formation réticulée. Ils supposent que ce coma correspond à une absence d'éveil. Comme la stimulation de la formation réticulée éveille l'animal endormi et que cette structure cérébrale reçoit de nombreux messages véhiculés notamment par les voies sensorielles, ils proposent le concept de «système réticulé activateur ascendant» : la formation réticulée serait le centre de l'éveil. Le sommeil surviendrait lors de la mise au repos de la formation réticulée, après un certain temps de fonctionnement ou lorsque cessent les stimulations éveillantes (la lumière, le bruit, etc.).

Puis, l'utilisation des substances neurotoxiques qui détruisent seulement les neurones a infirmé les certitudes fondées sur des lésions obtenues par électrocoagulation. En 1992, Michel Denoyer et Marcelle Sallanon, dans notre laboratoire, ont montré qu'une lésion de la formation réticulée et de

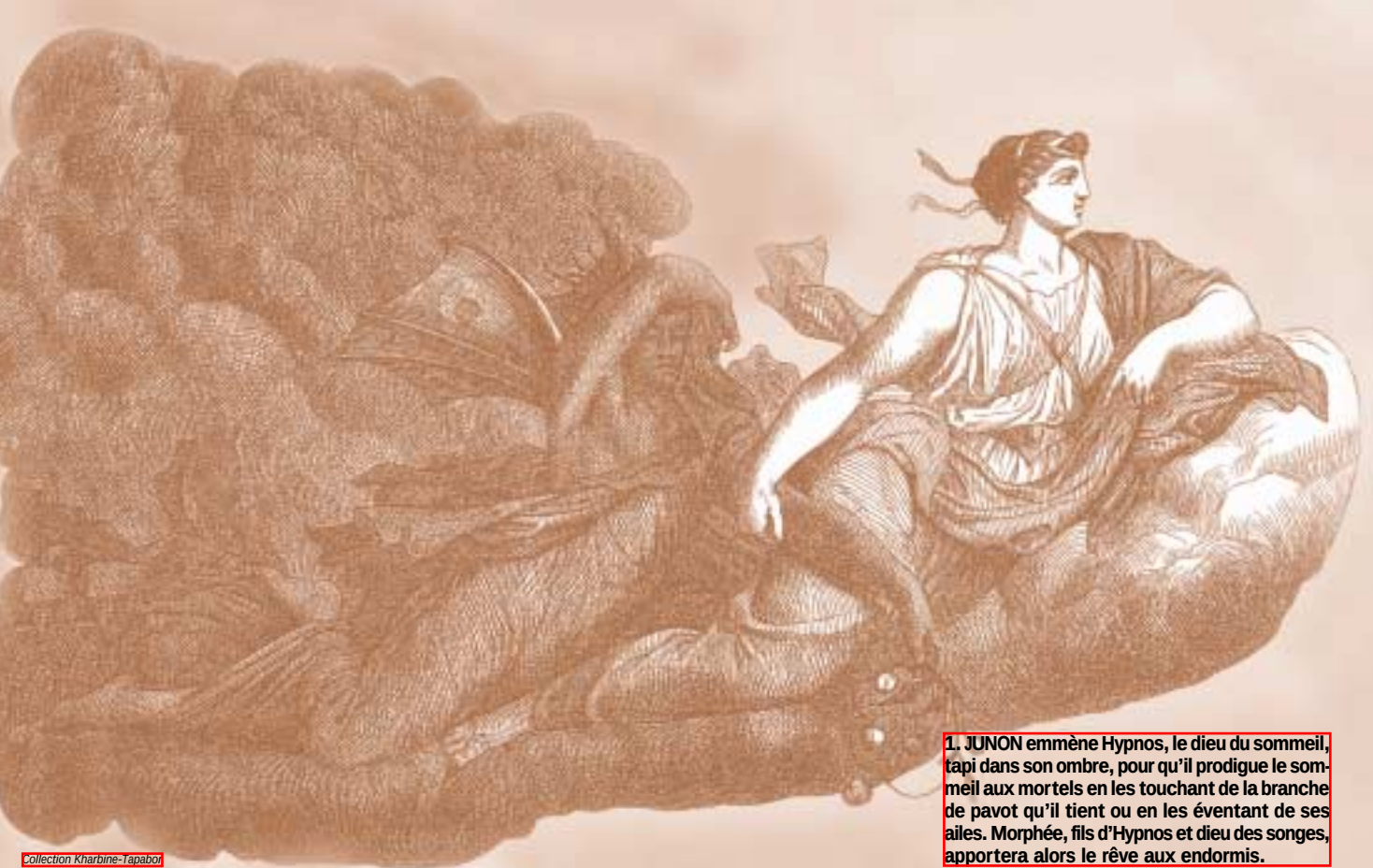
l'hypothalamus postérieur ne perturbe pas durablement l'éveil. Ces résultats surprenants montrent que d'autres structures prennent le relais des structures détruites ; les troubles de l'éveil qui avaient été obtenus antérieurement résultaient de la lésion des prolongements des neurones localisés dans les autres systèmes responsables de l'éveil. Ainsi, l'éveil est assuré par un réseau de structures redondantes.

De nombreux neuromédiateurs agissent dans ce réseau de l'éveil : des neurotransmetteurs «classiques» qui favorisent la transmission des messages neuronaux, tels que l'acétylcholine, le glutamate, l'histamine, la noradrénaline et la sérotonine, d'autres médiateurs tels que des peptides (de petites protéines), des hormones, ou encore le monoxyde d'azote.

L'origine des neurones qui véhiculent ces neurotransmetteurs et les régions cérébrales qu'ils innervent ont été représentées sur la figure 2. Selon Kasuya Sakai, de notre laboratoire, les composantes de ce réseau se regroupent en deux systèmes : une voie ventrale et une voie dorsale. Ces deux voies prennent naissance dans le bulbe rachien.

La voie ventrale se projette vers l'hypothalamus postérieur et le télencéphale basal (c'est la voie réticulo-hypothalamo-corticale). La voie dorsale active la formation réticulée mésencéphalique et le thalamus : c'est la voie réticulo-thalamo-corticale. Les différents neurotransmetteurs participent aux deux systèmes. L'acétylcholine et le glutamate y jouent un rôle important.

On a découvert assez récemment que l'histamine participe aussi aux mécanismes de l'éveil. Les neurones à histamine ont été localisés par Jian Sheng Lin, de notre laboratoire, dans l'hypothalamus postérieur. Ces neurones envoient des projections dans tout le cerveau antérieur, mais aussi dans le cerveau postérieur, sur les autres neurones de l'éveil. Par ailleurs, l'étude des substances pharmacologiques qui agissent sur l'histamine (inhibition de sa synthèse, action sur ses récepteurs) confirme que l'histamine participe à la régulation de l'éveil. Enfin, une observation clinique conforte ce rôle : les personnes à qui l'on administre des antihistaminiques contre les manifestations allergiques éprouvent souvent une certaine somnolence.



1. JUNON emmène Hypnos, le dieu du sommeil, tapi dans son ombre, pour qu'il prodigue le sommeil aux mortels en les touchant de la branche de pavot qu'il tient ou en les éventant de ses ailes. Morphée, fils d'Hypnos et dieu des songes, apportera alors le rêve aux endormis.

Les noyaux du raphé antérieur contiennent des neurones à sérotonine qui se projettent directement vers l'hypothalamus et vers le cortex. Longtemps, la sérotonine a été considérée comme l'hormone du sommeil, car la lésion des neurones qui la libèrent ou l'inhibition de sa synthèse provoque une insomnie de plusieurs jours. Toutefois, paradoxalement, ces neurones ne sont actifs que pendant l'éveil, et leur stimulation est éveillante.

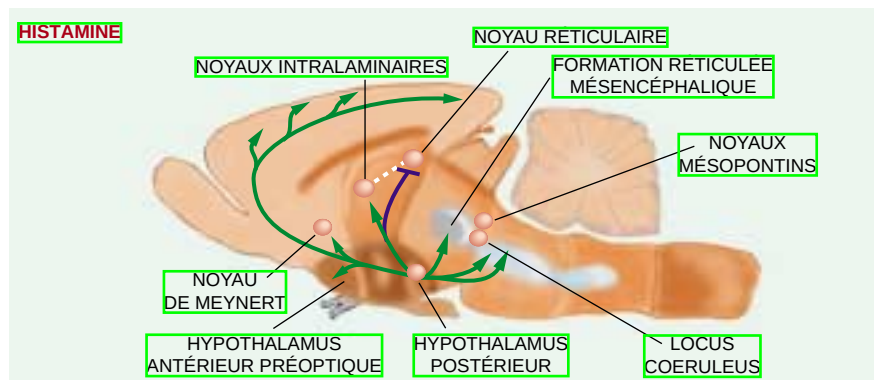
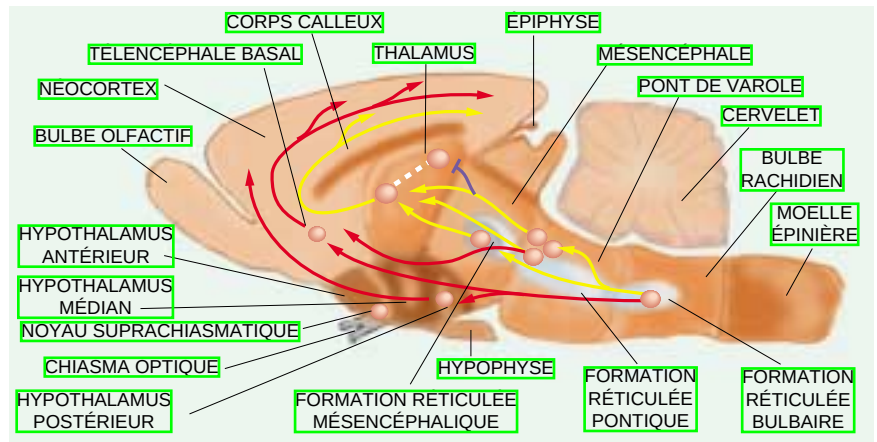
En fait, on restaure le sommeil chez un animal rendu insomniaque par absence de sérotonine en lui injectant le précurseur immédiat du neuromédiateur dans l'aire préoptique de l'hypothalamus. Nous verrons que les neurones de cette région, sous l'influence de la sérotonine, participent au déclenchement du sommeil : il est donc logique que le manque de sérotonine dans l'hypothalamus empêche le sommeil. La sérotonine joue ainsi un double jeu spécifique : essentielle pour l'éveil, elle a un rôle fondamental dans le sommeil.

La noradrénaline vient surtout du locus coeruleus situé dans le pont de Varole (voir la figure 2). Ces neurones, actifs au cours de l'éveil, envoient des projections vers le cortex et vers le système limbique. Ils sont contrôlés par des neurotransmetteurs inhibiteurs, le GABA et la glycine, sur lesquels nous reviendrons. Recevant des signaux sensoriels et végétatifs, les neurones à noradrénaline jouent un rôle important dans les réactions au stress.

Les hormones et les peptides de l'éveil

Des peptides participent à la modulation de l'éveil. L'hormone CRH (*Corticotropin releasing hormone*) est synthétisée par de nombreux neurones, et elle active l'hypophyse et les glandes surrénales en cas de stress. Cette hormone a aussi une action cérébrale spécifique dans l'élaboration des réactions comportementales face aux situations nouvelles et au stress. L'hormone ACTH ou les endorphines (des substances antalgiques naturelles), libérées par les neurones de l'hypothalamus médian, stimulent le réseau de l'éveil (l'ACTH et les endorphines sont issues d'une même molécule, la pro-opiomélanocortine).

On peut aussi inclure dans le système de l'éveil le noyau suprachiasmatique, la principale structure de



2. LES CIRCUITS DE L'ÉVEIL sont schématisés (en haut à gauche) sur une coupe de cerveau de rat : la voie réticulo-thalamo-corticale dorsale (en jaune) et la voie réticulo-thalamo-corticale ventrale (en rouge). Différents neurotransmetteurs interviennent pour assurer l'éveil. Les neurones qui libèrent l'histamine sont localisés dans l'hypothalamus postérieur. Ils se projettent sur l'ensemble de cerveau et notamment sur les autres neurones de l'éveil, et les activent (les flèches vertes). Les neurones qui produisent la noradrénaline sont localisés dans le locus coeruleus et émettent des prolongements vers le cortex, les noyaux amygd-

l'horloge biologique. Une lésion du noyau suprachiasmatique abolit le rythme circadien des états de vigilance et de sommeil : les longues phases d'éveil diminuent, et leur répartition au cours d'une journée devient aléatoire.

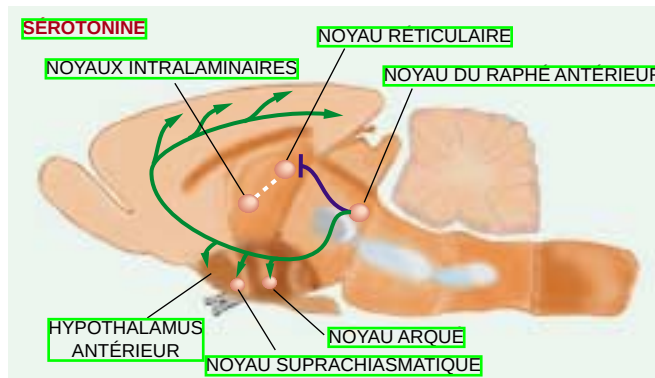
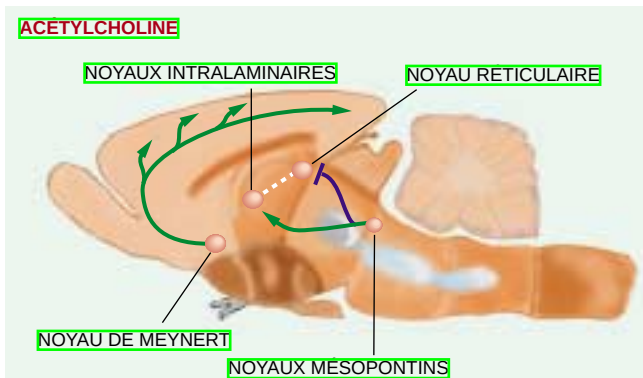
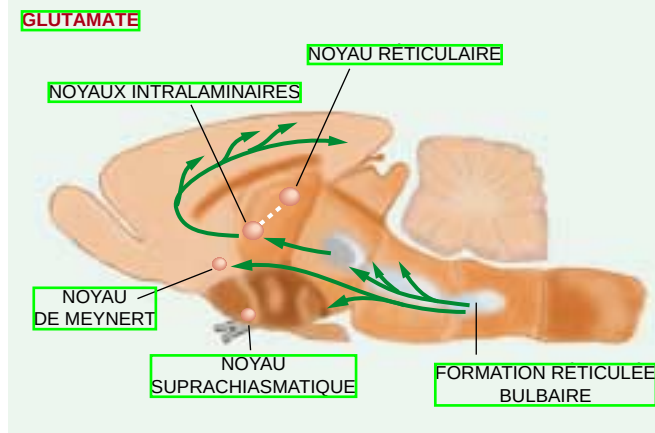
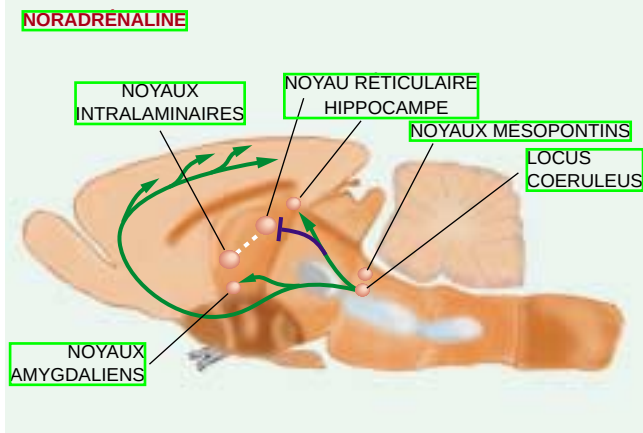
Le noyau suprachiasmatique semble influencer sur le rythme circadien par un de ses neuropeptides : la vasopressine. Les effets cérébraux de la vasopressine synthétisée par le noyau suprachiasmatique sont totalement différents de ceux de la vasopressine produite par l'hypophyse postérieure, qui agit notamment sur le rein et sur la pression artérielle.

Outre les neurotransmetteurs et les peptides de l'éveil qui activent le cortex, certaines substances sont éveillantes : par exemple, l'amphétamine ou le modafinil (Modiodal®). L'amphétamine agit en augmentant la durée d'action de l'adrénaline, de la noradrénaline et surtout de la dopamine dans les synapses.

Normalement, quand un neurotransmetteur est libéré par un neurone

«amont», dit présynaptique, dans la fente synaptique (l'espace qui sépare le neurone amont du neurone «aval», dit postsynaptique), il active le neurone postsynaptique. Quand il a fini d'agir, il est recapturé par le neurone présynaptique par l'intermédiaire d'un «transporteur». L'amphétamine bloque le transporteur de la dopamine, de sorte que le neuromédiateur exciteur reste longtemps dans la fente synaptique et continue à agir, tant qu'il n'est pas dégradé par des enzymes. Bruno Giros et ses collègues de l'unité INSERM U 288 ont montré que, chez des souris transgéniques qui ne synthétisent plus le transporteur de la dopamine, l'amphétamine n'agit plus, puisque sa cible principale a été éliminée. Après un éveil prolongé dû à l'amphétamine, la durée du sommeil augmente, ce que l'on nomme l'effet rebond.

Le modafinil, une nouvelle molécule éveillante, procure un éveil calme sans effets secondaires ni rebond de sommeil. J. S. Lin a montré que le modafinil semble agir sur des récep-



liens et l'hippocampe. Les neurones à acétylcholine sont situés dans les noyaux mésopontins, qui se projettent notamment vers le thalamus, et dans le noyau de Meynert du télencéphale basal. Les neurones à glutamate sont présents dans la formation réticulée bulbaire et mésencéphalique, et dans les noyaux intralaminaires du thalamus qui se projettent vers le cortex. Les neurones à sérotonine sont situés dans le noyau du raphé antérieur et innervent le cortex et plusieurs

noyaux de l'hypothalamus, tels l'aire préoptique, le noyau supra-chiasmatique et le noyau arqué. Le noyau supra-chiasmatique est la principale structure de l'horloge biologique. Les neurones à acétylcholine, à histamine, à noradrénaline, et à sérotonine envoient des prolongements (les flèches bleues) vers le noyau réticulaire du thalamus pour l'inhiber au cours de l'éveil ; lorsqu'ils cessent d'être inhibés, les neurones du noyau réticulaire déclenchent l'endormissement.

teurs α adrénergiques localisés dans une région précise de l'hypothalamus antérieur, tandis que l'amphétamine agit dans d'autres régions (notamment dans le cortex et dans le système limbique).

Ainsi, dans tous les cas énumérés, l'activation du cortex résulte de la stimulation directe des neurones corticaux par les différents éléments du réseau de l'éveil. Pour réaliser cette activation, envisageons une dernière possibilité : l'inhibition d'un système inhibiteur. Si l'on muselle un système d'inhibition, on renforce l'activation. Il existe essentiellement deux neurotransmetteurs inhibiteurs : le GABA et la glycine. Or, des neurones GABAergiques, localisés dans l'hypothalamus postérieur et dans le télencéphale basal, inhibent d'autres neurones GABAergiques corticaux. Ainsi, le rôle éveillant de l'hypothalamus postérieur s'exerce de deux façons : une stimulation directe par l'histamine et une stimulation indirecte par le GABA.

La régulation de l'éveil, vitale pour la survie, met en jeu plusieurs structures redondantes : aucune des structures décrites, prise isolément, n'est indispensable à l'activation corticale.

L'endormissement

Le réseau d'éveil, une fois activé, est entrete nu par les stimulations internes et externes. Comment l'envie de dormir est-elle à nouveau déclenchée ? L'arrêt des stimulations ne semble pas suffisant. La sérotonine, qui joue un rôle notable dans l'éveil, participe aussi au sommeil. Nous avons vu que l'inhibition de la sérotonine entraîne une insomnie qui est levée par l'injection de son précurseur uniquement dans l'aire préoptique de l'hypothalamus. La lésion de cette région déclenche une insomnie de très longue durée (plus de trois semaines) : ces deux résultats confirment le rôle hypnogène de la sérotonine.

Toutefois, l'insomnie due à une lésion de l'aire préoptique est interrompue par l'injection d'un analogue

du GABA (le muscimol) dans l'hypothalamus postérieur, où convergent plusieurs éléments du système d'éveil. Puisque l'insomnie cesse, nous pensons que l'aire préoptique n'est pas un «centre» du sommeil, mais plutôt une région qui contrôle l'éveil. Ainsi, une des composantes de l'éveil, la sérotonine, stimule, par certaines de ses terminaisons, l'aire préoptique qui, en retour, vraisemblablement par des neurones GABAergiques, inhibe l'ensemble du réseau de l'éveil : c'est un système anti-éveil qui facilite l'endormissement.

Le noyau du faisceau solitaire, dans le bulbe rachidien, intervient aussi dans l'endormissement par ses projections sur l'aire préoptique. Ainsi, dans les années 1970, Paul Dell et Jean-Jacques Puizillout, à l'Université de Marseille, ont montré que la stimulation de nerfs pneumogastriques endort un animal insomniaque. De plus, les pratiquants de sports de combat et les masseurs de Bali connaissent bien les effets sur la vigilance des atémis (des coups portés à la hauteur du cou)

Sommeil calme et sommeil paradoxal

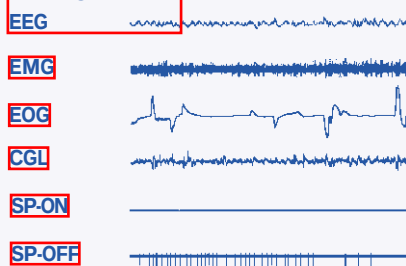
L'enregistrement de l'activité électrique de divers neurones a permis la description des différentes phases du sommeil. Au cours de l'éveil (1), l'activité électrique cérébrale est rapide et de faible amplitude. Le sommeil calme (2) présente des phases de sommeil léger, caractérisé par la présence de «fuseaux» (ou bouffées d'activité de grande amplitude) associés à quelques ondes lentes, et des phases de sommeil profond, où prédominent les ondes lentes.

Puis survient le sommeil paradoxal (3) : il associe des signes du sommeil profond, tel le relâchement des muscles (l'électromyogramme est plat) et des signes d'éveil, tels un électro-encéphalogramme rapide et des mouvements oculaires. Certains signes sont continus pendant toute la durée du sommeil paradoxal, par exemple

l'activité rapide de l'électroencéphalogramme et l'atonie musculaire ; d'autres sont intermittents, tels les mouvements des yeux, de la face ou des extrémités des membres.

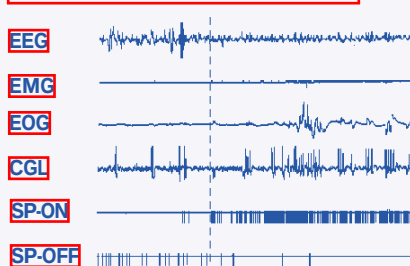
L'activité des neurones nommés SP-ON et SP-OFF est caractéristique du sommeil paradoxal : les neurones SP-ON sont spécifiquement activés au début du sommeil paradoxal et restent actifs pendant toute sa durée, tandis que les neurones SP-OFF s'éteignent progressivement après le début du sommeil paradoxal. Lorsque cesse cette phase du sommeil (4), les neurones SP-ON s'éteignent et les SP-OFF sont réactivés. Les rêves surviennent au cours du sommeil paradoxal. L'activité de certains neurones du corps genouillé latéral, le relais cérébral des voies visuelles est un autre signe du sommeil paradoxal.

1. PHASE D'ÉVEIL



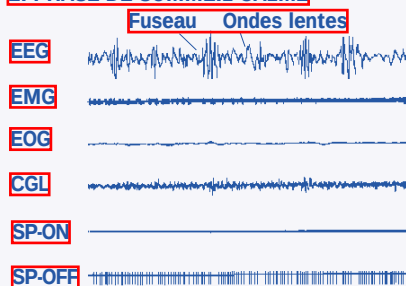
Sur cet enregistrement, la première ligne (l'électroencéphalogramme ou EEG) représente l'activité électrique du cerveau (la fréquence des ondes est égale à 20 hertz et leur amplitude à $50 \cdot 10^{-6}$ volts environ) ; EMG (un électromyogramme) indique l'activité des muscles de la nuque ; EOG est un électro-oculogramme, indiquant les mouvements des yeux ; la quatrième ligne est un enregistrement de l'activité des neurones du corps genouillé latéral (CGL), dans le thalamus ; la ligne suivante indique l'activité de neurones nommés SP-ON (silencieux pendant l'éveil) et la dernière celle de neurones SP-OFF.

3. PHASE DE SOMMEIL PARADOXAL



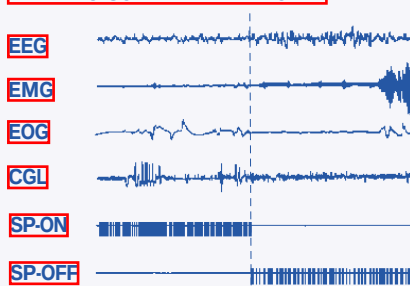
Une phase de sommeil paradoxal suit la phase de sommeil calme (le début est indiqué par la ligne pointillée). L'électroencéphalogramme indique une activité cérébrale rapide et de faible amplitude. Le tonus musculaire a disparu, à l'exception de quelques brèves secousses (deuxième ligne). Au cours de cette phase, les yeux bougent (troisième ligne) et les neurones du corps genouillé latéral sont activés (quatrième ligne). Une autre caractéristique du sommeil paradoxal est la mise au repos des neurones SP-OFF et l'activation des neurones SP-ON.

2. PHASE DE SOMMEIL CALME



Au cours du sommeil calme, le tonus musculaire faiblit (l'amplitude de l'EMG diminue), les yeux ne bougent pas et les neurones SP-OFF continuent d'être activés. Sur l'électroencéphalogramme, on observe des bouffées d'ondes (des fuseaux) séparés par des ondes dites lentes (1 à 4 hertz).

4. FIN DU SOMMEIL PARADOXAL



La fin du sommeil paradoxal (à l'endroit de la ligne pointillée) se traduit par une réapparition des fuseaux sur l'électromyogramme, par une diminution de l'activité des yeux, par une mise au repos des neurones SP-ON et par une réactivation des neurones SP-OFF.

et des massages de la région carotidienne. Le terme carotide lui-même vient du mot grec signifiant «qui provoque un sommeil profond».

Ainsi, le système anti-éveil est situé dans l'aire préoptique, à un carrefour stratégique qui contrôle des fonctions vitales : la thermorégulation, la faim, la reproduction notamment. Il analyserait l'état fonctionnel de l'organisme et déclencherait le sommeil avant que la fatigue ne soit trop intense, à un moment du nyctémère (24 heures) indiqué par l'horloge biologique.

Le sommeil lent

De la même façon que les neurobiologistes ont décrypté les médiateurs de l'éveil, ils ont décodé ceux du sommeil. Le sommeil lent est défini négativement par les Anglo-saxons comme le sommeil qui n'est pas du sommeil paradoxal. Les neurophysiologistes ne disposent pas, comme pour le sommeil paradoxal, d'un ensemble de critères mesurables. L'immobilité n'étant pas un critère suffisant, c'est l'étude de l'activité électrique du cerveau qui a fourni les caractéristiques du sommeil lent : la présence de fuseaux et d'ondes lentes (voir l'encadré ci-contre). Mircea Steriade et ses collègues de l'Université Laval, à Montréal, ont montré que cette activité électrique prend naissance dans le noyau réticulaire thalamique. Les neurones GABAergiques de ce noyau émettent des potentiels d'action périodiques qui entraînent une hyperpolarisation cyclique des neurones thalamiques se projetant sur le cortex. Ces hyperpolarisations sont à l'origine du blocage des messages sensoriels au début de l'endormissement (un neurone hyperpolarisé n'émet plus de messages). Le noyau réticulaire du thalamus est sous le contrôle inhibiteur des réseaux de l'éveil (l'acétylcholine, l'histamine, la noradrénaline).

Puis s'installe le sommeil profond. Les ondes lentes qui le caractérisent résultent de l'hyperpolarisation des cellules pyramidales du néocortex déclenchée par des interneurons GABAergiques locaux, vraisemblablement sous l'influence des neurones préoptiques. Le néocortex (une région du cortex apparue chez les mammifères) est nécessaire à l'apparition des ondes lentes : son ablation les supprime, mais l'animal sans néocortex a toujours un comportement de sommeil (difficile à quantifier en l'absence

d'ondes lentes). Chez les vertébrés inférieurs (les reptiles, les amphibiens, les poissons), on n'enregistre pas d'ondes lentes de grande amplitude, car le néocortex n'est pas développé. Chez ces animaux, l'observation du sommeil lent est difficile.

Le sommeil paradoxal

En 1959, Michel Jouvet observait pour la première fois le sommeil paradoxal. Ses observations sur un animal décérébré lui ont d'emblée permis de localiser les structures responsables de ce type de sommeil dans le tronc cérébral. Les neurones SP-ON, spécifiquement activés durant le sommeil paradoxal y sont localisés : ils forment le système dit exécutif du sommeil paradoxal.

Des groupes de neurones SP-ON ont été identifiés pour chaque composante du sommeil paradoxal. Ainsi, l'atonie musculaire résulte de l'hyperpolarisation des neurones moteurs de la moelle épinière par la glycine, un neurotransmetteur inhibiteur libéré par des neurones du tronc cérébral. Patrice Fort, dans notre laboratoire, a observé que les noyaux moteurs des nerfs crâniens sont peu soumis à l'action inhibitrice de la glycine, ce qui expliquerait la persistance des mouvements des yeux et de la face, au cours du sommeil paradoxal. Des neurones GABAergiques participent aussi à l'atonie musculaire.

Lorsque les neurones SP-ON sont activés, au début du sommeil paradoxal, les neurones SP-OFF s'éteignent. Les neurones SP-OFF forment le réseau dit permissif : pendant l'éveil, ils empêchent les neurones SP-ON du système exécutif de fonctionner, et c'est parce qu'ils s'arrêtent que le sommeil paradoxal peut s'installer. Ce sont des neurones aminergiques (à noradrénaline, à sérotonine ou à histamine). Certaines hypersomnies résulteraient de l'arrêt prolongé du système permissif.

Chez le cobaye, au cours de la deuxième moitié de la gestation, le fœtus est en état de sommeil paradoxal pendant 90 pour cent du temps. On sait que la myélinisation des neurones indique leur maturation (la myéline est la gaine qui protège les neurones et facilite la propagation de l'influx nerveux) ; elle commence dans le tronc cérébral (où sont localisés les neurones du sommeil paradoxal). Pendant cette période, le réseau du sommeil para-

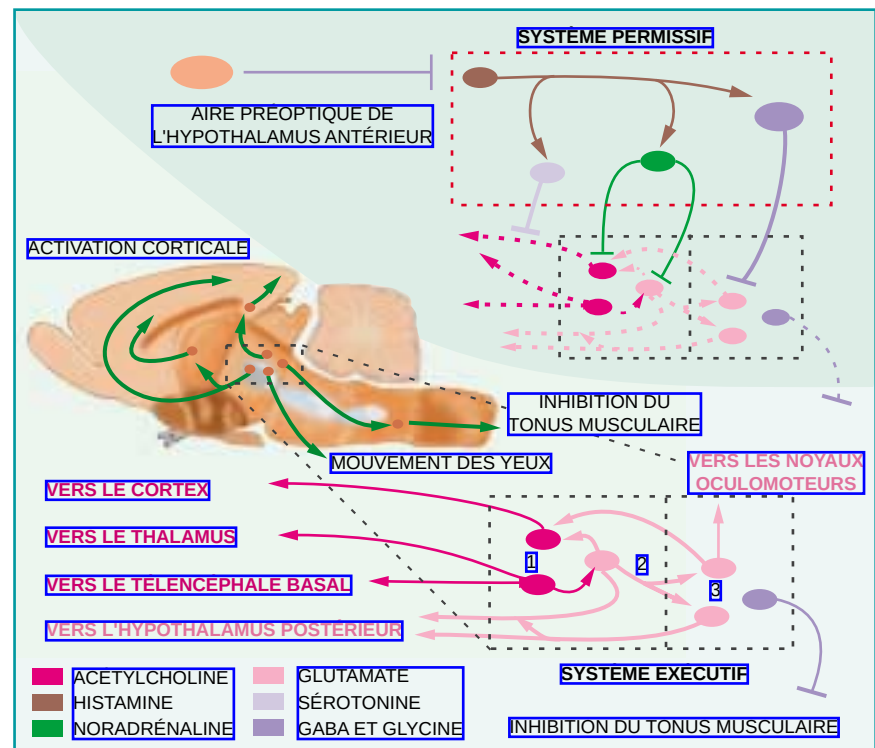
doxal serait le seul à fonctionner en permanence. Progressivement, les neurones du système permissif deviennent fonctionnels et la durée du sommeil paradoxal diminue.

Chez l'adulte, on peut provoquer, pendant quelques heures une hypersomnie de type fœtal par injection en des endroits très précis du tronc cérébral, de substances qui agissent sur des récepteurs du GABA, de l'acétylcholine ou du glutamate. La privation de sommeil est suivie d'une hypersomnie plus ou moins durable.

Cet effet rebond a été attribué à l'accumulation de substances hypnogènes produites pendant l'éveil prolongé. Toutefois, nous avons montré qu'en lésant les cellules qui produisent certaines substances hypnogènes, cet effet rebond est supprimé sans que le sommeil spontané ne soit modifié. Puisque l'effet rebond n'est pas nécessairement associé à un éveil prolongé, c'est que le rebond est produit par

un mécanisme indépendant de celui du sommeil. En réalité, la suppression des substances hypnogènes a peu d'effet sur le sommeil. Ces substances ne sont pas hypnogènes au sens strict du terme, mais elles facilitent le sommeil en agissant sur divers composants du système permissif. On devrait plutôt les qualifier d'hypnagogues, c'est-à-dire qui conduisent au sommeil.

Raymond Cespuglio, dans notre laboratoire, a étudié l'effet d'un stress aigu ou chronique sur le sommeil paradoxal. Il a montré qu'en déclenchant un stress chez un rat (en l'immobilisant pendant une heure environ), au début de la nuit, où il est normalement éveillé, on déclenche une augmentation de la durée du sommeil paradoxal pendant quelques heures. Le stress déclenche une libération de sérotonine dans le noyau arqué de l'hypothalamus et une synthèse accrue de substances hypnagogues. De plus, nous avons montré



3. LE SOMMEIL PARADOXAL : les différents composants du réseau exécutif du sommeil paradoxal (le rectangle noir en pointillés) ont été schématisés sur la coupe de cerveau de rat. Les neurones à acétylcholine (1 sur l'agrandissement, en bas à droite) stimulent notamment le thalamus et le télencéphale basal ; ils sont responsables de l'activité corticale rapide. Des neurones à glutamate (2) se projettent sur les neurones à acétylcholine, sur les neurones à GABA de l'hypothalamus postérieur, sur les noyaux oculomoteurs (les yeux bougent durant le sommeil paradoxal) et sur la formation réticulée bulbaire (3) responsable de la paralysie musculaire. Le réseau permissif (le rectangle rouge en pointillés, en haut à droite), empêche le déclenchement du sommeil paradoxal pendant l'éveil ; il est constitué de neurones à sérotonine, à noradrénaline et à GABA, actifs pendant l'éveil et qui inhibent le réseau exécutif (les circuits non fonctionnels pendant l'éveil ont été schématisés par des traits en pointillés). Pour que le sommeil paradoxal s'installe, il faut que le système permissif soit lui-même inhibé : ce dernier est sous le contrôle du système anti-éveil de l'hypothalamus antérieur et d'autres neurones du tronc cérébral que l'on n'a pas représentés.

A quoi rêvent les chats ?

Au cours du sommeil paradoxal, l'activité électrique venant du cortex moteur est aussi intense que pendant l'éveil actif, mais les motoneurones de la moelle épinière, qui assurent les mouvements, sont silencieux.

Jean-Pierre Sastre de notre laboratoire a décrit le comportement d'animaux qui ont des lésions des neurones responsables de l'inhibition des motoneurones. L'éveil et le sommeil lent ne sont pas modifiés. Le sommeil paradoxal conserve toutes ses caractéristiques, mais le tonus musculaire persiste. Le chat, dont les mouvements ne sont plus inhibés, redresse la tête, se lève, se met à l'affût devant une proie imaginaire, fait le gros dos, le poil hérissé, souffle comme s'il était

devant un ennemi, fait sa toilette, ou encore joue avec une balle ou une souris invisibles. La durée (cinq à six minutes) de ces périodes oniriques est identique à celle des phases de sommeil paradoxal enregistrées avant la lésion.

L'expression de ces comportements résulte de l'activation de neurones du système limbique. Le sommeil paradoxal aurait pour fonction, au cours du développement, de mettre en place les circuits dont l'expression est caractéristique de l'espèce. Chez l'adulte, il servirait à les maintenir afin de préserver la personnalité ou à les modifier en fonction de l'expérience vécue, pour améliorer l'adaptation à l'environnement.

que la lésion neurotoxique des terminaisons noradrénergiques du locus coeruleus supprime l'hypersomnie qui survient après un stress de courte durée. Au contraire, le stress chronique (dont la durée est supérieure à quatre heures) entraîne une réduction du temps de sommeil, à cause d'une production excessive d'hormones surrénaliennes, notamment de cortisone. Chez l'homme, le traitement de certaines maladies par de fortes doses de cortisone réduit notablement la durée de sommeil.

En bref, l'augmentation de la durée du sommeil paradoxal, après un stress de courte durée, résulte de l'activation en cascade de plusieurs boucles de régulation qui renforcent le système anti-éveil. Les hypersomnies observées à la suite de séances d'apprentissage complexes résultent vraisemblablement de tels mécanismes.

Il nous reste à évoquer le rôle d'une hormone dans le sommeil paradoxal : celui de la prolactine, une hormone de la lactation, mais qui est aussi présente chez les mâles. Parmi ses nombreuses fonctions, elle participerait au contrôle du sommeil paradoxal. Ainsi, chez une lignée de rats ayant un déficit en prolactine, nous avons observé une anomalie du rythme circadien du sommeil paradoxal sans modification des durées du sommeil. Or, chez le rat sain, l'ablation de l'hypophyse, où est produite la prolactine, n'entraîne pas cette anomalie du sommeil. Avec Luce Paut, nous avons mis en évidence un système neuronal indépendant de l'hypophyse et synthétisant la prolactine. Nous ignorons

encore le mécanisme d'action de la prolactine, mais nous espérons l'élucider en étudiant le rôle des récepteurs de la prolactine découverts sur les neurones du réseau de l'horloge biologique.

En résumé, la régulation du cycle veille-sommeil-rêve comprend cinq éléments : le système de l'éveil, du sommeil lent et du sommeil paradoxal, le réseau de l'endormissement et l'horloge biologique qui assure le rythme circadien.

L'alternance du sommeil lent et du sommeil paradoxal semble avoir une origine métabolique. Au cours du sommeil paradoxal, le cerveau consomme autant de glucose et d'oxygène que pendant l'éveil. La durée du rêve dépend des réserves énergétiques disponibles. Au contraire, le sommeil lent économise l'énergie : le métabolisme général et la température corporelle diminuent, et les réserves énergétiques se reconstituent.

Le sommeil lent et le sommeil paradoxal étant commandés par des systèmes différents, on leur attribue des fonctions différentes. Ainsi, un exercice physique intense et une température ambiante élevée pendant l'éveil entraînent une augmentation du sommeil lent. Au contraire, la durée du sommeil paradoxal augmente à la suite de situations nouvelles mettant en jeu la survie (par exemple, un stress d'immobilisation ou une épreuve de labyrinthe). Au cours du sommeil paradoxal, les comportements caractéristiques de l'espèce s'expriment (voir l'encadré ci-dessus). Lorsque l'apprentissage est maîtrisé ou lorsque l'animal est habitué au stress répété, le

sommeil redevient normal. La privation de sommeil perturbe l'acquisition de la maîtrise de ces situations. Chez l'homme, la suppression prolongée du sommeil paradoxal ne semble pas perturber la mémorisation. Toutefois, les tests servant à l'évaluation des troubles de la mémoire ne mettent pas les personnes qui participent aux tests dans des conditions de survie aussi difficiles que les animaux.

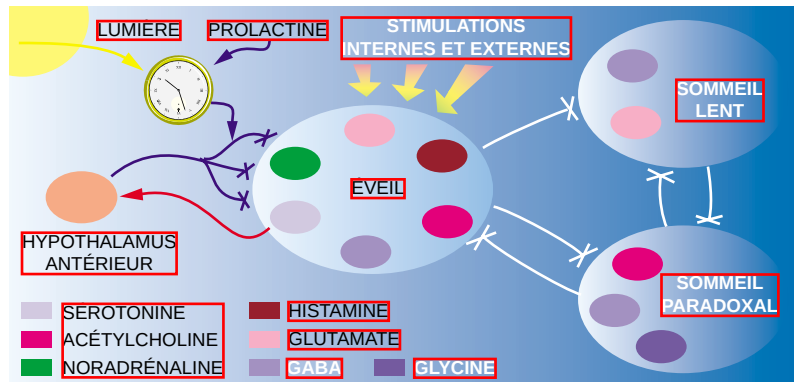
Les troubles du sommeil

Quelles sont les origines des insomnies ? Les troubles dus à des anomalies des réseaux du sommeil lent et du sommeil paradoxal semblent assez rares. Ils surviennent au cours des maladies dégénératives ou traumatiques du système nerveux central. Les difficultés d'endormissement, qui ne sont pas dues à une maladie somatique ou psychiatrique, ne résultent généralement pas d'un trouble du sommeil, mais d'un trouble de l'éveil.

Deux hypothèses sont envisageables : la persistance de l'activité du réseau de l'éveil et l'hypoactivité du système anti-éveil. Divers facteurs du milieu extérieur – tels la lumière, le bruit, ou la température –, du milieu intérieur – telles la faim, la soif, la douleur – et les stimulations affectives (les émotions ou l'anxiété) ou cognitives sont de puissants facteurs éveillants. Pour la sécurité, l'éveil est prioritaire : on doit se sentir en sécurité pour s'endormir.

Quand les facteurs précédents ne sont pas en cause, l'insomnie peut résulter d'une perturbation du réseau anti-éveil, notamment d'une diminution de l'activité des neurones à sérotonine. Cela expliquerait l'effet somnifère de certains antidépresseurs qui augmentent la concentration de sérotonine dans la fente synaptique par inhibition de la recapture. L'hypoactivité résulterait de la dégénérescence neuronale due au vieillissement ou à un traumatisme.

Il existe d'autres types d'insomnies : l'hypnagogie de Jouvett, c'est-à-dire la perception erronée du sommeil. Elle s'observe chez les personnes âgées ou ayant subi une intervention chirurgicale avec une anesthésie prolongée. Ces personnes ne se souviennent pas d'avoir dormi, bien que les enregistrements montrent le contraire. Cette plainte résulte d'un trouble de la mémoire. La rééducation mnésique peut les aider à se souvenir de leur sommeil.



4. LES INSOMNIES résultent d'une inhibition insuffisante de l'éveil (à gauche une publicité pour un somnifère : «Ne soyez plus le seul éveillé quand toute la ville dort, prenez...»). Le système de l'éveil est assuré par plusieurs neurotransmetteurs excitateurs activés par les stimulus externes ou internes. Le système de l'éveil empêche le sommeil de se déclencher (les inhibitions sont schématisées ci-dessus par les croix). Quand ce système est mis au repos par le système anti-éveil localisé dans l'hypothalamus, les inhibitions exercées sur les neurones du sommeil lent et du sommeil paradoxal sont levées. C'est le système de l'éveil lui-même qui active le système anti-éveil, par l'intermédiaire d'une de ses composantes : la sérotonine.

Certaines personnes ne s'endorment que très tard, et ce retard de phase de l'horloge biologique est souvent interprété comme une insomnie. Il réduit, effectivement, le temps de sommeil (quand la personne doit se lever pour aller travailler), ce qui entraîne une somnolence diurne excessive, avec son cortège d'effets indésirables : une inattention, une baisse de l'efficacité physique et intellectuelle, voire des accidents.

Quelles conséquences cliniques tire-t-on de ces constatations ? L'approche thérapeutique proposée est souvent comportementale : plus de la moitié des insomnies sont améliorées, sinon guéries, quand le médecin explique simplement aux patients comment se déroule une nuit de sommeil et quand il prodigue quelques conseils d'hygiène de vie (avoir une alimentation équilibrée, pratiquer un exercice physique modéré et régulier, mais pas le soir, ne pas boire de boissons excitantes en fin d'après-midi, se lever tous les jours à heure fixe, etc.).

En cas d'échec, le médecin aidera le patient à rechercher les causes de la stimulation excessive du système de l'éveil, et prescrira éventuellement des médicaments stimulant le système anti-éveil : pour réhabituer les insomniaques à dormir, la prescription de somnifères pendant quelques jours est parfois nécessaire. La majorité des somnifères agit en se fixant sur des récepteurs GABA, c'est-à-dire en activant un circuit inhibiteur : le réseau de l'éveil est inhibé, mais ces somnifères ont l'inconvénient de perturber d'autres cir-

cuits, comme celui de la mémoire et de l'humeur. De surcroît, de nombreux somnifères entraînent une dépendance dont les personnes traitées doivent être averties. L'arrêt du médicament doit être progressif pour éviter le syndrome de sevrage (anxiété, cauchemars, insomnie). Une meilleure connaissance de la constitution du récepteur GABA permettra aux pharmacologues de mettre au point des molécules qui agiront plus spécifiquement sur le système anti-éveil.

Les hypersomnies

La narcolepsie est caractérisée par des accès invincibles de sommeil durant la journée, parfois accompagnés de paralysie musculaire (catalepsie), à l'origine d'accidents de la route ou du travail. Les émotions ou les horaires irréguliers de sommeil favorisent les crises chez les personnes génétiquement prédisposées. La narcolepsie est vraisemblablement un trouble du contrôle du système permissif du sommeil paradoxal. Des traitements pharmacologiques (notamment le modafinil) normalisent les accès narcoleptiques.

Les hypersomnies (lorsque la durée du sommeil dépasse 12 heures) résultent parfois d'une hypoactivité du réseau de l'éveil, ou d'un hyperfonctionnement du système anti-éveil. Seule une approche pharmacologique est aujourd'hui envisageable : de nombreuses molécules stimulent les composantes du réseau de l'éveil, mais on ne dispose pas encore de substances qui réduisent spécifiquement l'acti-

tivité du système anti-éveil. Ces hypersomnies diffèrent de la somnolence diurne excessive, due au manque de sommeil ou à la perturbation du déroulement du sommeil nocturne par des troubles associés au sommeil, tels que des apnées ou le syndrome des jambes sans repos.

Les différentes pièces qui constituent le puzzle du sommeil se mettent en place. Aujourd'hui, les recherches sur la fonction du sommeil paradoxal et du rêve reposent sur l'étude, chez l'animal, d'hypersomnies déclenchées par des substances pharmacologiques plutôt que sur les privations de sommeil, dont on ne contrôle pas tous les paramètres. Ces études nous révéleront peut-être pourquoi le sommeil paradoxal est apparu si tardivement au cours de l'évolution, avec les oiseaux et les mammifères.

Jean-Louis VALATX est directeur de recherche à l'unité INSERM U 480, dirigée par Raymond Cespuglio, à l'Université Claude Bernard de Lyon.

J.-L. VALATX, *Régulation du cycle veille-sommeil*, in *Le sommeil humain*, sous la direction de O. Benoit et J. Foret, Masson éditeur, pp. 25-37, 1995.

J.-S. LIN et M. JOUVET, *Potential Brain Neuronal Targets for Amphetamine-, Methylphenidate-, and Modafinil-Induced Wakefulness, Evidenced by c-fos Immunohistochemistry in the Cat*, in *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, vol. 93, pp. 14128-14133, 1996.

M. JOUVET, *Les mécanismes de l'éveil*, in *Arch. Physiol. Biochem.*, vol. 104, pp. 762-769, 1996.

Les Araméens

LUC BACHELOT

Dans des sites bientôt noyés par la construction d'un barrage, les découvertes archéologiques renouvellent notre vision du monde araméen, de son organisation sociale, de ses coutumes et de ses écritures.

L'araméen évoque l'univers biblique. Jésus parlait araméen et la presque totalité du Talmud de Babylone fut rédigée en cette langue. Du VIII^e siècle av. J.-C. à la conquête d'Alexandre le Grand (III^e siècle av. J.-C.), de l'Indus à la Méditerranée, l'araméen était la *lingua franca* des habitants de ces régions. Durant la période romaine, elle était encore pratiquée dans de nombreuses communautés du Moyen-Orient et elle survit aujourd'hui encore dans quelques villages syriens (Mahallulla à proximité de Damas) et dans les collines

du Tur Abdin, entre la Turquie et la Syrie.

Pourtant les Araméens nous ont laissé peu de documents. De 1995 à 1997, les découvertes spectaculaires d'une équipe d'archéologues et d'historiens franco-italo-syrienne sur le site de Tell Shioukh Faouqâni (haute vallée de l'Euphrate, Syrie) apportent des informations de première main sur le monde araméen.

Ainsi dans les décombres d'une maison datant du VII^e siècle, avons-nous trouvé un lot d'archives privées comprenant des tablettes d'argile ins-

crites entièrement en caractères cunéiformes assyriens, d'autres en caractères alphabétiques araméens, d'autres encore mêlant les deux systèmes d'écriture. La rareté des tablettes écrites en araméen et leur présence conjointe, au sein d'un même lot d'archives, avec des tablettes cunéiformes font l'intérêt exceptionnel de cette découverte. Le corpus total des textes araméens sur argile ne comprend que quelques dizaines d'exemplaires (une soixantaine peut-être!), alors que, toutes périodes confondues, des centaines de milliers de textes cunéiformes ont été



1. TABLETTE ARAMÉENNE du VII^e siècle av. J. -C. Découvert en 1995, c'est le plus long document en langue araméenne connu. Ci-dessus, une partie de la maison où cette tablette a été trouvée. Le texte décrit un prêt contre un homme donné en gage ; le prêteur au nom local, Se'-usnî, traite avec les occupants assyriens. La traduction est de F. M. Fales : Sceau de ... 'I et Miyâ et Palti hommes de l'armée du roi des Benê-Zaman, qui donne en gage un homme, Pashâ,... à Se'-usnî, pour huit sicles [poids] d'argent. On ne pourra se retourner contre Se'-usnî. Si quelqu'un achète l'homme, le prix (sera) d'une mine et un intérêt d'une demi sera suffisant, mais si l'homme travaille pour Se'-usnî, l'acquéreur donnera la compensation de deux tiers de son offre. Quiconque parjurera, sera responsable sur la vie du roi [auquel il est lié] par son serment de loyauté. S'ils rendent la somme, ils ramèneront l'homme. Quiconque prête sa faucille [participe à la récolte] pour la moisson (voit sa dette levée)... Témoins : Hadd-... fils de ... et témoins : Sin-Zabad, le batelier et (A)num (?) -mare' et Se-izîrî et Hassan et Palat'-el de tarbusibi, Mulles-ibni, Ma se (...) Hana, "Aplad-sagab fils de Sassi-ili.

sauvegardés. Les documents écrits en araméen sont très rares : écrits sur des matériaux périssables, papyrus ou parchemins, ils n'ont pas résisté au temps. Seules ont traversé les siècles les inscriptions sur pierre (sur la statue essentiellement) et sur argile. Pourtant depuis le VIII^e siècle, l'empire des Assyriens, qui s'étend sur la quasi-totalité de la Mésopotamie, du Zagros, la chaîne montagneuse qui sépare l'Iran de l'Iraq actuels, à la côte méditerranéenne, avait adopté l'araméen.

À la cour du roi, par exemple, les textes étaient rédigés en deux langues et inscrits selon deux systèmes d'écriture : en akkadien avec caractères cunéiformes et en araméen avec caractères alphabétiques. Une fresque qui ornait les murs du palais du roi assyrien à Til Barsip, l'actuel Tell Ahmar situé sur les bords de l'Euphrate, à une quinzaine de kilomètres en aval de Tell Shioukh, et datant du VIII^e siècle av. J.-C., montre deux scribes côte à côte, écrivant l'un sur une tablette d'argile, l'autre sur un support souple, sans doute un papyrus (voir la figure 5).

Le choix d'un support particulier pour noter chacune des langues a été déterminé par des contingences matérielles. Les signes cunéiformes, composés uniquement d'éléments rectilignes, s'impriment dans l'argile fraîche au moyen d'un stylet taillé en coin (= *cuneus* en latin), d'où leur vient leur nom, alors que l'araméen, qui comprend des signes plutôt curvilignes, devait être dessiné. Une pointe trempée dans l'encre, s'appliquant sur un support souple, convenait mieux à ce type de tracé. Un tel document avait en outre l'avantage d'offrir plus de place au scribe, tout en étant plus léger et donc plus facilement manipulable qu'une tablette d'argile.

Cette commodité d'emploi a lourdement handicapé les historiens, privés d'une documentation à jamais disparue. Fort heureusement, certains scribes notèrent l'araméen sur des tablettes d'argile. On s'interroge sur les raisons de ce choix : peut-être la disponibilité constante du matériau servant à la confection d'une tablette les

2. SUR LA STATUE D'UN ROI ARAMEEN de Guzana, en Syrie du Nord, est gravé l'un des plus longs textes bilingues assyro-araméens : une supplique du roi de Guzana au dieu de l'orage, Hadad, pour avoir longue vie et prospérité, suivie d'une malédiction pour tous ceux qui toucheront au monument.

Philippe Mallard



poussa-t-elle à cette pratique, alors que l'utilisation du papyrus ou du parchemin nécessitait l'acquisition et la préparation beaucoup plus longue et probablement plus coûteuse du matériau ? Par économie de temps et de moyens, les scribes utilisèrent en certaines occasions ce qu'ils avaient sous la main : un peu d'argile et un bout de bois ou de roseau pour écrire.

La découverte récente à Tell Shioukh Faouqâni de plusieurs tablettes araméennes constitue donc une véritable aubaine. D'autant que l'une est actuellement le plus long document dont nous disposons (voir la figure 1). Par ailleurs, deux autres tablettes nous ont permis de déterminer le nom ancien du site de Tell Shioukh Faouqâni.

La ville de Burmarina, est redécouverte

Le toponyme est indiqué sur une tablette par la séquence des cinq lettres BRMRN. L'écriture araméenne ne notant que les consonnes, restait à y intercaler les voyelles permettant de prononcer le nom. La clé fut donnée par les annales du roi assyrien Salmanasar III (858-824), qui mentionnaient la ville de Burmarina, précisément située dans la région du Bît Adini, c'est-à-dire celle qui, du Sud au Nord, s'étend de la grande boucle de l'Euphrate aux alentours de Karkemish. Le texte des annales décrit le violent affrontement, en 856 av. J. -C., entre le conquérant assyrien et les Araméens du Bît Adini, menés par un chef fougueux : Akhuni.

«Quittant la ville de Til Barsip – dit le texte – je m'avançai vers celle de Burmarina qui appartenait à Akhuni de la tribu du Bît Adini. J'assiégeai la ville, la pris et passai trois cents soldats par le fil de l'épée. Devant la ville, j'érigeai une pyramide de têtes coupées. Quittant la ville de Burmarina, je traversai l'Euphrate au moyen de radeaux faits de peaux de chèvres...»

Burmarina, précise ailleurs le texte, fut atteinte par les troupes assyriennes après une journée de marche. Les 15 kilomètres qui séparent les deux sites correspondent bien à la longueur d'une étape journalière d'une armée en campagne. Le nom de Burmarina était donc déjà connu par les annales assyriennes, mais nous ne savions situer précisément la ville sur une carte. C'est maintenant chose faite.

Les documents épigraphiques trouvés ces dernières années (150 documents découverts depuis 1995) datent tous de la fin de la période néo-assyrienne (VII^e siècle av. J.-C.). Ils constituaient une seule et même archive privée, composée de textes administratifs et juridiques écrits soit en araméen, soit en cunéiforme assyrien. L'une des tablettes cunéiformes porte la date de 676 av. J.-C., tandis qu'un autre fragment se réfère à une période antérieure à 648 av. J.-C., ce qui correspond au règne d'Esarhadon et au début de celui d'Assurbanipal.

Que nous transmettent ces textes? Plusieurs exemplaires (les araméens surtout) ont été utilisés comme étiquettes attachées à des contenants, des jarres probablement, ainsi que

le montrent les empreintes de ficelles et de tissus encore visibles sur leur revers. D'autres transcrivent soit des actes légaux (contrats de vente, prêts, etc.), en rapport avec les activités commerciales du propriétaire, soit de simples notes de comptabilité domestique. Contrairement aux documents cunéiformes, plusieurs mains et une grande variété de *ductus* caractérisent les textes araméens. Par ailleurs, nous avons pu observer que des surcharges graphiques (palimpsestes) ont été portées sur des tablettes déjà inscrites et sèches.

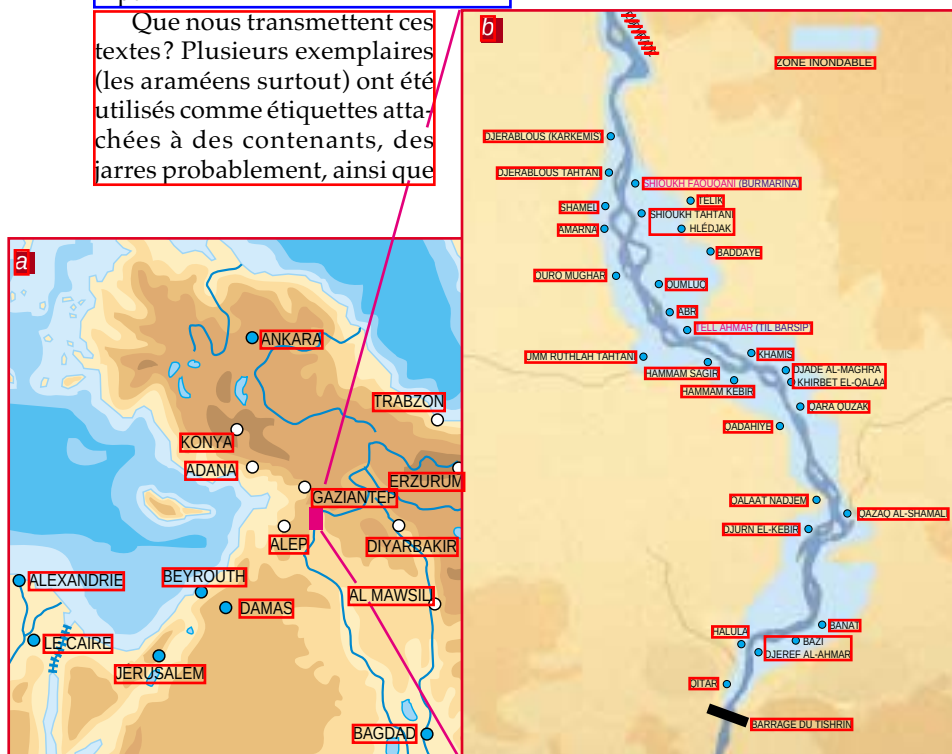
Dans ces archives, les tablettes cunéiformes assyriennes représentent la très grande majorité de l'ensemble. On compte de nombreux contrats de vente, des attestations de prêts d'argent surtout et de grains également. La graphie de ces documents est de bonne qualité, parfois même particulièrement soignée. Cette dernière caractéristique, associée à la mention des différentes parties et des témoins professionnellement liés au palais néo-assyrien de la capitale provinciale de Til Barsip, fait penser que Burmarina était un bourg dépendant de l'école scribale de la capitale provinciale toute proche. Par ailleurs, l'attestation fréquente du dieu lune Sin (écrite ici dans sa forme araméenne Se'), dont le centre culturel était Harran, témoigne de la vivacité du milieu culturel et religieux araméen.

Les caractères araméens peints sur les tablettes

Jusqu'à maintenant, l'étude des épigraphes araméennes sur tablettes concernait essentiellement les textes gravés sur argile, longs et monolingues, ou de simples «endos» sur la tranche de tablettes cunéiformes. La possibilité que, dès le VII^e av. J.-C., des inscriptions araméennes aient été portées à l'encre sur des tablettes d'argile avait déjà été envisagée, mais jamais aucun exemple de cette pratique n'avait encore été attesté.

Or, une douzaine de textes au moins, qui portent des traces de lettres peintes (ajouts portés dans les espaces libres du texte gravé en araméen ou endos sur des tablettes cunéiformes), ont été retrouvés cette année à Tell Shioukh Faouqâni, ce qui ouvre de façon spectaculaire un nouveau champ d'investigation dans les études de l'écriture araméenne. Le cas des espaces libres aménagés au milieu même d'un texte est particulièrement intéressant, car il montre qu'une intervention postérieure à la première rédaction d'un texte était d'emblée prévue, ce qui dénote des pratiques juridiques beaucoup plus complexes que ce que l'on imaginait.

Les récentes découvertes de Tell Shioukh Faouqâni nous imposent de reprendre l'examen des tablettes araméennes de cette époque déjà publiées, pour examiner si elles ne comportent pas des épigraphes peintes. La petitesse et la légèreté des traces de pein-



3. CARTE DU PROCHE-ORIENT (a), avec l'emplacement de la zone de sauvetage archéologique (rectangle rouge) sur l'Euphrate syrien (b). Fouilles (c) en cours de la maison de Tell Shioukh Faouqâni (Burmarina) où les tablettes ont été trouvées.



4. OBJETS DÉCOUVERTS au voisinage des tablettes. Élément de décoration de mobilier (a), sceaux appartenant probablement au propriétaire de la maison (b) et (c), brûle-parfum en basalte décoré de têtes

de taureau d'inspiration néohittite (d), lame d'épée en fer (e), trois empreintes de sceaux sur la tranche d'une tablette araméenne (f), «poids-canard» de 550 grammes, mesure typique de la région (g).

ture rendent l'étude de ces documents extrêmement difficile, si bien qu'elle ne pourra être entreprise qu'avec la mise en œuvre de techniques particulières (microscopie, rayons X, etc.).

Ces archives proviennent d'une couche extrêmement riche en matériel, où coexistaient, à côté de la céramique retrouvée en quantité considérable, des objets de métal, de pierre, d'ivoire et de coquillage spécifique de l'activité commerciale exercée par le propriétaire de cette maison (poids-canards, poids en métal notamment). Tout fut retrouvé dans les décombres, écrasé sur place par les murs écroulés. La présence, parmi le matériel de cette pièce, de centaines de coquillages reste quelque peu énigmatique. Leur conservation en dehors de tous autres restes alimentaires n'incite pas à les considérer comme de simples rebuts de la consommation. Ils semblent avoir été gardés pour un usage que nous ne sommes pas, à l'heure actuelle, en mesure de préciser : décoration, broyage pour une préparation quelconque, éléments servant à la compatibilité, etc.

Nous avons aussi trouvé un poids-canard en basalte dont la masse de 0,532 kilogramme correspond peut-être à la mine de Karkemish, l'étalon de la mine officielle de l'empire étant d'un poids légèrement inférieur : ce poids témoigne de la persistance de la culture de cette ville même après sa destruction et la déportation de ses habitants en 717 av. J.-C. ; un sceau représentant une chèvre-poisson (voir la figure 4 c), créature mythologique associée au dieu Enki/Ea, connue sous le nom babylonien de *Suhurmasu*, appartient peut-être au propriétaire de la maison et possesseur des archives que nous avons dégagées. Il est inté-

ressant de constater qu'à côté de ce symbole typique du vieux fonds culturel mésopotamien du Sud se trouve le symbole lunaire, renvoyant au dieu Sin, dont le culte était dominant en Syrie du Nord et particulièrement à Haran, située à une cinquantaine de kilomètres au Nord-Est de Tell Shioukh Faouqâni. Des coquilles de murex, un récipient en basalte, un brûle-parfum décoré de protomes de taureau, et une abondante céramique de luxe, très fine, appelée *palace-ware*, ainsi que plusieurs exemplaires de céramique à glaçure, témoignent de la richesse relative du propriétaire de la maison où ils furent trouvés.

À qui imputer cette destruction ? À un raid militaire sur la petite ville de Burmarina ? À des créanciers insolvable de Se-Usni, cet homme d'affaires suffisamment riche pour prêter de l'argent à intérêt et prendre des personnes en gage ? Sans doute ne le saura-t-on jamais... mais ce dont on peut être assuré, c'est que la destruction de cette maison fut volontaire. En cas de destruction accidentelle, en effet, le propriétaire aurait récupéré son matériel professionnel et certainement ses archives, ce qui manifestement ne fut pas le cas ; probablement fut-il empêché de reprendre ce dont il avait le plus besoin. Avant ces événements, il est très probable que ces documents étaient conservés dans une grande jarre : certains fragments, en effet, furent découverts sur la paroi interne d'une jarre écrasée sur place.

Sur le plan historique, on retiendra surtout que, deux siècles après que la région eut été intégrée à l'empire assyrien, une famille pouvait faire usage, dans la rédaction de ses documents, de deux systèmes d'écriture différents. On retrouvait d'ailleurs un autre élé-

ment fondamental dans la région : celui du monde hittite, dont l'empire disparut au XII^e siècle, mais dont la culture continua de survivre au sein de petites principautés appelées néohittites. Les tablettes de Tell Shioukh Faouqâni en portent la marque sur l'iconographie des trois empreintes de cachet et de sceau-cylindre visibles sur la tranche de la tablette représentée sur la figure 1. Tous les motifs identifiables font, en fait, partie du répertoire hiéroglyphique hittite. Sur l'empreinte du centre, on perçoit parfaitement un oiseau dont l'aile se déploie à la verticale du dos de l'animal. Cette façon très particulière de représenter l'oiseau est caractéristique de l'idéogramme néohittite qui n'est autre que la notation du nom propre Nuwanda. Les deux autres empreintes pourraient être celles d'un même sceau-cylindre que l'on a appliqué sur l'argile fraîche sans le dérouler. Sur l'empreinte de gauche, il s'agit d'une tête de bœuf, également du répertoire néohittite, tout comme le motif en forme de balance visible sur celle de droite et qui n'est qu'un simple complément phonétique, le reste de la composition sans doute présent sur le cylindre n'ayant pas été imprimé.

La fouille de la pièce aux tablettes de Burmarina est pratiquement achevée, aussi sommes-nous peut-être en possession de la totalité de ces archives familiales. Il n'est cependant pas exclu que d'autres documents proviennent du dégagement des autres pièces de cette demeure. Quoi qu'il en soit, l'exploitation des textes découverts au cours de ces trois dernières années nécessitera plusieurs années de travail. Mais d'ores et déjà, la somme d'informations recueillies, croisée avec celle des témoignages assyriens, tour à tour

ennemis jurés et suzerains, met en lumière bien des aspects de la vie pratique comme du destin de ce peuple qui eut une si grande importance dans l'histoire du Proche-Orient.

Les Araméens, peuple mythique

D'origine nomade, les Araméens vécurent dans la vaste zone moyen-orientale s'étendant de la chaîne montagneuse du Zagros, frontière naturelle entre l'Iran et l'Iraq actuels, à la côte méditerranéenne et jouèrent un rôle politique considérable entre le IX^e et le VI^e siècle av. J.-C. Les Assyriens, qui conquièrent pendant cette période la totalité de cette zone, et auxquels les Araméens donnèrent à maintes reprises du fil à retordre, en ont parlé d'abondance. Sargon II (721-705 av. J.-C.), le grand roi assyrien, dresse un portrait quelque peu terrifiant de ses ennemis.

«Le sentier qui mène [...] à Babylone, le haut lieu de l'Enlil des dieux, était alors inaccessible ; son chemin était inapte aux déplacements [...] ; ses routes étaient toutes couvertes de plantes épineuses, de chardons et de buissons touffus ; lions et chacals s'y ralliaient et y gambadaient comme des agneaux. Araméens et Sutéens qui vivent sous la tente, fugitifs criminels, engeance de brigands, campaient dans la steppe et l'interdisaient aux passants. Quant aux endroits cultivés [...], leurs champs n'avaient plus ni rigoles ni sillons ; ils étaient couverts de toiles d'araignées. Les terres fertiles s'étaient changées en terrains vagues. Plus de chants de moissonneurs dans les champs ; le grain n'y avait plus sa place. Je coupai les buissons touffus et je brûlai épines et chardons. Avec mes armes j'abattis les Araméens, ces fils de brigands ; je fis un massacre de lions et de loups.»

Le trait est sans doute forcé, comme toujours dans l'expression officielle du pouvoir impérial assyrien, qui fait des Araméens l'archétype du peuple fougueux, vindicatif et conquérant. À ces attributs s'ajoute l'aura de leur langue parlée, à partir du VIII^e siècle

av. J.-C., dans tout le Moyen-Orient, puis de l'empire perse ; elle fut surtout l'une de celles des textes bibliques. Aussi les Araméens nous apparaissent-ils comme un peuple mythique. Impression d'autant plus marquante que peu de données matérielles sur leur mode de vie nous sont parvenues. Image singulière et forte dont l'effet est sans doute accentué par tout ce que le mode de vie des nomades peut avoir d'inhabituel ou de fascinant pour nous, «civilisés» depuis des millénaires, organisés pour vivre en sédentaires. Les Araméens n'ont jamais constitué une entité politique, unique et cohérente. Vivant au sein de multiples tribus, ils n'ont pu établir leur suprématie que momentanément et sur des territoires limités, même lorsqu'ils ont fini par constituer une série de petits États. Ils n'en ont pas moins, nous le verrons, laissé une trace profonde dans l'histoire.

L'histoire des Araméens

L'existence des Araméens est attestée dès le milieu du III^e millénaire av. J.-C. en Mésopotamie. Pourtant, il ne s'agit encore que de rares mentions. Le toponyme d'Aramki (pays d'Aram), mentionné dans un texte de la III^e dynastie d'Ur, apparaît aussi au début du II^e millénaire av. J.-C. dans les textes de Mari et d'Alalah. Mais les Araméens ne font leur entrée dans l'histoire en

tant que réelle puissance qu'à partir du XII^e siècle av. J.-C. Cette émergence se produit dans un contexte que les historiens qualifient d'«âge sombre», car il correspond à l'affaiblissement des grands États, confrontés à de graves problèmes internes. De vastes mouvements de populations affectent l'ensemble du Moyen-Orient et mettent à mal les anciennes puissances.

Au cours des premières années du règne de Tiglath-Phalazar I^{er} (1115-1076) apparaissent les premières mentions d'un rôle marquant des Araméens. Durant la quatrième année de son règne, le roi assyrien conduit une campagne contre les Araméens (désignés alors par le terme Akhlamu-araméens) dans le désert de Suhu, c'est-à-dire dans la région de Mari et jusqu'à Karkemish. Le roi dit avoir traversé l'Euphrate, pour poursuivre les Araméens, à 28 reprises. Cela ne suffit pas à lever la pression qu'ils continuèrent à exercer jusqu'à la fin de son règne. Les assauts massifs des Araméens sur la Babylonie et l'Assyrie, auxquels s'ajoutèrent les famines consécutives à des récoltes désastreuses, affaiblirent tant l'Assyrie que Tiglath-Phalazar dut battre en retraite à Kalamu. La lutte continue jusqu'à ce qu'opposassent Assyriens et Araméens est décrite sur l'«obélisque cassé», d'Assur-Bel-Kala (1073-1056 av. J.-C.). Pour le X^e siècle avant notre ère, nous n'avons que les relations de Salmanazar III, postérieures d'environ un demi-siècle aux événements qu'elles décrivent et qui se seraient déroulés sous le règne d'Assur-Rabi II (1012-972). Il ne s'agit rien moins que de la prise par les Assyriens des cités de Pitru, Mutkinu, sur la grande boucle de l'Euphrate.

Salmanazar nous conte également les campagnes qu'il mena lui-même contre les Araméens dans cette même région. Après les batailles contre Ahuni à Til Barsip, puis à Burmarina, la lutte se poursuivit sous le règne du roi Assur Dan (934-912) qui, bien sûr, ne se priva guère de faire état de ses succès militaires. Il semblerait pourtant que les victoires les plus décisives furent remportées par Adad-Nirari (810-783). Il convient, par



5. SUR CETTE FRESQUE (au musée du Louvre), le scribe de gauche note sur un parchemin un texte en araméen, alors que celui de droite écrit sur une tablette d'argile un texte en cunéiforme assyrien.

ailleurs, de signaler que c'est à cette époque seulement que l'on peut faire état de véritables entités politiques araméennes en Syrie du Nord et que des documents strictement issus de leur société apparaissent.

Les États araméens de Syrie du Nord

Le Bît Adini correspond à une région d'importance stratégique considérable, puisqu'elle comprend le Moyen-Euphrate, frontière actuelle entre la zone côtière et la Djezireh syrienne, mais aussi voie de communication vers le plateau anatolien. Son territoire a pu s'étendre à l'Est jusqu'au Balikh. Dans cette zone, la présence araméenne se superpose à une population imprégnée de culture hittite. L'effondrement de l'empire hittite au XII^e siècle avait laissé place à de petits États dits néohittites, dont la marque est visible dans tout le Bît Adini, à Bur-marina, mais aussi à Til Barsip, où les archéologues ont retrouvé des inscriptions néohittites. Après cela, l'intégration de cette cité en une sorte de confédération araméenne dirigée par Akhuni fut peut-être à l'origine de la détermination assyrienne d'en finir avec ceux qu'ils considéraient être un obstacle majeur à leur progression vers l'Ouest.

Cette constellation de petits États araméens peut faire penser au modèle bien connu des « cités-États ». Or leur genèse montre que les Araméens s'organisèrent de façon bien différente. Les cités-États, comme leur nom l'indique, étaient essentiellement des centres urbains contrôlant les territoires situés à proximité immédiate de la ville, mais guère plus. Les dynastes araméens, en revanche, s'efforcèrent toujours d'étendre leur influence politique au-delà de leur cité et de former de véritables royaumes. Ils réussirent parfois à y intégrer plusieurs villes royales, des villes fortifiées comme de plus modestes agglomérations, bourgs ou villages. Souvenons-nous des coalitions organisées par Akhuni dans le Bît Adini et celui d'Arne, du Bît Agushi sous Salmanazar III. Si elle se réalisa avec des fortunes diverses, la tendance à l'unification semble avoir été une constante des États araméens.

La recherche d'une prise de contrôle de territoires toujours plus vastes eut pour conséquence inévitable la néces-

sité d'intégrer au royaume des populations d'origines très différentes. Dès lors, le royaume était fondé sur le principe de la territorialité, bien plus que sur celui de l'ethnie. Cependant le trait marquant du monde araméen est que tous ces royaumes restaient profondément imprégnés des valeurs et du mode de vie des sociétés tribales dont ils étaient issus.

Cela n'a pas empêché l'installation de royautés héréditaires fortes. Ce mode institutionnel semble s'être peu à peu établi dans tous les États araméens qui nous sont connus (Guzana, Samal, Arpas, Hamad et Damas). Les souverains disent souvent régner sur le trône de leur père. « Hadad-yis'i roi de Guzana, fils de Shamash-nari roi de Guzana... [l']a érigée et [la lui a] offerte... » (ligne 6 et sq. du texte araméen de la statue de Tell Fekhéryé).

Comme on peut aisément l'imaginer, le caractère héréditaire de la royauté ne s'imposa pas d'un seul coup. Un long processus de maturation lui fut nécessaire, comme le laisse bien percevoir la vie des rois du IX^e siècle av. J.-C. Ainsi Ahuni, qui mit un certain temps à unifier le Bît Adini, ne mentionne-t-il jamais ses prédécesseurs. De toute évidence, son royaume se constitua à partir d'éléments plus ou moins autonomes, des tribus, des petites principautés urbaines. Le roi n'en était pas moins l'objet d'une véritable glorification. Dans l'iconographie, il est abon-

damment représenté dans l'exercice de ses fonctions religieuses ou guerrières, ou encore à la chasse, l'autre façon de symboliser sa puissance et sa domination sur la totalité de l'univers. Le thème de la chasse au lion ou au taureau, si magnifiquement traité sur les reliefs néo-assyriens de Nimroud ou de Ninive, les deux capitales de l'empire assyrien, actuellement en Iraq du Nord, l'est également à Sakce-Gözu.

Une jeune fille vaut un mouton

Malgré leur nombre limité, les textes donnent parfois des indications très précises sur la valeur des biens de toutes sortes et sur les structures sociales : ainsi la tablette de Tell Shioukh Faouqâni, présentée ici, indique-t-elle qu'un homme pouvait être placé en gage pour quelques dizaines de grammes d'argent. Une inscription de Kulamuwa (roi du Bît Adini) nous apprend que l'issue favorable du conflit qui l'opposa à Adanafit baisser le prix des esclaves. On y note qu'on pouvait acquérir une jeune fille au prix d'un mouton et un homme à celui d'un habit ! Il est clair que la royauté évolua beaucoup avec le temps et ne put s'exercer de la même manière avant et après la conquête assyrienne. On sait, en effet, que les grands rois assyriens soumettaient les souverains dont ils avaient conquis les terres à un tri-



6. ÉCHANTILLONS DU MATÉRIEL DÉCOUVERT AVEC LES TABLETTES. Trois poids-canards (flèches bleues) étaient utilisés par le commerçant et les coquillages (flèche rouge) peut-être employés comme jetons pour la comptabilité. On a rassemblé aussi un lot de tablettes (flèche verte), des vases émaillés (flèches blanches) et un support de jarre (flèche jaune).

but. Malgré leur soumission aux conquérants, les rois araméens tentaient de conserver leur titre. Dans les textes araméens et assyriens relatant les mêmes événements, le roi soumis n'est appelé que «gouverneur» dans la version assyrienne, alors que, dans la version araméenne, il est toujours gratifié du terme de roi. Comme à toutes les époques, les relations entre la puissance conquérante et ceux qui s'y trouvaient soumis apparaissent très contrastées. Certains princes araméens résistèrent, d'autres s'accommodèrent de la situation nouvelle, collaborèrent franchement et tirèrent de cette attitude d'importants avantages. Bar-Rakib, par exemple, roi du Bit Gabbari, fait part d'une joie non dissimulée d'avoir pu «courir – dit le texte – à la roue du char de son seigneur, le roi d'Assur» (Tiglat-Phalazar III, 744-727 av. J.-C.). S'agissait-il d'un honneur accordé à l'Araméen : celui de pouvoir mener son propre char au côté même de celui du Grand Roi, comme l'ont pensé certains spécialistes, ou au contraire, pour d'autres, d'un acte de totale allégeance, le prince devant courir à pied à côté de l'attelage royal, situation apparemment fort peu gratifiante ? La question n'a pas été tranchée, mais on reconnaîtra que, dans les deux cas, Bar-Rakib entretenait avec son conquérant des rapports d'obédience.

Bar-Rakib, comme l'indique l'inscription qu'il fit graver sur la statue de Pananuwa, fils de Bar-Sur, mentionne des déportations qu'il ordonna lui-même pour le compte des Assyriens. Cependant, quels que fussent les bons offices et le zèle des rois soumis, les conquérants avaient la main lourde. Après la destruction et les pillages systématiques qui accompagnaient la conquête, le pays continuait d'être fortement taxé. À cette contribution économique forcée, s'ajoutait l'obligation de fournir des hommes pour l'armée impériale, sans compter les multitudes d'hommes, de femmes et d'enfants, déportées à des centaines de kilomètres pour servir de main-d'œuvre, main-d'œuvre affectée aux

chantiers des constructions somptueuses que les souverains faisaient bâtir en Assyrie même.

La hiérarchie sociale

Elle évolua bien sûr considérablement avec le temps. Il est vraisemblable qu'à ses débuts la société araméenne était, nous avons déjà eu l'occasion de le signaler, formée de tribus : organisation plus égalitaire que celle des sociétés sédentarisées depuis longtemps et s'étant constituées en États nécessairement très hiérarchisés. Assez rapidement toutefois, ces sociétés se



7. Noble dame occupée à filer (stèle de basalte du IX^e siècle provenant de Maras).

structurent, reprenant plus ou moins le modèle d'organisation des sociétés étatiques de l'Âge du bronze qui les avaient précédées.

La famille araméenne est de toute évidence patriarcale. La cellule familiale se présente avant tout sous les traits de la maison du père, comme c'était le cas dans les sociétés contemporaines du même type : Israël et Juda. L'auteur d'un document connu sous le nom de «Proverbes d'Ahiqar» des-

fine ces maximes, selon ses propres termes, à «mon fils». L'autorité paternelle y apparaît incontournable et intransigeante : un père doit enseigner, fût-ce par les châtiments corporels, l'obéissance à son fils. Méthode forte et radicale qui, dans le texte, est étendue aux relations entre un maître et ses serviteurs. On peut obtenir, bien qu'indirectement, d'intéressantes informations sur la structure familiale, à partir d'autres documents, notamment des cadastres de la région d'Haran (en Turquie, tout près de la frontière avec la Syrie). Ils donnent le recensement des travailleurs agricoles au service des grands propriétaires terriens. Le patriarcat et, d'une façon plus générale, la primauté accordée aux hommes y sont patents. Ainsi le texte énumère-t-il d'abord tous les hommes, pères et fils, et ensuite seulement les femmes, mères et filles ou parfois encore la mère du père de famille, voire ses sœurs non mariées. Trait remarquable et significatif de cette littérature : seuls les hommes sont appelés par leur nom, les femmes restant dans un total anonymat. La prééminence des hommes se manifeste encore par le fait que le ou les métiers du chef de famille sont précisément notés, alors que jamais aucune activité professionnelle n'est mentionnée pour les femmes.

La condition des femmes

L'archéologie complète heureusement la pauvreté de l'information livrée par les textes. À travers elle, la vie quotidienne des femmes sort un peu de l'ombre, car les quelques exemplaires de correspondance et les proverbes qui sont à peu près les seules sources littéraires que l'on puisse convoquer sont peu prolixes sur le sujet. Dans les correspondances, il n'existe presque aucune information sur la condition des femmes. Quant aux proverbes, ils sont également peu prolixes sur le sujet ; on y constate cependant qu'hommes et femmes étaient justiciables des mêmes honneurs quand ils étaient parents. Notons que, si les textes cadastraux de Haran ignorent presque

totallement le rôle des femmes, des documents néo-assyriens mentionnent des musiciennes araméennes. Indication intéressante, mais qui renvoie malgré tout à une situation exceptionnelle. En revanche, l'ensemble des tâches liées à la confection des tissus – filage, tissage, etc. – semble avoir tenu un rôle important dans la vie des femmes. Les données textuelles en font état, mais c'est surtout l'archéologie qui fournit les plus abondants témoignages de cette activité féminine.

L'iconographie représente fréquemment des femmes en train de filer. La production de ces images, statues et bas-reliefs, fort coûteuse, n'aurait jamais été entreprise pour la représentation de scènes auxquelles on n'attachait pas une importance particulière. Une stèle néohittite de Maras, dans l'ancienne Gurgum, montre une femme assise, vêtue d'un long manteau à bordure brodée et portant sur la tête un bandeau décoré de fleurs, qui tient dans la main gauche un fuseau et dans la droite le fil qu'elle tire (*voir la figure 7*). Comment, en prenant en considération la valeur symbolique attachée à ce travail auquel devaient s'adonner toutes les femmes, comment ne pas évoquer les figures d'Hélène et de Pénélope? On retrouve, par ailleurs, dans les niveaux d'habitat de tous les sites du Moyen-Orient des quantités considérables de fusaïoles en terre crue ou cuite et souvent des poids qui font partie de métiers à tisser. Ceux-ci, hélas, ont le plus souvent disparu, le bois dont ils étaient faits ayant généralement pourri avant d'être exhumé par les archéologues.

On comprend bien que le tissage était, comme dans toutes les sociétés traditionnelles, une activité essentielle de la maison. Le texte bilingue de Karatepe (qui présente une version en akkadien et l'autre en araméen) nous montre que la sécurité pour un pays était même symbolisée par la liberté dont pouvait jouir une femme de se déplacer où elle le désirait en tenant un fuseau à la main.

Les métiers des araméens

Habitant des agglomérations parfois importantes, les Araméens exerçaient de multiples métiers, mais, en ces temps agités, la guerre occupait un temps considérable dans la vie des hommes. Si nous disposons d'une relative abondance d'informations pour

tout ce qui touche au domaine militaire, peu d'éléments sur les autres métiers exercés par les Araméens sont exploitables. Les textes araméens nous renseignent surtout sur les personnages attachés à la cour ou à la haute administration. Indépendamment de ceux qui étaient contraints à ce travail forcé, les Araméens se répartissaient en deux grandes catégories imposées par les conditions géoclimatiques : celle des agriculteurs et celle des éleveurs. Dans les zones du Nord et de l'Ouest de la Mésopotamie, comme celles du Hanigalbat, du Haut-Khabour, du Balikh ou de la vallée de l'Oronte, le niveau de précipitation des pluies était suffisant pour permettre une agriculture non irriguée. On cultivait donc sur ces terres bien arrosées des céréales, du blé, mais surtout de l'orge et même des plantes légumineuses. Si le propriétaire de la maison de Tell Shioukh Faouqâni tirait profit de l'usure, il cultivait également des céréales, puisqu'il est stipulé dans le contrat ici présenté (*voir la figure 1*) que la participation aux moissons pouvait lever une dette d'argent! Par ailleurs, les tribus araméennes se trouvant en bordure du désert syrien nomadisaient toujours et pratiquaient l'élevage.

L'important commerce des tissus

Outre les denrées ou les produits déjà évoqués, les tissus faisaient également l'objet d'un commerce important. Les étoffes de fibres végétales existaient dans toute la Mésopotamie et étaient utilisées par toutes les couches de la population. Le lin, en revanche, ne pouvait se trouver que parmi les classes fortunées. Les royaumes araméens de l'Ouest, qui prisait beaucoup le lin finement tissé, identique à celui que les Égyptiens appelaient le «lin des rois», durent satisfaire régulièrement les exigences des Assyriens, qui n'appréciaient pas moins qu'eux la qualité de ce produit et se disaient «avides de tissus de lin à frange multicolore». Dans son cours supérieur au moins, l'Euphrate constitua un axe commercial important. Outre sa latitude qui le situe au carrefour de la zone côtière, de la Djézireh syrienne et du plateau anatolien, c'est à son établissement sur les rives du grand fleuve que Karkemish dut sa prospérité. Bien qu'habitant sou-

vent des zones dépourvues de matières premières, les Araméens n'en ont pas moins contribué largement à la prospérité des régions où ils se trouvaient. Artisans habiles, remarquables éleveurs, ils prirent une part importante dans l'échange et la circulation des produits de toutes sortes, dans l'ensemble gigantesque constitué par la zone où ils s'étaient répandus. Les données de Tell Shioukh en témoignent largement.

Mais l'héritage que laissèrent les Araméens dépasse largement le domaine économique, et son importance mythique est liée à l'écriture d'une partie des textes bibliques. Enfin, la destinée du peuple araméen est emblématique, dans la mesure où elle illustre la confrontation entre nomades et sédentaires qui a scandé toute l'histoire du Moyen-Orient.

Les textes de Tell Shioukh Faouqâni/Burmarina, encore à l'étude, n'ont pas fini de livrer tous leurs secrets... De plus, cette source d'information considérable, qui sera peut-être de nouveau alimentée par les découvertes des prochaines campagnes de fouilles, apportera-t-elle une touche plus précise au tableau que nous pouvons dresser des Araméens. Il est grand temps (*voir la carte de la figure 3*), car si, en raison de sa position géographique, Tell Shioukh peut échapper aux eaux du nouveau lac artificiel qui inondera très prochainement la région, d'autres sites majeurs pour l'histoire des Araméens, comme Tell Ahmar/Til Barsip disparaîtront à jamais.

La mission archéologique de Tell Shioukh Faouqâni a été menée par le Groupe international de recherches archéologiques, composé d'archéologues, d'historiens et de spécialistes de l'environnement, syriens, italiens et français, dirigé par Luc Bachelot (chercheur au CNRS) et Frederick Mario Fales (professeur à l'Université d'Udine, Italie).

P. E. DION, *Les Araméens à l'Âge du fer : histoire politique et structure sociale*, Librairie J. Gabalda, Paris, 1997.

Syrie, mémoire et civilisation, Cluzand éditeur, Paris, 1992.

F. M. FALLES, Luc BACHELOT et Ezio ATTARDO, *An Aramaic Tablet from Tell Shioukh Fawqani, Syria*. Semitica, 46.

Dissections et métamorphoses

IAN STEWART

Les anciennes et les nouvelles techniques de dissection d'une figure.



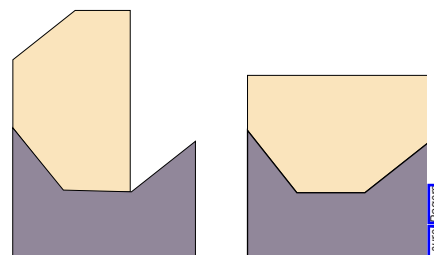
Au début de leurs carrières, l'Américain Sam Loyd et l'anglais Henry Ernest Dudeney collaborèrent à une chronique régulière de récréations mathématiques, pour le magazine *Titbits* (Amuse-gueules). Loyd énonçait les problèmes et Dudeney, sous le pseudonyme de «Sphinx», écrivait les commentaires mathématiques et décernait les prix. Cette collaboration tourna court et les deux hommes cessèrent de collaborer. Ils créèrent alors une industrie des jeux mathématiques de chaque

côté de l'Atlantique, soulevant des questions mathématiques dans le cadre d'histoires qu'ils pensaient amusantes, et qui l'étaient parfois.

Un exemple typique de leur travail est le problème de la chaise à porteurs de Loyd. La question mathématique est : comment découper une telle chaise en le plus petit nombre possible de morceaux pour qu'ils soient redisposables selon un carré ; Loyd l'évoquait dans un conte où la chaise à porteurs d'une jeune dame se repliait pour protéger ses occupants de la pluie.

Les problèmes de ce type sont des *dissections*. Un excellent ouvrage sur ce thème consacré sera bientôt publié sous le titre *Dissections : Plane and Fancy*, par Grey Frederickson (Cambridge University Press).

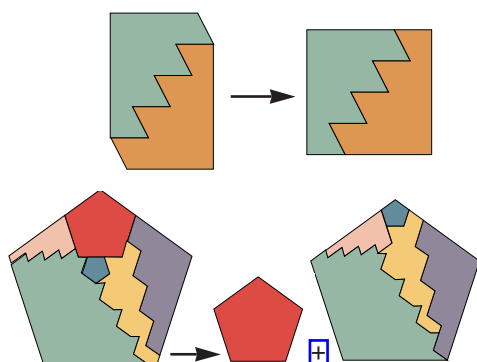
L'invariant mathématique conservé par les dissections est l'aire. Lorsqu'une figure est découpée et que ses morceaux sont réarrangés, l'aire totale ne change pas. En fait, de profondes questions mathématiques se cachent sous cette proposition d'apparence évidente. Étrangement, elle n'est pas vraie à trois dimen-



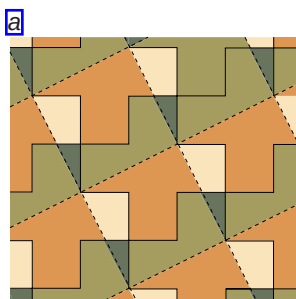
1. Le puzzle de la chaise à porteurs et sa solution.

sions quand les «parties» sont suffisamment complexes. Dans le célèbre paradoxe de Banach-Tarski, une sphère pleine est «découpée» en six morceaux qui peuvent être réassemblés pour former deux sphères pleines de même rayon que la sphère originelle. Les mathématiciens Stefan Banach et Alfred Tarski prouvèrent ce théorème en 1924. Le résultat, logiquement indiscutable, semble si étrange qu'un paradoxe s'y dissimule.

Comment le volume peut-il doubler par réarrangement des parties ? L'artifice consiste à utiliser des pièces si complexes que justement elles... n'ont pas de volume ; elles ressemblent plus à des



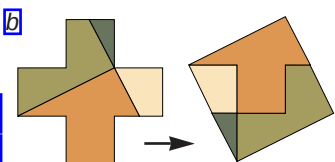
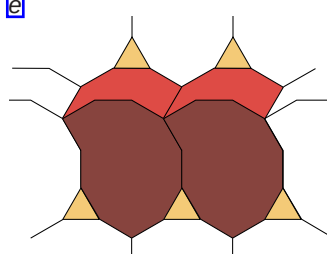
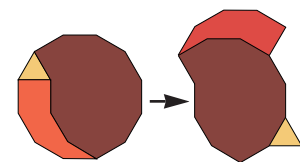
2. Les escaliers inspirent des dissections.



c

d

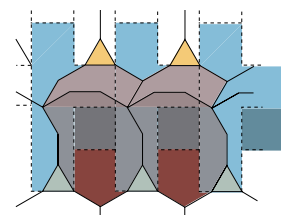
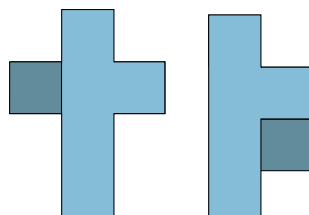
e



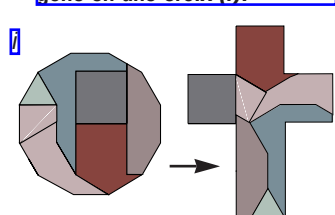
f

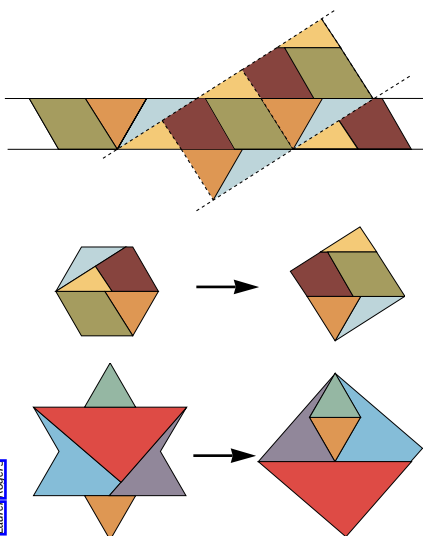
g

h



3. Les pavages du plan permettent de «lire» des dissections : on voit comment la croix grecque est réarrangée en carré (a et b). Plus compliqué : un dodécagone (c) peut être découpé et réarrangé en la forme (d) qui pave le plan (e), tout comme la croix (f et g). Superposant les deux pavages (h), on lit une dissection du dodécagone en une croix (i).





4. Des bandes infinies pavées par des formes différentes nous inspirent de possibles dissections ; en haut, un hexagone en un carré. Une étoile de David est, similairement, dissectée en carré (en bas).

nuages de poussières sphériques infiniment compliqués qu'à des formes juxtaposées.

Il n'y a, faut-il le dire, aucune possibilité pratique de réaliser cette dissection sur une sphère réelle – les trafiquants en métaux précieux peuvent soupirer de soulagement –, mais la dissection démontre combien le concept de volume est subtil. Tarski a démontré en 1935 qu'il n'existe pas de dissections « paradoxales » modifiant les aires des surfaces, quelle que soit la complexité des parties découpées – mais il en existe, cependant, à la surface d'une sphère.

Lorsque les parties issues du découpage de l'objet ont des aires, ou des volumes, bien définis, il n'y a pas de construction contraire à l'intuition. En 1833, un lieutenant de l'armée prussienne, P. Gerwein, résolut le problème essentiel des dissections posé par le mathématicien hongrois Farkas Wolfgang Bolyai. Gerwein prouva que, étant donné deux polygones plans d'aires

égales, on peut découper l'un en un nombre fini de pièces polygonales qui peuvent être assemblées pour former l'autre. Ce résultat est dénommé théorème de Bolyai-Gerwein, bien qu'un certain William Wallace l'ait démontré auparavant, en 1807.

Le théorème de Bolyai-Gerwein ne se généralise pas à la dimension trois. En 1900, le mathématicien allemand Hilbert demanda si deux polyèdres d'égal volume étaient toujours « équivalents par dissection », c'est-à-dire pouvaient être la réunion du même ensemble de parties polyédrales. Une année après, le mathématicien Max Dehn, spécialiste de topologie, prouva un surprenant théorème : un cube et un tétraèdre régulier ne sont pas équivalents par dissection polyédrale, répondant par la négative à Hilbert.

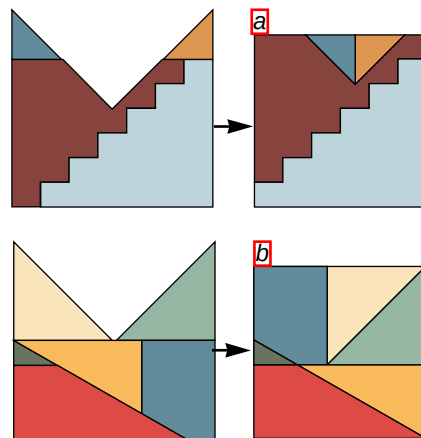
PAVAGES, BANDES ET DISSECTIONS

Des techniques mathématiques apparemment sans relation avec les dissections vous aident dans les recherches. Vous pouvez progresser dans ce domaine à l'aide de tâtonnements inspirés, mais seulement si vous avez une excellente imagination spatiale. Une des vertus de *Dissections* est qu'il explique nombre de techniques générales utilisées dans leurs recherches.

Une de ces techniques consiste à couper une forme suivant un « escalier », qui peut alors être décalé d'une marche pour créer une forme différente. David Collier, un fervent des dissections, conçut des dissections élaborées fondées sur ce principe. Sa dissection du pentagone (voir la figure 5) démontre l'égalité pythagoricienne : $5^2 + 12^2 = 13^2$.

Une autre méthode générale est celle de la mosaïque. Nombre de formes intéressantes peuvent être découpées et réassemblées en formes qui pavent le plan. Si deux mosaïques distinctes, chacune formée de pavés de même aire, sont superposées, il est souvent possible d'y « lire en clair » une dissection d'une des formes dans l'autre. Par exemple, une croix grecque peut de la sorte être « dissectée » en carré.

Un usage plus élaboré de la même idée de base – la dissection d'un dodécagone en une croix latine – est dû à



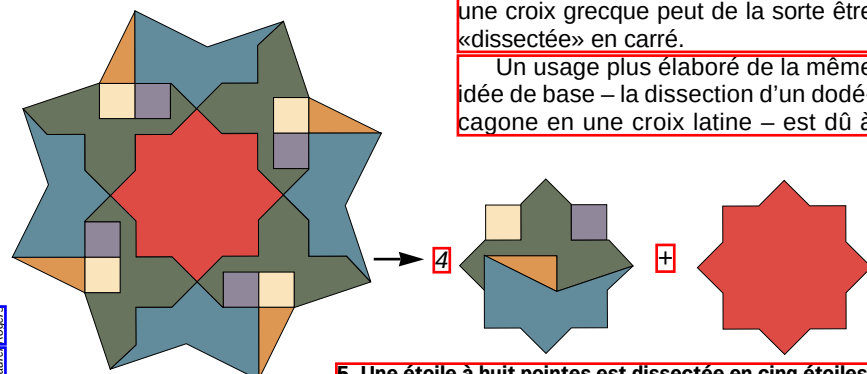
6. Dissection trompeuse : Sam Loyd pensait pouvoir disséquer une mitre en un carré. Malheureusement le carré (a) était un rectangle ! La bonne dissection est représentée en (b).

Harry Lindgren, l'auteur de *Geometric Dissections* (Van Nostrand, 1964). Le premier pas, et le plus difficile, est le découpage du dodécagone et son réarrangement en une forme pavant le plan. La croix latine (de même aire que le dodécagone) peut aussi se réarranger pour paver le plan. La superposition des deux pavages conduit à la dissection désirée.

Une troisième technique est la méthode des bandes. Chaque forme est découpée et réarrangée en pavé qui reproduit une bande infinie. Un recouvrement adéquat des bandes peut alors déterminer une dissection. Celle d'un hexagone en carrée, obtenue par Paul Busschop, provient de cette technique des bandes (Busschop était belge ; solitaire, il écrivit un livre dont son frère assura la publication posthume en 1879). Harry Bradley, un ingénieur américain, découvrit en 1897, alors qu'il était assistant à l'Université, comment dissectionner une étoile de David en carré par la même méthode.

Les problèmes de dissection ne se limitent pas à changer une seule forme en une autre. Souvent tout un ensemble de formes doivent être découpées et réassemblées, ou vice versa.

Les dissections vous hypnotisent, et, à l'occasion, l'œil peut vous induire en erreur. En 1901, Loyd commit une bourde mémorable : il affirma pouvoir dissectionner un carré privé d'un de ses quarts, une mitre, en un carré. Malheureusement, le « carré » apparent était, en définitive, un rectangle aux côtés proportionnels à 48 et 49. Son grand rival, Dudeney, fut ravi de signaler l'erreur en 1911, et indiqua une dissection correcte, illustrée sur la figure 6. Aussi, si vous voulez découvrir de nouvelles dissections, suivez le conseil prodigué par nombre de parents à leur progéniture : « Amusez-vous bien, mais faites attention. »



5. Une étoile à huit pointes est dissectée en cinq étoiles.



Le monde des machines

JEAN-PAUL DELAHAYE

Envisageons sérieusement l'hypothèse selon laquelle nous sommes des ordinateurs.

Nous sommes en l'année 2098. Monsieur J. Martin souffre d'une grave maladie qui atteint progressivement chacun de ses organes. Il possède déjà un rein, un poumon, un cœur, des jambes et des bras artificiels, une peau de remplacement... seul son cerveau reste biologique. À chaque opération, son médecin l'a assuré que l'organe substitué était fonctionnellement identique à celui enlevé, et J. Martin, lorsqu'il s'est réveillé après les greffes, n'a jamais rien perçu d'anormal.

Aujourd'hui, les infos sur les neurones indiquent que son cerveau est touché, mais son médecin-informaticien connaît les techniques pour mesurer l'état instantané du cerveau et pour «reprogrammer» son équivalent, neurone par neurone, dans un ordinateur, lequel se loge facilement dans la boîte crânienne en plastique de Monsieur Martin.

Notre médecin décide d'opérer la substitution, et un nouveau cerveau-ordinateur convenablement programmé est placé dans le corps de Monsieur Martin. Celui-ci se réveille deux heures plus tard et, comme lors des précédentes greffes, ne ressent aucun changement majeur. Le lendemain, il rentre chez lui où son épouse et ses enfants l'accueillent avec chaleur et soulagement.

Tout serait parfait si, à l'hôpital, le cerveau de Monsieur Martin n'avait été conservé. Après observation, l'organe se révèle totalement sain, contrairement aux analyses erronées d'un laborantin inexpérimenté. Le même médecin replace le cerveau dans un corps artificiel en tout point identique à celui de Monsieur Martin (les caractéristiques précises de son corps étaient décrites dans son dossier médical). Monsieur Martin retourne à son domicile. Il est, bien sûr, quelque peu surpris d'y découvrir son double. Mais qui est le double de l'autre ? Cette fable montre que la croyance que nous sommes des machines, croyance baptisée *mécanisme*, conduit à des situations inattendues et choquantes.

Reste que la question de la philosophie mécaniste est bel et bien posée et qu'à défaut de prévoir ce que l'avenir de la médecine autorisera, on peut quand même s'interroger sur sa validité.

Nous voudrions vous faire découvrir une théorie proposée à titre d'hypothèse et explorée avec le plus grand soin depuis une dizaine d'années par Bruno Marchal, qui travaille à l'Institut de recherche interdisciplinaire et de développement en intelligence artificielle de Bruxelles.

Les difficultés que rencontre B. Marchal à faire reconnaître son travail montrent qu'il est plus aisé de faire accepter une recherche concernant un sujet précis, même inintéressant (comme «L'influence de la direction du vent sur les pratiques sexuelles des fourmis unijambistes de l'île de Pâques»), que d'explorer des hypothèses que certains jugent déplaisantes pour des raisons extra-scientifiques. Le travail de B. Marchal explore les conséquences de l'hypothèse mécaniste, sans préjuger toutefois de sa validité, et son travail se fonde sur la théorie de la calculabilité, la logique mathématique, et sur certains formalismes de la mécanique quantique, domaines où il fait preuve de minutie et d'érudition. Le monde universitaire est cloisonné en disciplines qui s'ignorent, quand elles ne se méprisent ou ne se combattent pas. Nulle place ne semble réservée aux travaux fondés sur une culture multidisciplinaire impliquant de délicats mélanges de mathématiques, de physique et de philosophie.

B. Marchal étudie le *mécanisme numérique*, théorie selon laquelle, si l'on décrit un être humain avec une précision suffisamment grande, on saisit complètement son identité mentale. À ce niveau de précision, le fonctionnement de l'esprit d'un individu est mécaniquement décrit. Autrement dit, B. Marchal s'interroge sur ce qu'on peut déduire de l'idée que «je ne suis peut-être après tout qu'une machine». Il précise son hypothèse en adoptant le principe que les

machines envisagées, que nous appellerons machines numériques, sont du type de nos ordinateurs actuels : tous les calculs s'y ramènent à des manipulations réglées de «0» et de «1».

Le premier résultat que B. Marchal fait apparaître – et cela seul est déjà très intéressant – est l'indéterminisme que son hypothèse entraîne. Comme nous allons le voir, cette nouvelle forme d'indéterminisme est différente de celles rencontrées jusqu'à présent en physique.

UN INDÉTERMINISME RÉCALCITRANT

Procédons à quelques expériences de pensée, comme on le fait fréquemment en physique et comme Albert Einstein l'a fait avec délectation et génie pour élaborer et justifier sa théorie de la relativité générale.

Si l'hypothèse du mécanisme numérique est vraie, on imagine que l'on saura construire un jour des machines qui analyseront un corps humain tout entier, en enverront la description codée à une machine de reconstitution, par exemple sur la Lune, machine qui alors le recréera ou recréera son équivalent mécanique. La science-fiction a depuis longtemps envisagé ce moyen de transport à la vitesse de la lumière, qu'elle désigne par *téléportation*. Celui qui monte dans une machine de téléportation a le sentiment d'un simple déplacement. De son point de vue, avant que la machine soit mise en marche et sauf en cas de pannes, qu'on espère rares, il est certain de se retrouver sur la Lune.

Imaginons maintenant que le signal avec la description de votre corps soit envoyé à la fois sur la Lune et sur Mars, où deux machines réceptrices différentes vous reconstituent chacune de leur côté. Avant de monter dans la machine, vous savez qu'elle va vous envoyer dans deux directions ; si vous vous posez la question : «Vais-je me retrouver sur la Lune ou sur Mars ?», vous n'avez aucune rai-

son de donner plus d'importance à la machine sur la Lune qu'à celle sur Mars et vous répondez : « Il y a 50 pour cent de chances que j'aille sur Mars, et 50 pour cent que j'aille sur la Lune. »

En recommençant l'expérience un très grand nombre de fois, et en interrogeant les gens qui sortent des machines sur Mars et sur la Lune, on trouverait que la moitié exactement ont fait le voyage Terre-Lune et l'autre moitié Terre-Mars. La prédiction « Je vais arriver sur la Lune » est donc juste une fois sur deux. Nous avons affaire à une indétermination absolue. Même si nous croyons que toutes les lois de la physique sont parfaitement déterministes, cet indéterminisme persiste. C'est bien sûr un indéterminisme psy-

chologique – intime, pourrions-nous dire – qui n'en est pas moins total. Contrairement à l'indéterminisme quantique, il ne peut être évité par aucune théorie spéciale comme celles « à variables cachées et non locales » qu'on a proposées pour rétablir le déterminisme physique.

IMPOSSIBLES PROBABILITÉS

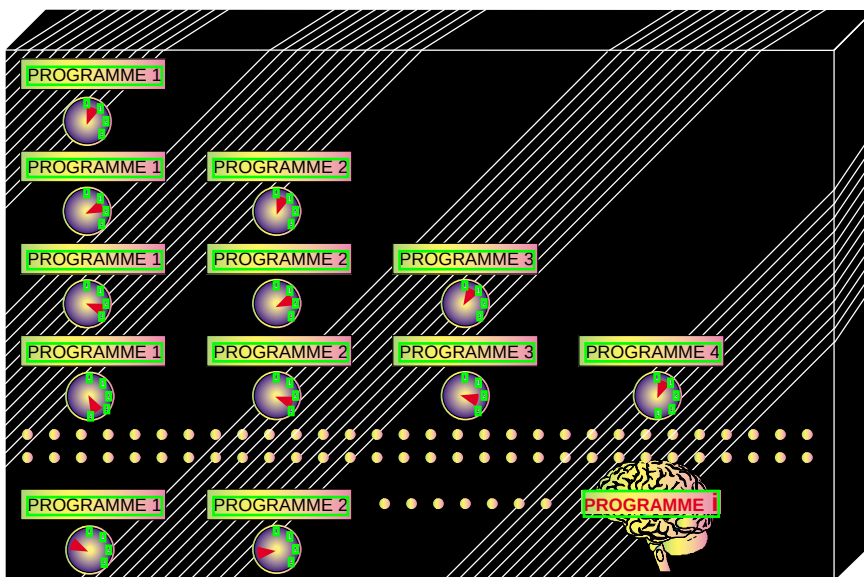
Tout serait simple si l'on ne pouvait envisager qu'une troisième machine ayant capté secrètement le message radio ne reconstitue aussi le voyageur, maintenant sur Saturne. La probabilité est-elle donc de 33,33 pour cent pour chaque destination plutôt que 50 pour cent ?

Allons encore un peu plus loin et imaginons que le message codant le voyageur a été capté par une autre machine, qui conserve en mémoire le message reçu et qui, toutes les heures régulièrement et sans fin, produit une nouvelle copie du voyageur.

Quelle est dans ce cas la probabilité pour le voyageur (s'interrogeant avant le départ) d'être la version numéro 1 432 ou la version numéro 323 846 264 338 ? Il est impossible de répondre, car une infinité de versions du voyageur vont être créées. Aucune théorie des probabilités ne semble s'adapter à un tel contexte. Il y a bien indéterminisme, mais il est tellement grave qu'on ne peut même plus parler de probabilité. Troublant, non ?



1. Si nous sommes des machines, alors il sera possible de réaliser des appareils de téléportation : après avoir enregistré (soigneusement !) sa description, on annihile la personne qui doit voyager. On fait voyager la description par onde électromagnétique. On reconstitue la personne à l'arrivée. On peut aussi la reconstituer deux fois (par exemple, sur la Lune et sur Mars). Celui qui entre dans la machine vit une expérience où ce qui va se passer est pour lui absolument indéterminable à l'avance : il n'a aucun moyen de savoir où il va arriver. Cet indéterminisme « intime », sans lien avec l'indéterminisme physique (quantique ou autre) est troublant. L'illustration est tirée de la bande dessinée *Clarke et Kubrick T.1 agents très spatiaux* d'Alfonso Font, Éditions Glénat.



2. Le *déployeur universel* est un programme qui, une fois lancé, ne s'arrête jamais et fait fonctionner tous les programmes envisageables (en théorie de la calculabilité, on démontre que c'est possible). Il prend la liste de tous les programmes, *Programme 1*, *Programme 2*, *Programme 3*, ... et les fait fonctionner à tour de rôle selon le schéma indiqué. Si votre esprit est équivalent à un programme, et si l'on réalise concrètement un *déployeur universel* et qu'on le fait fonctionner indéfiniment, alors il finit par reproduire votre fonctionnement mental : un *déployeur universel* simule tous les esprits possibles.

LE PROGRAMME DE SIMULATION DE TOUT

La chose peut être rendue encore plus inquiétante en imaginant un «programme de simulation de tout», que B. Marchal dénomme un *déployeur universel*.

Un tel *déployeur universel* fonctionne de la manière suivante : il écrit dans une zone de mémoire le plus simple des programmes possibles (un langage de programmation a été fixé, et l'on mesure la simplicité des programmes par leur longueur ; si plusieurs ont la même longueur, on les classe par ordre alphabétique). Le *déployeur universel* le fait fonctionner durant une seconde. Il écrit ensuite le second programme dans l'ordre de simplicité et fait fonctionner le premier programme et le second une seconde chacun. Le *déployeur universel* écrit ensuite le troisième programme et fait fonctionner le premier, le second et le troisième une seconde chacun, etc. (Le schéma d'appel des programmes est donc 1 12 123 1234 12345, etc.)

Un tel méta-programme engendrant et faisant fonctionner tous les programmes est possible, car l'ensemble des programmes peut être ainsi énuméré et qu'il n'y a aucun obstacle à les faire fonctionner par tranches de une seconde, selon le schéma proposé.

La mise au point de tels programmes ne présente pas de difficultés particulières : B. Marchal en a écrit. Bien sûr, les *déployeurs universels* n'ont guère de fonctions pratiques, car on est obligé

de les arrêter avant que quelque chose d'intéressant ne se produise.

Cependant, si nous ne sommes que des machines numériques (c'est l'hypothèse que nous explorons), alors dans le cours d'un fonctionnement ininterrompu d'un *déployeur universel* vient nécessairement un moment où le programme envisagé qui fonctionne pendant une seconde correspond à celui de mon cerveau à l'instant présent. Pendant une seconde, tout se passera donc dans l'ordinateur qui exécute le *déployeur universel* comme dans mon cerveau maintenant : ma conscience de l'instant aura été simulée. Mon esprit, pendant un court intervalle de temps, existera dans la machine.

Remarquons qu'il n'est pas nécessaire de supposer que le programme simule l'environnement extérieur, car, pour que j'aie une sensation identique à celle que j'ai actuellement, il suffit que les influx nerveux provenant de mes divers organes sensoriels soient correctement simulés.

Un peu plus tard, le même programme sera de nouveau exécuté une seconde de plus, et la simulation de mon esprit se poursuivra donc. Ce que je vis en ce moment sera en fait parfaitement reproduit par tranches d'une seconde, sans que bien sûr j'aie conscience des interruptions.

Toujours sous réserve que le *mécanisme numérique* soit vrai, le *déployeur universel*, en simulant tous les programmes, simulera en réalité tous les esprits possibles. Je suis donc dedans,

comme vous l'êtes, comme toute conscience passée, présente ou future est dedans. En fait, chacune y est une infinité de fois.

Cela rappelle l'histoire de *La bibliothèque de Babel* de Borgès, qui contient tous les livres possibles (voir *Pour La Science*, juillet 1996), mais ici ce n'est pas la description extérieure de ce que nous vivons qui est reproduite, c'est l'esprit et le sentiment intime que nous avons de nous-même : la conscience de soi.

La perspective de tout cela donne le vertige, et il y a quelque difficulté à y croire sérieusement. L'hypothèse du mécanisme numérique, même si elle est loin d'être prouvée, ne paraît pas aussi absurde que les conséquences que nous venons d'en tirer. Aurions-nous adopté une hypothèse non mentionnée en plus de celle du *mécanisme numérique*?

Oui, et cette hypothèse que nous allons expliquer s'appelle le *fonctionnalisme*. Il a donné lieu à de nombreuses discussions en philosophie de l'esprit depuis une vingtaine d'années.

LE FONCTIONNALISME

Nous avons supposé dans la présentation du *déployeur universel* que le fonctionnement d'un esprit, l'essence de ce qu'est une personnalité ou une conscience, est indépendant de la base matérielle qui en constitue le support.

Lorsque l'on change un bras de Monsieur Machin, le fait que ce soit un bras en plastique qui se substitue au bras de chair n'a pas d'importance, car on suppose que la science des greffes a tellement progressé que la fonction du bras est préservée dans le moindre détail. De même, quand il s'agit d'un ordinateur, si je remplace un composant par un autre fonctionnellement équivalent, tout sera identique, et les mêmes programmes fonctionneront à l'identique.

De même encore, si je dispose d'un programme qui calcule les nombres premiers, je peux le faire tourner sur toutes sortes de machines ; à chaque fois, le détail de ce qui se passe est assez différent, mais, à un niveau d'abstraction suffisant, le calcul est le même et, en définitive, ce qui est important lors du fonctionnement de mon programme ne dépend pas de la machine (le langage Java, si à la mode aujourd'hui, a justement cette propriété : les programmes écrits avec lui peuvent fonctionner dans une grande variété d'environnements différents, PC, Macintosh ou UNIX).

L'hypothèse fonctionnaliste qu'on a utilisée sans le dire à propos du *déployeur universel* est l'idée que, pour l'esprit, il en est de même : ce qui est important pour

caractériser mon esprit et son fonctionnement, ce ne sont pas les neurones biologiques particuliers qui se trouvent dans ma boîte crânienne, mais l'organisation abstraite de leur réseau et des flux électriques et chimiques qui les parcourent.

Le *fonctionnalisme* en philosophie de l'esprit est considéré comme acceptable par un nombre de gens : ce serait revenir au vitalisme des siècles antérieurs que de soutenir que la pensée et l'esprit présents dans nos cerveaux le sont à cause du type particulier de chimie ou à cause de propriétés biologiques uniques que seules possèdent les cellules humaines.

Il est beaucoup plus naturel de croire que l'esprit, la pensée, la conscience sont le résultat abstrait de processus abstraits réalisés d'une certaine façon dans les cerveaux des humains, mais qui pourraient être réalisés matériellement d'autres façons, comme le programme de calcul des nombres premiers peut exister et fonctionner de mille façons différentes dans mille machines différentes.

Lorsque nous avons envisagé le *déploieur universel* et que nous avons dit que chacun de nous était dedans, nous avons, sans le dire, utilisé l'hypothèse *fonctionnaliste*. Maintenant que nous en avons pris conscience, la conclusion de l'expérience de pensée du *déploieur universel* s'exprime ainsi :

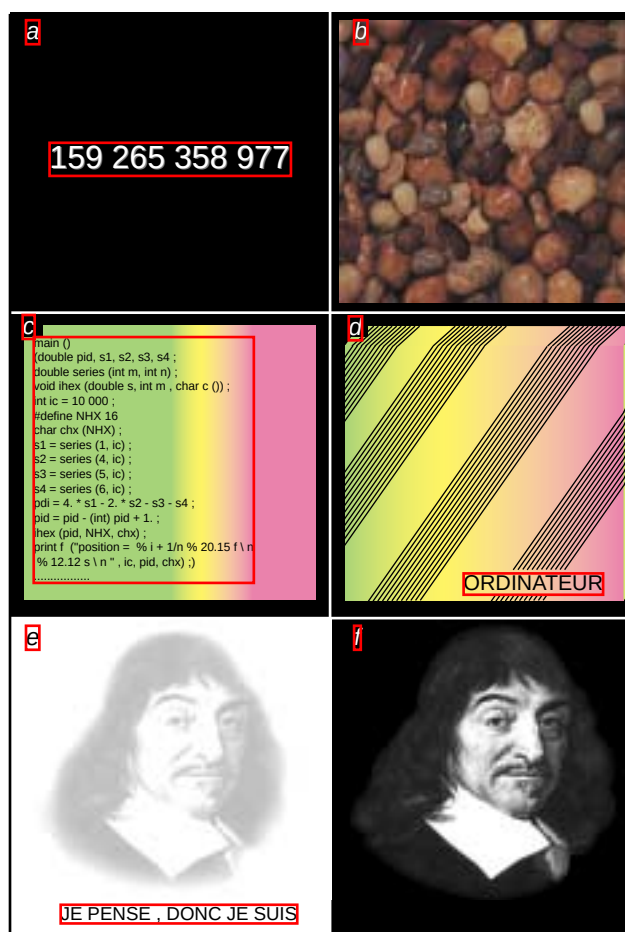
– si nous sommes des machines numériques (hypothèse 1) et,

– si le *fonctionnalisme* est exact (hypothèse 2), alors le *déploieur universel* fait fonctionner tous les esprits possibles ayant existé, existants ou qui existeront.

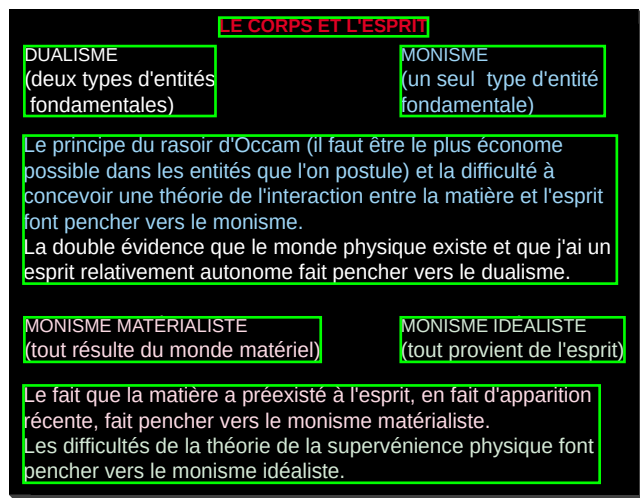
LA SUPERVÉNIENCE PHYSIQUE

Pour franchir l'étape suivante, nous devons nous interroger sur l'importance des réalisations matérielles nécessaires à l'existence d'un esprit.

Il semble naturel de soutenir que, si aucune réalisation



3. LA SUPERVÉNIENCE PHYSIQUE. Un objet mathématique (ainsi l'entier naturel 159 265 358 979) peut être physiquement réalisé : on l'écrit (a) ou on rassemble un nombre de cailloux correspondant (b). Avant que cet entier n'ait été conçu, il existait déjà dans le monde abstrait des objets mathématiques. Il en va de même des programmes informatiques (c) : avant d'avoir été pensé, un programme existe comme un nombre entier. Donc, si je suis un programme (hypothèse mécaniste), mon existence n'exige pas vraiment qu'un monde physique la supporte (e). Cette idée qui dispense d'appuyer la conscience sur la matière est refusée par les philosophes qui soutiennent la thèse de la supervénience physique : pour qu'une conscience existe, il faut qu'un support physique lui soit associé. Cette thèse exige que nous adoptions vis-à-vis des programmes une attitude différente de celle que nous avons vis-à-vis des entiers.



4. Les oppositions de base entre le corps et l'esprit.

matérielle ne résulte d'un processus de calcul, non seulement celui-ci ne sert à rien, *stricto sensu*, mais n'existe pas. Cette idée en termes techniques est que l'esprit «supervient à la matière» (qui lui est nécessaire). Autrement dit encore, l'esprit et la conscience naissent de la matière et ne peuvent se passer de ce support.

B. Marchal explore cette hypothèse avec soin et, au terme d'une longue analyse menée avec minutie, il retrouve la conclusion (aussi énoncée par le philosophe T. Maudlin) qu'à partir du moment où l'on accepte le *fonctionnalisme* il faut abandonner la *supervénience physique*. Autrement dit, il n'est pas raisonnable de s'accorder d'existence qu'aux pensées dont une réalisation matérielle existe quelque part dans l'univers physique.

On comprend directement la position de B. Marchal en revenant au cas du programme de calcul des nombres premiers : pour qu'il existe, il n'est pas nécessaire d'admettre que je l'ai vraiment écrit. Il existe en tant que structure mathématique, même si personne n'a jamais vu ce programme, ne l'a jamais écrit ni même jamais envisagé. La conclusion de B. Marchal n'est que la généralisation de cette idée à l'esprit et à la conscience. Une telle conclusion repose sur une option particulière en philosophie des mathématiques appelée le *réalisme* : les objets mathématiques, en particulier les nombres et les programmes (qu'on peut, grâce à des méthodes introduites par Kurt Gödel, ramener à des nombres) existent indépendamment de nous.

Le *réalisme*, quand il ne porte que sur des nombres et des programmes, est difficile à récuser (quoique ce soit l'option retenue par les philosophes *intuitionnistes*), donc la nouvelle hypothèse que propose B. Marchal est plausible. Ainsi, à partir d'hypothèses parfaitement identifiées, B. Marchal défend l'idée qu'un esprit existe en tant qu'être arithmétique abstrait, même si aucune réalisation du programme correspondant n'a été physiquement réalisée ni mise en fonctionnement.

Toutefois, si la conscience que nous avons de nous-même n'a plus besoin de support maté-

1. MECANISME NUMERIQUE
(il existe un niveau de détail où nous sommes des machines numériques, c'est-à-dire des programmes)

2. FONCTIONNALISME
(en changeant des composants d'une machine par d'autres fonctionnellement équivalents, sa nature n'est pas modifiée ; donc mon esprit n'est pas vraiment dépendant de sa réalisation).

3. REALISME ARITHMETIQUE
(entiers et programmes existent indépendamment du monde physique)

La solution du problème du corps et de l'esprit est l'idéalisme, qui sera vérifié par notre réussite à déduire la physique de la théorie de la calculabilité.

5. Si l'on admet les trois prémisses de Bruno Marchal, on obtient une nouvelle théorie philosophique et une conception révolutionnaire de la physique. Si l'on pense que la conclusion est invraisemblable,

alors il faut renoncer à l'une des hypothèses au moins. Nombreux sont ceux qui renoncent au mécanisme, mais peut-être que le réalisme arithmétique est l'hypothèse qui doit être abandonnée.

riel, la physique n'est-elle pas une illusion? Dit autrement, la physique pourrait-elle se déduire de l'existence des machines numériques? La physique peut-elle être élaborée purement logiquement à partir de l'étude de la théorie de la calculabilité?

DUALISME, MATÉRIALISME ET IDÉALISME

B. Marchal défend que cette idée doit être examinée et se fixe le projet de retrouver les lois de la physique par l'étude de la théorie de la calculabilité. Il a déjà obtenu quelques résultats. Avant de les évoquer, je vais situer la conception globale qu'il envisage en la comparant aux théories plus classiques portant sur ce qu'on appelle le problème du corps et de l'esprit.

Très schématiquement, on distingue le *dualisme*, le *matérialisme*, et l'*idéisme*. Le *dualisme* défend que l'esprit et la matière existent et entretiennent des relations l'un avec l'autre. La communication entre les deux mondes est une énigme délicate qui a conduit Descartes (qui soutenait un point de vue dualiste) à proposer qu'elle se faisait grâce à la glande pinéale. Des versions modernes du dualisme ont récemment été défendues par le prix Nobel de médecine 1963 John Eccles, qui propose une théorie fondée sur la possibilité de certains «mécanismes quantiques dans les vésicules du réseau présynaptique des cellules pyramidales du cortex».

Pour des raisons de simplicité et pour éviter le délicat problème de l'interaction entre la matière et l'esprit, le *matérialisme* propose de se débarrasser de l'esprit en décrétant que seule existe vraiment la matière. Dans les versions modernes, le mot *matière* est remplacé par les concepts de particules ou de champs. L'esprit, pour un matérialiste, n'est qu'une illusion ou se ramène à son support physique. Cette conception est celle majoritairement défendue aujourd'hui, car elle semble plus économique en nombre d'entités de base que le dualisme et donc satisfait mieux au principe

du rasoir d'Occam, qui veut qu'en cas de doute, on doive toujours donner la préférence à l'option la plus simple.

Une autre conception satisfait au principe du rasoir d'Occam l'*idéisme* : seul l'esprit existe, la matière n'étant qu'une illusion. À partir du mécanisme, B. Marchal tombe sur un *idéisme*. Son *idéisme* est toutefois très spécial, puisqu'il admet comme élément de base, non pas une substance spirituelle vague et toute-puissante, mais l'univers des *machines numériques abstraites*, qui ne sont qu'un type d'objets mathématiques. Pour cet idéisme, ce qui existe avant tout, c'est une catégorie complexe d'objets mathématiques, et tout se construit à partir de là.

Bien évidemment, la solution de B. Marchal est inattendue, choquante, et ceux qui ont fait l'effort de l'écouter ou de le lire ont rarement réussi à le suivre, tant les deux conceptions dominantes d'aujourd'hui que sont le *dualisme* et le *matérialisme* occupent le terrain et masquent les autres alternatives.

Heureusement sa conception est susceptible d'être testée ou attestée (je n'ose dire prouvée!) : si l'on réussit à déduire la physique de la théorie des machines numériques, la conception de B. Marchal devra certainement être prise au sérieux, quel que soit l'étonnement qu'elle provoque au premier abord. Un premier pas a peut-être été franchi dans cette direction. Pour B. Marchal, la théorie de la calculabilité doit servir de base à une reconstruction de la physique. C'est une théorie non triviale (elle se construit sur l'arithmétique, qui est loin de l'être), dont certaines parties développées pour approfondir la compréhension des théorèmes d'incomplétude de Gödel explicitent ce qu'une machine peut connaître d'elle-même sans se tromper, c'est-à-dire en restant non contradictoire. Cette *logique de la prouvabilité* développée pour comprendre mieux le sens des résultats de Gödel peut être vue comme une *logique des êtres conscients*. B. Marchal en a élaboré une version nouvelle qui semble s'adapter au point de vue qu'il

défend et qui constitue l'apport technique et mathématique de son travail, indépendamment de son interprétation philosophique.

Un point remarquable est que la logique qu'il a développée ressemble à une autre logique qui avait été proposée par G. Birkhoff et J. von Neumann pour rendre compte des observables de la mécanique quantique.

Cette coïncidence doit-elle être interprétée comme le début de la réalisation du programme de reconstruction de la physique par la théorie de la calculabilité? Il est trop tôt pour le dire. Cependant, si c'est le cas, alors cela signifie que la conception philosophique générale qu'envisage B. Marchal doit être examinée avec attention. En explorant avec détermination les conséquences de l'hypothèse du *mécanisme numérique*, B. Marchal a ouvert un champ de recherche nouveau qui, si l'on réussit à y progresser, remettra en cause nos conceptions philosophiques du corps et de l'esprit.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lil.fr

B. MARCHAL, *Informatique théorique et philosophie de l'esprit*, Actes du Colloque de l'Association sur la recherche en cognisciences, Toulouse, 1988.

B. MARCHAL, *Mechanism and Personal Identity*, in *Proceedings of WOCFAI, World Conference on the Fundamental of Artificial Intelligence*, sous la direction de M. De Glas et D. Gabbay, Paris, 1991.

B. MARCHAL, *Des fondements théoriques pour l'intelligence artificielle et la philosophie de l'esprit*, *Revue internationale de philosophie*, 172, 1990.

B. MARCHAL, *Calcul, physique et cognition*, Rapport de recherche, LIFL, 1997.

T. MAUDLIN, *Computation and Consciousness*, in *The Journal of Philosophy*, pp. 407-432, 1989.

Écrans à cristaux liquides

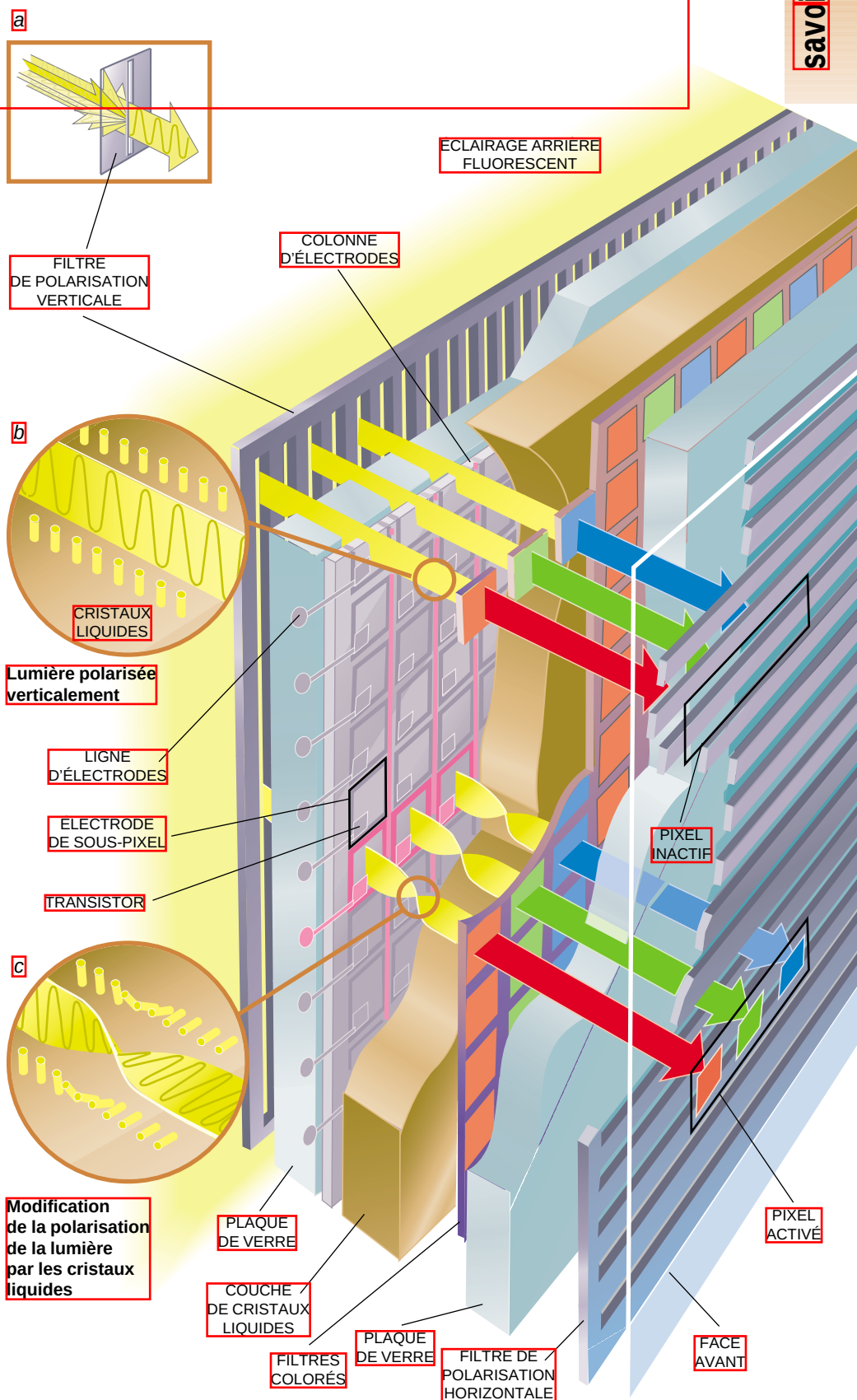
Des écrans à cristaux liquides de bonne qualité équipent aujourd'hui tous les ordinateurs portables. Les cristaux liquides sont utilisés comme de petits interrupteurs qui allument ou éteignent des unités élémentaires de l'image nommées pixels. Ces matériaux possèdent deux propriétés utiles à cette fin : ils sont transparents, mais ils peuvent modifier la polarisation de la lumière (l'orientation du champ électrique de l'onde) qui les traverse ; en outre, l'alignement des molécules de cristaux liquides et leurs propriétés polarisantes sont modifiables par application d'un champ électrique.

Un écran est formé de plusieurs couches, emprisonnées entre deux plaques de verre : un film mince, transparent, qui porte de minuscules électrodes, est en contact avec une couche de cristaux liquides. La taille des électrodes définit celle des pixels. Les faces externes des plaques de verre portent elles-mêmes des filtres polarisants, orientés à 90 degrés l'un par rapport à l'autre. Les écrans couleur contiennent en outre des filtres colorés dans les trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu), découpés en sous-pixels : la combinaison de trois sous-pixels forme un pixel.

La lumière émise à l'arrière de l'écran, par fluorescence, est filtrée une première fois : seules les ondes dont le plan de polarisation est vertical pénètrent dans l'écran (a). La lumière qui traverse un sous-pixel «éteint» reste polarisée verticalement (b) : elle est absorbée par le filtre polariseur de la face avant, et le pixel reste sombre sur l'écran. En revanche, la polarisation de la lumière qui traverse un sous-pixel «allumé», où une orientation est imposée aux molécules de cristaux liquides, est modifiée : cette lumière traverse la face avant de l'écran (c).

L'allumage des sous-pixels du réseau est réalisé ligne par ligne. En même temps qu'un potentiel est appliqué à une ligne, un logiciel détermine quels potentiels doivent être appliqués aux colonnes où les sous-pixels doivent être allumés. À l'intersection d'une ligne et d'une colonne activées, un champ électrique qui commande l'orientation des molécules de cristaux liquides est créé par l'intermédiaire d'un transistor. L'activation successive des 1 280 lignes d'un écran requiert entre 16 et 33 millisecondes. On améliorera la qualité des images en augmentant la densité des pixels et en accélérant l'activation des lignes.

Samuel MUSA, Université du Michigan



Philosophie

Dieu face à la science

Claude Allègre. Éditions Fayard.

Aussi peu éclairé par un discours pontifical, qui me dit que j'ai une âme et la dois à Dieu, que par un lauréat du prix Nobel qui raconte que le Big Bang a engendré l'Univers à partir de moins d'une once de matière, j'ai abordé cette lecture caparçonnée d'un double scepticisme. Ma critique interpellera, avant l'auteur, le ministre en exercice : j'ai la crainte qu'il ne touche avec cet essai qu'un très faible public étudiant. Pourquoi ? Parce que l'histoire des sciences et des idées reste une discipline marginale dans les universités scientifiques françaises ; à titre d'exemple, on peut dire que l'étudiant de biologie qui a lu ce grimoire de 1859 *L'origine des espèces* est l'exception.

Plus triste : je me souviens avoir proposé, dans une de ces réunions universitaires accouchée de nos soixante-huitardes années, qu'il *pourrait* être envisagé que les cours de français des DEUG scientifiques *pourraient* être avantageusement remplacés par une unité de valeur «Épistémologie». La levée de boucliers dans l'assemblée fut immédiate : «Mais si un tel programme est adopté, il faudra faire appel aux enseignants d'en face (ceux de la Faculté des Lettres)!»

Claude Allègre ministre pourra-t-il instiller dans les nouveaux programmes ce minimum d'épistémologie que devraient maîtriser les jeunes esprits, sans pour autant que cette «nouvelle» matière vienne plomber les cursus ? La requête est plus qu'osée ; elle est hasardeuse. Car, alors, quels enseignements supprimer ? Qui priver de ses rituels et hebdomadaires bachotages ? Formons et appelons dans l'urgence une Commission compétente qui traitera de l'affaire ; voilà la plus sûre réponse.

Si j'ai ainsi entamé cette recension, c'est parce qu'il m'apparaît que, pour exposer les non-raisons de ces conflits entre prêtres et savants nés d'une cohabitation fiévreuse au point d'allumer des bûchers, l'auteur fait tenir la vedette à cette histoire des sciences si négligée en France. Certains diront qu'il a le résumé sommaire ; en 200

pages, l'entreprise était une gageure, et l'accent n'est mis que sur quelques moments forts de ces polémiques : procès de Galilée, négation des propositions de Hutton, puis de celles de Darwin, par exemple. Il constate aussi que les sciences dites dures ont donné lieu à moins d'opposition entre les deux communautés, sans doute parce que les lois physiques et chimiques sont parées de dessous mathématiques.

Les conflits n'ont éclaté que lorsque les hommes de science nous ont appris que le Cosmos, la Vie étaient en constante évolution, et qu'il n'y avait pas de place pour Dieu dans leurs hypothèses, comme Laplace le répondait à Napoléon. De fait, prêtres et savants contribuent tous, avec des moyens différents, à aider les hommes à surmon-



Pierre Simon de Laplace supposa que le Système solaire résultait d'une condensation de nébuleuse : Dieu n'y était pour rien.

ter leurs angoisses. Les uns expliquent l'Univers et son fonctionnement, les autres font appel à la force supranaturelle qui l'a voulu.

Pour l'auteur, ce sont là des champs d'étude et de réflexion différents, et, en cela, le message de Cl. Allègre est d'inspiration thomiste. Mieux, il propose une alliance entre les deux communautés pour combattre les partisans d'une lecture littérale des Livres : ces adeptes fondamentalistes-crétionnistes empoisonnent des millions de vies, et pas seulement celles de leurs adeptes. Car l'obscurantisme en cette fin de

siècle, ce n'est un secret pour personne, est loin de refluer, et il ne sévit pas que dans des contrées lointaines : l'épouse présidentielle du plus puissant pays du monde avoue qu'elle a l'habitude d'interroger les mânes d'Eleanor Roosevelt pour prendre conseil ; des hommes politiques les plus haut placés fréquentent des astrologues ; et des centaines de milliers de personnes adhèrent à des sectes, pour certaines aussi criminelles au Guyana que dans les Alpes bien françaises.

Pour répondre aux angoisses légitimes des hommes, aux mages et intégristes de tout poil il faut préférer les avis des scientifiques, les seuls à même d'apporter les réponses très concrètes qui permettent de nous situer dans l'Univers et dans le temps. La religion est affaire de croyance ; prêtres et théologiens offrent de leur côté un champ de réflexion autre, mais tout aussi riche.

En exposant quelques-uns des moments où l'on vit s'opposer scientifiques et religieux, Cl. Allègre illustre l' inanité de leurs querelles.

En plusieurs occasions, on peut lui reprocher de jeter un regard au «futur antérieur» sur ces conflits, ce qui lui fait, avec d'autres d'ailleurs, reprocher des «erreurs» à Descartes, par exemple. Je crois qu'il est préférable de juger les écrits de nos prédécesseurs à l'aune des connaissances de leur temps pour bien mesurer en quoi ils ont innové.

C'est certes une tâche difficile, ne serait-ce que par les pièges que tendent les mots. Ainsi, lorsque Cuvier parle de «Révolutions du Globe», il paraît évident qu'il conçoit que ces manifestations sont catastrophiques ; son contemporain Lamarck utilise le même mot, mais lui pour décrire des successions de modifications somme toute graduelles. Si, dans ce cas précis, on peut analyser les intentions différentes des deux savants grâce à un contexte qui laisse peu de place au doute, en d'autres occasions l'erreur est possible, et parfois consommée.

La description de ces luttes d'influence entre les deux élites qui ont souhaité et souhaitent encore guider les hommes montre aussi qu'il en est résulté un enrichissement mutuel, et qu'au fil du temps le contrat de tolérance entre gens d'église et de science est de mieux en mieux respecté. C'est en tous les cas la principale leçon qui nous est donnée.

Jean-Louis HARTENBERGER

Paléontologie

Dinosaures Story

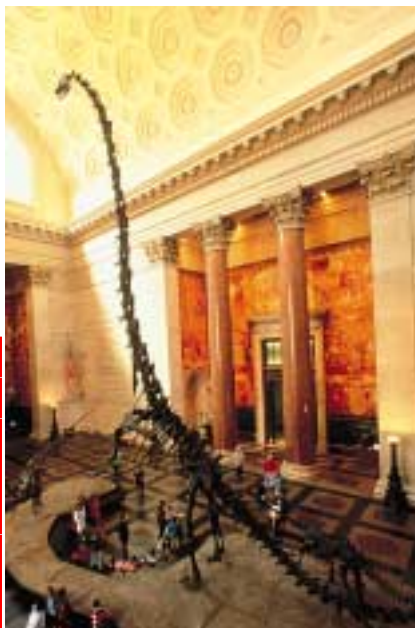
Dominique Leglu et Catherine Mallaval. Éditions Calmann-Lévy, 1997.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, il n'est pas nécessaire que Steven Spielberg nous gratifie d'un nouveau film pour que les dinosaures suscitent la curiosité, voire l'intérêt passionné du public. Pourquoi ce phénomène ? Faut-il s'en réjouir ou le déplorer ? Il faut en tout cas en reconnaître l'existence et la constance, et les paléontologues doivent répondre à la curiosité. Des journalistes, également, peuvent apporter leur pierre dans les pages des quotidiens et des magazines, mais aussi, parfois, dans des livres.

Celui-ci est un livre de journalistes, je le dit sans le moindre sous-entendu péjoratif. Dominique Leglu et Catherine Mallaval exercent à *Libération* le métier périlleux de journaliste scientifique : périlleux, parce qu'il n'est pas facile de concilier les impératifs de l'actualité, de la rigueur scientifique et de l'écriture à l'intention d'un vaste public. Certains de leurs collègues, disons-le, ont moins de talent qu'elles.

Il s'agit ici d'un véritable ouvrage, et non d'une collection d'articles, même si l'on sent souvent poindre le goût de l'actualité, voire du scoop. Les chercheurs cités sont presque toujours contemporains, au point qu'on est presque étonné de trouver dans leurs rangs William Buckland, le premier à avoir décrit scientifiquement un dinosaure, en 1824. Ce goût est heureusement contrebalancé par un esprit critique de bon aloi (voir leur encadré, pour le moins sceptique, sur les prétendus restes de sang de tyrannosaure signalés aux États-Unis en 1997!). D. Leglu et C. Mallaval ont choisi le style «question-réponse» pour renseigner leurs lecteurs sur les aspects les plus variés de la vie des dinosaures.

Ce n'est pas toujours un exercice facile, et cela conduit à des questions qui peuvent faire frémir un paléontologue : «Qui était le plus cruel ?», demande sans hésiter le premier chapitre. La cruauté, *stricto sensu*, est certainement un attribut bien plus humain que dinosaurien, mais le plus cruel était, selon les auteurs, le *Tyrannosaurus rex* (on s'en doutait bien un peu). Ne nous arrêtons toutefois pas aux titres des chapitres, ni au style volontairement désinvolte (on aime ou on n'aime pas). L'important, c'est que l'in-



Lequel était le plus haut ? On a douté que les dinosaures aient été des herbivores se nourrissant de feuillage au sommet des arbres, mais le barosaure semble avoir eu ce comportement alimentaire.

formation fournie soit de bonne qualité, et elle l'est.

La vision panoramique des dinosaures que les deux auteurs nous proposent laisse fort peu à redire, même à un paléontologue exigeant. En outre, et c'est là que la qualité des deux journalistes scientifiques se fait surtout sentir, le texte n'assène pas des certitudes, n'esquive pas les débats qui sont le moteur même de la science. D. Leglu et C. Mallaval ne voient pas les paléontologues comme les détenteurs d'une vérité révélée et définitive, ce qui tranche sur certains livres du style «question-réponse» où les réponses sont trop catégoriques pour être scientifiquement honnêtes.

Ce que les auteurs proposent ici au lecteur, ce n'est évidemment pas une encyclopédie des dinosaures (il vient d'ailleurs d'en paraître une, en langue anglaise, qui fera sans doute autorité pendant quelque temps) ; c'est plutôt une promenade dans un monde perdu, mais fascinant, au fil des découvertes et des controverses scientifiques. On découvre ainsi les dinosaures, naturellement, mais aussi, à l'occasion, les hommes qui les font revivre, par des méthodes qui ont peu à voir avec celles des protagonistes de *Jurassic Park*.

En y suivant les auteurs, le lecteur, si novice soit-il en matière de dinosaures, y apprendra sans effort bien des choses sensées et qui reflètent l'état actuel de la science paléontologique, au sujet d'animaux sur lesquels on écrit ou l'on dit encore trop souvent n'importe quoi.

Eric BUFFETAUT

Mathématiques

Fractales et finance

Benoît Mandelbrot. Éditions Flammarion, 1997.

On connaît le mot de Winston Churchill à propos d'un adversaire politique : «C'est un homme modeste, et il a d'excellentes raisons pour l'être.» On peut retourner le compliment à Benoît Mandelbrot : «C'est un homme qui n'est guère modeste, et qui a d'excellentes raisons pour ne pas l'être.»

Le but avoué de son dernier livre est de montrer l'unité de sa pensée scientifique et de raconter comment il a eu raison avant tout le monde. Le sous-titre, «1959-1997», manifeste même une certaine injustice de B. Mandelbrot envers lui-même, car, s'il fait partir de 1959 ses travaux en économie, fournissant à l'appui les reproductions de deux notes aux Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, le livre comporte également la reproduction d'une note bien antérieure (de 1951). Il est vrai que cette dernière porte sur la théorie du langage, alors que les précédentes portent sur la répartition des revenus.

Toutes ces notes sont évidemment peu lisibles, couchées dans le langage codé de ce genre d'exercice et dans les caractères désuets d'une ère antérieure au langage de programmation TeX, mais celui qui sait les lire y trouve déjà les idées-forces qui animent jusqu'à aujourd'hui l'œuvre de B. Mandelbrot et les centres d'intérêt auxquels il n'a pas cessé de s'attacher pendant un demi-siècle : la répartition des revenus, l'évolution des cours boursiers, les crues du Nil et la fréquence des mots. Le livre ne fait que développer les idées exposées dans les premières notes, et les enrichir de l'expérience acquise entre-temps. B. Mandelbrot insiste à plusieurs reprises sur le fait qu'il avait à peu près tout dit dès le début, ce qui le conduit à s'étonner lui-même quand, bien des années après, il est conduit à revoir ses premières analyses.

Ses idées sont simples et robustes. Pour reprendre ici le mode d'exposition qui m'a paru le plus clair, celui du chapitre 2.1, tirons au sort une suite de N valeurs $X_1, X_2, X_3, \dots$, indépendantes et équiréparties dans l'ensemble des nombres réels. Trois types de situations sont possibles. Premièrement, le cas classique, où les moyennes $X_1, (X_1 + X_2)/2, (X_1 + X_2 + X_3)/3, \dots$ convergent rapidement vers une valeur finie et certaine (loi des

grands nombres), et où l'écart à la moyenne, pondéré convenablement, converge vers une variable aléatoire dont la distribution est représentée par la très fameuse courbe en cloche de Gauss (théorème central limite).

Deuxièmement il y a le cas lent, représenté par exemple par la loi «lognormale» ; dans ce cas, les convergences précédentes subsistent, mais elles sont si lentes qu'elles n'ont d'intérêt que pour le mathématicien, qui, comme chacun sait, n'est pas gêné d'afficher des temps de convergence supérieurs à l'âge de l'Univers. Dans la pratique, en revanche, on n'a pas le temps de voir s'instaurer de telles régularités statistiques, et le praticien n'observe qu'irrégularités et fluctuations.

Troisièmement le cas sauvage, représenté par exemple par la loi de Cauchy, dont l'espérance et la variance sont infinies ; dans ce cas, les moyennes ont exactement la même distribution que chacun des tirages individuels. Aussi loin qu'on aille, on ne verra jamais s'instaurer de compensation entre les différents tirages : la moyenne est aussi incertaine que chacune des épreuves.

Ce sont des cas extrêmes, et il y a entre eux tout un continuum de cas intermédiaires. Dès le début de sa carrière scientifique, B. Mandelbrot s'est intéressé aux lois de probabilité dites stables, qui avaient été introduites par le mathématicien français Paul Lévy. Ces lois interpolent d'une certaine manière entre la loi normale et la loi de Cauchy, et vont même un peu au-delà de celle-ci. Dans une série d'articles, B. Mandelbrot analyse leurs propriétés d'autosimilarité et montre que, bien qu'on ne leur connaisse pas en général d'expression analytique, et qu'il faille donc construire des tables et des graphiques par ordinateur, elles modélisent bien certains phénomènes importants. Citons notamment : «la rencontre occasionnelle d'énormes écarts par rapport à ce qu'on aurait voulu considérer comme la norme» et «la rencontre occasionnelle de très longues suites de valeurs, telles que chacune prise séparément s'écarte assez peu de la norme, mais les écarts sont si persistants que la moyenne ne peut se faire que très lentement ou pas du tout». C'est ce qu'il appelle joliment l'«effet Noé» et l'«effet Joseph».

Ces lois ont d'autres propriétés intéressantes, mais leur intérêt principal est qu'elles fournissent des modèles qui paraissent mieux adaptés que la simple loi normale pour représenter certains phénomènes, comme, par exemple, les crues du Nil et les cours de la Bourse. En ce qui concerne ces derniers, c'est un fait avéré qu'ils présentent des queues de distri-

bution importantes : les valeurs très écartées de la moyenne sont beaucoup plus fréquentes qu'avec une simple loi gaussienne, même si l'on ajuste sa variance. L'utilisation d'autres lois stables que la loi gaussienne permet de mieux rendre compte du phénomène, même s'il existe d'autres moyens qui permettent de rester dans le cadre gaussien (mouvements browniens à volatilité stochastique par exemple).

Après ces analyses, qui constituent l'essentiel de l'ouvrage, deux autres thèmes apparaissent, en fin de livre : le «brownien fractionnaire en temps multifractal», notion à peine esquissée, mais qui renvoie aux préoccupations qui ont fait la célébrité de B. Mandelbrot, et la loi de Zipf sur la fréquence des mots dans le langage, qui lui donne l'occasion de reproduire sa première publication, une note de 1951.

À la lecture du livre, on ne peut qu'être frappé, une fois de plus, par le caractère purement visuel des analyses de B. Mandelbrot. Comme il le dit lui-même : «Précisons le rôle des images. J'insiste sur le fait que la capacité d'imiter est déjà une forme de compréhension. Mais j'ai toujours dit, et je "reconnais" volontiers, que les images doivent nécessairement être suivies de commentaires statistiques objectifs.»

Ce n'est pas ce que la plupart d'entre nous entendent par compréhension. Je veux bien, par exemple, que les trajectoires du «mouvement brownien fractionnaire en temps multifractal» ressemblent à s'y méprendre aux cours de l'action *Shell* à la Bourse de New York, mais il me semble que celui qui s'intéresse vraiment à la finance doit se poser la question du pourquoi : quels sont donc les phénomènes micro-économiques qui, agrégés, donnent des évolutions de ce type ? Cette recherche des causes est d'autant plus importante qu'on ne s'intéresse pas à ces trajectoires pour le plaisir, mais pour réaliser certaines opérations de couverture. Le fameux modèle de Black et Scholes, par exemple, qui vient d'être récompensé par le prix Nobel d'économie, est initialement un modèle en temps où les auteurs ont mis en évidence des stratégies de couverture simples. En temps continu, le modèle brownien s'est imposé parce que c'est l'extension la plus immédiate de ce modèle discret. Quiconque veut proposer un nouveau modèle doit se soucier de savoir ce que deviennent ces stratégies de couverture. Ce n'est pas le souci de B. Mandelbrot : il lui suffit d'avoir vu, et de pouvoir montrer. B. Mandelbrot est un mathématicien pur.

Ivar Ekeland

Épistémologie

Impostures intellectuelles

Alan Sokal et Jean Bricmont.
Éditions Odile Jacob, 1997.

C'est ignorer le goût du peuple que de ne pas hasarder quelquefois de grandes fadaïses», écrit La Bruyère dans le chapitre des *Caractères* consacré aux «ouvrages de l'esprit». Contrairement à ce que sous-entendent J. Bricmont et A. Sokal, quelque peu flagorneurs à l'égard des Français, notre tradition ne se résume pas aux Lumières. Un type de fadaïse fort goûté chez nous est l'amphigouri, la préciosité : les «postmodernes» dénoncés dans *Impostures intellectuelles* s'inscrivent à la suite d'une longue lignée. Comment se fait-il que préférer des propos abscons soit un procédé efficace pour s'attirer les suffrages du public ? Question centrale, que A. Sokal et J. Bricmont ne posent pas. Dommage !

Leur ouvrage est essentiellement consacré à dénoncer les non-sens commis par certains penseurs lorsqu'ils recourent aux «sciences dures». Les rodомontades mathématiques de Jacques Lacan, l'utilisation inepte de la logique par J. Kristeva, la suffisance de Gilles Deleuze et de Félix Guattari, le fourre-tout fantasme auquel se réduisent les connaissances scientifiques de Luce Irigaray sont repérés avec une féroce précision. Travail de démystification, toujours bien venu face aux coups de bluff. Mais à qui A. Sokal et J. Bricmont s'adressent-ils ? Cela fait belle lurette que ceux qui veulent bien savoir savent à quoi s'en tenir sur le génie mathématique de Lacan. Le problème est ceux qui ne veulent pas savoir. C'est eux qu'il faudrait convaincre. Il ne semble pas que cet objectif soit atteint : en réaction au livre de A. Sokal et J. Bricmont, on voit, du «côté littéraire», s'esquisser une défense corporatiste bien plus qu'un début d'autocritique.

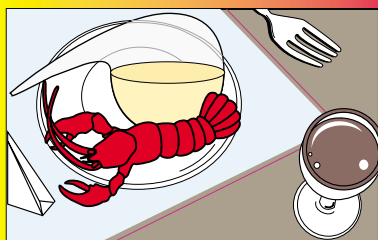
C'est que leur livre a beaucoup de défauts. D'abord, à collecter et à mettre bout à bout des passages absurdes tirés d'auteurs souvent ennuyeux, ils obtiennent un livre qui, lui-même, n'est pas folichon. Surtout que, après chaque citation, le commentaire commence presque invariablement par : «tout ceci ne veut rien dire». Autre défaut : A. Sokal et J. Bricmont se placent en donneurs de leçons. Certes, les penseurs qui

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur France Info
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 31 décembre 1997.



disent n'importe quoi sur les mathématiques ou sur la physique ne l'ont pas volé ; en outre, *Impostures intellectuelles* fait un effort appréciable pour présenter le plus clairement possible les notions utilisées le plus obscurément possible par les postmodernes. N'empêche : le lecteur non scientifique se trouve face à deux autorités. D'un côté, Lacan ou J. Kristeva ; de l'autre, A. Sokal et J. Bricmont, et il est bien obligé de s'en remettre soit aux premiers, soit aux seconds, bref de se soumettre à une autorité. J'avoue ne pas voir comment nos auteurs auraient pu résoudre cette difficulté.

Quoique A. Sokal ait entamé sa carrière médiatique par un canular, le livre qu'il propose avec J. Bricmont manque étonnamment d'humour. Il y a dedans ample matière à rire, pourtant. Par exemple, A. Sokal et J. Bricmont critiquent Bruno Latour, qui prétend ne pas voir de différence entre science et mythe ; ils soupçonnent que cette esquivance lui permet de parler des sciences sans rien comprendre de leur rationalité interne. D'accord, mais pourquoi enrager ? Soyons beaux joueurs, et goûtons en connaisseurs le tour de force réalisé par B. Latour. Quoi ! Philosophe de formation, il fait l'impasse sur une question décisive dans toute réflexion sur les sciences – celle de la vérité – et il parvient au statut d'autorité reconnue ! Ce n'était pas gagné d'avance. Et Lacan qui a fait faire des mathématiques à des cohortes entières de fans qui n'y comprenaient rien et qui, probablement, les détestaient : n'est-ce pas un peu farce ? Régis Debray aussi est un grand comique : il applique le théorème de Gödel à la science politique. Cette facétie lui vaut l'admiration sans borne de ce penseur entre les penseurs qu'est Michel Serres. Dans un inoubliable numéro d'*asinus asinum fricat*, dûment rapporté par A. Sokal et J. Bricmont, M. Serres juge « décisif l'apport de Gödel-Debray » ! Plus pessimiste sans doute que les auteurs d'*Impostures intellectuelles*, je crois que les boursoufflés mourront, mais jamais la boursouflure. L'humour de Molière n'a pas mis fin à la préciosité, le sérieux de A. Sokal et J. Bricmont n'y réussira pas mieux. Tant qu'à faire, rions plutôt.

Rions – mais à une condition : savoir également rire de nous-mêmes, scientifiques. Une critique qui ne contient pas une part d'autocritique a plus de chances de braquer les personnes visées, de les figer sur leurs positions que de faire avancer le débat. R. Debray fait n'importe quoi avec la logique ? Certes, mais que penser de logiciens dont les recherches sont si abstraites que toute utilisation autre

que la leur est quasi immanquablement vouée au contresens, sinon au non-sens ? A. Sokal et J. Bricmont notent que les mathématiciens sont, dans l'ensemble, indifférents aux travaux des logiciens sur les fondements des mathématiques, mais ils omettent d'en tirer une conclusion : l'une au moins de ces deux professions fait erreur. Soit les logiciens, embarqués dans des considérations qui n'éclairent aucune lanterne, pas même celle de leurs frères mathématiciens. Soit les mathématiciens, qui se prétendent rigoureux, mais bâtissent sur le vide.

Reprocher aux philosophes postmodernes de ne pas comprendre ce qu'écrivent leurs collègues ? À la bonne heure, mais dites-moi : les mathématiciens se comprennent-ils les uns les autres ? Critiquer l'emphase avec laquelle certains philosophes s'emparent de la théorie du chaos et prennent le mot « chaos » dans un sens apocalyptique qui n'est pas le sien dans ladite théorie ? Très juste, mais ne faudrait-il pas s'interroger d'abord sur le bien-fondé de l'attitude des scientifiques qui ont emprunté ce mot usuel, très lourd de sens ?

Rejetant vigoureusement les vues extrêmes dépourvues de tout bon sens, défendues par les tenants du solipsisme ou du scepticisme radical, A. Sokal et J. Bricmont écrivent : « La démarche scientifique n'est pas radicalement différente de l'attitude rationnelle dans la vie courante ou dans d'autres domaines de la connaissance humaine », et ils déduisent : « On peut avoir de sérieux doutes sur toute philosophie des sciences dont on s'aperçoit qu'elle est manifestement erronée lorsqu'elle est appliquée à l'épistémologie de la vie quotidienne. » Voilà ce qui s'appelle ne pas manquer d'audace. Depuis des décennies, sinon des siècles, le divorce entre la science et l'expérience quotidienne est consommé. Un problème épineux posé aux sciences est de savoir si elles n'exagèrent pas dans leur refus du sens commun. A. Sokal et J. Bricmont eux-mêmes, un peu plus loin, dans le passage consacré à la théorie de la relativité, insistent sur le fait que cette théorie décrit des phénomènes contre-intuitifs, et que les philosophes seraient bien inspirés d'admettre et de comprendre ce caractère contre-intuitif avant de prétendre critiquer la relativité : il y a une contradiction « entre la relativité et une extrapolation naturelle, mais (nous le savons maintenant) erronée de notre expérience quotidienne ». Ainsi, ils pulvérisent ce qu'ils affirmaient précédemment. Si A. Sokal et J. Bricmont sont amenés à préparer une édition revue et augmentée d'*Impostures intellectuelles*, ils connaîtront le plaisir de pouvoir s'inclure dans leur propre livre.

Didier NORDON

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 Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction 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 : Dominique Angles, Daniel Collobert, Bettina Debü, Paul Decaix, Manuel Gutierrez, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Machetel, Claude Olivier, Michel Ravellonandro, Joan van Baaren.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, 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

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 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 adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français 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.

Biologie

Le fleuve de la vie

Richard Dawkins. Éditions Hachette, 1997.

Par son sous-titre, *Qu'est-ce que l'évolution?*, par son format et par son prix, ce petit livre pourrait passer pour un ouvrage de synthèse sur les théories actuelles de l'évolution destiné à un large public. Ce qui ne saurait faire de mal en ces périodes où intégrismes et fondamentalismes font prospérer les idées créationnistes, que les scientifiques crurent trop vite enterrées par la biologie moderne. C'était compter sans la puissance de feu financière et la force de frappe médiatique des sectes de toutes les religions, en particulier dans le monde anglo-saxon où rien ne s'est arrangé depuis Emma Darwin, fidèle du «Credo unitarien» et terreur domestique de son naturaliste de mari.

Par bien des côtés, le sulfureux Richard Dawkins, apôtre de la contestée sociobiologie, mais aussi compagnon de route de John Maynard-Smith – l'un des meilleurs théoriciens de l'évolution –, aurait pu fournir une synthèse, certes tendancieuse, mais utile : il a le sens de la formule («le gène égoïste»), et son discours, souvent simpliste, en a fait l'une des vedettes de la respectable Université d'Oxford. Las ! Le recueil ici proposé, dans une bien mauvaise traduction, rassemble des articles disparates, qui ont en commun d'avoir été écrits trop vite, chacun autour d'une idée que l'auteur considérait comme géniale et originale sur le moment, sans autre référence que son nombril et Darwin, dont il se croit l'unique légataire universel.

La plupart des idées proposées relèvent de l'analogie, souvent utile pour faire comprendre les sujets difficiles, mais qu'il faut savoir arrêter avant de s'y empêtrer ou de foncer dans le mur. Toutefois, il n'est pas dans la nature de Dawkins de s'arrêter à temps ! Ainsi, le fleuve du vivant, qui donne son titre au livre, n'était pas une mauvaise idée initiale pour suggérer la continuité du matériel génétique à travers les changements d'individus de chaque génération et les apparitions de nouvelles espèces.

De même, une comparaison de l'information de l'ADN avec le téléphone numérique aide les ingénieurs des télécommunications qui n'ont jamais fait de biologie. Cependant fallait-il, pour expli-

quer clairement l'évolution, perdre son fleuve numérique dans un Bar et Ghazal acoustique et téléphonique réservé aux électroniciens ? Je doute que les techniques téléphoniques paraissent plus simples au grand public que l'histoire de la vie, bien racontée du moins... Au passage, on étrille, sans le nommer, le pauvre Stephen Jay Gould, qui raconte pourtant tellement mieux que R. Dawkins ; il a pour seuls torts de croire que les mécanismes évolutifs ont changé au Cambrien et de ne pas adhérer au gradualisme intégriste de R. Dawkins.

Ce dernier, comme Lamarck et Darwin, pense que toutes les transitions naturelles étaient très progressives. Les derniers cités avaient l'excuse de ne pas connaître les mécanismes génétiques et embryologiques qui rendent possibles, sinon probables, des sauts évolutifs relativement brusques dans des écosystèmes peu sélectifs, au moins au début des nouveaux groupes d'espèces...

Bien sûr, en tant qu'ultradarwinien et sociobiologiste, R. Dawkins voit de la sélection partout, sauf quand il raconte l'histoire dite de l'Eve africaine, de feu Allan Wilson, dont il se différencie peu, malgré des réserves. Pourtant, il n'y a pas d'Eve africaine s'il n'y a pas d'horloge moléculaire, il n'y a pas d'horloge moléculaire s'il y a sélection... et R. Dawkins, le sélectionniste, ignore les articles, parus dans les meilleures revues, qui montrent que l'ADN mitochondrial humain fut sans doute sélectionné !

De même qu'il ignore toute littérature d'origine non anglo-saxonne, même disponible en anglais ou parue en Angleterre ou aux États-Unis, qu'il s'agisse des grands classiques des siècles passés ou des travaux récents, à l'exception de Jacques Monod dont la nécessité exagérée plaît. À l'opposé, Motoo Kimura ou Gustave Malécot ne sont même pas cités. Vous me direz que Sewall Wright non plus, sans doute parce que trop intéressé par la dérive génétique.

C'était juste pour faire remarquer que la bibliographie était aussi sommaire que biaisée et qu'il semble inutile d'en écrire plus sur l'inconsistance de ce petit livre... Dommage !

André LANGANEY

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse :
<http://www.pourlascience.com>