

Bloc-notes de Didier Nordon

Point de vue

Plastique et environnement

par Pierre Avenas

Tribune des lecteurs

Les impossibles en chimie

par Pierre Laszlo



Présence de l'histoire

Biot et l'origine des météorites

par Marcel Weyant

Science et gastronomie

Fibres et confitures

Jeu-concours

Tour contre Cavalier

Perspectives scientifiques :

Un reptile dans une souris

Vaccin plus stable contre la polio

La combustion apprivoisée

Le laçage élucidé

Un problème de cou

La porte de l'antimonde

Syphilis en Europe

Un crapaud envahisseur

Molécule de sommeil

Microscopie et chimie

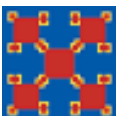
L'origine des rayons cosmiques

La myrrhe

Réformes de l'orthographe

Chémokines

HIPPARCOS : premiers résultats



Visions mathématiques

Partage de butin

par Ian Stewart



L'expérience du mois

Respirations

par Shawn Carlson

L'image du mois

Craquelures tectoniques



Analyses de livres

– *Connaître les arbres*, de Bernard Fischesser.

– *Paléocéologie. Paysages et environnements disparus*, de Jean-Claude Gall.

L'imaginaire monstrueux

par Jean-Louis Fischer

Pendant plusieurs millénaires, l'homme a imaginé que des êtres monstrueux vivaient dans des contrées reculées. Nés de l'imagination, ces monstres exerçaient à la fois fascination et crainte.



L'allaitement maternel protège le nourrisson

par Jack Newman

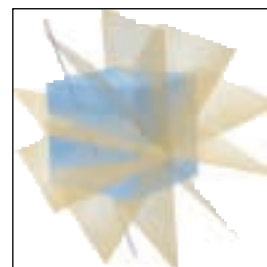
Certaines molécules et cellules du lait humain protègent les nourrissons contre les infections.



La confidentialité des communications

par Thomas Beth

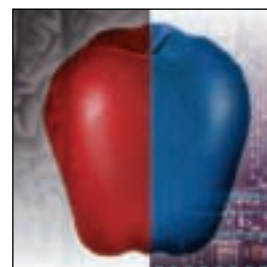
Un nouveau protocole cryptographique utilisant des « passeports numériques » assure la sécurité des réseaux informatiques en permettant l'authentification des correspondants.



Qu'est-ce que la conscience?

par David Chalmers

Neurobiologistes et philosophes explorent un grand mystère. La connaissance des mécanismes physiques du cerveau semble insuffisante pour comprendre la nature de la conscience.

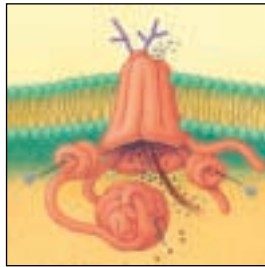


La mucoviscidose

66

par Michael Welsh
et Alan Smith

Cette maladie mortelle est due à une anomalie génétique, dont une des conséquences est la production de sécrétions très visqueuses qui obstruent les voies respiratoires.

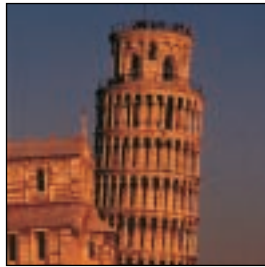


Le redressement de la tour de Pise

76

par Paolo Heiniger

Depuis le XII^e siècle, la tour de Pise s'incline dangereusement. Les techniques modernes du génie civil la sauveront-elles?



Les tremblements de terre géants du Pacifique Nord-Est

84

par Roy Hyndman

La côte Ouest des États-Unis, entre la Californie et la Colombie britannique, risque d'être frappée par un séisme violent.

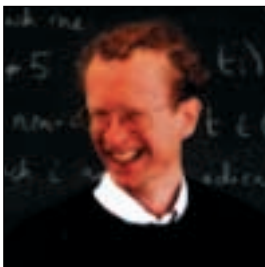


Fermat enfin démontré

92

par Yves Hellegouarch

La démonstration du théorème de Fermat par Andrew Wiles s'appuie sur un faisceau de méthodes mathématiques, qui bouleverse le paysage de la théorie des nombres.



Homo monstrosus

Quand la planète n'était pas entièrement explorée, quand les mécanismes de l'évolution et de l'hérédité étaient un total mystère, l'univers des possibles n'était limité que par l'imagination. Faible contrainte...

Aussi les variations de la morphologie humaine hantaient-elles les récits fabuleux. Avec des modes, la mythologie, fruit de l'imagination collective, avait ses rythmes et ses engouements. Les premiers chrétiens répudièrent les images de la mythologie antique, ses gorgones sifflantes, ses centaures hennissants, ses hydres gluantes, ses sirènes musiciennes, ses minotaures rugissants et ses satyres velus. Ils les remplacèrent par les chimères, les gargouilles, les dragons et les salamandres. Parallèlement, condisciples de nos frayeurs de la forêt et de la nuit, elfes, korrigans malicieux et fées diaphanes peuplaient la lande celtique ; les récits de voyages africains mêlaient observations étonnées, comptes rendus de légendes locales et exagérations débridées : l'amplification de la corne du rhinocéros transformait l'animal en licorne.

Quand les possibilités d'êtres extraordinaires terrestres actuels se sont estompées, la paléontologie a remeublé notre bestiaire : la faune des dinosaures s'est révélée plus riche et plus diversifiée que celle des dragons.

La biologie naissante (voir *L'imaginaire monstrueux*, par Jean-Louis Fischer, page 38) a commencé à démêler l'écheveau de la procréation, a cherché à interpréter les phénomènes humains, observés ou relatés, en termes de volonté biologique divine. À la table du mal, pêcheurs, monstres humains et diables étaient invités. Les accidents monstrueux interrogeaient la vigilance divine : Dieu voulait-il ou permettait-il ces accidents? Le monstre est à la fois production naturelle et signe du créateur.

Philippe BOULANGER

Lit de Procuste-mathématique

André Lichnerowicz, je crois, expliquait qu'une difficulté de sa vie de mathématicien, c'était de convaincre sa femme qu'il pouvait fort bien se trouver allongé sur son lit, les yeux fermés, tout en étant en train de travailler intensément. David Ruelle pratique le même exercice du divan créateur.

Cette curieuse façon de faire ne doit pas être exceptionnelle dans la profession. A preuve, le souvenir suivant, raconté par Michel Philippot. Pendant une grève au CNRS, Michel Philippot, alors conseiller scientifique, rend visite au Directeur du CNRS. Avisant un groupe de personnes errant par là, il demande : « Ils sont en grève ? » Réponse du Directeur : « Je n'ai jamais pu reconnaître un mathématicien qui travaille d'un mathématicien qui ne travaille pas » (*Actes de la Table Ronde du 3 juin 1994, Laboratoire Musique et Informatique de Marseille*).

Ainsi les mathématiciens sont privés du droit de grève, puisqu'il n'est même pas « reconnu » par le Directeur du CNRS ! Comment faire alors pour leur garantir l'exercice de cette liberté fondamentale ? Je vois une solution. Certains grévistes, pour rendre leur colère plus spectaculaire,

manifestent en brandissant leurs instruments de travail. Que les mathématiciens grévistes défilent donc dans la rue allongés sur leurs lits, à la romaine.

Diktat formaliste

Le formalisme effréné des années 1960, gloire du structuralisme, menait à des constructions si abstraites, qu'elles perdaient tout sens. Encore aujourd'hui, on trouve un professeur pour écrire que, en mathématiques, « les résultats sont vrais ou faux indépendamment de leur sémantique » – ce qui signifie à peu près qu'ils peuvent n'avoir aucun sens et être vrais quand même : au fou ! Heureusement le structuralisme a reculé.

Hélas, chassez le non-sens par la porte, il rentre par la fenêtre...

Lisez la dernière dictée des championnats d'orthographe organisés par Bernard Pivot. Vous y trouverez une accumulation hétéroclite de zinnias nonpareils, de hardies ziggourats, de moucharabiehs, de gypaètes barbus et autres cancoillottes parfumées. Ces mots n'étant là que pour leur difficulté, il est inutile de chercher le moindre intérêt à ce texte. Plus grave : il est même inutile de lui chercher le moindre

sens. Il n'en a aucun. Simplement, il peut être orthographié correctement ou non. Là encore, formalisme pur, mené jusqu'à l'absurde. Par quelle aberration certains voient-ils en Bernard Pivot un défenseur de la langue française ? La vider ainsi de tout sens, c'est la massacrer.

La retenue des Marseillais

La réputation que les Marseillais ont d'exagérer est-elle justifiée ? Question complexe, qu'on ne peut pas résoudre sans scruter les données numériques. Car exagérer consiste aussi bien à augmenter un chiffre qu'à le diminuer. La même manifestation, par exemple, où un policier a vu à peine trois chats, un syndicaliste y a vu une marée humaine. Du policier et du syndicaliste, l'un au moins exagère. Et si tous deux le font, cela ne les met pas d'accord, puisqu'ils ne vont pas dans le même sens.

Participation à la manifestation du 16 décembre 1995. Paris. Police : 56 000. Organisateurs : 300 000. Si le nombre véridique reste inconnu, cela n'empêche pas de déterminer le coefficient d'exagération corrélée du policier et du syndicaliste parisiens. Il est de 5,4 : quand le syndicaliste parisien voit passer 5,4 adhérents, le policier parisien ne voit qu'un opposant.

Participation à la manifestation de ce même jour. Marseille. Police : 60 000. Organisateurs : 120 000. Le coefficient d'exagération corrélée du policier et du syndicaliste marseillais est donc 2 : quand un policier marseillais voit passer une personne, le syndicaliste en voit deux.

Ainsi la réputation des Marseillais n'est pas justifiée. Car si, comme il se doit, on se fonde sur Paris, leur taux d'exagération rapporté à la norme n'est que de 2/5,4 soit à peine 0,37.

Le sens de la mesure

Comment remédier au dramatique manque d'enseignants dans les universités ? Un professeur à la Sorbonne a trouvé une solution : augmenter de 50 pour cent le service des universitaires qui, durant les cinq dernières années, n'ont pas publié un minimum de deux cents pages dans des revues subventionnées par le CNRS (*Le Monde*, 10-11 décembre 1995).

Voilà un professeur qui aura au moins compris une chose dans sa vie : rien n'existe, que le quantitatif. Des pages, mon Dieu, des pages... Si prestigieux soit l'organisme qui les cautionne, il existe toutes sortes de pages. Des grandes et des petites, des pleines et des vides, des lisibles et des illisibles... Foin de ces considérations futiles ! Le seuil est à deux cents, parce que c'est à deux cents qu'il doit être. Cent cinquante pages intelligentes, et on vous inflige un surcroît d'enseignement ; deux cent cinquante pages ineptes, et on vous laisse tranquille. De quoi inciter les universitaires à travailler la qualité...

Cependant, répétons-le : le manque d'enseignants est dramatique. Même imparfaite, adoptons donc la suggestion, et imaginons-la entrée dans les faits. Pour éviter d'être condamnés à une fréquentation accrue des étudiants, les enseignants vont écrire tant et plus. Que deviendront alors les innombrables pages, conditionnées en paquets de deux cents, sorties de leurs doctes plumes ? Il serait criminel que ces merveilles de l'esprit s'accumulent sans que personne n'en tire profit. Il faut absolument que des gens se consacrent à les lire. Des gens, je veux dire : des universitaires, car eux seuls ont compétence pour venir à bout d'aussi laborieuses lectures. Mais la compétence ne suffit pas, il faut également du temps, beaucoup de temps. La mesure préconisée par notre professeur en Sorbonne doit donc être accompagnée d'une mesure la complétant : tout universitaire s'engageant à lire les publications de ses chers collègues bénéficiera d'une dispense totale d'enseignement.

Méfions-nous de la facilité

Le gouvernement voulait supprimer la déduction de 20 % du revenu pour les salariés. Cela, bien sûr, dans un souci unique : simplifier. Simplifier, il ne s'agit que de cela ? C'est nous prendre pour plus sots que nous ne sommes. Que les scientifiques, au contraire, emploient leurs talents à compliquer les calculs nécessaires à établir l'impôt. Faisons confiance à leur esprit frondeur : le contribuable y trouverait son compte, au moins autant que le ministre...

Plastique et environnement

PIERRE AVENAS

On accuse les matières plastiques synthétiques d'être écologiquement moins performantes que les matériaux « naturels » tels que le bois. Est-ce justifié ? Ils n'ont pas une aussi bonne image que les métaux ou le verre, qui sont, pourtant, également artificiels ; est-ce raisonnable ? Les plastiques biodégradables, produits à partir des matières végétales, ont la faveur de ceux qui se sentent une solidarité pour la nature : sont-ils vraiment plus écologiques que les plastiques produits à partir du pétrole ?

Avec une consommation mondiale de plus de 100 millions de tonnes, le volume de plastiques produits est comparable à celui des aciers. Leur valeur d'usage remarquable (légèreté, souplesse, résistance à la corrosion...) est à l'origine de leur développement. Initialement ces matériaux étaient fragiles, ou résistaient mal aux variations de température, de sorte qu'ils avaient une réputation de qualité médiocre ; pourtant cette qualité s'est tant améliorée que les fenêtres en polychlorure de vinyle sont vendues avec une garantie décennale, par exemple.

D'autre part, on a longtemps associé les matières plastiques au pétrole, et leur utilisation croissante à un gaspillage d'énergie. Il est vrai que la plupart des polymères synthétiques sont tirés du pétrole, avec des exceptions notables : pour 57 pour cent de son poids, le polychlorure de vinyle provient du chlorure de sodium, dont les océans sont une source inépuisable ; le polyamide 11 provient de l'huile de ricin, l'acétate de cellulose provient de la cellulose... Des recherches sur la fabrication des polymères à partir de biomasse se poursuivent, mais elles se heurtent le plus souvent à des impossibilités économiques : la nature produit bien des polymères, mais ceux-ci forment des mélanges dont il est difficile d'extraire des composés définis, aux propriétés contrôlées. En outre, le spectre de la pénurie de pétrole a reculé, et d'autres sources de carbone prendront le relais, aux siècles suivants : charbon, sables asphaltiques, schistes bitumineux... Enfin les polymères ne sont pas particulièrement responsables d'un gaspillage : quatre pour cent seulement du pétrole utilisé dans les pays européens

constituent la matière première des plastiques, contre 86 pour cent brûlés pour la génération d'énergie et pour les transports. Enfin tous les matériaux, et pas seulement les polymères, nécessitent de l'énergie pour leur élaboration, leur mise en forme et leur transport.

Examinons le problème d'une bouteille, en verre ou en matière plastique : pour le même poids de matériau, il faut plus d'énergie pour fabriquer du plastique que du verre, mais une bouteille en verre est bien plus lourde qu'une bouteille en plastique, de sorte que la quantité d'énergie consommée est supérieure. En outre, le transport de produit liquide en bouteille de verre conduit à transporter plus de 40 pour cent d'emballage et moins de 60 pour cent de produit ; avec des bouteilles en plastique, ces proportions sont moins de 10 pour cent d'emballage, et plus de 90 pour cent de produit.

Au total, le bilan énergétique complet de la bouteille en plastique est plus favorable que celui de la bouteille en verre (même en cas de réutilisation, qui ne se justifie que sur des distances inférieures à 300 kilomètres : le transport du retour coûte d'autant plus que le matériau est dense).

UNE SOLUTION POUR L'ENVIRONNEMENT

Le plastique est donc un espoir pour l'environnement : non seulement les allègements des véhicules et des emballages, dus aux matières plastiques, contribuent à réduire la consommation des ressources fossiles, mais, d'une façon générale, les matières plastiques ont un écobilan favorable. C'est dans le domaine de la gestion des déchets ménagers et industriels que les exigences à l'égard des plastiques ont été les plus pressantes, surtout depuis la fin des années 1980. On a reproché à ces matériaux des faits qui résultent, en réalité, de leur succès et de leurs qualités : si les plastiques se développent, il est normal que leur proportion dans les déchets augmente, même si celle-ci n'atteint que sept à huit pour cent (en poids) dans les déchets ménagers. Ce problème s'est aggravé pour les maté-

riaux de toutes les familles (aciers, papiers, verres...), de sorte que les pays ont pris des mesures afin de réduire les déchets et d'obliger les acteurs économiques à valoriser leurs déchets. Les plastiques se prêtent bien à de telles valorisations : on refond les déchets de plastique afin de fabriquer des objets par extrusion ou injection, des traitements de craquage redonnent des produits assimilables à des coupes pétrolières, la dépolymérisation redonne parfois les monomères initiaux, et la combustion des plastiques, dans des incinérateurs propres, fournit de l'énergie (c'est la voie favorisée dans les pays les plus avancés dans ce domaine).

Ainsi, en France comme dans de nombreux pays, l'incinération propre des déchets ménagers contribue largement au chauffage urbain des grandes villes. La moitié environ de l'énergie produite par la combustion de ces déchets est apportée par les matières plastiques qu'ils contiennent. Ces diverses solutions permettent d'envisager une valorisation de plus en plus complète des matières plastiques usées. La valorisation énergétique est une des voies les plus rationnelles, car elle permet d'utiliser la même quantité de pétrole plusieurs fois : une fois en tant que matière plastique et une fois en tant que source d'énergie, alors que le reste du pétrole est généralement brûlé directement, surtout pour le chauffage et les transports.

Le raisonnement précédent est parfois critiqué par des personnes qui préconisent d'utiliser des polymères biodégradables. Cette question appelle plusieurs réponses, fondées sur une observation : toute biodégradation nécessite la présence d'eau, et tout matériau biodégradable doit donc être perméable à l'eau. Or les plastiques sont souvent préférés au papier ou au carton, qui sont biodégradables, précisément parce qu'ils résistent à l'eau et à l'humidité et, plus généralement, parce qu'ils sont impu-trescibles. D'autre part, des produits normalement biodégradables peuvent ne pas se dégrader lorsqu'ils sont enfouis sous plusieurs mètres de déchets (on lit encore un journal vieux de 40 ans). En troisième lieu, pour les trois voies de valorisation des déchets plastiques (matériau, chimie et énergie), la biodégradabilité n'apporte rien ; au contraire, elle est gênante pour le recyclage de type matériau. Il ne paraît donc pas rationnel de développer des matières plastiques biodégradables.

Pierre Avenas est directeur de la recherche et du développement d'Elf Atochem et président du Syndicat des producteurs de matières plastiques.

Le tabac et le chou

La campagne publicitaire en faveur du tabagisme fait décidément parler d'elle (voir *Tribune des lecteurs*, *Pour la Science*, novembre 1995)! Le message publicitaire est construit comme une bonne blague et égrène le nombre de mots pour le théorème de Pythagore (24), le principe d'Archimède (6), les *Dix commandements* (179), la *Déclaration américaine d'indépendance* (300), et... la récente législation en Europe limitant les occasions de fumer (24 942). Message bien reçu : la bureaucratie tue la liberté ; donc vive le tabagisme.

M. Federspiel a vérifié la comptabilité des mots. Il retrouve la langue dans laquelle le théorème de Pythagore ne fait que 24 mots (en grec), mais cherche en vain d'autres concordances : le principe d'Archimède n'est pas énoncé comme tel dans l'Antiquité. Ce qui l'amène à traiter les publicitaires de négligents...

J'irais plus loin : dans ce cas précis, les publicitaires ne sont pas négligents, mais carrément plagiaires. Heureusement, ils ont plagié une «chose» sans copyright : une rumeur. Leur annonce commerciale reprend exactement la forme d'une rumeur qui circule... au moins depuis les années 1950.

Un chercheur de Harvard l'a repérée aux États-Unis et en Grande-Bretagne entre 1951 et 1964, à propos du nombre de mots d'une supposée législation sur le chou(!) Que dit ce «canular du chou»? Comme le «canular du tabac», il reprend le nombre de mots des *Dix commandements* (297), le *Bill of Rights*, la charte et les droits civils américains (463), le discours de Lincoln à Gettysburg (266)... et «la directive fédérale pour fixer le prix du chou contient 26 911 mots». Troublante ressemblance avec notre annonce pro-tabagisme, non?

C'est cette campagne contre la bureaucratie américaine qui est à l'origine de l'annonce publicitaire. Le voyage transatlantique ne semble pas avoir été trop dur, encore que la *Déclaration américaine d'indépendance* aurait pu être remplacée par celle de la *Déclaration universelle des droits de l'homme* de 1789...

Pourquoi les publicitaires de 1995 reprennent-ils un message plus vieux qu'eux de 40 ans? Le «canular du chou» et le «canular du tabagisme» visent le même ennemi : la mainmise des politiciens sur la vie quotidienne. L'utilisation d'une suite logique de nombres (procédé narratif que les sciences occultes, telle la numérologie, utilisent aussi) vise à produire l'effroi devant l'implacabilité du destin («je ne suis rien face à l'État»), l'épouvante devant un ennemi dont on n'arrive même pas à imaginer la taille (puisqu'il est partout), l'épouvante à l'idée qu'un geste aussi personnel que «griller une

blonde» puisse tomber sous le coup d'une interdiction sociale. D'où le sentiment de révolte, l'appel à la sédition, et l'autopersuasion du fumeur que son acte de plaisir est une revendication politique. On se croirait dans une tragédie antique : le héros contre les Dieux, le libre arbitre contre le *fatum*.

Un manufacturier américain cherche à établir un lien politique entre l'acte personnel de fumer et une décision administrative d'en limiter les lieux : il utilise une vieille rumeur de derrière les fagots. Son efficacité est connue, et, en plus, elle est amusante. Mais personne n'est dupe : le but est avant tout politique, et il ne suffit pas toujours d'avoir de bons mots pour gagner une cause.

Pascal FROISSART, Paris

P. S. : Mon article contient 550 mots...

Dépenses de santé

Dans l'article *La juste évaluation des dépenses de santé* (*Pour la Science*, décembre 1995), des arguments sociologiques, économiques, statistiques, médicaux, antimédicaux et soi-disant éthiques sont exposés pour justifier l'évaluation des dépenses de santé et, par voie de conséquence, leur maîtrise, leur contrôle. L'omission d'une raison essentielle du fameux «trou de la sécu», le chômage, me fait penser à un médecin qui, pour traiter une personne ayant une angine à streptocoques β hémolytiques, ne lui prescrirait que de l'aspirine contre la fièvre et la douleur, mais pas de pénicilline contre la cause de la maladie, la bactérie. Peut-être notre médecine n'a-t-elle pas trouvé le juste antibiotique au moindre coût, à moins que son client n'ait dépassé certaines limites, tel l'âge moyen d'espérance de vie, ou abusé des plaisirs de la vie. Le parti pris «libéral» est clair, même s'il est enrobé de bons sentiments.

L'ennui n'est pas tant le parti pris que le libéral, au sens de l'économie dite de marché. L'économie libérale n'est qu'un art, comme la médecine, même si elle se réclame de la science, de la mathématique, en usant et abusant de l'informatique. Toutefois, à la différence de la pratique médicale, l'art économique ne se fonde que sur le mythe séculaire de l'ordre naturel. Pourtant la science nous a montré ces dernières années que la nature est à la fois ordre et désordre, excès et manque, jamais en parfait équilibre, comme l'intelligence, mais surtout l'angoisse, humaine le voudrait.

Ce qui pouvait être un idéal au siècle des lumières, mettre en équation les échanges de biens entre possédants et possédés, est malheureusement devenu un

dogme : l'éconocratie, pour reprendre le terme d'Edgar Morin. Il est éthiquement incorrect que, pour masquer les erreurs des uns et les bénéfices des autres, une pseudoscience, au nom de la société, critique la pratique médicale et ses praticiens et veuille les réduire à des biens de consommation.

La majorité des médecins ont conscience de l'imperfection de leur pratique, des limites de leur connaissance et, surtout, de leur impuissance devant la mort. À l'encontre de l'OMS, ils savent que la médecine ne peut pas grand-chose pour le bonheur de l'humanité quand cette dernière confond santé et bien-être. Ils n'ont pas attendu les «éconocrates» pour participer aux enseignements postuniversitaires. Quel malade aurait confiance en un médecin qui jouerait tous les jours au «juste prix»?

Docteur VULTAGGIO-LUCAS, Chinon

Réponse de Jean-Paul Moatti et Pierre Huard

Dans notre article, nous expliquons en quoi, depuis le milieu des années 1970, le ralentissement de la croissance économique (dont le chômage est en partie l'expression) est à l'origine des difficultés croissantes d'équilibrage des comptes de notre système d'assurance maladie. En outre, même dans l'hypothèse d'une croissance plus soutenue, le problème de la bonne utilisation des ressources dans notre système de santé continuerait de se poser. Toute utilisation inadéquate sacrifie en effet la possibilité de produire, avec les moyens disponibles, plus de santé (ou d'autres sources de bien-être) pour nos concitoyens.

Il est regrettable qu'une partie du corps médical (et, comme on l'a vu dans une actualité récente, des organisations syndicales), sincèrement attachée au maintien de l'équité sociale dans l'accès aux soins, continue de camper sur un refus de principe de toute analyse économique en matière sanitaire. Que ce refus soit habillé d'une critique radicale de la science économique, au prix d'un amalgame de celle-ci à ses versions les plus caricaturalement «néo-libérales», ne change rien au fond de l'affaire.

Avec la majorité des économistes de la santé au plan international, nous défendons l'idée qu'une régulation par le marché et par les assurances privées ne constitue pas la solution pour les systèmes de santé. Le calcul économique devient alors un moyen, non unique mais indispensable, d'éclairage des choix médicaux et sanitaires. Il est vrai qu'aller dans cette direction de plus grande transparence implique que les médecins partagent mieux la responsabilité de ces choix, non pas tant avec les économistes qu'avec le reste de la société, à commencer par leurs patients eux-mêmes.

Les impossibles en chimie

PIERRE LASZLO

La chimie est un art combinatoire assorti de règles. Dans leurs «figures libres», les chimistes synthétisent des molécules pour le plaisir de la difficulté vaincue ; dans leurs «figures imposées», ils fabriquent des molécules, déjà identifiées, pour l'industrie et la pharmacie. L'étrange est que des molécules faites pour l'amour de l'art aient des applications. Ainsi, les cristaux à symétrie d'ordre 5, considérés comme une merveille inutile, constituent des alliages antifriction.

Toute nouvelle molécule est un outil en quête d'applications, et il semble impossible d'inventer une molécule dont on puisse assurer qu'elle ne servira à rien : l'impossible majeur en chimie est de dire ce qui est impossible. Le chercheur est ainsi fait : le fruit défendu l'attire irrésistiblement.

La plupart de ce qui m'a été enseigné comme impossible au cours de mes études s'est révélé pratiquement réalisable. Semblables aux règles auxquelles s'astreignent écrivains et poètes, les impossibles incitent les chimistes aux transgressions. On m'avait appris que l'atome de carbone avait toujours quatre liaisons ; depuis, on a observé et créé des molécules, fugaces mais bien réelles, où ce carbone est lié à cinq ou six autres atomes.

Un autre impossible de la chimie du carbone, apparaissant alors comme impossibilité de principe, concerne les hydrocarbures saturés, qu'on appelle aussi paraffines : on m'avait seriné qu'on ne pouvait faire réagir ces substances extrê-

mement stables. L'an dernier, le prix Nobel de chimie a été décerné à George Olah, qui a trouvé des milieux tellement acides que même ces molécules s'y transforment. Un autre dogme était l'absence de réactivité des gaz rares : on a synthétisé depuis des dizaines de composés des gaz rares. On les qualifiait d'inertes, alors que c'était notre imagination qui était inerte.

Un impossible de principe a été très bien énoncé dès sa première formulation par Louis Pasteur : c'est l'impossible de synthétiser un composé asymétrique en l'absence d'asymétrie.



À bel arbre, chimie somptueuse. On a isolé du tremble une dizaine de terpènes d'une classe nouvelle, formés par la nature, suivant un plan inédit lui aussi. Cet arbre est le théâtre d'une guerre chimique. Des moisissures de diverses espèces hostiles combattent au cœur du bois, qu'elles font pourrir. Parallèlement des champignons émettent des acides, benzoïque et salicylique, inhibant diverses enzymes de ces moisissures.

L'IMPOSSIBLE SYNTHÈSE CHIRALE

Il existe deux catégories d'objets : ceux qui sont identiques à leur image dans un miroir et ceux qui en diffèrent.

Parmi les lettres majuscules, il y a des lettres qui ont un «sens» et des lettres qui n'en ont pas. Par exemple, le A majuscule est une lettre qui n'a pas de «sens» : elle est la même, qu'on la lise de gauche à droite ou de droite à gauche, tandis que S, R, F, G sont toutes des lettres ayant un «sens». On distingue ainsi, parmi les majuscules de l'alphabet, celles ayant un «sens», les lettres chirales, et celles qui sont symétriques parce qu'elles se lisent identiquement vers la gauche ou vers la droite. Les lettres symétriques sont identiques à leur image dans un miroir, celles qui ont un «sens» sont différentes. La même distinction est vraie dans l'espace à trois dimensions : ma main gauche, image de ma main droite dans un miroir, en diffère. Un tire-bouchon, un escalier en colimaçon, de nombreux coquillages, pratiquement toutes les molécules du vivant ont un sens et

appartiennent soit à une série gauche, comme la main gauche, soit à une série droite, comme la main droite. Les chimistes savent synthétiser ces molécules pour qu'elles soient toutes comme des mains gauches ou des mains droites. Toutefois, ils ne peuvent le faire en l'absence d'une source d'asymétrie, en l'absence d'un environnement où des objets, généralement des molécules, ont déjà un sens, soit de main gauche, soit de main droite.

Le physicien arrive à briser la symétrie pour faire un objet asymétrique à partir de forces qui sont symétriques. Une barre symétrique sur laquelle on appuie va flamber, c'est-à-dire qu'elle va s'incurver. On ne sait pas où le bombement va avoir lieu, mais on va créer une asymétrie à partir de forces symétriques : une petite fluctuation amènera une asymétrie. On a créé ainsi une asymétrie à partir de la symétrie, mais sur un cas

seulement : or, en chimie, on met en jeu des populations de milliers de milliards de milliards d'objets. Si l'on peut observer une déviation par rapport à la production égale de formes gauches et droites, statistiquement, sur le nombre colossal de molécules créées, on observe toujours une population strictement identique (50-50) d'objets gauches et d'objets droits.

Cette impossibilité de principe s'est affaiblie depuis Pasteur, qui était convaincu que la synthèse asymétrique était impossible en l'absence du vivant. Nous avons su dépasser cet interdit avec des molécules asymétriques n'appartenant pas au vivant.

Un des très grands problèmes connexes non résolus est celui de l'origine de la vie, puisque la vie est asymétrique : comment la première asymétrie est-elle apparue ? Cette double question, origine de la vie, origine de l'asymétrie moléculaire, est ardue. Le rationaliste que je suis souhaite une réponse scientifique plutôt que métaphysique, ou de science-fiction. Il n'est pas sûr qu'on la trouve... Il est certain qu'on ne l'a pas encore trouvée.

LA PRÉPONDÉRANCE DE LA FORME GAUCHE

Hormis quelques exceptions, les sucres des substances naturelles appartiennent à la série droite, et nous ne savons pas quand et comment cette sélection s'est imposée. Il est tout à fait possible qu'une légère prépondérance de la forme gauche soit apparue à un certain endroit de la planète et que, pour des raisons contingentes, cette abondance plus grande ait entraîné petit à petit l'incorporation dans des formes plus élaborées ; la sélection darwinienne aidant, cette forme a expulsé l'autre. Mais cela reste une hypothèse, et des dizaines d'autres causes ont été invoquées.

Deux questions passionnent actuellement les chimistes : l'auto-assemblage et la reconnaissance moléculaire.

Comment les molécules individuelles se regroupent-elles pour s'auto-assembler en structures d'ordre supérieur dotées de propriétés que les molécules n'avaient pas à l'état individuel ? Examinons le cas des phospholipides, ces molécules en forme d'allumettes avec une tête polaire et une queue hydrocarbonée. Leur tête se met de préférence en contact avec l'eau et leur queue hydrocarbonée exclut l'eau : ces phospholipides s'assemblent et forment ainsi ce qu'on appelle des bicouches lipidiques, c'est-à-dire les constituants des membranes cellulaires. L'évolution biologique impose une séparation entre l'intérieur et l'extérieur de la

cellule, de manière à définir un milieu interne à la cellule. Nous imitons très bien ce processus ; les fabricants de cosmétiques utilisent de tels liposomes.

L'autre question est la reconnaissance moléculaire. Bien entendu, dans l'auto-assemblage, il y a déjà reconnaissance moléculaire, puisque l'auto-assemblage est la reconnaissance du même par le même. Mais la reconnaissance par complémentarité, où la clé est complémentaire de la serrure qu'elle ouvre, est autrement créative. De telles adaptations mutuelles de formes sont fréquentes dans le vivant : ainsi les enzymes agissent sur les seules molécules dont la forme épouse celle de leur site actif, complémentaire. Cette adaptation mutuelle clé-serrure s'est perfectionnée au cours des siècles, et elle a été réglée par l'évolution.

L'asymétrie du récepteur joue un rôle primordial : sur un site actif, l'enzyme accepte la molécule gauche et refuse la molécule droite. Cette sélection est très importante en pharmacie, car il faut éviter de vendre des produits où 50 molécules sur 100 sont inactives, voire dangereuses.

LIMITES DE LA SYNTHÈSE CHIMIQUE

Le répertoire des outils de la chimie et des réactions est un ensemble suffisant : étant donné le plan d'une molécule, sa formule, on est capable de la construire. L'impossible est de synthétiser plus qu'une infime fraction du monde extraordinairement diversifié des possibles. L'octane a huit atomes de carbone, et il existe 2 028 conformations différentes de ces huit atomes. L'étude de ces 2 028 conformations est encore accessible, mais une molécule naturelle typique du monde vivant aura, par exemple, 18 carbones asymétriques et 262 144 stéréo-isomères aux propriétés différentes. Nous ne pouvons pas synthétiser ces 262 144 molécules afin de les comparer une à une à la substance naturelle et de déterminer quelle est la bonne !

Cette impossibilité de tout faire prouve par l'absurde l'inanité de toute gestion de la recherche par secteurs d'activité, lotis en lopins hyperspécialisés. Il importe au contraire d'encourager le nomadisme scientifique, qui assure les grandes percées. La logique de la découverte n'est pas dans l'immobilisme d'un découpage territorial ; la recherche vit dans le dynamisme d'un constant réaménagement des frontières, d'ailleurs arbitraires, posées entre les sous-disciplines.

Il est extrêmement tentant d'opposer la recherche universitaire, acadé-

mique, et la recherche industrielle. Aujourd'hui, étant donné l'extrême sensibilité de très nombreux tests biologiques, les chimistes sont tentés de travailler à l'aveuglette : ils constituent des chimiothèques en synthétisant 10 000 molécules apparentées, ils les soumettent à des tests biologiques et repèrent ainsi une dizaine de molécules actives. Ces méthodes évacuent l'intelligence, l'imagination créatrice, et je suis très hostile à leur développement. En science, une idée, même simpliste, vaut beaucoup mieux que pas d'idée du tout. Il me semble impossible que l'on obtienne de très bons résultats par ce moyen. En outre, nous ne connaissons pas toutes les propriétés des 700 000 molécules synthétisées chaque année, et le danger de toxicité imprévue va grandissant avec cette technique des chimiothèques. Le risque de prolifération lié à la mise sur le marché pharmaceutique de molécules insuffisamment connues est réel.

Tout scientifique partage son temps entre le ludique et l'utile. Le paradoxe est que l'utilité sociale naît très souvent d'une recherche parfaitement désintéressée. Je crois assez peu à la recherche ciblée vers des objectifs appliqués.

Les chimistes ont voulu et su synthétiser des molécules en forme de solides platoniciens : le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre. Cette activité, à la fois gratuite et coûteuse, s'est révélée payante : la molécule de cubane, en forme de cube, est utile dans la lutte antivirale et pour fabriquer des explosifs.

Pourquoi la lutte antivirale ? Parce que les enzymes n'ont pas l'habitude d'interagir avec des cubes : aussi ceux-ci restent-ils actifs très longtemps dans l'organisme sans être détruits. Pourquoi des explosifs ? Parce que les six faces carrées du cube sont sous forte tension et ne demandent qu'à s'ouvrir en libérant une forte énergie. L'armée américaine a été vivement intéressée... et le Pentagone s'est saisi du cube. Je ne connais pas de molécules naturelles en forme de cube, mais nous n'avons encore exploré qu'une infime portion de la diversité naturelle.

Ce rapprochement de l'artifice et du naturel nous amène à un autre sujet : la distinction arbitraire et fictive entre molécule naturelle et molécule artificielle. La législation américaine protège certaines substances naturelles, en particulier la vanilline, qui est l'arôme au goût de vanille des glaces à la vanille : c'est l'arôme alimentaire le plus utilisé dans le monde entier. La substance naturelle coûte environ 50 000 dollars le kilogramme ; la substance de

synthèse, environ 17 dollars le kilogramme. C'est dire les trafics pour faire passer la vanilline de synthèse comme vanilline naturelle. Pour réprimer la fraude, on analyse les impuretés isotopiques qui se trouvent dans la vanilline naturelle et dans la vanilline de synthèse. On détecte aussi, par les mêmes méthodes, la chaptalisation, car le sucre de betterave a un enrichissement en deutérium différent du fructose présent dans le raisin. Le laboratoire de Maryvonne et Gérard Martin, à l'Université de Nantes, est spécialisé dans ce type d'identification.

CHIMIE MINÉRALE ET CHIMIE ORGANIQUE

La distinction est conventionnelle, un peu arbitraire, et peut être néfaste, car le front actif de la science chevauche les frontières entre les disciplines. Comme toute interface, celle de la chimie minérale et de la chimie organique est active et productive. Parmi les espèces chimiques qui sont à la fois des espèces organiques et des espèces minérales, il y a tous ces complexes organométalliques où un métal porte des groupements qui sont organiques. La plupart des catalyseurs dans les réacteurs industriels sont des complexes organométalliques.

Certains scientifiques cherchent, dans ce *no man's land* entre minéral et organique, les indices de l'origine de la vie... C'est une intuition que, sentimentalement, j'aurais tendance à partager, mais que, rationnellement, je ne peux pas justifier. Ici nous sommes en pleine science-fiction, voire métaphysique. Dans ce domaine de l'origine de la vie, je trouve que les auteurs, que mes collègues, sont terriblement dogmatiques, fonctionnant par exclusion mutuelle, avec des affirmations beaucoup trop tranchées et catégoriques. D'autre part, leurs écrits utilisent des procédés typiques des romanciers : dans Balzac et dans une publication traitant des origines de la vie, on trouve le même souci de descriptions extrêmement minutieuses, avec la volonté de donner une impression de réel, alors que, bien sûr, on nage en pleine fiction.

Ce très grand problème n'est pas propre à la chimie, mais c'est effectivement l'une des frontières actuelles de la chimie.

Pierre LASZLO est professeur de chimie à l'École polytechnique.

Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël, sera diffusée sur France Culture le 7 février 1996, à 9 heures.
