

■ POUR LA

SCIENCE

pls

Novembre 2002

Édition française de Scientific American

L'océan, piège à carbone



Le nez de la taupe



L'incertitude des scores



L'atmosphère cosmique



*Comment le milieu
intergalactique
s'est structuré*

FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,13 €, BEL : 7,07 €,
CH : 11,2 FS, CAN : 8,95 \$, LUX : 6,77 €, ESP : 8,71 €,
PORT.CONT. : 6,33 €, AND : 5,95 € MAY : 8,92 €, REU : 8,92 €

M 02687 - 301 - F : 5,95 €



TRIBUNE DES LECTEURS

4

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

SCIENCE ET ÉCONOMIE

La morale fait passer le goût du gain

par Ivar Ekeland

6

POINT DE VUE

Égalité et équilibre

Hervé This, Bernard Denoyer et Georges Bram

7



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le trouble du pastis

par Hervé This

8



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ L'euro gagne du terrain ■ Mithra le Rhénan

■ Collisions de trous noirs ■ Viva la ola!

■ Hiéroglyphes mayas ■ Visage de soi, visage de l'autre ■ Avis

de séisme ■ Pas de coup d'État chez les fourmis ■ Le rideau du

sommeil ■ Le palimpseste cosmique ■ Le guidage des artères

■ La géométrie dans la grammaire ■ Double trou dans la couche

d'ozone ■ La forme d'une goutte qui ruisselle

10

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Ibn Sahl, inventeur de la loi de la réfraction

par Brahim Guizal et John Dudley

24

ÉNIGMATHS

C'est du billard!

par Dennis Shasha

92



LOGIQUE ET CALCUL

Le monde mathématique existe-t-il?

par Jean-Paul Delahaye

98

ART ET SCIENCE

L'art cellulaire

par Bernard Caillaud

104



IDÉES DE PHYSIQUE

Pièges à eau

par Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

106



ANALYSES DE LIVRES

■ Les cris du volcan, de Stanley Williams et Fen

Montaigne ■ Les Arago – François et les autres,

de François Sarda ■ Du nylon et des bombes (Du Pont de Nemours,

le marché et l'État américain 1900-1970), de Pap Ndiaye

■ L'Homme de vérité, de Jean-Pierre Changeux

108

Une forêt sous la mer

28

par Paul Falkowski

Le phytoplancton marin joue un rôle important dans le cycle du dioxyde de carbone et dans le stockage du carbone. Pourrait-on l'utiliser pour combattre le réchauffement climatique?

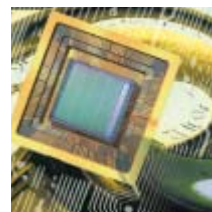


Ordinateurs asynchrones

36

par I. Sutherland et J. Ebergen

Des puces qui ne sont pas contrôlées par une horloge centrale améliorent les performances des ordinateurs en permettant à chaque circuit de travailler indépendamment.

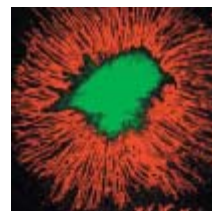


Les sentinelles de l'immunité

44

par Jacques Banchereau

Les cellules dendritiques activent le système immunitaire contre les «envahisseurs». Elles pourraient être utilisées pour lutter contre le cancer et certaines maladies auto-immunes.



La gastronomie médiévale

52

par Bruno Laurioux

Au Moyen Âge, les épices venues d'Orient accompagnaient potages, volailles et entremets. Une nourriture de qualité était considérée comme un gage de bonne santé.



Un nouveau site plus convivial

- pour chaque article un complément d'information
- un moteur de recherche intégré
- un annuaire des sites web scientifiques

www.pourlascience.com

Le milieu intergalactique

58

par E. Scannapieco,
P. Petitjean et T. Broadhurst

L'Univers est essentiellement constitué de vide : le gaz raréfié du milieu intergalactique joue pourtant un rôle primordial dans l'évolution du cosmos.

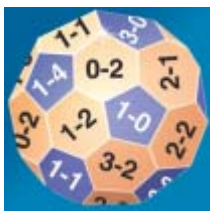


La glorieuse incertitude du football

66

par John Wesson

Les faibles scores du football font que les résultats des matchs sont plus aléatoires que dans d'autres sports. Aussi est-il rare que la meilleure équipe gagne le championnat!



Le nez de la taupe

70

par Kenneth Catania

La taupe au nez étoilé est sans doute dotée du nez le plus étonnant qui soit. Infaillible dans la détection des proies, cet organe est pourvu d'une zone où la sensibilité est maximale.

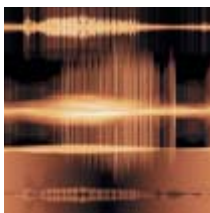


Vocalises chaotiques

76

par Lorenzo Matassini

La théorie du chaos fournit des techniques adaptées au traitement du signal vocal. Un algorithme élimine le bruit parasite et devrait améliorer les dispositifs de reconnaissance vocale.



La nacre, substitut de l'os

84

É. Lopez, S. Berland et S. Borzeix

La nacre et l'os sont des tissus minéralisés ayant une structure et un mode d'élaboration similaires. Divers essais cliniques montrent que la nacre aide à régénérer les os.



De petits riens

Gooaal! Ce but signifie-t-il que l'équipe qui a marqué est plus forte que l'équipe adverse? Pas toujours. Ce but peut être le fruit du hasard, comme le résultat pile d'un lancer d'une pièce ne montre pas que pile est plus fort que face. Peu de buts sont marqués au cours d'une partie de football, aussi le hasard joue-t-il un grand rôle dans le résultat de chaque partie, et même du championnat. John Wesson a étudié les statistiques du football et montré que les écarts dus au hasard sont souvent supérieurs aux différences résultant de la qualité des équipes (voir *La glorieuse incertitude du football*, pages 66 à 69). Cela doit rendre modestes les équipes gagnantes et consoler les perdantes : de la Roche Tarpéienne au Capitole, il n'y a... qu'un petit rien.

Le petit rien constituant le milieu intergalactique est un concept astrophysique étonnamment riche. Le milieu intergalactique est d'une rare aridité, moins de dix atomes par mètre cube, et pourtant il témoigne de l'activité stellaire ancienne, notamment des explosions de supernovae qui l'ont ionisé et qui l'ont approvisionné en divers éléments. De plus, ce quasi vide est structuré, autre surprise, en longs filaments où s'accrochent les galaxies.

Dans ce néant vaste et noir, opèrent les lois de physique découvertes sur Terre. Par le miracle scientifique sans cesse renouvelé, l'utilisation de ces lois permet de reconstruire la géographie de l'Univers. Ainsi les zones où il y a de l'hydrogène sont réparties le long de la ligne de visée des quasars. La lumière émise par les quasars est absorbée par les bulles de gaz intergalactiques à différentes longueurs d'onde à cause du décalage Doppler résultant de leur vitesse. Et comme, dans l'expansion de l'Univers, la vitesse est fonction de la position, on sait déterminer la position des bulles traversées (voir *La forêt Lyman-alpha* dans *Le milieu intergalactique*, pages 58 à 64).

«Le Guatemala n'existe pas, je le sais, j'y ai vécu», avait ironisé Georges Arnaud ; les astrophysiciens affirment que le vide n'existe pas et qu'ils l'ont étudié.

Philippe BOULANGER

Tribune des lecteurs

Le décalage horaire

Dans l'article *Caféine et vigilance* (voir *Pour la Science*, août 2002), l'auteur évoque l'hormone mélatonine et son rôle dans la resynchronisation des décalages horaires. Durant le jour, l'organisme sécréterait moins de mélatonine, car la lumière inhibe les voies nerveuses qui stimulent cette sécrétion. Or, on lit que, lors d'un trajet New York-Paris, on a envie de dormir pendant la journée qui suit, ce qui montre que de la mélatonine est présente. La lumière cesserait-elle d'inhiber la sécrétion de mélatonine ?

Par ailleurs, l'auteur mentionne une expérience conduite sur des aviateurs qui absorbent soit de la caféine, soit de la mélatonine, soit un placebo. Mais vous ne donnez que les résultats concernant la caféine. Qu'en est-il des effets de la mélatonine sur la vitesse de resynchronisation comparés à ceux de la caféine et du placebo ? De plus, vous mentionnez un rythme de resynchronisation d'une heure par jour, très supérieur à celui obtenu avec le placebo. Or, sauf erreur de ma part, une heure par jour est la valeur généralement admise pour un recalage «naturel».

Henri Nonac, Paris

Réponse de Bruno Sicard

La lumière ne cesse pas d'inhiber la sécrétion de mélatonine. Quand on subit un décalage horaire, la situation est compliquée. En temps normal, l'inhibition de la sécrétion de mélatonine par la lumière est généralement en phase avec le rythme circadien de l'individu. Lorsque vous êtes à New York au mois de mai, votre organisme sécrète naturellement plus de mélatonine pendant les 12 heures de nuit, et moins de mélatonine pendant les 12 heures du jour. Cela ne pose pas de problème, car le jour dure 12 heures et la nuit aussi. En revanche, si vous vous envoliez pour Paris à 21 heures, le jour arrive 6 heures après, c'est-à-dire alors que votre rythme naturel est en plein milieu de sa nuit, et sécrète beaucoup de mélatonine. Quand vous descendez d'avion, la lumière inhibe la sécrétion de mélatonine, mais elle ne peut tout de même pas recaler à elle seule, en si peu de temps, un rythme biologique bien installé. Seule une partie de la mélatonine est inhibée chaque jour. Peu à peu, la lumière recale le rythme biologique, mais il faut une bonne semaine pour que l'un et l'autre soient de nouveau en phase.

La phrase de notre texte correspondant à votre deuxième remarque est peut-être ambiguë. Effectivement, le recalage sans aide pharmacologique est d'environ une heure par jour. La caféine à libération

prolongée, de même que la mélatonine, raccourcissent le délai total de resynchronisation d'environ quatre jours par rapport au placebo, ce qui veut dire que le recalage journalier est presque de deux heures. L'effet synchronisant de la mélatonine était déjà connu, c'est celui de la caféine qui est nouveau.

Pêche en eaux troubles

Pour résoudre le problème soulevé par Ivar Ekeland dans *Le laboureur des mers* (voir *Pour la Science*, août 2002), on peut aussi envisager l'attribution de droits de propriété du type ITQ (contingents individuels transférables). Il s'agit certes de quotas, mais leur caractère transférable (le pêcheur peut vendre son droit d'accès à la pêche) induit la régulation du système, chaque pêcheur étant alors en mesure d'optimiser son portefeuille et de choisir librement l'échelle de ses opérations. La question de la surveillance serait là aussi réglée «en interne», les pêcheurs exerçant eux-mêmes le contrôle des pêches.

Philippe JOSSELIN, Asnières-sur-Seine

Réponse de Ivar Ekeland

Les ITQ me paraissent une excellente idée, et j'aurais dû y penser, d'autant plus que c'est une solution qui a déjà été préconisée en matière d'environnement : ce sont les fameux droits à polluer transférables.

Le propre de l'homme

Dans l'article *Les proportions, reflets de l'évolution* (voir *Pour la Science*, août 2002), les auteurs, X. Penin et C. Berge essaient de distinguer, dans l'évolution qui a mené du singe à l'homme, les changements qui sont dus à un ralentissement de la croissance (qui expliqueraient pourquoi un homme ressemble à un jeune chimpanzé) et ceux qui ont une origine différente (qui expliqueraient pourquoi, entre le jeune chimpanzé et l'homme, on note tout de même de grandes différences). Pour illustrer cette distinction, ils écrivent : «La conservation de caractères juvéniles influe sur le crâne humain, mais elle n'est pas le seul facteur qui entre en jeu. Les hommes ont également des caractères anatomiques spécifiquement humains, tels le nez et le menton saillants.» Pourtant, en 1977, Stephen Jay Gould, dans *Ontogeny and Phylogeny*, pensait qu'au contraire l'apparition du nez et du menton saillants s'expliquait par la conservation de caractères juvéniles.

Thibaut Brunet, Dijon

Réponse de X. Penin et C. Berge

L'analyse mathématique de forme amène à distinguer deux sortes de processus évolutifs sur le crâne humain, le plus important correspond à la conservation d'une forme juvénile chez l'adulte (la néoténie), le second à des caractères structuraux propres à l'espèce. Si l'on considère le crâne d'un homme adulte, sa forme résulte à 64 pour cent de la néoténie et à 36 pour cent de caractères spécifiques (on a éliminé du calcul les variations individuelles). L'analyse mathématique est donc le moyen de quantifier des phénomènes biologiques différents. Concernant la face, on peut ainsi démontrer que le nez et le menton humains sont des structures anatomiques indépendantes de la croissance.

La sûreté des cartes à puce

J'ai lu avec attention le dossier de *Pour la Science* sur la cryptologie, et il y a un point que je n'arrive pas à comprendre. Comment garantir la sécurité des cartes à puce ? Il me semble que les cartes à puce disposent d'un nombre assez limité de connecteurs d'entrée et de sortie, et que l'on pourrait identifier la sortie pour tous les signaux d'entrée, et produire une puce identique à une puce donnée. Il est peut-être possible également (je suis peut-être trop optimiste) de reproduire le schéma ayant servi à la gravure de la puce par des techniques fondées sur la microscopie.

Sébastien MALTAVERNE

Réponse de Louis Goblin

Les schémas d'authentification sont conçus pour empêcher votre première suggestion. Plus précisément, même si la carte reçoit les données de l'extérieur par blocs de 8 à 32 bits, le calcul proprement dit (par l'algorithme d'authentification) ne commence que lorsque que sa valeur d'entrée a été complètement reçue. Or la taille de cette valeur d'entrée est généralement d'au moins 64 bits, ce qui fait qu'il est utopique d'essayer toutes les valeurs d'entrée de l'algorithme.

Quant à la possibilité de copier physiquement la puce, les technologies utilisées pour la fabrication des puces visent à l'interdire. Elles mettent notamment en jeu plusieurs couches métalliques de protection et des détecteurs d'intrusion. En outre, le stockage des données est effectué sous des formats particuliers qui rendent très difficile l'interprétation des données. Un certain nombre d'autres protections, non divulguées par les constructeurs, existent. Ces mécanismes de sécurité permettent ainsi à la carte à puce de garder plusieurs longueurs d'avance sur les pirates potentiels...

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourslscience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourslscience.com

Bloc-notes

DIDIER NORDON

Faire la pluie et le beau temps

Quatre exercices théoriques sur la pluie et le beau temps.

1. Météo conditionnelle. Existe-t-il une disposition des masses d'air chaudes et froides conduisant à la prévision suivante : «Si vous restez chez vous, il fera beau. Si vous sortez vous promener, il se mettra à pleuvoir?» On ne supposera pas que le promeneur a l'habitude de chanter, l'exercice serait trop facile.

2. Contre-pied. La météo fait une prévision à 4 jours – par exemple, il va pleuvoir – en précisant que l'indice de confiance est de 2 sur 5. Est-ce que, si je prévois qu'il fera beau, l'indice de confiance de ma prévision est de 3 sur 5, donc meilleur que celui de la météo?

3. Prévoir les prévisions. Connaissant la prévision à 48h faite aujourd'hui par la météo, peut-on en déduire la prévision à 24h qu'elle fera demain?

4. Progrès scientifique. Supposons que la prévision à 24h faite demain contredise la prévision à 48h faite aujourd'hui. Cela prouve-t-il que la météorologie sera devenue demain une science plus fiable qu'elle ne l'est aujourd'hui?



Infortuné convive

Même si leur argent est, à coup presque sûr, destiné à être finalement perdu, ceux qui jouent au loto s'offrent, jusqu'au moment du tirage, quelque chose de précieux : le rêve. Un rêve moins serein qu'il n'y paraît, peut-être, puisque ces mêmes joueurs sont souvent friands d'anecdotes racontant la série de catastrophes subies par des gagnants victimes d'escrocs ou de revers de fortune.

Rares sont ceux qui n'ont jamais tenté aucune loterie. Quelle est en effet la loterie la plus antique et la plus universelle, sinon celle qui unit un homme et une femme pour donner naissance à un être dont nul ne sait ce qu'il sera? Les premiers mois laissent aux parents le temps de rêver à un enfant d'exception. Espoir anéanti,



à coup presque sûr, par la suite. Et quand, par hasard, le rêve n'est pas démenti, il tourne aussi bien au cauchemar. Papa Beethoven, papa Bolyai ou papa Kafka, maman Baudelaire ou maman Jules Renard ont eu plus à souffrir du génie de leur enfant qu'à s'en féliciter.

Dénoncer l'irrationalité naïve des joueurs qui hasardent un argent qu'ils ne reverront pas manque d'à-propos. Car les loteries sont moins une question d'argent qu'une parabole désabusée sur la condition humaine et les désillusions que la vie nous inflige, même quand elle réalise nos vœux.

Théorème de Nicolas Sarkozy

Je ne me mêle pas de politique. Je dis simplement qu'on commence à avoir assez vu Nicolas Sarkozy. Faire parler de lui jusque dans les revues de mathématiques, c'est, de sa part, exagérer. Voici comment a procédé l'astucieux personnage.

Lorsqu'un mathématicien en rencontre un autre, que se racontent-ils? Des histoires de mathématiciens, évidemment, lesquelles consistent en général à imaginer de concert des problèmes compliqués, puis à se mettre illico, mais pour longtemps, à sécher dessus. Si, par exemple, les mathématiciens Jean Martin et John Smith collaborent, le patrimoine mondial de l'humanité a donc toutes les chances de se voir tôt ou tard enrichi d'une «conjecture de Martin-Smith».

Assez de théorie, passons à la pratique. Dans les années 1990, le Français Jean-Louis Nicolas et le Hongrois Andras Sarkozy ont connu le

bonheur de travailler ensemble donc, inéluctablement, celui de sécher ensemble. Ils sont ainsi devenus les pères d'une conjecture qui fait leur gloire internationale puisque, à l'heure qu'il est, la profession continue de s'échiner dessus. Dans le *Journal of Number Theory*, 95, 209-226, 2002, on peut lire un article de Fethi Ben Saïd intitulé *On a Conjecture of Nicolas Sarkozy*.

Vu la remarquable symétrie en miroir des voyelles de son nom (Nicolas Sarkozy : i-o-a/a-o-i), on aimerait que la conjecture porte sur la façon d'engendrer des mots à partir de lettres soumises à quelque contrainte. Non. Elle concerne des partitions au sein des nombres entiers. Même en mathématiques, les plus belles histoires ont leurs imperfections.

La nature, voilà l'ennemie!

La moitié peut-être de l'activité ancestrale de l'humanité consiste à apprendre à se méfier de la nature et à inventer des parades contre elle, sans cependant jamais pouvoir la vaincre (l'autre grande activité humaine étant la guerre). Les maisons protègent de la pluie et du soleil, mais cèdent parfois à ces autres phénomènes naturels que sont la foudre et les séismes. La médecine, l'hygiène et autres artifices, luttent contre la tendance naturelle de l'homme à attraper des maladies qui le font mourir jeune, mais échouent devant l'ultime fatalité naturelle qui l'attend. La nature mêlant sans la moindre précaution l'aliment et l'ordure, le remède et le poison, le sain et le pourri, c'est à l'élevage et à l'agriculture qu'il revient de fournir des aliments moins indigestes que ces farnieuses baies dont, paraît-il, se nourrissent les aventuriers perdus loin de tout.

Bref, pour qui ne voit pas le monde à l'envers, le mot «nature» ne peut qu'évoquer l'effroi, le danger, la violence. Eh bien, il faut croire que nous le voyons à l'envers, le monde. Quand les voix enjôleuses des publicités susurrent «C'est naturel!», nous entendons : «C'est bon pour nous.» Mis en confiance par ce mot magique, nous courons acheter crèmes de beauté, yaourts, vêtements, voire détergents, garantis «naturels». Quelle expression de raccourci irréfléchi contre notre civilisation, que d'aspirer à «retrouver l'harmonie avec la nature», alors que, en vérité, la nature est la dysharmonie même!

Le poulet aux hormones, moins naturel que l'amanite phalloïde, reste plus sain.





La morale fait passer le goût du gain

IVAR EKELAND

Le désir de justice et un certain altruisme social font que nos actes ne sont pas seulement vénaux.

Dans toutes les sciences, les théoriciens font des modèles et les expérimentateurs testent la validité de ceux-ci. En économie, ce rôle est partiellement tenu par les économètres, qui analysent statistiquement des données recueillies sur la production, la consommation et les échanges.

Mais il y a aussi de vrais expérimentateurs, qui conçoivent et réalisent des expériences pour observer le comportement de quelques cobayes dans des situations tests, et confrontent les résultats obtenus aux prédictions de la théorie.

Le résultat le plus constant de ce type d'expériences est que l'être humain n'est pas qu'égoïste, ou du moins qu'il n'est pas que cela. L'intérêt propre et immédiat de chacun est un facteur important dans ses décisions, mais ce n'est pas le seul.

Le jeu dit de l'ultimatum met ce résultat en évidence. La règle est simplissime. Une somme d'argent, mettons cent euros, est à répartir entre deux individus A et B. Le premier, A, propose une répartition. Si B, l'accepte la répartition se fait selon les termes proposés par A. Si B la refuse, l'expérimentateur reprend l'argent. Si les individus ne songeaient qu'à leur intérêt immédiat, A devrait proposer une répartition du style 99 pour A et 1 pour B, et B devrait accepter, car recevoir 1 est toujours mieux que rien. Or ce n'est pas ce que l'on observe : dans la plupart des cas, A propose une répartition du type 50-50, ou 60-40, que B accepte, et dans les rares cas où A propose des répartitions trop biaisées, du type 90-10, B refuse.

Une expérience récente de Gary Charness et Matthew Rabin renouvelle le jeu de l'ultimatum. Ils proposent à des tiers de répartir de l'argent entre deux individus A et B. Deux possibilités leur sont offertes : dans la première, A reçoit 7,50 € et B reçoit 3,75 € ; dans la seconde, A et B obtiennent 4 € chacun. Dans cette variante, B n'a plus le pouvoir de refuser.

Deux arguments d'équité et d'efficacité se présentent immédiatement à l'esprit des tiers décideurs ; malheureusement ils ne conduisent pas au même choix. Examinons d'abord l'argument d'équité : la

première répartition avantage outrageusement A, qui touche le double de B, et il convient donc de préférer la deuxième, rigoureusement égalitaire. Mais il y a aussi un argument d'efficacité : après tout, entre la première répartition et la seconde, la différence pour B est minime, 6,25 pour cent, et ce n'est pas cher payé pour faire un cadeau très important, presque 100 pour cent, à quelqu'un d'autre. Lequel de ces deux arguments va l'emporter ?

Quand G. Charness et M. Rabin font faire le choix par des tierces personnes, les résultats sont parfaitement équilibrés : 50 pour cent des tiers choisissent la première répartition et 50 pour cent la seconde. On voit que le poids de l'argument d'équité est considérable. Dans un deuxième temps, c'est B lui-même qui fait le choix. On pourrait penser que, comme il est directement intéressé au résultat, et que l'argument d'équité est ici secondé par l'intérêt personnel, le choix se fera toujours en faveur de la répartition égalitaire. Il n'en est rien : 40 pour cent des sujets préfèrent encore la première, c'est-à-dire qu'ils choisissent d'avantager autrui au prix d'une petite perte pour eux-mêmes. Si ce n'est pas de l'altruisme, on se demande bien ce qui méritera ce nom, et ce sentiment s'avère assez fort pour combattre efficacement le souci d'équité.

ALTRUISME OU ÉQUITÉ ?

Le troisième temps de l'expérience est le plus intéressant : on laisse B choisir, comme dans le deuxième temps, mais auparavant on lui raconte une petite histoire : on lui dit que A vient de rejeter une répartition qui aurait donné 5,50 € à chacun. En d'autres termes, on soutient que A préfère laisser B choisir entre (7,50 €, 3,75 €) et (4 €, 4 €) que d'accepter immédiatement (5,50 €, 5,50 €). Dans ce cas, la proportion de sujets B qui choisissent la répartition égalitaire (4 €, 4 €) monte à 90 pour cent.

On comprend ce qui se passe dans l'esprit de B. A rejette, pense-t-il, l'offre de (5,50 €, 5,50 €), espérant que lui-même choisira la répartition (7,50 €, 3,75 €). Le

gain pour A sera alors sensible, environ 36 pour cent, mais le gain pour la collectivité sera minime : 11,25 € au lieu de 11 €. Le comportement de A ne peut être justifié ni par l'équité ni par l'efficacité, c'est de l'égoïsme à l'état pur, et B s'empresse de le sanctionner, poussé soit par un désir de justice, comme si chacun de nous était chargé de punir l'injustice, soit par un désir de vengeance, la satisfaction de rendre à A la monnaie de sa pièce, les deux sentiments n'étant nullement incompatibles.

Je suis curieux de savoir ce qui se passerait si, dans le deuxième temps de l'expérience, on avait laissé faire le choix par A plutôt que par B : je pense que l'argument d'équité aurait été assez fort pour convaincre 20 à 30 pour cent des A d'opter pour la répartition égalitaire, bien qu'elle les désavantage par rapport à la première. Telle qu'elle est, cette expérience montre que les individus sont prêts à se sacrifier (un peu) pour autrui, qu'ils recherchent l'équité dans les partages, et qu'ils réagissent à l'injustice, surtout quand ils en sont victimes.

D'autres expériences mettent en lumière un souci de réciprocité : les gens ont tendance à traiter autrui comme ils ont le sentiment d'être traités, à réagir généreusement aux offres qu'ils considèrent comme généreuses, et à se venger de comportements qu'ils estiment mesquins. En principe, rien n'empêche d'intégrer tous ces comportements au modèle habituel de l'*homo economicus* : ce dernier est un froid calculateur, mais cela n'empêche pas les sentiments. Il poursuit rationnellement ses objectifs, mais ceux-ci peuvent être désintéressés, voire altruistes, et le formalisme des fonctions d'utilité (la valeur que chacun donne aux différentes possibilités) a suffisamment de souplesse pour rendre compte d'une multitude de comportements.

C'est bien dans cette voie que s'engage la théorie, mais il me semble cependant qu'une révision plus profonde soit nécessaire. Peut-être l'économie devra-t-elle frapper à la porte de l'anthropologie pour apprendre d'elle les structures mentales de l'échange et du don.



Égalité et équilibre

HERVÉ THIS • BERNARD DENOYER • GEORGES BRAM

Les nouveaux programmes de chimie préconisent de remplacer la double flèche par un signe égal. C'est un recul d'un siècle.

Les «compléments» de la nouvelle réforme des programmes prescrivent qu'en classe de terminale scientifique, «le signe égal (=) sera utilisé pour rendre compte du fait que la réaction peut avoir lieu dans les deux sens (sens direct, dans le sens $A + B$ «donne» $C + D$, et sens inverse, dans le sens $C + D$ «donne» $A + B$: $A + B = C + D$).» Cette proposition fait mal : elle réintroduit une notation abandonnée depuis plus de 100 ans. De surcroît, continuent les compléments : «... jusqu'à la fin de la classe de première scientifique, la réaction chimique ne donne pas lieu à un modèle de description au niveau microscopique». Ce second point est tout aussi passéiste. Nous y reviendrons.

L'«innovation» que constitue le remplacement d'une double flèche par un signe = est assortie de commentaires. Par exemple, il est dit que «le signe = adopté en classe de terminale traduit le fait que la réaction chimique – processus de redistribution des atomes entre réactifs et produits – peut se faire dans les deux sens, le sens direct et le sens inverse». Ah bon ? Objection votre honneur : la signification du signe = n'est pas *égale* partout. En langage de programmation, le signe =, comme dans $n = n + 1$, signifie je remplace le terme de gauche par le terme de droite, c'est-à-dire j'augmente n d'une unité !

Un exemple à l'appui de l'introduction éclairante du signe *égal* pour les réactions réversibles est la mise en solution de chlorure d'argent solide. Dans les commentaires des nouveaux programmes, un schéma montre deux flèches, une décrivant le passage de l'ion Ag^+ d'un cristal de chlorure d'argent à l'ion Ag^+ libéré en solution, et l'autre le passage inverse. Pourquoi abandonner les deux flèches, que tous les chimistes réunissent en une double flèche, pour symboliser les échanges ?

C'est à l'université qu'incombera sans doute la tâche de faire comprendre aux élèves que, dans un équilibre chimique, la réaction est dynamique, et s'effectue sans cesse dans les deux sens, ce que ne montre pas le signe =. Quant au déplacement de l'équilibre induit par l'ajout d'une

quantité de réactifs, il nous semble être mieux explicité par les doubles flèches.

Cette querelle de doubles flèches et de signe = s'apparente-t-elle à celle des gros et des petits boutistes de Gulliver ? L'histoire de la chimie montre, au contraire, que le problème du signe = et de la double flèche fut très important dans le développement de la chimie. Lavoisier (1743-1794) introduisit les équations chimiques, en 1782, et, en 1787, il écrivit dans son *Traité élémentaire de chimie* : «Moût de raisin = acide carbonique + alkool». La révolution chimique due à Lavoisier et à ses émules conduisit à utiliser le signe = pour décrire les réactions chimiques : c'était un premier pas.

Puis, à la fin du XIX^e siècle, le signe = est éliminé au profit d'une double flèche par le chimiste néerlandais Jacobus Henricus Van't Hoff (1852 – 1911) : «Déjà l'état de repos qui caractérise un liquide volatil dont la vapeur a atteint sa tension maxima n'est qu'apparent, et résulte d'une condensation et d'une vaporisation équivalentes et simultanées [...]. On ne peut méconnaître la tendance de notre époque, qui s'efforce de développer de plus en plus la conception thermodynamique au détriment de la conception moléculaire [...]. Nous continuerons [cependant] à représenter les phénomènes d'équilibre par un symbole qui exprime d'une manière figurée l'idée qu'on se fait du mécanisme. Les deux flèches en sens contraires indiquent les deux transformations inverses.»

Geons que dans un grand élan moderniste, la prochaine réforme de l'enseignement de la chimie abandonnera le signe = au profit de la double flèche, et que l'on prendra du recul, pour fonder ces programmes, sur des faits de société. On observera ainsi que : (1) les élèves se détournent des études scientifiques, notamment de chimie ; (2) la chimie est critiquée pour son aspect hermétique, les élèves ayant le sentiment qu'elle est excessivement formelle, qu'elle doit s'apprendre par cœur et non se comprendre ; (3) la chimie française doit une large partie du retard international qu'elle eut au début du XX^e siècle à l'influence de

personnalités telles que Marcelin Berthelot (1827-1907), qui usèrent de toute leur influence pour lutter contre les idées modernes d'atomes et de molécules, au sens où nous les entendons aujourd'hui.

Sur ces bases, notre prochaine réforme montrera aux élèves que le monde matériel se comprend mieux en termes microscopiques, moléculaires. Non seulement il est riche d'une foule de phénomènes insoupçonnés des enfants, mais encore les mécanismes de base éclairent les équations qui font partie de l'habituel catéchisme, tel alcool + acide = ester + eau. Au lieu d'admettre le résultat, l'élève comprend que cette réaction est celle qui doit avoir lieu... et qui a effectivement lieu. L'approche moléculaire permet à l'élève de comprendre.

Révoons, aussi : pourrait-on enfin s'affranchir des préjugés de Berthelot, et introduire l'idée de molécule dès l'école, sans attendre le second cycle ? L'équation de Schrödinger n'est pas nécessaire pour une première approche de la chimie : il sera bien temps, ensuite, que le collège, puis le lycée pour certains, puis l'université pour un nombre encore inférieur, aillent progressivement préciser l'idée que la science moderne se fait des molécules.

Pour les enfants, y aurait-il grand péril à penser les molécules en termes de billes dures en mouvement ? Et un abord plus précoce ne donnerait-il pas, précisément, plus de temps pour préciser les notions ? N'est-ce pas faire injure à des enseignants dévoués et intelligents que de leur refuser la possibilité de présenter aux enfants des objets que des médias évoquent à l'envie : enzymes gloutonnes, dioxine(s), hydrocarbures, CFC, dioxyde de carbone... L'école de Jules Ferry apprenait à compter et à lire ; celle de Luc Ferry ne pourrait-elle pas expliquer aux enfants dans quel monde (chimique) ils vivent ? Pour cela, commençons simplement par faire l'économie d'une réforme.

H. THIS est physico-chimiste à l'INRA.
B. DENOYER est professeur de physique-chimie au Lycée Lakanal. **G. BRAM** est professeur émérite à l'Université Paris-Sud.



Le trouble du pastis

HERVÉ THIS

L'alcool trouble les sens, l'eau trouble certaines essences, comme l'anéthole du pastis, ainsi que le mesurent les faisceaux de neutrons.

L'idée lui vint de faire les absinthes, et il commença de les mouiller, délicatement, goutte par goutte, élevant de temps en temps à la hauteur de ses yeux le verre où l'alcool, peu à peu, se colorait sous l'action de l'eau, décomposé en longues spirales nuageuses.

Courteline, *Le train de 8 heures* 47.

Ah, ce léger trouble qui survient quand l'eau ajoutée au pastis promet une désaltération proche ! Le pastis n'a pas l'apanage de cette opacification : se troublent aussi le sirop d'orgeat, ou encore l'absinthe, dont la couleur verte prenait naguère une teinte blanche... Pourquoi ce trouble ? Pourquoi ces changements de couleur ? À l'Institut Laue Langevin de Grenoble, Isabelle Grillo a utilisé un spectromètre de diffusion de neutrons aux petits angles pour répondre à ces questions dans le cas du pastis.

Le pastis du joueur de pétanque est principalement composé d'eau (55 pour cent en volume), d'alcool éthylique (45 pour cent en volume), d'anéthole (environ deux grammes par litre) et de divers composés qui contribuent au goût du breuvage. Contrairement à ce que son nom indique aux chimistes (les alcools ont une désinence en -ol), l'anéthole n'est pas un alcool, mais une molécule aromatique, déjà utilisée dans l'Antiquité pour ses vertus thérapeutiques ou pour parfumer les aliments et les produits de beauté.

L'anéthole est extrait des graines d'anis et de fenouil. C'est un liquide légèrement jaune, très odorant, soluble dans l'alcool éthylique et très peu dans l'eau : les molécules d'eau s'attirent fortement et ne se lient que faiblement avec les molécules d'anéthole ; aussi ne les retiennent-elles pas en leur sein et les molécules d'eau et les molécules d'anéthole constituent-elles des phases séparées. En revanche, les molécules d'alcool ont autant

d'attrance pour l'anéthole que pour leur congénère et les dissolvent en leur sein. Dans la bouteille de pastis, la concentration en anéthole est suffisante pour que l'influence solubilisatrice de ce corps soit prépondérante : l'anéthole reste dissous et le breuvage est transparent. Quand on ajoute de l'eau, l'alcool qui est soluble dans l'eau se lie à l'eau, formant une solution majoritairement aqueuse et l'anéthole, qui se trouve au sein de cette solution, s'en sépare, formant des gouttelettes, qui sont cause de nébulosité.

COULEUR DES ÉMULSIONS

Le lait, la crème, la sauce mayonnaise sont également des émulsions ; leur couleur est due à la réflexion de la lumière sur la surface des gouttes dispersées dans l'eau.

La lumière se réfléchit aussi à la surface des gouttes microscopiques d'anéthole ; de ce fait, l'œil voit de la lumière blanche (si la source est blanche) issue du breuvage. En outre, les gouttelettes d'anéthole, beaucoup plus petites que celles formées avec les corps gras et de la taille de la longueur d'onde de la lumière, diffusent la lumière. En effet, la lumière, qui est une propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique, excite les électrons du matériau qu'elle traverse ; ceux-ci rayonnent (diffusent) dans toutes les directions. Au total, le milieu est nébuleux, car la lumière n'est plus transmise, mais totalement diffusée

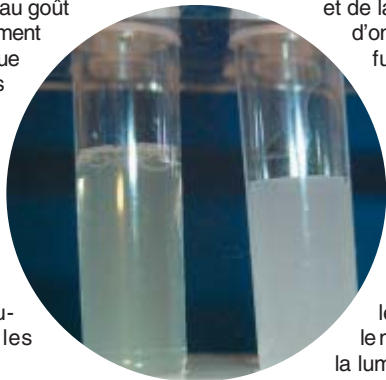
et on ne voit plus les objets derrière la solution. Sur la photographie ci-contre, le pastis est dilué cinq et dix fois : la nébulosité augmente avec la dilution.

Pour corroborer la théorie, il fallait mesurer la taille des gouttelettes. Pour les émulsions telles que la mayonnaise, où les gouttes sont grosses (de l'ordre du dixième de millimètre), les observations ne nécessitent qu'un microscope optique (les

grosses gouttes réfléchissent la lumière). Pour le pastis, en revanche, I. Grillo a dû utiliser des neutrons diffusés à de petits angles, afin de détecter les gouttelettes d'anéthole. La diffusion de neutrons aux petits angles est une technique puissante que les physico-chimistes utilisent pour observer la forme et l'organisation d'objets ayant des tailles comprises entre quelques nanomètres (ou milliardièmes de mètre) et quelques dix-millionnièmes de mètre. Lors des mesures, le comportement nébuleux du composé pur après l'ajout d'eau et d'alcool éthylique a été comparé à celui du pastis vendu dans le commerce. Comme il est recommandé par le fabricant de diluer le pastis par cinq fois son volume, cette dilution a été étudiée, et comparée à une dilution double.

La diffusion de neutrons a révélé que les gouttes d'anéthole ont un rayon proche d'un demi-micromètre, à la température ambiante et juste après la préparation de la boisson-échantillon. Le rayon d'une goutte ne dépend pas de la concentration en anéthole, mais celui du pastis modèle est un peu plus gros que celui du pastis réel. Avec le temps, c'est-à-dire après 12 heures pour l'expérience menée, les gouttes d'anéthole grossissent d'un tiers environ. Ces études ont testé également l'effet de la température sur la taille des gouttelettes d'anéthole : le diamètre double lorsque la température passe de 10 °C à 40 °C (mais qui aurait l'idée de se rafraîchir avec une boisson à cette température ?), ce qui corrobore l'idée selon laquelle une fusion de gouttelettes voisines (favorisée par l'agitation thermique) engendre des structures de plus en plus grosses.

Les tailles, toutefois, restent suffisamment petites pour diffuser la lumière, et c'est seulement une sédimentation qui viendra définitivement à bout de l'émulsion... mais le breuvage sera bu bien avant, puisque, à la température ambiante, il faut plus de deux jours pour que la boisson redevienne claire !



Rendez-vous de France Info et de Pour la Science, le 26 novembre, avec la chronique Info Sciences de M.-O. Monchicourt.

