

## UNE ÉPISTÉMOLOGIE DE L'ERREUR

Bien d'autres exemples d'erreurs commises par de grands mathématiciens peuvent être cités, si bien d'ailleurs que certains philosophes des mathématiques ont proposé l'idée que le développement mathématique se fait grâce aux erreurs commises puis corrigées. C'est en effet la thèse soutenue par le philosophe Imre Lakatos, disciple de Karl Popper, dont la position appelée parfois *faillibilisme* peut être résumée ainsi :

- l'erreur est une caractéristique essentielle de la connaissance mathématique qui, contrairement à ce que soutiennent les *infaillibilistes*, ne progresse pas par une simple accumulation continue de vérités ;
- les théories mathématiques sont empiriques, c'est-à-dire confrontées aux expériences que constituent contre-exemples et calculs ; comme les physiciens, les mathématiciens passent d'une théorie à une autre sans que jamais aucune ne puisse être considérée comme ultime.

Les principaux exemples sur lesquels Lakatos appuie sa thèse sont celui de la convergence uniforme et celui de la formule d'Euler qui lie les nombres associés à un polyèdre. Cette formule donna lieu à toute une série d'énoncés faux pendant plus d'un siècle (car utilisant des définitions inappropriées de la notion de polyèdre).

Cependant pour la grande majorité des mathématiciens, l'épistémologie faillibiliste n'est adaptée qu'à la description des périodes courtes de l'histoire des mathématiques où une théorie élabore ses concepts et ses méthodes de preuve. Cela s'est produit pour l'analyse et la topologie au XIX<sup>e</sup> siècle (d'où l'exemple de Cauchy et celui de la formule d'Euler), mais ne se produit plus aujourd'hui depuis la mise au point de la logique du calcul des prédicats et la formulation de cadres formels généraux qui sont aptes à la représentation de toutes les mathématiques.

Depuis l'invention du formalisme ensembliste au début du XX<sup>e</sup> siècle, les erreurs qu'on rencontre en mathématiques ne sont non plus dues à des théories fausses ou à des concepts en cours d'élaboration, mais de «vraies belles erreurs» dues à l'étourderie, la paresse de donner tous les détails, la complication d'une situation, l'insuffisance des contrôles.

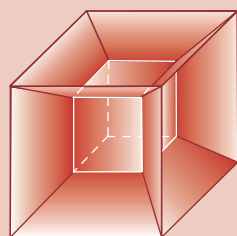
Non, les mathématiques ne sont pas comme la physique, soutiennent la majorité des mathématiciens et ce qui a été démontré avec soin il y a 100 ans ou 2 000 ans reste vrai et le restera. Le mathématicien John Conway précise : «Il est trompeur de considérer l'exemple de la formule d'Euler comme caractéristique du développement des mathématiques. La plu-

### 5. LA FORMULE D'EULER ET LA THÈSE FAILLIBILISTE

Imre Lakatos (1922-1974) s'est servi de l'exemple de la formule d'Euler pour expliquer sa conception faillibiliste des mathématiques : les mathématiques progressent par corrections d'erreurs. La formule d'Euler (énoncée en 1750) indique que pour tout polyèdre donné, si on désigne par S le nombre de sommets, A le nombre d'arêtes et F le nombre de faces alors :

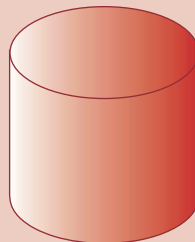
$$F - A + S = 2 \quad (\text{pour le cube on a } S = 8, A = 12, F = 6).$$

L'énoncé semble juste, pourtant des contre-exemples existent :

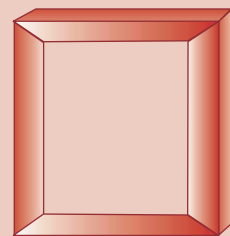


$$12 - 24 + 16 = 4$$

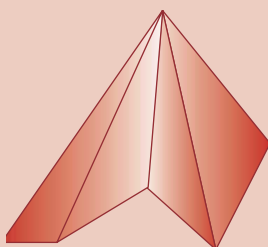
Faces - Arêtes + Sommets



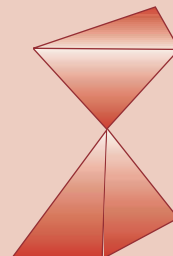
$$3 - 2 + 0 = 1$$



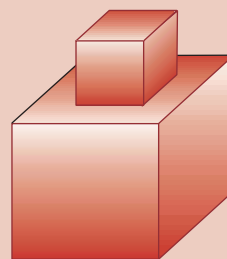
$$12 - 24 + 12 = 0$$



$$8 - 11 + 6 = 3$$



$$8 - 12 + 7 = 3$$



$$11 - 24 + 16 = 3$$

Comme Euler n'avait pas donné de définition précise de ce qu'il appelait polyèdre, les contre-exemples amènent à en rechercher une qui exclurait le contre-exemple. C'est seulement en 1895 que Poincaré proposera une définition convenable après que de nombreuses tentatives imparfaites amènent une succession d'énoncés faux, rectifiés par d'autres énoncés faux. Ces contre-exemples provoquant un processus d'ajustements successifs sont vus par Lakatos comme une caractéristique du développement mathématique. Ce point de vue n'est guère partagé aujourd'hui où on considère que seules les périodes de mise au point de nouveaux domaines (ici la topologie) sont sujettes à ce type d'hésitation.

part des résultats mathématiques une fois prouvés le restent définitivement. Si la preuve originale ne satisfait plus tout à fait les critères de rigueur adoptés ensuite, les adapter est en général facile. Bien souvent, il y a eu des omissions importantes ou des erreurs dans les premières tentatives de preuve de résultats importants, mais elles sont vite corrigées, et au total il existe très peu de cas analogues à la formule d'Euler.»

### ENSEMBLE TOUT S'ARRANGE !

Finalement, si l'on est étonné du nombre important d'erreurs commises par chaque mathématicien et par la gravité de certaines d'entre elles, jusqu'à présent, jamais un théorème faux et important n'est passé inaperçu longtemps ou n'a été utilisé comme base pour formuler et développer une théorie fautive qui aurait berné toute la communauté. Collectivement les mathématiciens ne semblent pas être faillibles.

L'image d'une science qui, en dehors de quelques périodes courtes, progresse continûment et sans remise en cause profonde est pour l'essentiel confirmée par l'examen des faits historiques. L'erreur est fréquente et gênante, mais aussi fructueuse et stimulante et en définitive toujours rapidement effacée.

**U. BOTTAZZINI, *Poincaré, philosophe et mathématicien*, Collection *Les génies de la science*, Pour la Science, 2000.**

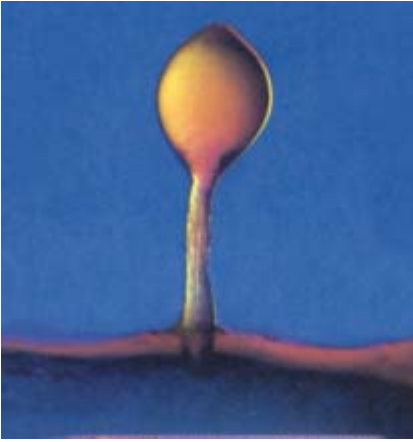
**T. C. HALES, *The Kepler Conjecture*. <http://www.math.lsa.umich.edu/~hales/countdown/>**

**J. HERBRAND, *Écrits logiques*, Presses Universitaires de France, Paris, 1968.**

**W.-Y. HSIANG, *A Rejoinder to Hales's Article*, in *Math. Intel.* 17, 35-42, 1995.**

**C. PÖPPE, *La conjecture de Kepler*, in *Pour la Science*, n° 259, mai 1999.**

**I. LAKATOS, *Preuves et réfutations*, Essai sur la logique de la découverte mathématique, Hermann, Paris, 1984.**



# Le fond et l'informe

IAN STEWART

**Les mathématiques modifient notre perception du monde animal, des micro-organismes aux tigres en passant par les poissons.**

Lors d'un colloque sur les mathématiques de la genèse des formes, et notamment lors d'une des conférences, un de mes animaux favoris me revint à la mémoire. Mon préféré est le tigre pour sa magnifique fourrure rayée, mais l'autre, s'il n'a pas l'élégance d'un félin, a pourtant une apparence remarquable : il s'agit d'une moisissure visqueuse de l'embranchement des acrasiomycètes, nommée *Dictyostelium discoideum*.

Ces organismes fascinent les biologistes, car ils sont à la frontière entre les animaux unicellulaires et pluricellulaires. Ils illustrent également une vérité que les nouveaux explorateurs du génome se doivent de garder en mémoire : ce ne

sont pas seulement les gènes qui importent, mais ce que l'on en fait.

Malgré son humble position dans l'arbre des espèces, *Dictyostelium discoideum* rivalise avec les animaux dits supérieurs par les belles structures spiralées qu'il crée (voir la figure 2). Dans quelle mesure ces formes sont-elles inscrites dans les gènes ? Y a-t-il un gène des spirales ? À l'inverse, doit-on voir dans ces formes le résultat de lois physiques et d'équations mathématiques ?

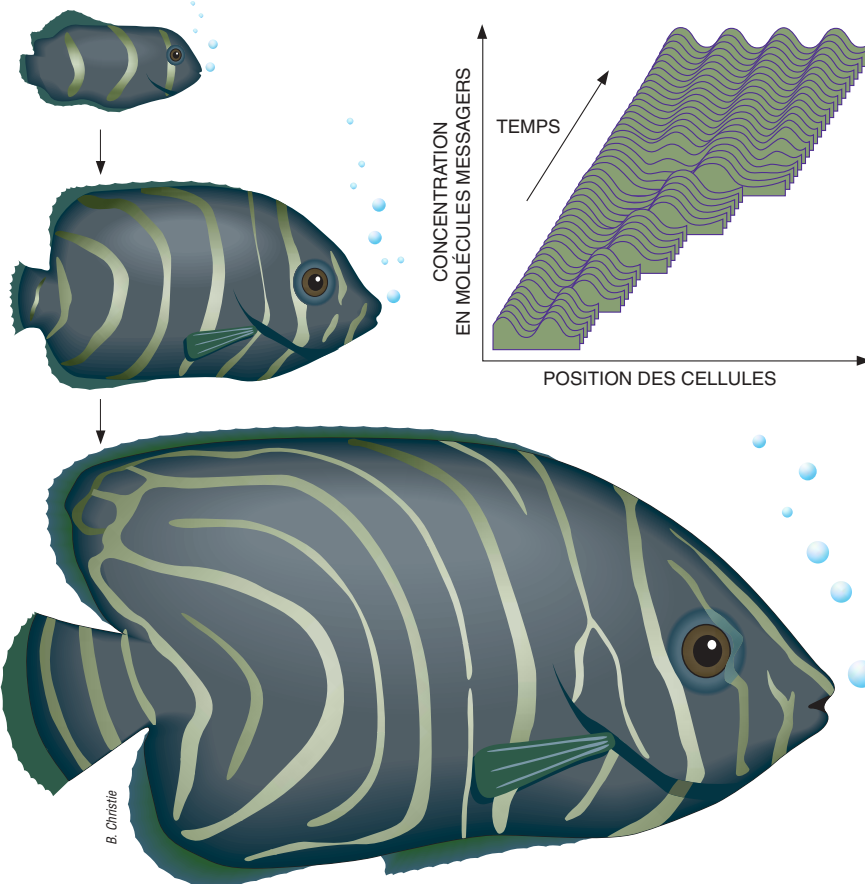
Afin de répondre à ces questions, examinons le cycle de vie de *Dictyostelium discoideum*. Ces organismes sont issus de spores transportées par le vent en un lieu propice, humide et riche en nour-

riture (principalement des bactéries et des levures qu'ils phagocytent). Les spores germent et donnent naissance à des cellules, semblables à des amibes, qui partent en quête de nourriture. Lorsque ces cellules sont suffisamment grosses, elles se reproduisent en se divisant en deux cellules identiques. Quand la nourriture abonde, elles aussi. Elles conservent un mode de vie autonome : elles ne se préoccupent pas de leurs voisines !

De même que certains artistes ne sont talentueux qu'en période de bohème, l'expression artistique de ces organismes apparaît lorsque la nourriture se raréfie. Dans ces conditions, les cellules sécrètent de l'adénosine monophosphate cyclique (une molécule messager). Attirées vers la source de cette molécule, les autres cellules sécrètent à leur tour de l'adénosine monophosphate cyclique : chaque cellule «clame» sa présence à ses voisines en émettant cette molécule. De ce mouvement de foule naît parfois une élégante spirale. La population devient de plus en plus dense, tandis que la spirale se resserre jusqu'à se transformer en une structure arborescente qui rappelle les racines ou les branches d'un arbre. Ces ramifications s'épaississent et les cellules s'agglutinent. L'ensemble s'entoure alors d'une gaine visqueuse et prend finalement la forme d'une «limace» (à ne pas confondre avec le gastéropode du même nom).

La «limace» est une colonie de cellules autonomes, cependant elle se déplace à la manière d'un organisme pluricellulaire unique. Parvenue dans une zone sèche, la colonie s'ancre solidement au sol, puis certaines des cellules «se sacrifient» et forment une longue tige à l'extrémité de laquelle les autres cellules s'agencent en une masse arrondie, nommée sporocarpe. Les cellules s'y transforment en spores qui, libérées à maturité et transportées par le vent, commencent un nouveau cycle.

Thomas Höfer, biophysicien à l'Université de Berlin, a découvert un système d'équations mathématiques dont les solutions reproduisent les formes spiralées et arborescentes de *Dictyostelium discoideum*. Par ailleurs, Cornelis Weijer, de



1. Le scalaire se pare de nouvelles rayures à mesure qu'il grandit. Dans une simulation sur un ordinateur, les pics des ondes représentent les rayures.

l'Université de Dundee, a montré que des équations très similaires modélisent les déplacements de la «limace». Les principaux paramètres qui déterminent la structure sont la densité de la population, la quantité d'adénosine monophosphate cyclique sécrétée et la sensibilité des organismes à cette molécule.

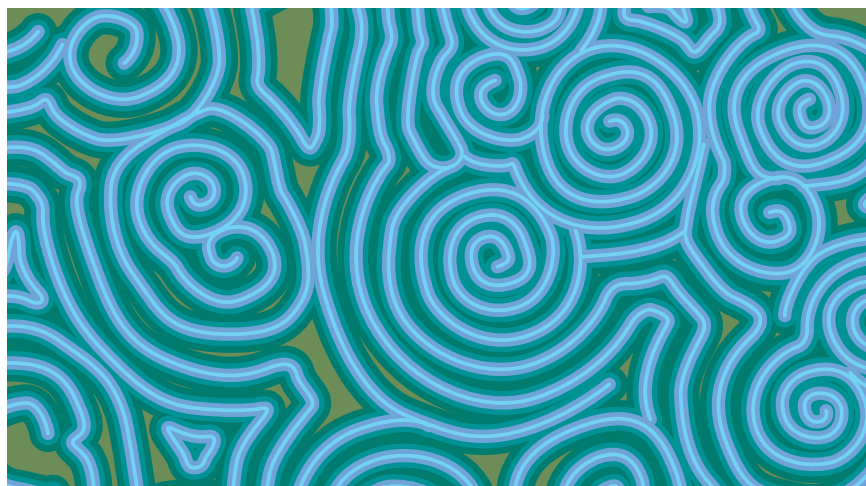
Ainsi, les gènes de *Dictyostelium discoideum*, à l'origine notamment de la synthèse de l'adénosine monophosphate cyclique et des récepteurs de cette molécule, sont responsables du comportement de chaque organisme, mais ne contiennent aucune instruction sur la forme spiralee de la colonie. Cette forme résulte des lois mathématiques auxquelles obéissent ces organismes. En d'autres termes, cette idée, chère à d'Arcy Thompson qui voyait dans la forme de nombreux organismes le résultat de lois physiques, signifie que les mathématiques définissent le cycle vital de *Dictyostelium discoideum* autant que la génétique.

Les équations qui mènent à cette conclusion importante, mais controversée, sont proches de celles établies il y a environ 50 ans par le mathématicien anglais Alan Turing, plus connu comme l'un des pères de l'informatique. Il s'intéressait aussi à la morphogenèse – la formation et la différenciation des tissus et des organes biologiques. En 1952, il a postulé que les structures ordonnées d'êtres vivants n'exigeaient pas de précurseur ordonné. Selon lui, ces structures naissent parfois de substances chimiques, dites morphogènes, qui régissent l'ensemble en diffusant dans les tissus.

Lorsque Turing publie pour la première fois ses idées, elles ne sont que théoriques. Cependant, elles sont bientôt étayées par un saisissant exemple : la réaction chimique de Belousov-Zhabotinsky, du nom de deux chimistes russes, où le simple mélange de quelques substances chimiques usuelles, tels le bromure de sodium, l'acide sulfurique et l'acide malonique, dans une boîte de pétri, fait apparaître des anneaux concentriques et des spirales semblables à celles de *Dictyostelium discoideum*. De telles réactions engendrent des rayures, des taches, des mouchetures et d'autres motifs fréquents dans le monde animal.

Les idées de Turing ont néanmoins été rejetées par les biologistes qui opposaient la dynamique des structures de la réaction de Belousov-Zhabotinsky et de toutes les autres structures de Turing découvertes par les chimistes à la fixité des motifs observés dans le monde animal : il n'y a pas de zèbres à rayures mobiles, ni de léopards à taches mouvantes !

Pourtant Turing a montré que ses équations ont également des solutions stationnaires, mais les chimistes n'en ont



2. Les cellules de la moisissure visqueuse *Dictyostelium discoideum* forment des spirales, comme sur cette vue d'artiste.

jamais obtenues, jusqu'à ce que l'on découvre pourquoi : quand les réactions sont effectuées dans un gel plutôt que dans un liquide, les motifs sont fixes. Or les organismes vivants sont plus proches de gels que de liquides. Toutefois, le temps que ce résultat soit acquis, les biologistes avaient cessé de s'intéresser à la question... mais pas les mathématiciens !

Bien que les équations de Turing soient trop simples pour décrire un phénomène biologique réel, elles engendrent les mêmes types de structures que celles observées chez les animaux. Des pigments déposés selon les pics (ou les creux) d'ondes parallèles forment des bandes (voir la figure 1). Des ondes plus complexes modélisent un réseau tacheté. Les mathématiciens ont ensuite étoffé le schéma de Turing et mis au point des modèles plus proches du monde vivant.

En 1995, Shigeru Kondo et Rihito Asai, de l'Université de Tokyo, ont découvert des

structures de Turing chez des poissons du genre scalaire (des poissons d'Amazonie, aplatis et rayés de jaune et noir). Ils ont observé la croissance de ces poissons et remarqué le réarrangement graduel de leurs rayures. Chez les mammifères, les motifs cutanés ne font que grandir avec l'animal. En revanche, chez les scalaires, à mesure que l'animal croît, de nouvelles rayures apparaissent par division des anciennes. Ces modifications sont décrites par des équations très proches de celles de Turing. Simulées sur un ordinateur, les interactions moléculaires d'un réseau unidimensionnel de cellules adoptent une structure ondulée bien adaptée au réarrangement des rayures des scalaires observés (voir la figure 1).

La lenteur du déplacement des rayures explique sans doute pourquoi on ne le remarque pas, néanmoins, pour paraphraser Galilée : «et pourtant, elles bougent !»

## Réactions

Dans l'article *Simple pavés* (voir *Pour la Science*, juin 2000), j'indiquais que personne n'avait encore proposé de classification de l'ensemble  $E$  des pavages qui, convenablement assemblés, forment des répliques d'eux-mêmes. Selon Aaron Meyerowitz, de l'Université de Floride, ce problème est certainement difficile au sens de la complexité algorithmique, c'est-à-dire qu'un ordinateur requiert énormément de temps pour traiter une solution.

Restreignons-nous aux polyominos, des polygones formés de carrés joints par leurs côtés. On sait que le problème du pavage d'un rectangle par un ensemble donné de polyominos est «insoluble» : tout algorithme utilisé pour le résoudre demanderait un temps rédhibitoire pour donner une réponse. Le pavage d'un rectangle avec une forme unique de polyominos est vraisemblablement de même ordre. De plus, nous savons qu'un polyomino qui peut paver un rectangle appartient à  $E$  : on peut toujours assembler ces rectangles (tant que le rapport de leur longueur sur leur largeur est un nombre rationnel) pour former un carré, puis réunir des copies de ce carré pour dupliquer le polyomino initial. Aussi, il semble intuitif que la classification des seuls polyominos de l'ensemble  $E$  soit une tâche impossible.



# La gravité à très courte distance

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-PHILIPPE UZAN

**La force de gravitation est bien connue à grande distance, mais reste un mystère en dessous du millimètre.**

**L**a gravitation est étudiée depuis longtemps, pourtant elle est mal connue. Sa faiblesse extrême la rend difficile à mesurer à petite échelle. Une revue rapide de la progression des idées sur cette interaction révèle tout l'intérêt des expériences entreprises aujourd'hui pour mieux comprendre cette force.

L'étude moderne de la gravitation commence avec Galilée au XVII<sup>e</sup> siècle. Le savant italien (1564-1642) étudie le premier la chute des corps en détail, et montre que le mouvement d'une bille sur un plan incliné s'accélère uniformément. Il remarque aussi que la résistance de l'air ralentit plus les corps légers que les corps lourds. Qu'en est-il dans le vide? Galilée se pose la question, et réalise de cette façon que l'accélération d'un corps en chute libre ne dépend ni de sa masse, ni de sa forme, ni de sa composition chimique. Un kilogramme de fer tombe aussi vite qu'un kilogramme de plume ou d'acide sulfurique... Toutefois, à l'époque de Galilée, la découverte est d'importance. En fait, elle traduit un principe physique essentiel toujours mal compris aujourd'hui : le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle, celle qui intervient dans le calcul du poids d'un corps, et la masse inertielle, celle qui quantifie la résistance d'un corps à une accélération, sont une seule et même grandeur.

Isaac Newton (1642-1727) est le premier à publier une véritable théorie de la gravitation en 1687. Il y énonce la «loi d'attraction universelle», selon laquelle l'intensité de la force que deux corps exercent l'un sur l'autre est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Newton fonde ainsi la théorie de la gravitation sur le principe d'équivalence et sur la loi d'attraction universelle. Deux lois qui, aujourd'hui encore, n'ont pas été vérifiées dans toutes les situations.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Albert Einstein généralise la théorie de la gravitation. Il fait du principe d'équivalence le fondement de la nouvelle théorie, la relativité

générale. La gravitation change de statut : elle est réinterprétée comme la conséquence de la géométrie de l'espace-temps, elle-même déterminée par son contenu matériel et énergétique. Ainsi la géométrie de l'espace n'est pas la même dans le voisinage d'une grande masse (étoile) et à distance de cette étoile. En relativité générale, la théorie de Newton correspond à un cas limite, celui où le champ de gravitation a une faible intensité, comme c'est le cas par exemple loin d'une étoile.

La gravitation a d'abord été testée grâce à l'observation des mouvements planétaires. Dans la nature, il n'y a que deux forces qui agissent sur de grandes distances : la gravitation et la force électrostatique. Dans la pratique, cette dernière n'a cependant qu'une portée limitée. Les charges électriques sont disposées de façon à créer des ensembles neutres, c'est-à-dire sans charge électrique. Le champ électrique produit par une charge est masqué dans la plupart des cas par celui d'une charge voisine, de signe opposé. Puisqu'il n'existe pas de masses négatives, il en va tout autrement avec la gravité. Cette force n'est jamais répulsive, et pour cette raison, domine toutes les autres à grande distance, où elle est la seule qui subsiste : c'est pourquoi elle a été établie, puis vérifiée aux grandes échelles.

En fait, Newton avait formulé la loi d'attraction universelle afin d'expliquer les lois du mouvement des corps célestes. Trois lois que l'astronome Johannes Kepler avait établies au début du XVII<sup>e</sup> siècle grâce aux observations de l'astronome danois Tycho Brahe. Toutefois, le triomphe de la théorie newtonienne ne fut vraiment assuré que le jour où la loi d'attraction universelle expliqua aussi des phénomènes plus compliqués. Le calcul du passage au périhélie de la comète de Halley par Alexis Clairaut en 1759 en fut un ; il démontra toute la puissance de la théorie newtonienne, laquelle fut ultérieurement confirmée par d'autres

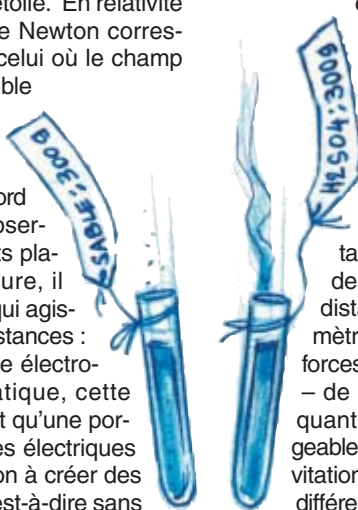
succès. Urbain le Verrier (1811-1877) prédit par exemple l'existence de Neptune, avant que la planète ne fut découverte en 1846. Plus récemment, l'étude par télémétrie laser de l'orbite lunaire (mesure du temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre la Terre et la Lune) raffina notre connaissance de la trajectoire du satellite de la Terre, au point que sa position est aujourd'hui connue à un centimètre près!

Ainsi, la loi de Newton est vérifiée dans toutes les interactions gravitationnelles à grandes distances. Que se passe-t-il lors des interactions à très courtes distances, inférieures au millimètre. À cette échelle, d'autres forces courantes dans la matière – de nature électrostatique ou quantique – ne sont plus négligeables vis-à-vis des forces de gravitation. Il devient alors difficile de différencier les rôles joués par chacune de ces forces. C'est Henri

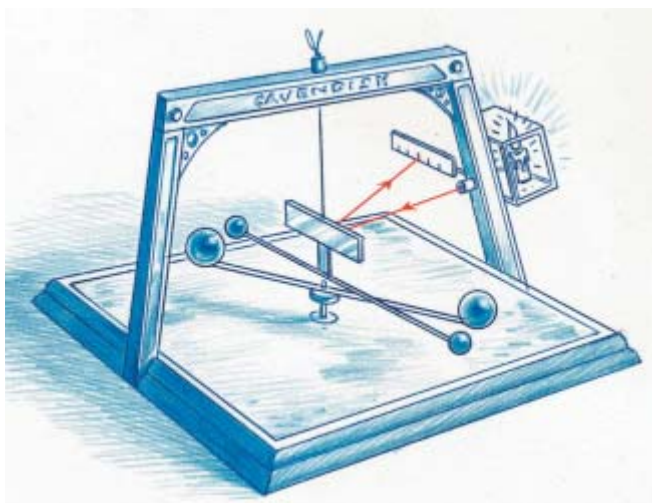
Cavendish (1731-1810), qui fit la première tentative pour mesurer la gravitation à petite échelle. Il publia en 1798 les résultats de son expérience de «pesée du monde».

Le montage confirmait la validité de la loi d'attraction universelle et livrait la première estimation expérimentale fine de la constante de gravitation universelle  $G$ , c'est-à-dire du coefficient qui intervient dans la loi d'attraction universelle. Cavendish

**Galilée (en haut) fut le premier à réaliser que la façon dont un corps chute ne dépend pas de sa composition chimique. Newton (ci-contre) conçut la première théorie de la gravitation.**



Dessins de Bruno Vacaro



**1. Cette machine, inventée il y a 200 ans par Cavendish, livra la première estimation expérimentale de la constante de gravitation universelle : les sphères, suspendues à un pendule de torsion sont attirées par des boules placées à proximité. L'attraction entre les masses s'oppose à la torsion du fil. Le pendule oscille et la mesure de sa période d'oscillation conduit à la constante de gravitation.**

utilisait un pendule de torsion à l'extrémité duquel sont accrochées deux petites sphères pesantes (voir la figure 1). Lorsque deux boules massives identiques sont placées à proximité de chacune des deux sphères, celles-ci sont attirées et le pendule tourne. Le système est conçu de telle façon que l'attraction gravitationnelle entre les grandes et les petites sphères s'oppose à la torsion du fil. L'attraction des masses fait tourner le pendule d'un très petit angle, et influe sur sa période d'oscillation ; la mesure de la période conduit notamment à  $G$ . Pour comprendre quelle virtuosité expérimentale Cavendish déploya, il faut réaliser que, dans ce montage, la force d'attraction entre les corps est 500 millions de fois plus petite que leur poids !

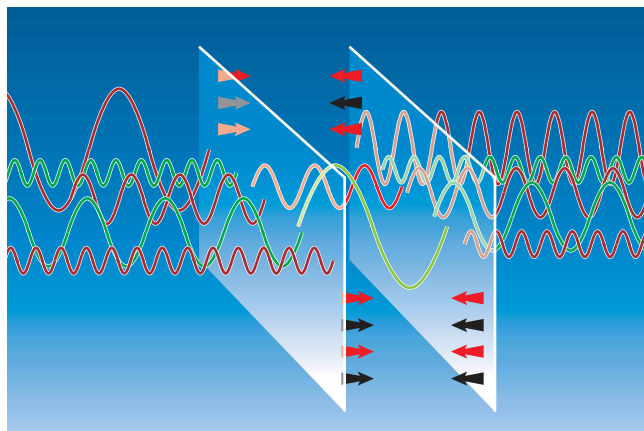
## VAN DER WAALS ET CASIMIR

Aller plus loin était difficile. Un problème est la nature cumulative de la gravité à petite échelle. Ainsi, quand un corps interagit par la gravitation avec un autre, chacune de ses particules est concernée ; leur position dans l'espace joue un rôle essentiel dans la force d'attraction résultante. Une difficulté que le cas de deux sphères quasi tangentes illustre bien. Proportionnelle au produit de leurs masses (et donc à  $R^3$  au carré, soit  $R^6$ ) divisé par le carré de leurs distances ( $R^2$ ), leur attraction gravitationnelle varie selon la puissance quatrième de leur rayon ( $R^4$ ). Cette dépendance implique que l'attraction gravitationnelle entre deux sphères est très petite à courte distance. Pour pallier cette difficulté, on choisit des dispositifs, où la plupart des particules des deux corps sont à la même distance, par exemple en utilisant des plaques parallèles. Malheureusement, une autre difficulté gêne l'étude de la gravitation entre

deux plaques : deux forces s'ajoutent à l'attraction gravitationnelle. La première, la force de Van der Waals, est une force intermoléculaire d'origine électrostatique, qui apparaît entre particules proches. La seconde, la force de Casimir, est d'origine quantique.

Le physicien théoricien Hendrick Casimir montra en 1948 que les fluctuations quantiques du vide électromagnétique engendrent une force à courte portée entre deux plaques conductrices (voir la figure 2). Quelle pourrait en être la cause ? Représentons-nous le vide comme une mer agitée de clapot : des vaguelettes apparaissent à la surface, au hasard, semble-t-il, mais toujours de sorte que le niveau moyen de la mer reste le même. Ces fluctuations du vide correspondent à la superposition d'oscillateurs (photons, paires particules-antiparticules...) de toutes longueurs d'onde. Comme le clapot à la surface de la mer, ces fluctuations apparaissent et disparaissent sans cesse, et assurent au vide un niveau d'énergie constant.

Que se passe-t-il lorsque l'on plonge dans ce vide agité deux plaques infinies, parfaitement conductrices et parallèles ? Dans l'intervalle qu'elles délimitent, seuls les oscillateurs dont la longueur d'onde est un sous-multiple de la distance séparant les plaques, peuvent exister. On peut les comparer à des cordes de guitare fixées aux deux extrémités, et qui ne vibrent qu'avec des fréquences bien précises. La «pression de rayonnement» engendrée par les fluctuations électromagnétiques est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur des plaques. Ainsi, une force d'attraction à courte portée règne entre les plaques : à température ambiante, elle varie comme l'inverse du cube de la distance entre plaques. Le calcul montre que pour des plaques carrées en cuivre d'un millimètre d'épaisseur, à



**2. Entre deux plaques proches s'exercent les forces de Van der Waals, l'attraction gravitationnelle et la force de Casimir due aux fluctuations quantiques du vide. Entre les deux plaques, seules les longueurs d'onde égales à la distance des plaques ou à des sous-multiples de cette distance sont tolérées. La pression de radiation créée par les ondes extérieures aux plaques tend à les rapprocher.**

300 kelvins, et éloignées d'un micromètre, la somme des forces de Van der Waals et de Casimir est égale à la force d'attraction gravitationnelle. Longtemps, l'absence de mesures fiables de la force de Casimir a empêché l'étude de la gravitation à petite échelle. Ce n'est plus le cas depuis qu'en 1997, le physicien américain Steven Lamoreaux mesura la force de Casimir avec précision.

Le principe d'équivalence devait être aussi testé. Les succès des théories qui se fondent sur lui constituent, certes, une sorte de vérification *a posteriori*. Le baron Roland von Eötvös fut le premier à vouloir aller plus loin en 1886. À l'aide d'une version modifiée du dispositif de Cavendish, il montra que l'écart relatif entre masse gravitationnelle et masse inertielle est inférieur à un milliardième. Cette expérience fut reprise et améliorée par Robert Dicke en 1966 et par Vladimir Braginsky en 1972 ; ils en augmentèrent notablement la précision. La future expérience spatiale STEP (*Satellite Test of the Equivalence Principle*) devrait atteindre la précision fabuleuse d'un centième de milliardième de milliardième ( $10^{-17}$ ) !

Ainsi l'extrême difficulté de réaliser des expériences à très petites distances explique pourquoi la gravité est si mal testée en deçà du millimètre. Y varie-t-elle par rapport à la loi de Newton ? Le vérifier serait précieux : un écart serait un indice de nouvelles structures de l'espace.

**Roland LEHOUCQ est astrophysicien au service d'astrophysique du CEA. Jean-Philippe UZAN, chargé de recherche au CNRS, travaille au laboratoire de physique théorique de l'Université d'Orsay.**

**Les enfants d'Einstein, Clifford Will, 1988. Y.T. CHEN et A. COOK, *Gravitational Experiments in the Laboratory*, Cambridge University Press, 1993.**

# Paléontologie

## Dinosaures. Enquête sur une disparition

Eric Buffetaut, Éditions Phare, 2000  
(128 pages, 58 francs).

**L**es dinosaures réconcilieront-ils Charles Darwin, le père de l'Évolution, et Georges Cuvier, l'apôtre des « révolutions du Globe » ? On oppose souvent le fixisme rétrograde de Cuvier, qui évoquait des créations successives d'organismes suivant de grandes catastrophes, à l'évolutionnisme de Darwin. Aujourd'hui, et depuis longtemps déjà, l'évolutionnisme est universellement accepté par le monde scientifique (seules quelques sectes « créationnistes » s'y opposent encore) : on admet que le monde vivant que nous connaissons aujourd'hui résulte de l'évolution des espèces depuis 3 500 millions d'années, et on pense que cette lente évolution découle de la sélection de caractères qui favorisent l'adaptation des êtres vivants à leur milieu. La spéciation, c'est-à-dire l'évolution de nouvelles espèces, est donc un phénomène relativement lent, tout comme la plupart des phénomènes géologiques (sédimentation, dérive des continents, etc.). C'est l'action de ces phénomènes durant de très longues durées géologiques qui provoque des modifications considérables.

Ce gradualisme des phénomènes géologiques et biologiques, mis en évidence au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, relégua aux oubliettes le catastrophisme de Cuvier et de quelques uns de ses successeurs. C'est dans ce contexte qu'ont longtemps été appréhendés les phénomènes d'extinction de masse de l'histoire de la vie.

Toutefois les nombreuses hypothèses échafaudées depuis des décennies pour expliquer la disparition des dinosaures

ont la plupart du temps un défaut majeur : elles n'expliquent que la disparition des dinosaures. Or ces animaux, qui ont constitué environ 95 pour cent des animaux terrestres (au sens de « vivant sur les terres émergées ») moyens et grands pendant 100 millions d'années, n'ont pas disparu tout seuls. Ne peuvent être testées raisonnablement que les hypothèses qui expliquent aussi les innombrables disparitions d'animaux terrestres et marins il y a 65 millions d'années. L'étude scientifique de cette question a réellement commencé en 1980, lors de la découverte, par une équipe américaine, d'une couche géologique enrichie en iridium, élément abondant dans les météorites.

La découverte d'anomalies d'origine cosmique exactement à la limite Crétacé-Tertiaire, dans le monde entier, puis la découverte d'un énorme cratère d'impact dans la péninsule du Yucatan sont des indications de l'écrasement sur la Terre d'un astéroïde dont le diamètre devait être voisin d'une dizaine de kilomètres, il y a 65 millions d'années. Aussi suppose-t-on que cet impact aurait perturbé l'atmosphère au point de bloquer temporairement la photosynthèse ; le bouleversement des chaînes alimentaires qui en aurait découlé aurait eu des répercussions en chaîne avec, notamment, les disparitions sélectives de la fin du Mésozoïque.

Comment tester l'hypothèse ? Les lacunes de l'enregistrement fossile ne donnent pas une résolution chronologique de l'ordre de l'année ni de la décennie, mais de seulement quelques dizaines de milliers d'années en milieu marin, de quelques centaines de milliers d'années (au mieux) en milieu continental. On ne peut donc affirmer avec certitude que les extinctions de la limite Crétacé-Tertiaire se sont réellement produites en un an plutôt qu'en 100 000 ans, ou en un million d'années. En revanche, on sait qu'elles s'achèvent avec la chute de la météorite. Cet impact a-t-il porté un « coup de grâce » à des écosystèmes affaiblis par d'autres phénomènes, telles de grandes éruptions volcaniques ? Ou bien les extinctions antérieures à la limite Crétacé-Tertiaire ne sont-elles que des phénomènes apparents, dus à la mauvaise qualité de l'enregistrement fossile ?

Les récentes approches statistiques montrent que l'enregistrement fossile ne permet pas de réfuter l'hypothèse météoritique, et de nouvelles études de terrain s'imposent. Une autre voie de recherche est le perfectionnement du scénario de ces extinctions et, notamment, l'étude de la biologie des animaux survivants (amphibiens, crocodiles, etc.) : on donne ainsi des limites biologiques raisonnables au scénario météo-

ritique. Non, la surface de la Terre n'a pas été transformée en four à micro-ondes pendant quelques heures, comme cela a parfois été écrit...

On le voit, cette histoire n'est pas terminée. « Reconstituer dans ses détails une crise écologique qui s'est produite il y a 65 millions d'années est une entreprise passionnante, mais qui n'a rien d'aisé », note justement Eric Buffetaut dans son nouveau livre. Ces avancées considérables dans notre connaissance de la limite Crétacé-Tertiaire ont néanmoins suscité une prise de conscience de l'importance des épisodes d'extinctions de masse dans l'histoire de la vie. Cette dernière s'est construite lentement, selon les processus évolutifs décrits par Darwin, mais elle a aussi été le théâtre des événements violents postulés par Cuvier.

En mêlant l'histoire des sciences et les plus récentes connaissances acquises sur la fin de l'ère secondaire par des disciplines aussi variées que la géochimie, la planétologie ou la paléontologie, E. Buffetaut, l'un des rares acteurs français de cette aventure scientifique, présente sans fard l'état des lieux d'un problème enfin en cours de résolution. La disparition des dinosaures n'est plus un poétique mystère aux explications pittoresques, mais une question traitée scientifiquement, dont le mécanisme bouscule certaines de nos certitudes biologiques.

Tous ceux qui s'intéressent à la façon dont la science se construit liront avec profit cette enquête passionnante, qui relate une des plus importantes avancées scientifiques de cette fin de millénaire.

Jean LE LÉUEFF

## Biochimie

### Le grain de blé, composition et utilisation

Pierre Feillet. INRA Éditions, 2000  
(312 pages, 330 francs).

**L**es enfants des écoles comprendraient le miracle du pain s'ils en faisaient, et ils seraient mis sur la voie de son « intelligence » s'ils répétaient l'expérience faite en 1745 par Jacopo Beccari : après avoir malaxé de la farine de blé avec un peu d'eau, il passa le pâton obtenu sous un petit filet d'eau ; une poudre blanche s'écoula avec l'eau – c'est l'amidon – et une masse élastique lui resta dans les doigts, c'est le gluten.



Peter Trusler

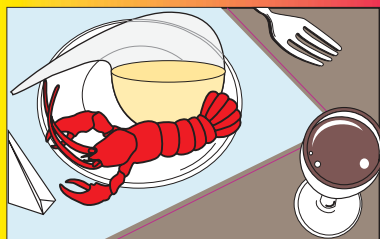
Dinosaures du Crétacé inférieur.

# FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent  
à écouter la chronique  
de Marie-Odile Monchicourt :

## Info Sciences

Tous les jours  
sur **France Info**  
à 15 heures 41,  
17 heures 10,  
20 heures 12,  
22 heures 12,  
et 23 heures 42



Les prochains  
résultats présentés  
dans la rubrique  
Science et Gastronomie  
seront annoncés sur  
**France Info**  
le 27 février 2001.



L'opération est éclairante : c'est la graine à partir de laquelle toute la physico-chimie du pain a poussé. Elle est rudimentaire, mais Joseph-Louis Gay-Lussac, qui la cite dans son *Cours de chimie*, admettait son principe – la séparation de fractions – qui est celui de toute l'analyse chimique.

La science des aliments a considérablement progressé, depuis Beccari. Par exemple, après avoir séparé les diverses protéines en les extrayant successivement à l'eau, à l'eau salée ou à l'alcool, les biochimistes qui avaient ainsi distingué les albumines, les globulines, les gliadines et les gluténines ont utilisé des techniques d'analyse moderne (chromatographie, électrophorèse...) pour distinguer, dans chaque fraction, des types de molécules variés. Et le travail qui a été fait pour les protéines a naturellement son pendant dans le cas des polysaccharides, des lipides, et des constituants minéraux.

Toutefois, la farine et le pain ne se réduisent pas aux tables de composition chimique, même affinées. Pour comprendre le pain, il fallait simultanément explorer la structure du grain de blé, des farines et des sons, et identifier les interactions des divers constituants moléculaires.

Ce travail est loin d'être achevé, parce que les constituants sont nombreux, et P. Feillet écrit même que « L'analyse des constituants des farines et des pâtes, aussi élaborées que soient les méthodes utilisées, ne permet pas de prédire de manière satisfaisante les propriétés physiques de celles-ci ».

Pourquoi tant de pessimisme, alors que, du grain de blé naît aujourd'hui un livre passionnant, qui mêle la technique, la chimie, la physique, la biologie, la génétique ? Après avoir examiné la morphologie du grain, l'auteur considère les farines, qu'il classe et qu'il décrit du point de vue chimique, examinant au passage les procédés de transformation ou de stockage. Puis il révèle l'intimité chimique du grain : ce dernier étant essentiellement composé de protéines et d'amidon, l'auteur examine d'abord les divers types de protéines présentes, puis il explore l'amidon, les pentosanes et les lipides.

Il revient ensuite à des protéines, actives cette fois, avec les enzymes, et passe de la farine à la pâte et de la pâte au pain, en examinant successivement les étapes de pétrissage, de fermentation, de façonnage et de cuisson. Les dernières parties du livre examinent les biscuits, les pâtes alimentaires (pourquoi l'auteur donne-t-il, à propos de l'intérêt de l'huile dans l'eau de cuisson, une indication contraire à celle qu'ont publiée d'autres membres de son laboratoire ?)

et autres produits dérivés du blé, les produits utilisés comme régulateurs des farines et agents de levée des pâtes. Enfin P. Feillet conclut en présentant les méthodes d'appréciation de la qualité, la valeur nutritionnelle des produits à base de blé et les problèmes économiques de la filière blé.

Un tel livre est un tour de force : le monde du blé est si vaste, et les connaissances à son sujet si nombreuses, que l'on admire l'agencement des parties ; le point de vue retenu conduit à mêler harmonieusement des connaissances amassées par les boulangers, les agronomes, les technologues, les biochimistes ou les biophysiciens qui, depuis des décennies, voire des siècles, se préoccupent de ce matériau qui fait vivre l'humanité.

Doit-on admirer le livre sans réserve ? Le gastronome Jean-Anthelme Brillat-Savarin évoquait « l'âme humaine, cause toujours active de perfectibilité » : cherchons comment le livre pourrait être perfectionné. Remarquons, tout d'abord, qu'il ne sera pas abordable par les boulangers, et que les physico-chimistes ou les biologistes manqueront de références exactes (chaque chapitre s'achève sur une vingtaine de références seulement, ce qui est peu, vu l'étendue considérable des matières traitées). Autrement dit, le livre est trop lourd pour être une initiation et trop léger pour être un ouvrage de référence. À qui s'adresse-t-il ? À des étudiants ? Pourquoi pas. À des industriels ? Peut-être, mais lesquels ?

Le livre a aussi son lot d'étrangetés qui pourraient être corrigées. Parfois, des amphibologies gênent la lecture, et quelques abstractions sont inutiles (« si l'on élève la température (apport de thermies) ») ; parfois la langue est un peu lourde. Et par endroits, le texte comporte des « coquilles » chimiques (l'auteur mentionne de l'eau qui serait liée de façon « covalente ») ou physiques (contrairement à ce qu'écrit l'auteur, une transition de phase, même du second ordre, n'est pas une dérivée d'ordre 1 de l'enthalpie par rapport à la température ; c'est un phénomène). Enfin, dans certaines parties, les hypothèses sur les mécanismes moléculaires sont si nombreuses qu'on perd un peu le fil.

Ne nous appesantissons pas mesquinement sur ces imperfections et admirons la quantité enthousiasmante de connaissances ici regroupées. Elle sont le fruit d'un double travail : celui des agriculteurs, qui ont progressivement domestiqué le blé que nous utilisons aujourd'hui, et celui des femmes et des hommes de science, qui ont patiemment exploré les détails moléculaires du monde que les agriculteurs leur forgeaient.

Hervé THIS

## **OGM, le vrai débat**

Gilles-Éric Séralini.  
Éditions Flammarion, 2000  
(128 pages, 41 francs).

**G**illes-Éric Séralini est biologiste moléculaire. C'est en spécialiste qu'il fait, dans une première partie de cet ouvrage, une présentation claire et accessible du code génétique et de la démarche scientifique qui a conduit au transfert volontaire de gènes et à la fabrication d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

S'il reconnaît l'intérêt des applications de la transgénèse, notamment dans le domaine médical qui est le sien,

l'auteur ne trouve aucune vertu aux premières variétés transgéniques de plantes déjà cultivées (essentiellement en Amérique du Nord), qu'il qualifie de «brouillons génétiques». Beaucoup des remarques pertinentes émises à ce sujet font l'objet d'études qui doivent être poursuivies, mais les arguments systématiquement négatifs de l'auteur ne prennent pas en compte les connaissances et l'expérience des biologistes-agronomes, habitués à replacer une telle innovation dans le contexte agronomique, comme l'illustrent quelques exemples.

Peut-on considérer, comme indiqué dans le préambule du livre, que l'intégration volontaire de quelques gènes supplémentaires dans une plante cultivée conduit à une nouvelle «sous-espèce» végétale? Non, car les plantes modifiées obtenues (OGM) demeurent interfertiles avec l'espèce d'origine (ce qui est considéré par certains comme

un inconvénient). De surcroît, de nombreuses variétés classiques correspondent à des mutations (naturelles ou provoquées par traitement mutagène); ces plantes mutantes ne sont pas considérées comme des «sous-espèces», bien qu'elles aient subi des modifications incontrôlées et aléatoires de leur génome.

Les biologistes effectuent des «transformations» génétiques des plantes cultivées, notamment parce qu'ils veulent obtenir des végétaux plus rustiques, par intégration d'un gène provenant d'autres organismes. C'est ainsi, par exemple, que l'on a utilisé un gène d'origine bactérienne (Bt) pour rendre des variétés transgéniques (maïs, cotonnier, pomme de terre) résistantes à un insecte parasite. L'auteur tente de développer, à ce sujet, l'image de «plantes à pesticides», mais cette idée n'a pas de sens biologique : les parasites des plantes (insectes, micro-

# POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06  
Tél : 01-55-42-84-05  
www.pourlascience.com  
Commande de dossiers ou de magazines :  
01-55-42-84-05

**POUR LA SCIENCE** Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Emmanuel Leclerc, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Nathalie Choplain. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Paul Decaix, André Delacourte, Daniel Desbruyères, Jean-Paul Foucher, Élodie Hardouin, Marie-Thérèse Landousy, Michel Le Bellac, Valérie Martin-Rolland, Jean-Michel Mazin, Alexis Michel, Thierry Montmerle, Christophe Pichon, Philippe Poulin, Jean-Pierre Reverseau, Marc Sauvage, Daniel Tacquenot, Brigitte Vigolo.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Griesebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

## PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté d'Irène Limon  
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06  
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97  
Télécopieur : 01 43 25 18 29

**Étranger** : 415 Madison Avenue, New York.  
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

## SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

## SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

## DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

### POUR LA SCIENCE

**Canada** : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

**Suisse** : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

**Belgique** : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oides - 1130 Bruxelles.

**Autres pays** : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

**Toutes demandes d'autorisation de reproduire**, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

## © Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

organismes) sont sélectifs. Ainsi, les larves de pyrale attaquent le maïs (et quelques autres plantes cultivées comme le houblon), mais elles n'attaquent ni la pomme de terre ni le chou, par exemple. Par manque d'appétence ? En raison d'un effet répulsif ? D'un effet toxique ? Au cas où cette dernière hypothèse se vérifierait, devrions-nous conclure que la pomme de terre et le chou sont des plantes à pesticides ? La démonstration est du même type pour les variétés cultivées classiques qui résistent à un herbicide sélectif. Par exemple, le blé produit naturellement une enzyme (nitrilase) qui inactive certaines molécules herbicides (oxinyls) et le rend insensible à l'herbicide, qui détruira beaucoup d'autres plantes adventices concurrentes ; le blé n'est pas devenu pour autant une plante à pesticides.

G.-É. Séralini conteste la démarche de résistance à un parasite par l'introduction d'un seul gène dans une plante. Il considère que le parasite, dont le temps de génération est plus court que celui de la plante, aura l'avantage de muter pour surmonter ce mécanisme simple de résistance. Toutefois les généticiens savent que la réalité est plus complexe... sinon leurs travaux depuis un demi-siècle, dans ce domaine, n'auraient pas eu de sens. Les sources naturelles de résistance transmissibles par croisement n'étant pas nombreuses, ils adaptent des stratégies de lutte. Lorsqu'ils étudient les plantes à cycle de reproduction long (arbres fruitiers), ils cherchent plutôt des formes complexes de résistance : elles sont plus durables, mais généralement d'une efficacité relative. Lorsqu'ils veulent protéger des plantes à cycle de reproduction court (maïs, tomate...), ils explorent des formes de résistance qui mettent en jeu un ou quelques gènes, si la protection est efficace, même si elle ne doit durer que quelques années. La transgénèse permet d'aborder les deux stratégies en élargissant considérablement les sources de résistance au-delà de l'espèce cultivée.

La troisième partie du livre examine les réglementations des OGM. Le monde de la recherche et la société en général demandent que les études et utilisations des OGM soient réglementées. La demande initiale est d'ailleurs venue des biologistes, dès les premières réussites de transferts de gènes (Congrès d'Asilomar, en 1975). L'auteur décrit positivement les instances françaises responsables du contrôle : la Commission du génie génétique, qui traite des applications

en milieu fermé, la Commission du génie biologique (milieu ouvert), l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (contrôle alimentaire), le Comité de biovigilance (contrôle en culture). Les éventuels effets indésirables de l'intégration d'une construction génétique nouvelle dans un génome complexe le conduisent à réclamer des tests préalables nouveaux, dont il ne fixe pas les limites d'exigence et pour lesquels nous manquons de méthodes éprouvées.

Les qualités (ou défauts) alimentaires des variétés classiques actuellement cultivées ne font pas l'objet (sauf quelques exceptions) d'analyses systématique «d'alimentarité» avant leur mise sur le marché, même lorsque ces variétés résultent de croisements interspécifiques avec des espèces botaniques proches des espèces cultivées (exploitation de la diversité des ressources génétiques). Le chantier dépasse les OGM ; il est ouvert, mais il conviendrait de planifier les objectifs de façon réaliste.

Pour terminer, l'auteur soulève deux questions importantes trop souvent négligées. Il se préoccupe, à juste titre, des éventuelles applications militaires de la transgénèse, champ explicitement écarté de la réglementation française. Il conviendrait, en effet, que la société soit informée des possibles menaces et que des instances soient chargées de contrôle, afin que «bioterrorisme» et «biodéfense» restent des scénarios de films. Pour les recherches et l'expertise scientifique, il propose que les chercheurs s'engagent sous une sorte de serment d'Hippocrate, sans toutefois rappeler que Michel Serres a déjà proposé concrètement un tel serment, qui apporterait une garantie éthique supplémentaire.

Vrai débat ? Ou plutôt état des lieux pour une contribution au débat, l'ouvrage est d'une lecture facile. Les lecteurs qui sont *a priori* opposés à la culture de plantes transgéniques trouveront un argumentaire solide pour étayer leur position. En revanche, ceux qui veulent construire leur opinion devront, avant de se prononcer, chercher d'autres lectures pour compléter l'argumentaire.

Jean-Pierre PRUNIER

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de **Pour la Science** est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>