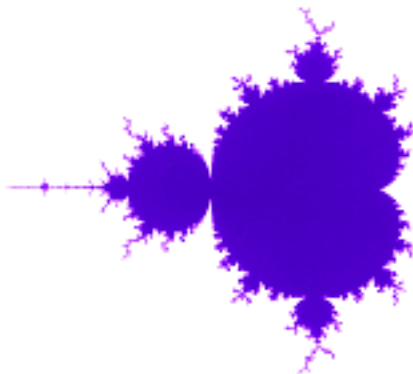




2. L'ensemble de Mandelbrot.

Toutefois il ne s'ensuit nullement que je sois d'accord avec Rouault. Si l'art qu'il pratiquait ne pouvait être quantitatif, il n'est pas exclu que puisse émerger un art quantitatif, algorithmique, qui serait profondément différent du sien. Déjà, on trouve de la beauté aux montagnes et nuages fractals les plus classiques, faits dans un dessein simplement utilitaire, et aux vues, quelque austères qu'on les fasse, de l'ensemble de Mandelbrot. Mais qu'on relève la formule avec un piment de fantaisie, ou même de hasard, et l'on voit surgir toutes sortes d'effets fantastiques, marques de styles bien définis et qu'on aurait cru être nécessairement le fruit de la créativité artistique. Du point de vue de l'artiste, il n'y a là aucune trace de créativité artistique. Mais les émotions de l'amateur d'art ne s'accordent pas nécessairement avec celles de l'artiste. La discussion n'est pas près d'être close.

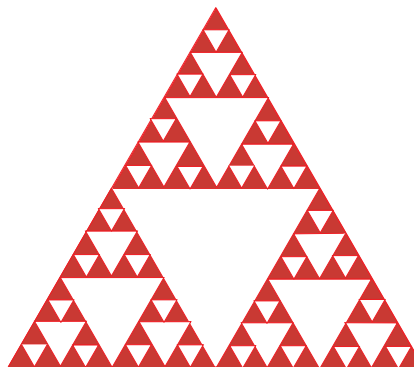
LE RUGUEUX

Il était inattendu que le même enfant, qui résistait aux parties les plus anciennes et les plus simples des mathématiques, puisse s'enflammer pour des objets géométriques d'une extraordinaire complexité.

Autrefois, on enseignait les mathématiques dans l'ordre où elles avaient été découvertes (puis l'ordre fut inversé, commençant par celles d'aujourd'hui, mais passons). Des maîtres excellents nous signalaient des faits que l'œil comprenait sans peine et déclarait évidents ; ils peinaient pour nous faire accepter que ces évidences restaient à démontrer, mais l'apprentissage fut lent, et gêné par mille exemples d'erreurs de démonstration «impunies,» que nous voyions même dans le travail de nos maîtres.

Voici donc un premier inattendu, qui repose la question de la «bosse des maths.» À la base du désir de prouver, on ne trouve pas tant le désir de mieux comprendre ce qu'on comprenait déjà un peu, mais plutôt le désir de comprendre

Document PLS



3. Un triangle de Sierpinski.

au moins un peu ce qui paraissait incompréhensible. Or, quoi de plus incompréhensible, quoi de plus magique (une magie désormais à la portée de tous) que les images fractales telles que celles de l'ensemble de Mandelbrot ? La longue préparation qui m'a poussé à les examiner n'est plus nécessaire aujourd'hui : le désir de les comprendre est devenu spontanément irrésistible pour l'enfant comme pour l'adulte.

Passant à la rigueur, combien il est inattendu qu'une activité presque manuelle, l'écriture de programmes d'ordinateur, ait changé la donne ! Elle nous apporta une métaphore puissante : les programmes qui suivent les règles marchent, les autres ne marchent pas. La machine vous le dit immédiatement (comme il se doit pour que l'apprentissage soit efficace). Il n'y a aucun sens à dire qu'un programme est «presque correct», seulement qu'il s'est révélé, après coup, facile à corriger. Bien sûr, les logiciels sont parfois défaillants, mais cela n'affaiblit pas le message : la différence fondamentale, mais subtile, que les mathématiques font entre le rigoureux et le non-rigoureux trouve une contrepartie «parlante» dans la différence, dont personne ne peut douter, entre les programmes qui marchent parce qu'ils obéissent strictement, sans exception, à toutes les règles, et les autres programmes.

Il était inattendu que ce soit dans l'analyse mathématique dite «fine» d'il y a 100 ans que se soit cachée la clef permettant de quantifier la notion de «rugueux».

En excluant Architas et Eudoxe de son Académie, Platon (selon Plutarque) maintenait «qu'ils corrompaient et gâtaient la dignité et ce qu'il y avait d'excellent en la géométrie... en la faisant descendre aux choses sensibles et matérielles.» Ce sont précisément certaines des «sensations» ainsi chassées qui allaient devenir les sources des sciences, tels la vision, l'ouïe et les sens du lourd, chaud ou sucré. Seul le sens du rugueux gardait une place exiguë et mal quantifiée.

Sans penser désobéir à Platon, des mathématiciens se lassaient de la dérivée, limite de dy/dx , et Hölder la remplaçait par la limite de $\log dy/\log dx$. Plus tard, Hausdorff et Besicovitch concevaient une dimension «anormale», sans aucune finalité concrète. De nombreuses décennies s'étant écoulées, l'inattendu survint quand je sus transmuier l'exposant de Hölder en exposant de rugosité, notion qu'on peut aussi exprimer en termes d'une dimension devenue fractale, et qu'on peut mesurer avec une grande précision. Elle joue pour le rugueux le rôle que la température joue pour le chaud.

Il était entendu que le monde physique est régi par des équations qui présupposent que tout varie de façon «douce». Comment se peut-il donc qu'il regorge de fractales ?

Ce qui était entendu reste vrai, mais il y a en général des singularités, où rien ne va plus. Ma thèse est qu'il est «typique» que ces singularités finissent par former un ensemble fractal. C'est, parmi d'autres exemples de plus en plus nombreux, la base de mon point de vue sur la turbulence et la nature de certaines arborescences fractales nommées DLA (agrégats limités par la diffusion), ainsi que la base de la théorie des interfaces de diffusion de Bernard Sapoval.

Il était inattendu qu'il devienne utile de concevoir le hasard comme tombant dans plusieurs «états» distincts. Le hasard ne sera jamais considéré comme désirable, mais, dans sa forme qu'on peut appeler usuelle, il a été si bien dompté que j'ai pu l'appeler bénin. On croyait même, sans d'ailleurs l'exprimer, que les conditions que cette forme postule sont nécessairement et automatiquement vérifiées dans la nature.

Il était donc inattendu que j'en vienne à constater que les marchés financiers et maints autres phénomènes imprévisibles échappent au hasard bénin. Soit ils ne satisfont pas les conditions requises, soit les conséquences tirées de ces conditions ne se révéleraient que dans des circonstances limites, qu'on ne rencontrera jamais. J'ai conclu qu'il fallait se faire à l'idée que, dans la nature, le hasard peut aussi se rencontrer dans au moins deux autres «états» : sauvage et lent.

Benoit MANDELBROT est professeur de sciences mathématiques à l'Université Yale et Fellow émérite au Centre de recherches T.J. Watson d'IBM.

Ce texte est une transcription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 9 avril 1997, à 9h05.

La mystification d'Alan Sokal

PIERRE THUILLIER

Les penseurs «postmodernes» manquent-ils de rigueur et de culture scientifique? Pour le savoir, un physicien américain a expérimenté.

« Il faut dénoncer la paresse et l'imposture intellectuelle, d'où qu'elles viennent. » Telle est la justification qu'a fournie le physicien Alan Sokal, de l'Université de New York, après s'être livré à un brillant canular qui a fait couler beaucoup d'encre. Rappelons les faits.

En mai 1996, la revue américaine *Social Text* a publié un article d'A. Sokal au titre pompeux : « Violier les frontières : vers une herméneutique transformatrice de la gravité quantique. » L'un des objectifs prétendus de ce travail était de remettre en cause les fondements de la science orthodoxe.

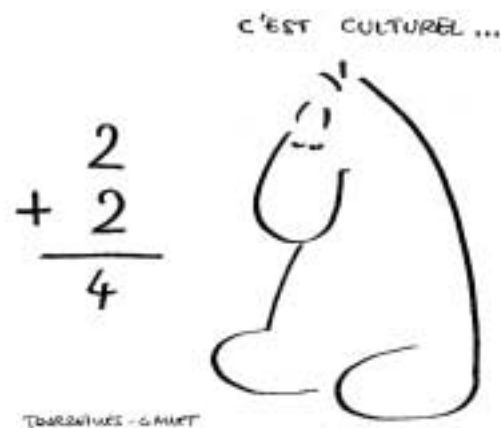
Le rationalisme occidental a réussi à imposer un « dogme » : il existe un monde extérieur dont les hommes peuvent progressivement découvrir les lois. Or, affirmait A. Sokal, diverses études révisionnistes, féministes et post-structuralistes ont mis à mal cette croyance, en montrant que la réalité physique est essentiellement « une construction sociale et linguistique ». La science moderne n'a donc qu'une « façade d'objectivité » et les privilèges épistémologiques accordés à « la prétendue méthode scientifique » ne sont pas mérités.

Toujours à en croire A. Sokal, il fallait cesser de vénérer le « concept de vérité » et même s'en débarrasser. On pourrait ainsi créer une nouvelle science qui, enfin, serait « postmoderne » et « libératrice ». Non seulement on ferait sauter les « barrières artificielles » qui séparent encore les scientifiques du grand public, mais « on purgerait l'enseignement des sciences et des mathématiques de leurs caractéristiques autoritaires et élitistes ».

On y introduirait, en revanche, des idées empruntées aux partisans du féminisme, de l'homosexualité, du multiculturalisme et de l'écologisme. Il était bien difficile, concédait A. Sokal, de

prévoir ce qui serait le nouvel « arbre de la science ». Dans sa conclusion, il risquait pourtant cette prédiction : la théorie du chaos, puisqu'elle jetait de la lumière « sur le mystérieux phénomène de la non-linéarité, aurait une place centrale dans toutes les mathématiques futures ».

Afin d'étayer ses dires, A. Sokal invoquait, d'une part, la gravité quantique, « cette nouvelle branche de la physique où sont à la fois synthétisées et dépassées la mécanique quantique de Heisenberg et la relativité générale d'Einstein ». Il citait, d'autre part, une kyrielle d'intellectuels pratiquant la philosophie, la sociologie des sciences ou les *cultural studies* (une réflexion de type humaniste sur les grands problèmes socio-culturels). Adoptant leur langage, A. Sokal procédait à une vaste « déconstruction » de la pensée scientifique, c'est-à-dire à une remise en question radicale des connaissances les mieux établies. Non sans habileté littéraire, il écrivait par exemple : « Aussi le groupe d'invariance infini-dimensionnel érode-t-il la distinction entre observateur et observé ; le π d'Euclide et le G de Newton, jadis considérés comme constants et universels, sont maintenant perçus dans leur inéluctable historicité. » Ou encore, imper-



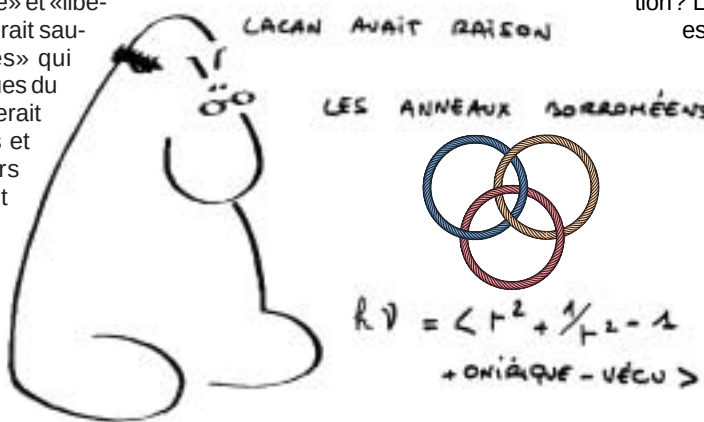
turbablement, il proposait ce critère « épistémologique » : « Les quantités ou les objets qui sont en principe inobservables – tels que les points de l'espace-temps, les positions exactes des particules, ou les quarks et les gluons – ne devraient pas être introduits dans la théorie. » Au passage, il signalait l'un des inconvénients de cette innovation : elle excluait de la science « une grande partie de la physique moderne »...

UNE SUPERCHERIE BÉNÉFIQUE?

Ainsi a commencé l'affaire. Car, presque en même temps, A. Sokal faisait paraître dans une autre revue américaine, *Lingua Franca*, un second article révélant qu'il avait composé une parodie, un pastiche. Délibérément, il avait accumulé des énoncés approximatifs, fantaisistes, souvent faux ou même absurdes. Précisant que les nombreuses citations empruntées aux auteurs postmodernes étaient strictement exactes, notre persifleur avouait qu'il avait échafaudé une pseudo-démonstration parfaitement inconsistante. En fait, il s'agissait d'une expérimentation : « Une revue de pointe consacrée aux *Cultural Studies* publierait-elle un article pimenté d'absurdités : a) s'il avait de l'allure, b) s'il flattait les présupposés idéologiques de la rédaction ? La réponse, malheureusement, est oui. » En conséquence, on ne

pouvait que déplorer « l'arrogance intellectuelle » et le manque de rigueur des théoriciens de la revue.

A. Sokal se demandait notamment pourquoi la rédaction n'avait pas jugé utile de consulter un physicien, ce qui lui aurait permis d'éviter de nombreux pièges. Il avait, par exemple, présenté la théorie des nombres complexes comme « une branche



récente et encore tout à fait conjecturale de la physique mathématique» (les nombres complexes ont été introduits par les algébristes de la Renaissance et Gauss leur donna leur statut de concept mathématique dans les années 1830). Ou encore il avait évoqué «la victoire» remportée par la cybernétique sur la mécanique quantique... Cette victoire, évidemment, est imaginaire. La cybernétique est une discipline spécifique ; en tant que telle, elle ne vise aucunement à supplanter la mécanique quantique. Tout au plus le grand public peut-il la juger plus prestigieuse. Un comité de rédaction attentif n'aurait jamais laissé passer des assertions aussi étranges ; et, même sans l'aide d'experts, il aurait mesuré l'extrême faiblesse de certains arguments. Comment croire, par exemple, que les derniers développements de la mécanique quantique avaient confirmé les spéculations psychanalytiques de Jacques Lacan ?

A. Sokal reconnaît que son expérimentation soulève une question éthique. Les travailleurs intellectuels communiquent dans la confiance et, dans ce cas, il y a tromperie délibérée. Il se justifie, en dernier ressort, en invoquant un motif politique. Affirmant qu'il appartient lui-même à «la gauche», il regrette qu'une certaine gauche américaine trahisse les idéaux progressistes en se ralliant à ce qu'il nomme le «relativisme épistémique». Autrement dit, elle renonce à distinguer le faux du vrai et jette le discrédit sur la science. Ce n'est pas en retombant dans l'obscurantisme, déclare Sokal, qu'on luttera contre le SIDA ou contre le réchauffement de l'atmosphère. Et comment pourrait-on mener une réflexion critique en économie ou en politique si l'on démisionne intellectuellement ?

La revue *Social Text* a eu du mal à se défendre. Dans les médias, du *New York Times* à *Physics Today*, les articles se multiplièrent autour de cette question : A. Sokal avait-il eu raison de se livrer à une telle mystification ? En France, il fallut attendre plusieurs mois pour que l'affaire Sokal suscite de vives polémiques.

Dans *Le Monde* du 3 janvier 1997, le sociologue Denis Duclos reprocha au physicien américain et à ses acolytes d'être des «pistoleros de l'intellectual correctness» et de se livrer à des «autodafés symboliques» à la fois cyniques et stupides. Dénonçant les «simagrées de M. Sokal», il déplorait, en particulier, son «chauvinisme anti-européen».

Sur ce point précis, comme l'a noté Pierre Guerlain, spécialiste de la civilisation américaine, il est difficile d'être d'accord. Il est vrai que beaucoup de Français sont visés : Jacques Lacan, Jacques Derrida, Gilles Deleuze, Julia Kristeva, Jean-François Lyotard, Bruno Latour, Luce Irigaray et quelques autres. De nombreux auteurs américains, toutefois, sont également mis en cause. Les Français ne sont pas critiqués à cause de leur nationalité, mais parce qu'ils ont utilisé de façon maladroite, erronée ou arbitraire des énoncés scientifiques mal assimilés, et parce qu'ils ont exercé une grande influence sur la «nouvelle gauche» américaine. La vraie cible est constituée par le postmodernisme, c'est-à-dire par un courant de pensée qui, toujours selon A. Sokal, manque totalement de rigueur intellectuelle.

Les experts en sciences humaines ont assurément le droit de se référer aux sciences «dures», mais à condition d'éviter les faux-semblants. Si un psychologue ou un linguiste prétend trouver des arguments «sérieux» dans la topologie, alors il doit s'informer de façon également «sérieuse» sur cette branche des mathématiques.

Pour mener à bien sa critique, A. Sokal a d'ailleurs trouvé un allié européen en Jean Bricmont, professeur de physique théorique à l'Université catholique de Louvain. Ils vont publier ensemble un livre qui devrait s'intituler : Les impostures scientifiques des philosophes (post-)modernes. Leur intention est d'analyser minutieuse-

ment divers textes postmodernes afin de mettre au jour des «récupérations» et des «détournements» du théorème de Gödel, de l'hydrodynamique, des relations de Heisenberg et de diverses théories.

RELATIVISME MODÉRÉ ET RELATIVISME RADICAL

Si important qu'il soit, ce déblayage ne constitue guère qu'un préliminaire. Le principal problème, selon A. Sokal lui-même, concerne le relativisme affiché par les postmodernes. Sous sa forme extrême, rappelons-le, cette doctrine affirme que toutes les connaissances se valent : la science, malgré ses prétentions, n'est jamais qu'un mode de connaissance parmi d'autres et ne se situe donc pas au-dessus de la magie, de l'astrologie ou de la religion. En d'autres termes, les «théories scientifiques» sont seulement des constructions élaborées à partir de quelques présupposés arbitraires et en fonction de divers intérêts économiques, sociaux, politiques ou culturels. Certains «sociologues des sciences» n'hésitent pas à le dire en termes brutaux : les sciences n'existent pas, il n'y a pas de théories, mais seulement des rapports de forces. En France et aux États-Unis, du moins dans certains milieux intellectuels, les propos de ce genre ont connu une grande vogue. Il faut bien voir ce qui en résulte : la notion même de science est pratiquement vidée de son contenu.

Il est à peine besoin de dire que cette «sociologie» a donné lieu à de multiples discussions. Est-il bien raisonnable, par exemple, de réduire à néant toute l'activité expérimentale des physiciens et des biologistes et de soutenir que le «vrai» et le «faux» doivent s'expliquer de la même façon (c'est-à-dire sociologiquement) ? On peut, comme A. Sokal, en douter. Son opinion n'est cependant pas aussi tranchée qu'on pourrait le croire de prime abord. Pour saisir correctement sa pensée, il est utile de distinguer les formes modérées et les formes radicales que peut revêtir le relativisme.

En effet, bien avant que la nouvelle «sociologie des sciences» ne soit à la mode, de nombreux philosophes et historiens des sciences ont explicitement noté que le fonctionnement de la «méthode expérimentale» était beaucoup plus complexe et beaucoup moins transparent que ne le voulait une certaine tradition. Divers hommes de science ont eux-mêmes expliqué, parfois avec humour, que les purs argu-

UN DÎNER EN FAMILLE



Surtout, ne parlons pas de l'affaire Dreyfus Sokal!



...Ils en ont parlé...

L'UNIVERS
DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

LES ÉTOILES

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

272 pages - 220 F
code 1892

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

ments rationnels ne suffisent pas à rendre compte du succès des théories. Max Planck, prix Nobel de physique en 1918, écrivait dans son *Autobiographie* : «Une vérité nouvelle en science n'arrive jamais à triompher en convainquant les adversaires et en les amenant à voir la lumière, mais plutôt parce que finalement ces adversaires meurent et qu'une nouvelle génération grandit, à qui cette vérité est familière.»

Même en science, il y a des modes, des pressions sociales, des égarements divers dus à des causes également diverses : publication précipitée de résultats mal confirmés, «oubli» plus ou moins délibéré de certains faits gênants, petites ou grosses tricheries, etc. En outre, il est devenu de plus en plus clair que toute théorisation met en œuvre des choix et des présupposés susceptibles d'être contestés et révisés. C'est ce qu'on peut appeler le relativisme modéré : il met en évidence les limites de la «science», mais se garde de nier radicalement sa spécificité et son efficacité cognitive.

Tout en demeurant vigilant, A. Sokal fait de larges concessions à cette forme de relativisme. Dans un texte postérieur à sa parodie, par exemple, il a déclaré qu'il serait injuste de critiquer indistinctement tous les relativistes. Certains d'entre eux ont assez de bon sens pour reconnaître que certains énoncés empiriques ont une valeur objective ; ils forment à l'égard des théories des critiques dignes de considération. A. Sokal admet également que le scepticisme, à condition d'être «informé», a une fonction positive. Ce qu'il récuse, c'est le relativisme radical. À la fois peu rigoureux et hyper-critiques, les tenants de cette doctrine finissent par dévaluer non seulement les sciences, mais les normes élémentaires du travail intellectuel (rigueur, cohérence, vérification des informations, etc).

Nous sommes ainsi ramenés au projet initial d'A. Sokal : établir «expérimentalement» que tout un secteur de la gauche américaine s'est fourvoyé dans le postmodernisme. Il n'a pas démontré, à proprement parler, que cette dérive était politiquement dangereuse. Autant qu'on puisse juger, il a du moins réussi à dévoiler les faiblesses et même la vacuité d'un certain type de productions intellectuelles. On peut espérer que, des deux côtés de l'Atlantique, les divagations pseudo-scientifiques des postmodernes se feront plus rares. Des questions importantes demeurent toutefois ouvertes ; il serait regrettable que certains propos d'A. Sokal les fassent oublier.

À diverses reprises, il a par exemple affirmé qu'il ne fallait pas mêler les questions épistémologiques et les questions éthiques, les questions factuelles et les

questions relatives aux valeurs. L'idée est certainement juste, du moins si elle signifie qu'on ne doit pas condamner une théorie scientifique sous le seul prétexte qu'elle a été utilisée par l'armée ou par des entreprises capitalistes... A. Sokal ne nie pas pour autant la nécessité de s'interroger sur le fonctionnement social de la science. Au cours de la controverse avec *Sokal Text*, il l'a dit en toute netteté : «La science et la technologie soulèvent des centaines de questions politiques et économiques importantes. La sociologie des sciences, à son meilleur niveau, a d'ailleurs beaucoup contribué à les clarifier.» Les présupposés philosophiques sur lesquels reposent les diverses disciplines, évidemment, peuvent eux aussi faire l'objet de discussions. Bref, la dénonciation des jongleries intellectuelles n'implique aucunement une démission de l'esprit critique en politique et en philosophie, fût-ce au sujet de la science.

En principe, il ne devrait pas y avoir de malentendu ; mais, concrètement, les remous causés par «l'affaire» n'ont pas toujours favorisé le dialogue et la lucidité. Il faut bien l'avouer : l'«expérimentation» d'A. Sokal se révèle pédagogiquement efficace, mais elle est brutale et risque de causer des blocages. Comme le montrent les réactions de certains représentants des sciences sociales, elle a parfois été ressentie comme une agression et même une humiliation. Ainsi s'explique le réflexe de défense de Denis Duclos : «Ce n'est pas parce qu'une revue de sciences sociales se laisse piéger par des erreurs en physique que les questions sociales cessent d'avoir leur autonomie radicale.»

Plus généralement, la mystification d'A. Sokal a pu faire craindre le retour d'un certain «terrorisme» scientiste : la science, seule détentrice de la vérité, devrait être considérée par tous et en tous les domaines comme l'autorité suprême... Un tel projet, disons-le fermement, ne correspond certainement pas aux intentions d'A. Sokal. Il ne demande pas que la science soit idolâtrée ; il souhaite seulement que les postmodernes renoncent à leur laxisme intellectuel.

Pierre THUILLIER, philosophe et historien des sciences, enseigne à Paris VII.

Pierre THUILLIER, *La revanche des sorcières. L'irrationnel et la pensée scientifique*, Éditions Belin, 1997.

Les articles cités ont été publiés par *Le Monde* des 3, 14 et 18 janvier 1997.

Des informations sur l'affaire Sokal sont disponibles sur le site Web : <http://www.physics.nyu.edu/faculty/sokal/index.html>

Questions de frites

HERVÉ THIS

Les frites de quatrième gamme, ensachées crues, boivent moins l'huile que les frites surgelées.

La quasi-totalité des frites servies dans les restaurants français sortent d'un sachet. À la maison, la frite fraîche résiste, parce qu'elle a des atouts : elle boit moins l'huile. Surtout, elle est détrônée par la frite de quatrième gamme, ensachée crue dans une atmosphère modifiée, qui a été mise au point par Patrick Varoquaux et ses collègues de la station INRA de Montfavet ?

Les modifications des habitudes alimentaires cantonnent la frite maison... à la maison : dans les cantines ou dans les restaurants, la frite en sachets s'impose, parce que les volumes à préparer nécessitent une préparation à l'avance ; or les pommes de terre noircissent quand elles sont laissées à l'air, après la découpe, parce que cette dernière libère des enzymes et leurs substrats, initialement enfermés dans des compartiments séparés des cellules de pomme de terre. En présence d'air, ces molécules réagissent et forment des composés bruns voisins de ceux qui nous font bronzer en été.

Ce brunissement enzymatique avait conduit les fabricants de frites en sachets

à proposer des produits précuits : après pelage et découpe, les bâtonnets de pomme de terre sont d'abord séchés, puis précuits dans un bain d'huile (souvent de l'huile de palme, peu coûteuse), et enfin congelées. Pour la cuisson finale, l'utilisateur peut alors plonger les frites dans un bain de friture, mais les micro-fissures créées lors de la congélation absorbent alors beaucoup d'huile, ou bien les réchauffer au four, mais elles sont alors trop sèches.

Comment éviter ces deux écueils ? Les chercheurs de l'INRA ont étudié l'ensachage sous atmosphère contrôlée de frites crues : ce que l'on nomme les frites de quatrième gamme. Pour obtenir de bons résultats, ils ont traqué les causes de brunissement tout au long de la fabrication. Tout d'abord, les pommes de terre doivent être pelées, si possible sous jet d'eau, par une technique qui évite de trop endommager les cellules. Puis, lors de la découpe des bâtonnets, les lames des couteaux, en acier inoxydable, doivent être aussi affûtées que possibles.

Ensuite les bâtonnets détaillés doivent être maintenus à une température

de 4 °C environ, de sorte que le métabolisme des cellules intactes soit aussi ralenti que possible. Après égouttage par centrifugation ou ventilation, les pommes de terre doivent être conditionnées avec un gaz inerte, en l'absence d'oxygène, dans un sachet très imperméable aux gaz. Ainsi les bâtonnets se conservent dix jours à 4 °C sans altération (cependant, au cours du stockage, les tis-

sus de pommes de terre accumulent des sucres qui provoquent un brunissement à la cuisson, par des réactions analogues à celles qui font le brun de la croûte du pain). Le goût et la texture des frites confectionnées ultérieurement ressemblent davantage au goût et à la texture des frites fraîches ; la proportion d'huile est analogue, c'est-à-dire deux fois inférieure à celle de frites obtenues par friture de frites surgelées.

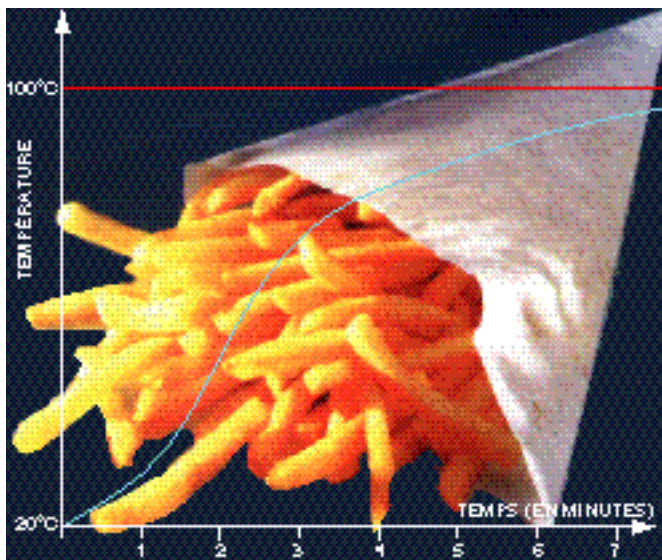
Comment cuire les frites ? Là, les cuisinières et les cuisiniers se mettent à douter, car chaque chef a sa méthode. On se déterminera après s'être demandé ce que l'on attend d'une frite, puis après avoir cherché rationnellement quelles opérations permettent de satisfaire cette attente.

Observons qu'une frite de bon aloi doit certainement être tendre à cœur, aussi peu huileuse que possible et croustillante sans être noire. Observons aussi que la cuisson résulte d'une diffusion de la chaleur, de l'extérieur vers l'intérieur, avec deux phénomènes principaux : la formation de la croûte, et la cuisson du cœur. En effet, les pommes de terre sont composées de cellules qui renferment, notamment, de l'eau et des grains d'amidon : quand la chaleur gagne le cœur des frites par conduction, certaines cellules sont dissociées, tandis que les grains d'amidon libèrent leurs longues molécules dans l'eau chauffée. En surface des frites, la croûte, elle, résulte d'une évaporation complète de l'eau.

L'expérience qui consiste à cuire une frite où l'on a introduit un thermocouple (une sonde qui mesure plus fidèlement et plus rapidement la température qu'un thermomètre) montre que les frites chauffent très lentement : même quand la température de l'huile est de 180 °C, la température au cœur n'atteint 85 °C qu'après plusieurs minutes, car la pomme de terre est thermiquement inerte. Autrement dit, si le premier bain d'huile est trop chaud, la surface noircit avant que l'intérieur soit cuit.

Inversement, le premier bain ne doit pas être trop froid, sans quoi le croustillant ne se forme pas assez rapidement, et la frite boit l'huile. En pratique, sept minutes de cuisson à la température de 180 °C donnent un bon résultat pour des frites de 12 millimètres de côté.

Un second bain parfait alors les frites : dans de l'huile portée à 200 °C, on arrête la cuisson quand la couleur est d'une plaisante blondeur.



La température à l'intérieur d'une frite (courbe bleue) ne tend que lentement vers 100 °C.

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

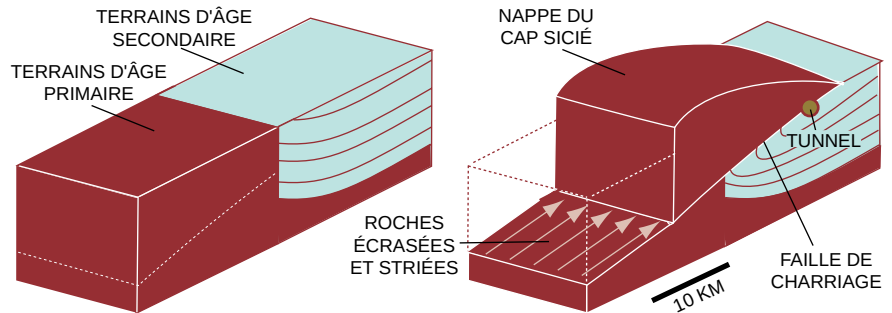
La faille du tunnel de Toulon

L'analyse géologique aurait dû être adaptée au problème posé.

Après chaque catastrophe, un expert prétend qu'il avait mentionné la possibilité du péril, et qu'il n'a pas été écouté. Mais quel est l'expert en experts qui choisit les experts ? Il est des instances où des spécialistes différents des experts choisis n'ont, à tort, pas été consultés. Tel a été le cas, me semble-t-il, de l'évaluation du risque lié au tunnel autoroutier de Toulon.

La construction de ce tunnel de dix mètres de hauteur vient d'être arrêtée à la suite d'un éboulement. Le surcoût associé serait de 600 millions de francs : de difficiles négociations détermineront qui va payer.

Or la structure géologique des environs de Toulon était connue. Son interprétation est délicate, mais elle a été élucidée par un modèle proposé le siècle dernier, et un débat en 1963 à la Société géologique de France a éclairé la question. Pour comprendre cette structure, remontons 40 millions d'années : à cette époque, la plaque ibérique s'est rapprochée de l'Europe en provoquant, par compression, la formation



Charriage de terrains anciens (Nappe du Cap Sicié) sur des terrains plus récents.

de la chaîne des Pyrénées qui se prolongeait à l'époque en Méditerranée et passait au Sud de Toulon. L'écorce terrestre s'est cassée et un compartiment de quelques centaines de kilomètres cubes s'est avancé d'au moins dix kilomètres vers le Nord. Ce phénomène tectonique relativement banal a évidemment eu d'importantes conséquences mécaniques sur les roches le long de la faille de charriage.

Les bouleversements ont été spectaculaires, car ils ont amené des roches schisteuses d'âge primaire (appartenant à la vieille chaîne hercynienne) sur des sédiments d'âge secondaire beaucoup plus jeunes. Ce chevauchement ne se fait pas selon un plan net, mais sur une épaisseur d'une centaine de mètres, elle-même découpée par de nombreuses failles secondaires.

Les propriétés mécaniques des roches ont été modifiées : le matériau est instable, «manque de tenue», d'autant que la composition des terrains est à dominante argileuse et les accidents dans ce type de substrat sont fréquents.

Or le tunnel construit à Toulon traverse la zone de la faille de charriage. Ainsi le responsable de la catastrophe est clairement «la faille de chevauchement de la nappe du Cap Sicié».

L'exemple tragique, mais heureusement en termes financiers seulement, montre que les considérations géotechniques, tout à fait indispensables dans ce type d'ouvrages, doivent être précédées par une étude géologique minutieuse. Dans ce cas extrême, des géologues structuraux spécialisés auraient pu prévoir la grande complexité du sous-sol toulonnais et attirer l'attention des entreprises et du maître d'œuvre sur les difficultés à attendre.

Depuis 20 ans, un «Comité technique des grands barrages» contrôle les étapes de la construction des barrages. Il a montré son efficacité. Je recommanderais bien

volontiers la création d'un comité indépendant de même nature pour les tunnels. En profitant des compétences des géologues.

Le chantier de Toulon est une nouveauté : c'est le premier exemple d'un tunnel à si faible profondeur dans des terrains très perturbés et, de surcroît, sous une ville. C'est un miracle que l'effondrement du tunnel n'ait fait aucune victime. La faille était double : géologique et de raisonnement. Aujourd'hui l'homme réalise des travaux de plus en plus ambitieux, défiant les pièges de la nature. La leçon de Toulon sera retenue.

Maurice MATTAUER



Carotte de sondage dans les gypses du Trias (220 millions d'années) dans la région de Toulon. Ces gypses se trouvent sous des terrains du Permien (250-270 millions d'années), du Carbonifère (290-300 millions d'années) et du Paléozoïque (400-550 Ma).

Bactéries thermophiles

Ces enzymes résistent aux températures et aux pressions élevées.

Des sources hydrothermales sous-marines, dont certaines sont nommées «fumeurs noirs», jaillit une eau dont la température varie entre 100 et 400 °C. Autour de ces fumeurs noirs, les organismes adaptés aux conditions extrêmes abondent. Guy Hervé et son équipe du Laboratoire de biochimie des signaux régulateurs cellulaires et moléculaires étudient les bactéries hyperthermophiles, dont les enzymes résistent aux températures élevées.

Parmi les micro-organismes proches des fumeurs noirs, vivent des archéobactéries, que certains biologistes considèrent comme des bactéries primitives, ancêtres des bactéries actuelles. Au contraire, d'autres pensent que ce sont des bactéries très évoluées, ayant acquis

BRÈVES

Les Amazones

Hérodote mentionne l'existence, au Nord de la mer Noire, d'une tribu de femmes guerrières, les Amazones. L'historien ayant mêlé des récits non vérifiés à des observations personnelles, on doutait de l'existence de ces femmes représentées sur le

Parthénon. Près de la ville russe de Pokrovka, Jeanne Davis-Kimball et ses collègues russes ont trouvé, dans sept tombes de femmes, les objets utilisés par les guerriers : des

pointes de flèches en bronze, de courtes dagues et de longues épées, dont les poignées sont plus petites que celles des armes analogues de la même époque. Toutes les femmes des tribus où vivaient ces Amazones (entre le VI^e et le II^e siècle avant notre ère) n'étaient apparemment pas guerrières : 33 autres tombes ne contenaient que des aiguilles et des billes de verre.



J. Davis-Kimball

Le béton conducteur

Des scientifiques de l'Institut de recherche pour la construction, à Toronto, ont mis au point un béton conducteur, résistant et de faible coût. Obtenu par injection de matériaux conducteurs de la chaleur et de l'électricité dans le mélange, ce béton permet la diffusion uniforme de chaleur dans une maison ou, utilisé dans le revêtement des routes, évite leur enneigement. Une dalle test, reliée à une source électrique, a été soumise au rigoureux hiver d'Ottawa : elle n'a été recouverte ni de neige, ni de givre.

La molécule anti-graisses

Des souris qui ont un régime très riche en graisses, mais dont le gène *ucp2* est fortement exprimé, ne deviennent pas obèses : les protéines produites par ce gène (isolé par Daniel Riquier et ses collègues) permettent aux souris de brûler les graisses alimentaires au lieu de les accumuler. Cette protéine opère dans les mitochondries, les « usines » cellulaires qui fabriquent les substances énergétiques de l'organisme. La protéine a peut-être la même fonction chez l'homme, ce qui en fait un agent anti-obésité potentiel.

Suite page 24



Guy Hervé - PREMIER

Les archéobactéries vivent à proximité des sources océaniques chaudes, tel ce fumeur noir.

la capacité de se développer dans des conditions défavorables. Le groupe de G. Hervé s'intéresse surtout à *Pyrococcus abyssi*, une archéobactérie hyperthermophile dont les conditions de croissance favorites sont une température de 96 °C et une pression de 250 atmosphères.

Comme les bactéries « usuelles », les archéobactéries sont pourvues d'enzymes. Les biochimistes ont choisi d'en étudier deux, qui interviennent dans la synthèse des précurseurs des acides nucléiques (l'ADN et l'ARN) : la carbamyl phosphate synthétase et l'aspartate transcarbamylase ; ils les ont comparées aux enzymes homologues de la bactérie *Escherichia coli*. Les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont très stables : elles supportent d'être chauffées à 96 °C pendant trois heures, en conservant 100 pour cent de l'activité pour l'aspartate transcarbamylase ou 50 pour cent pour la carbamyl phosphate synthétase ; dans les mêmes conditions, les enzymes d'*Escherichia coli* sont inactivées en quelques secondes. En outre, les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont aussi efficaces à 96 °C que celles d'*Escherichia coli* à 37 °C.

Les structures et le fonctionnement des enzymes des archéobactéries et de *Escherichia coli* sont-ils comparables ? Les chaînes protéiques ont des compositions semblables. De *Escherichia coli* à l'homme, la carbamyl phosphate synthétase est constituée de deux parties homologues. Ces enzymes résultent de la duplication d'un gène initial dont les deux produits ont été assemblés par une séquence de liaison. Chez *Pyrococcus abyssi*, la protéine homologue correspond à la moitié de la molécule des autres espèces. Il s'agit sans doute d'une enzyme fossile, précurseur des autres

carbamyl phosphate synthétases, codée par un gène qui s'est dupliqué ultérieurement au cours de l'évolution. La duplication de ce gène semble renforcer l'hypothèse stipulant que les archéobactéries seraient les ancêtres des bactéries actuelles.

L'aspartate transcarbamylase est constituée de deux types de chaînes : les unes fixent le substrat sur lequel elles agissent (ce sont les chaînes catalytiques), les autres modulent la réaction enzymatique (ce sont les chaînes régulatrices). L'enzyme de *Pyrococcus abyssi* contient des séquences de ces deux types de chaînes. D'après une modélisation moléculaire, les enzymes auraient des structures similaires, mais celle de *Pyrococcus abyssi* contient deux fois plus d'acides aminés chargés que la protéine homologue de *Escherichia coli*. Ces acides aminés chargés établissent sans doute des ponts ioniques entre les molécules, qui stabilisent l'enzyme à haute température.

La panoplie des archéobactéries disponibles commence à s'étoffer et l'on s'intéresse à une autre bactérie hyperthermophile, *Pyrococcus furiosus*, qui se développe aussi à 96 °C, mais à la pression atmosphérique, ainsi qu'à d'autres bactéries, dites psychrophiles, adaptées au froid et provenant de l'Antarctique. Cette stabilité thermique ouvre de nouvelles perspectives techniques. Deux exemples illustrent l'intérêt de disposer de telles enzymes : dans la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, l'enzyme employée doit résister à près de 100 °C (elle est extraite d'une bactérie des sources chaudes) ; les industriels qui fabriquent des lessives recherchent des lipases – des enzymes dégradant les graisses – qui résisteraient aux températures élevées.

Marie-Thérèse LANDOUSY