



LES SYMÉTRIES BRISÉES

Pascal Chossat

La symétrie, de simple conséquence des lois physiques, est devenue principe d'explication dans des domaines aussi divers que les transitions de phase ou la turbulence.

La théorie des brisures de symétrie rend compte de la diversité des phénomènes en s'attachant aux symétries perdues, «brisées», d'un état originel.

Elle donne une nouvelle compréhension de la genèse des formes dans la nature.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

jours faire tendre une quantité vers zéro, comme on le fait en analyse, parce qu'on ne calcule pas toujours avec des nombres réels.

Il arrive alors que l'on utilise d'autres règles : par exemple, en calculant «modulo quelque chose», c'est-à-dire en remplaçant chaque nombre par le reste de la division par un certain module. Ainsi 3 est égal à 1 modulo 2 parce que le reste de la division de 3 par 2 donne 1. Dans ce cadre, des éléments dénommés «nilpotents» jouent le rôle du zéro. Ce sont, par exemple, des éléments non nuls, mais dont le carré est nul. On peut considérer que cet ε est un élément petit, parce que son carré est nul. Quand on fait de l'analyse, on dira ε est petit, le carré est beaucoup plus petit, on le néglige ; en algèbre, on dit ε n'est pas nul, mais le carré de ε est nul.

Ce type de calcul est facile à concevoir parce qu'il est familier. Les compteurs d'eau, les compteurs de kilomètres des voitures reviennent à zéro automatiquement quand ils dépassent un certain nombre. Les Mayas avaient cette conception du calendrier : à la fin de l'année, ils repartaient à zéro.

Examinons un exemple numérique : dans le calcul modulo 9, chaque nombre est remplacé par le reste de sa division par 9 (C'est ce qu'on fait quand on fait la preuve par 9). Trois est un élément nilpotent : le nombre 3 n'est pas nul, mais, modulo 9, 3^2 , qui fait 9, est égal à zéro.

UN ARGUMENT RÉALISTE ?

Toutes ces belles propriétés sont-elles inattendues ? Ce qui est inattendu, c'est qu'elles aient été indépendamment découvertes par de multiples civilisations. Sont-elles le fruit de l'imagination humaine, comme l'affirment les constructivistes, ou toutes les belles caractéristiques du zéro reposent-elles dans une caverne scintillante de type Ali Baba qu'il nous appartient d'explorer, comme le pensent les réalistes ? Le zéro pose toute la question de la réalité des mathématiques et des difficultés de sa définition.

Christian HOUZEL est mathématicien, historien des mathématiques et professeur à l'IUFM (Institut universitaire de formation des maîtres) de Paris.

Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, sera diffusée sur France Culture le 9 octobre à 9 heures.

Bières de pharaons

Les Égyptiens connaissaient le maltage.

Les hiéroglyphes ont révélé que les Égyptiens fabriquaient de la bière, mais comment s'y prenaient-ils ? Les provisions de route pour l'au-delà, enterrées avec les défunts, viennent de le dire : utilisant des résidus de cette bière des bières, l'archéologue Delwen Samuel, de l'Université de Cambridge, a reconstitué les recettes des brasseurs égyptiens.

On a longtemps cru que les Égyptiens étaient des brasseurs primitifs : ils auraient fait leur bière à partir de pâte à pain très levée et peu cuite, qu'ils auraient dispersée dans l'eau, tamisée et fermentée par les levures utilisées pour la confection du pain. Comment tester cette hypothèse ? Les résidus alimentaires antiques étant très bien conservés dans le climat aride de l'Égypte (les micro-organismes ont besoin d'eau pour proliférer), les archéologues des années 1920 avaient utilisé le microscope optique pour préciser la matière première des brasseurs égyptiens : du blé emmer (*Triticum dicoccum*) et de l'orge, utilisés soit ensemble, soit séparément. Quels traitements ces céréales subissaient-elles ?

D. Samuel a complété les premières études par des analyses au microscope électronique de tissus végétaux, de grains d'amidon, de levures et d'autres micro-organismes. Elle s'est surtout intéressée

aux grains d'amidon des céréales retrouvées à Deir el-Medina, où vivaient entre l'an -550 et l'an -307 les ouvriers qui construisaient les tombes de la Vallée des rois ; d'autres échantillons analysés provenaient d'Amarna, en Moyenne Égypte. Les grains d'amidon étant modifiés de façon caractéristique par les traitements qu'on leur fait subir, l'archéologue britannique supposait que l'on trouverait dans la morphologie des grains antiques la clef des anciens procédés de brasserie.

Les céréales sont composées de grains d'amidon dans des enveloppes ; les grains, eux, sont composés de deux types de grosses molécules, l'amylose et l'amylopectine, enchaînement respectivement linéaire et ramifié d'un motif de base qui est le glucose.

Quand des grains d'amidon sont chauffés dans l'eau, l'amylose se dissout dans la solution, et le reste des grains gonfle, parce que l'eau s'introduit par capillarité entre les molécules. Au microscope, on voit les grains gonfler, se replier et, finalement, fusionner. Quand la quantité d'eau est limitée, les grains ne sont pas complètement dispersés, de sorte qu'ils conservent une limite identifiable.

De surcroît, les enzymes des céréales qui germent dissocient l'amidon en molé-

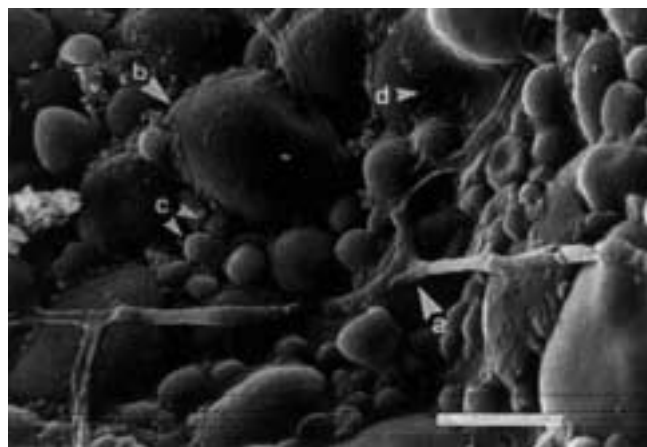
cules plus petites, les dextrines ou les sucres élémentaires, ce qui creuse la surface des grains d'amidon de petites cavités et creuse des galeries dans les grains. Si les Égyptiens avaient obtenu de la bière en dispersant seulement de la mie de pain dans l'eau, les grains d'amidon auraient été simplement fusionnés, mais comme ils étaient également attaqués, D. Samuel a conclu que les Égyptiens pratiquaient une sorte de maltage (le maltage moderne est l'opération qui consiste à tremper de l'orge dans l'eau, à provoquer la germination des grains, puis à sécher ces derniers dans une touraille).

Apparemment les Égyptiens maltaient et chauffaient d'abord les grains, ce qui engendrait les sucres et des molécules aromatiques par les réactions dites de Maillard, entre les sucres et les acides aminés. Puis ils mélangeaient les grains maltés à des grains germés et non chauffés et à de l'eau. La solution formée était ensuite décantée et fermentée.

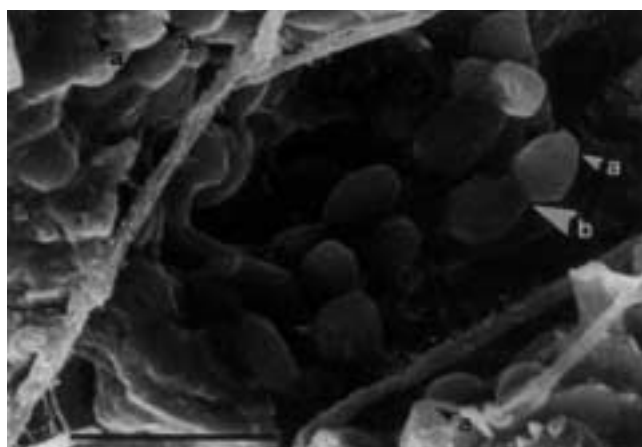
Quels ustensiles utilisaient-ils pour le maltage ? Les archéologues, guidés par les analyses au microscope, peuvent se mettre en quête. Quel goût avait leur bière ? James Merrington, brasseur à Newcastle, s'est fondé sur le procédé retrouvé par D. Samuel : utilisant blé emmer, coriandre et genièvre, il a obtenu une bière plaisante, avec un goût complexe et puissant. Ce n'est peut-être pas une réplique des bières antiques, mais la tentative était intéressante.

Hervé This

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le XX octobre 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Microstructure d'un fragment de pain. On distingue des grains d'amidon de diverses tailles. Les grains ne présentent pas de signe de déformation particulière.



Cellules de levure trouvées dans des résidus de bière trouvés dans une poterie d'une tombe de l'Égypte antique. On aperçoit des modifications sur plusieurs grains (b).

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement
de leur
nouvelle émission**

**les
Inattendus
de la
Science**

**Samedi 12 octobre
à 15h**

La paléontologie

avec Michel Brunet
professeur à l'Université
de Poitiers

Directeur du Laboratoire
de géologie, biochronologie
et paléontologie humaine

**Invitations à demander
au 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



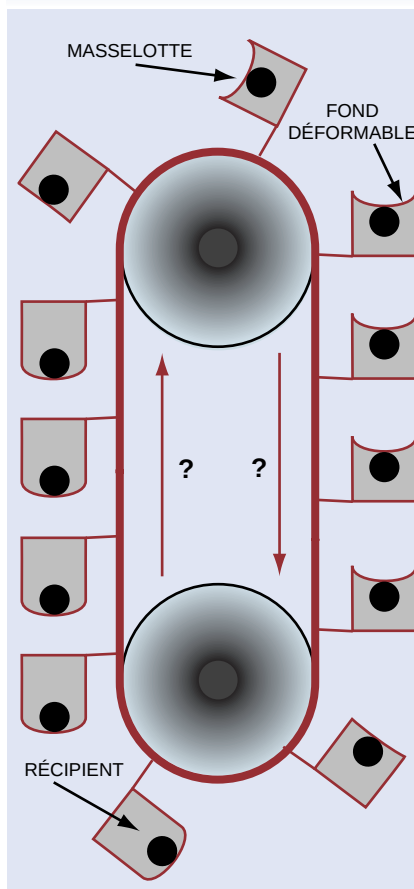
Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

JEU-CONCOURS N°28

PIERRE TOUGNE

LE MOUVEMENT PERPÉTUEL



Faut-il vraiment expliquer le diagramme à gauche ? C'est une machine perpétuelle. La masselotte, solidaire du fond du récipient, est représentée par un disque noir sur le schéma. Elle entraîne et déforme le fond du récipient selon l'orientation de celui-ci, vers le haut ou vers le bas. La force d'Archimède, proportionnelle au volume, fait tourner le système selon le sens indiqué par les flèches...

Mais nous savons tous que le mouvement perpétuel est impossible. Nous demandons aux lecteurs de nous expliquer pourquoi le système représenté ici ne «tourne pas».

De plus, si vous connaissez d'autres machines à mouvements perpétuels, hydrodynamiques, électriques, magnétiques ou autres, indiquez-les nous. Nous publierons les plus originaux, les plus surprenants, en vous rendant grâce.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'octobre 1996, dix gagnants tirés au sort recevront un livre de la Collection *Univers des Sciences*.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°26

Si l'on désigne par N le nombre de cartes d'un tas quelconque et V la valeur de la carte du dessous, on a la relation $N + V = 14$ (A). Soit (n_1, v_1) , (n_2, v_2) et (n_3, v_3) les valeurs de n et v des trois tas conservés. On aura alors, en main, $N = 52 - (n_1 + n_2 + n_3)$ cartes. Si par exemple ce sont les cartes du dessus des tas 1 et 2 qui sont retournées, v_1 et v_2 nous sont connus et donc aussi n_1 et n_3 grâce à la relation (A). Il faut trouver v_3 . Or $v_3 = 14 - n_3 = 14 + N - 52 + n_1 + n_2 = N - 38 + 14 - v_1 + 14 - v_2 = N - 10 - v_1 - v_2$.

Nombreux ont été les lecteurs à résoudre ce petit problème, mais auraient-ils été aussi perspicaces devant le tour de magie qu'il permet de réaliser ? Distribuez un jeu de 52 cartes selon le procédé décrit (mais en comptant mentalement !), retournez-vous et demandez à la personne de choisir trois tas, de les retourner et de vous donner les cartes restantes. À ce moment, vous vous retournez et demandez que l'on retourne la carte de dessus de deux paquets quelconques. Maintenant il vous suffit, en regardant les cartes dans votre main, de compter mentalement $10 + v_1 + v_2$ cartes, le nombre de cartes restantes vous donnant la valeur de la carte du dessus du troisième paquet. Essayez-le avec des amis !

Pansement pour fracture

Un pansement à l'ADN accélère la cicatrisation osseuse.

Chaque année, en France, des milliers de personnes souffrent de fractures osseuses dont certaines se réparent mal. Peut-on favoriser la cicatrisation des os ? À l'Université du Michigan, Jeffrey Bonadio et ses collègues ont utilisé un pansement constitué d'une éponge naturelle imbibée d'ADN pour réparer des os de rats sectionnés. Une cicatrisation osseuse parfaite a été obtenue en quelques semaines.

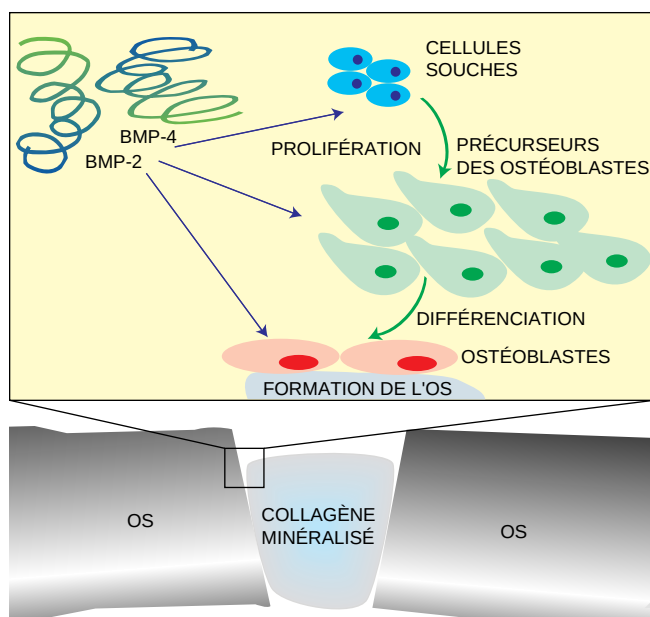
Chez les organismes supérieurs, l'os remplit deux fonctions physiologiques : une fonction de soutien et de protection des organes vitaux, grâce à sa résistance et à sa solidité, et une fonction métabolique. Au cours de son développement normal, l'os est constamment remodelé. Deux types de cellules assurent cette fonction : les ostéoclastes détruisent l'os, tandis que les ostéoblastes le construisent.

En 1965, M. R. Urist a montré que, chez l'animal, l'implantation d'os déminéralisé dans un site non squelettique (abdomen ou muscle) déclenche l'ostéogenèse (formation osseuse). La formation des os est contrôlée par des protéines nommées *bone morphogenetic proteins* ou BMP (protéine de la morphogenèse osseuse).

Après une cassure, comment l'os se consolide-t-il ? Les protéines BMP présentes dans l'os lui-même déclenchent la prolifération de cellules pouvant donner naissance à des populations cellulaires différentes. Après différenciation, sous l'action des BMP, les ostéoblastes présents à proximité de la cassure synthétisent une protéine, le collagène. Ces cellules adhèrent aux fibres existantes et continuent la production du collagène dont la minéralisation donnera de l'os nouveau.

Pour tester l'action de ces protéines osseuses, on les a purifiées, puis asso-

ciées à un support qui les protège et qui sert aussi de germe, pour l'édification de l'os néoformé. Ainsi l'effet d'une protéine osseuse la BMP-2 (produite par recombinaison génétique) a été évalué sur des fémurs de rats fracturés. La BMP-2 associée à une matrice de collagène, utilisée comme support, montre à l'examen radiologique une augmentation significative de la construction osseuse. De plus, des tests mécaniques ont révélé



Après une fracture, les protéines BMP activent les mécanismes de la formation osseuse, en provoquant la prolifération et la différenciation de cellules souches en ostéoblastes. Les ostéoblastes migrent vers la matrice de collagène, y adhèrent et synthétisent du collagène qui, en se minéralisant, forme de l'os. Véritables usines à BMP, les cellules hôtes en contact avec une éponge imbibée d'ADN codant une BMP favorisent la consolidation des fractures osseuses.

une parfaite union fonctionnelle entre les bords du défaut et l'os nouvellement formé. Chez le babouin, animal plus proche de l'homme que le rat ou la souris, plusieurs études réalisées avec la BMP associée à du collagène ont également montré une parfaite cicatrisation de l'os sectionné.

Jusqu'à aujourd'hui, toutes les études réalisées avec les BMP utilisaient de grandes quantités de protéines purifiées,

coûteuses à produire. De plus, ces protéines sont rapidement dégradées par diverses enzymes. Aussi, la durée de vie des protéines utilisées directement n'est que de 90 secondes, limitant leur action. D'autre part, les fortes doses utilisées sont toxiques.

UN PANSEMENT ÉPONGE

Pour pallier ces inconvénients, J. Bonadio et ses collègues ont eu l'idée de tester, non des protéines BMP purifiées, mais directement de l'ADN qui code l'une de ces protéines, la BMP-4. On a retiré cinq millimètres d'un os d'une quinzaine de rats de laboratoire. Dans un cas, on a utilisé des morceaux d'éponges naturelles imbibées de collagène et d'ADN codant la BMP-4. Dans d'autres cas, on ajoutait également un fragment d'ADN codant une hormone qui régule le métabolisme osseux. Ces éponges étaient ensuite implantées à la place du morceau d'os manquant. Le résultat est spectaculaire : neuf semaines

suffisent pour obtenir une cicatrisation osseuse parfaite et, lorsque les deux ADN sont associés, le temps de consolidation est réduit de moitié. Cette façon d'administrer localement l'ADN codant des protéines participant à la formation osseuse protège les protéines des dégradations. Les BMP-4 sont produites par des cellules de la peau (les fibroblastes) présentes en grande quantité à proximité d'une blessure. Les mécanismes de protection interne de ces cellules évitent à la BMP produite d'être dégradée trop rapidement. De plus, comme la production des protéines est lente, l'organisme ne reçoit plus des doses de BMP élevées, ce qui évite toute toxicité.

Cette accélération de la consolidation des fractures osseuses ouvre des perspectives en chirurgie orthopédique. D'autres facteurs de croissance et de différenciation interviennent pour la formation osseuse, et des expérimentations avec les ADN codant ces facteurs sont en cours. Après avoir montré que cette méthode permet une reconstruction osseuse de grande taille (par exemple chez le singe), cette approche peu coûteuse devrait rapidement être testée chez l'homme.

Abderrahim LOMRI,
INSERM Unité 349, Paris