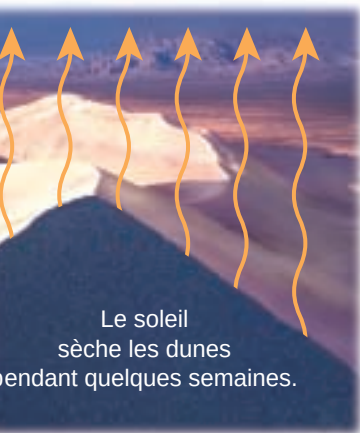


du Sud-Est de la Californie, confirmant la théorie de Bagnold : les seules différences entre les mugissements et les crissements résultent des mécanismes d'avalanche ou de compression qui les provoquent.

Il existe cependant des différences entre des sables mugissants que l'on peut faire crisser en laboratoire et les sables connus pour crisser dans leur milieu naturel : P. Haff a montré que les spectres des sables mugissants sont riches, tandis que ceux des crissements sont plus purs.

Quelques lois sont maintenant établies : tout d'abord, les dunes mugissantes sont éloignées de la source des sables ; les grains ont été ainsi transportés par le vent sur de longues distances, et ils ont été polis et triés avant d'être déposés au sommet des dunes. Les émissions ont lieu quand la pluie a chassé les poussières et les plus petites particules d'entre les grains : après un séchage d'une à deux semaines, le vent doit être suffisamment fort pour soulever le sable au-dessus de la crête de la dune et pour provoquer des avalanches.

Le paramètre le plus important pour l'émission sonore est la résistance du sable aux contraintes de cisaillement : un sable dont les grains sont trop serrés bouge difficilement, tandis qu'un sable aux grains plus espacés se comporte comme un fluide, qui transmet mal les contraintes de cisaillement. Si le mécanisme d'émission sonore reste insuffisamment connu dans le détail, on sait bien que les caractéristiques des grains déterminent les sons produits.

L'étude des sables d'Hawaii semble intéressante, car les dunes des îles de Kauai et de Niihau, en retrait des plages, sont les seuls exemples connus de dunes mugissantes qui

ne soient pas dans un désert. Leur sable, plus humide que celui des déserts, est composé de grains inhabituellement gros (de l'ordre de 0,46 millimètre de diamètre). En outre, la nature chimique des grains – du calcaire provenant de coquilles – est différente de celle des autres sables mugissants, tous composés de quartz. Comme l'exception permet de mieux comprendre la règle, l'étude de ces sables pourrait être très profitable. Les sons de ces sables peuvent être reproduits dans des récipients ou dans des sacs, mais, pour vraiment comprendre comment ils sont émis, un examen approfondi du processus de cisaillement est nécessaire. On pourrait notamment effectuer une analyse radiographique, afin de comprendre la propagation des contraintes de cisaillement.

La piézo-électricité des grains de sable doit également être explorée : lorsqu'un grain de silice est comprimé, des charges électriques de signes opposés apparaissent à ses extrémités. Ces charges peuvent contribuer à provoquer une attraction mutuelle des grains de sable. En 1936, Lewis a observé sur les glissements lents des sables mugissants du Kalahari que les grains se collaient les uns aux autres pour former des filaments de plusieurs centimètres. À l'aide d'électroscopes, on a vérifié que ces ensembles sont chargés électriquement, mais on ignore si la neutralisation des charges électriques dans le sable a une influence sur les sons émis. De même, on n'a pas établi que la présence d'effets électriques explique l'absence d'émissions sonores dans les sables humides.

L'analyse de la composition minérale des grains des sables constitue enfin une voie de recherche promet-

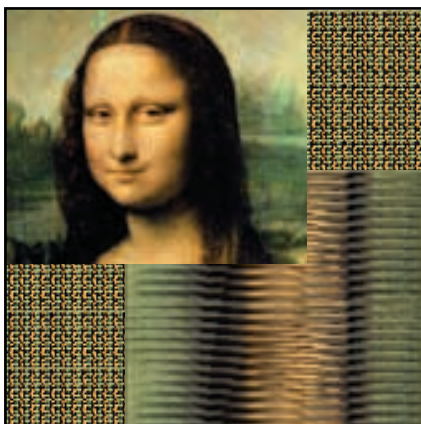
teuse pour mieux comprendre l'importance des phénomènes de cisaillement : connaissant cette composition, les chimistes pourront fabriquer des sables mugissants synthétiques, avec lesquels les physiciens essaieront de résoudre le mystère des sables qui chantent.

Franco NORI, Paul SHOLTZ et Michael BRETZ étudient les sables mugissants à l'Université d'Ann Arbor.

R.A. BAGNOLD, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, Londres, 1954.

J.F. LINDSAY, D.R. CRISWELL, T.L. CRISWELL et R.S. CRISWELL, *Sound-Producing Dune and Beach Sand*, in *Geological Society of America Bulletin*, vol. 87, pp. 463-473, 1976.

Paul SHOLTZ, Michael BRETZ et Franco NORI, *Sound-Producing Sand Avalanches*, à l'adresse : http://www-personal.engin.umich.edu/~nori/booming_sand.html du réseau Internet.



Images brouillées, images retrouvées

JEAN-PAUL DELAHAYE • PHILIPPE MATHIEU

La transformation du boulanger, du photomaton, et les charmes de l'arithmétique.

Le boulanger prend la pâte, l'étire, la replie, puis recommence. C'est la «transformation du boulanger» que les spécialistes du chaos utilisent depuis 20 ans pour expliquer les subtiles interactions entre l'ordre et la complexité, entre le déterminisme et le hasard. Par cette transformation, croit notre boulanger, les particules de pâte se mélangent, et sa pâte s'homogénéise. Est-ce certain ?

Notre projet ici sera modeste et ludique : nous allons utiliser la métaphore pâtissière pour maltraiter des images et observer quelques phénomènes étranges. La transformation du boulanger et celle que nous appellerons *la transformation du photomaton* nous feront assister en direct au brouillage progressif d'une image et à son «débrouillage» inattendu.

Un logiciel pour Windows 95 réalisé à l'occasion de cet article est disponible. Les lecteurs pourront soit le demander à la revue (envoyer une disquette et une enveloppe timbrée pour le retour), soit le télécharger à partir du site Internet : <http://www.lifl.fr/~mathieu/transform>.

Le site contient des illustrations complémentaires et propose d'autres transformations avec lesquelles vous pourrez expérimenter en suivant les indications données dans cet article.

LES MÉLANGES BIJECTIFS DE PIXELS

Une image d'ordinateur est composée d'un nombre fini de points appelés pixels, qu'il est possible de traiter individuellement et donc de mélanger comme on

mélange des cartes à jouer (nous reviendrons sur ce parallèle).

Les mélanges de points les plus intéressants sont les mélanges bijectifs (appelés aussi permutations) : chaque point d'une image est envoyé à la place d'un autre point dans la transformée, et aucun point n'est perdu. Après un mélange bijectif, l'image est toujours présente (puisque aucun point n'a été effacé), mais elle est mélangée et parfois méconnaissable.

Le mélange bijectif ayant été effectué, on peut l'appliquer une deuxième fois, puis une troisième, etc. On obtient ainsi une série d'images complètes, mais où l'on éprouve des difficultés – en général croissantes – à reconnaître l'image de départ.

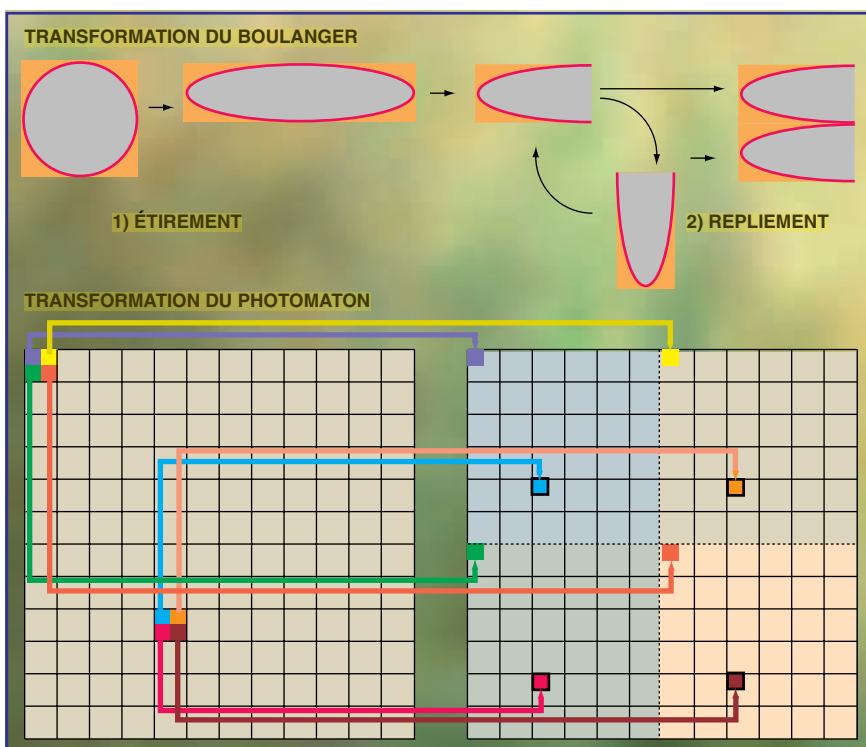
Avec des images composées d'un nombre fini de pixels (c'est toujours le cas en informatique), un miracle se produit : au bout d'un certain temps, l'image de départ réapparaît absolument identique. Ce temps de retour est parfois énorme, mais nous verrons comment le calculer.

Dans le cas continu – c'est-à-dire quand on considère une image comportant une infinité de points –, ce retour à l'ordre est exceptionnel. Cependant, pour certaines transformations, il se produit approximativement ce qui intéresse les théoriciens de l'ordre et du désordre. Le retour approximatif dans le cas continu n'est peut-être pas étonnant puisque, dans le cas fini, le retour exact est une règle absolue : quel que soit le mélange bijectif considéré, le retour au départ se produit.

Partons pour ce voyage d'image en image cadencé par les transformations bijectives qui nous feront observer de curieuses brusques réapparitions de l'ordre là où le chaos semble s'imposer.

LE BOULANGER DISCRET

Commençons par la transformation du boulanger. Nous partons d'une image de n lignes et m colonnes. Pour la couper en deux selon la hauteur et la largeur,



1. Le déplacement des points dans les transformations du boulanger et du photomaton.