

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



POUR LA
SCIENCE
400 pages

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

ter et la mission *Cassini* vers Saturne coûteront, à elles deux, plus de six milliards de francs.

De surcroît, une mission vers Mercure pose une difficulté technique particulière : la sonde devrait être protégée contre l'intense rayonnement solaire, auquel s'ajoute l'énergie solaire réfléchie par la planète (ce rayonnement pourrait même être encore plus dommageable que le rayonnement direct du Soleil). Malgré toutes ces difficultés, un projet de mission vers Mercure a été soumis en 1994 et deux en 1996.

Le projet de 1994, *Hermès 94*, aurait utilisé un dispositif de propulsion à l'hydrazine nécessitant plus d'une tonne de carburant. La plus grande partie du combustible aurait permis au vaisseau spatial de réduire la taille de l'orbite. Nous n'aurions pu éliminer la charge de carburant qu'en multipliant les rencontres avec d'autres planètes, ce qui aurait ralenti le vaisseau. Ces détours auraient allongé le trajet, qui doit être le plus court possible, car les rayons cosmiques endommagent les instruments embarqués, dont la durée de vie est ainsi limitée. Nous nous proposons de photographier toute la surface de Mercure avec une résolution inférieure à un kilomètre. Nous voulions ensuite relier ces cartes topographiques avec des cartes du champ gravitationnel et du champ magnétique. Finalement, la NASA rejeta le projet en raison de son coût élevé et des risques d'échec.

En 1996, une autre équipe proposa un nouveau projet moins coûteux et plus bref. La quantité de carburant n'aurait pas excédé 300 kilogrammes, car le vaisseau aurait été équipé d'un moteur à propulsion ionique. Ce moteur d'un type nouveau aurait utilisé l'énergie solaire pour ioniser des atomes de xénon et pour accélérer les ions à l'aide d'un champ électrique. La mission *Hermès 96* aurait atteint Mercure une année avant *Hermès 94*. Pourtant, la NASA n'a pas retenu le projet, car elle a jugé que le moteur solaire était encore trop expérimental.

La NASA s'est aussi intéressée à un troisième projet, *Messenger*, soumis dans le cadre des missions *Discovery*. Le vaisseau, conçu par des ingénieurs du Laboratoire de physique appliquée du Maryland, aurait été équipé d'un moteur à propulsion classique. Deux instruments auraient déterminé les proportions des éléments les plus abon-

dants de la croûte rocheuse. Toutefois, la charge supplémentaire due à ces deux instruments aurait imposé d'allonger le trajet : le vaisseau spatial aurait dû passer deux fois à proximité de Vénus et trois fois à proximité de Mercure, avant de se mettre en orbite. Le trajet Terre-Mercure aurait duré plus de quatre ans, le double de ce qui était prévu pour *Hermès 96*. *Messenger* aurait aussi été la mission *Discovery* la plus onéreuse des derniers projets qui ont été évalués (elle a été estimée à 1,2 milliard de francs). C'est vraisemblablement en raison de son coût que le projet n'a pas été sélectionné.

Les personnes qui décident des missions *Discovery* prennent des avis de spécialistes qui ne travaillent pas tous à la NASA, et qui privilégient souvent les techniques éprouvées au détriment des innovations. Pour pallier cette insuffisance, la NASA a décidé de créer un nouveau programme qui s'intéresse exclusivement aux projets futuristes. Ainsi une des missions doit évaluer dans l'espace diverses techniques innovantes qui ont été proposées. En juillet 1998, le vaisseau *Deep Space One*, propulsé par un moteur ionique, entamera un voyage de trois ans en direction de l'astéroïde McAuliffe (du nom de l'astronaute Christa McAuliffe, morte dans l'explosion de *Challenger*), de la planète Mars et de la comète West-Kohoutek-Ikamura. *Deep Space One* devra prouver l'efficacité de la propulsion ionique. Une mission à propulsion ionique vers Mercure est étudiée par l'Agence spatiale européenne pour 2008-2010. Ces missions devraient percer les mystères de la lointaine planète.

Robert NELSON travaille au Laboratoire *Jet Propulsion*, à Pasadena. Il a été l'astronome principal des projets *Hermès 94* et *Hermès 96*, et participe à la mission *Deep Space One* qui sera lancée en 1998.

Atlas of Mercury, sous la direction de M.E. Davies, D.E. Gault, S.E. Dwornik et R.G. Strom, NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., 1978.

Mercury, sous la direction de F. Vilas, C.R. Chapman et M.S. Matthews, University of Arizona Press, 1988.

The New Solar System, sous la direction de J.K. Beatty et A. Chaikin, Cambridge University Press et Sky Publishing Corporation, 1990.

La musique des sables

FRANCO NORI • PAUL SHOLTZ • MICHAEL BRETZ

Pourquoi certains sables crissent, tandis que d'autres mugissent.

Depuis des millénaires, les Bédouins traversant les déserts redoutent les démons et les fantômes dont ils croient entendre les cris. Marco Polo, également, a cru que des esprits mauvais des déserts emplissaient l'air de musiques de toutes sortes, de roulements de tambour et de claquements de mains. Les explications modernes de la musique des sables sont plus rationnelles : ces sons proviendraient d'effondrements des dunes.

Une trentaine de dunes musicales ont été identifiées dans les déserts et sur les plages d'Afrique, d'Asie, d'Amérique du Nord et d'ailleurs. Selon les cas, ces dunes émettent des sons de cloches, de trompettes, d'orgue, de cornes de brume, de canon, d'avion volant à basse altitude, des sifflements de fils télégraphiques dans le vent ou, encore, des gémissements. Comment naissent ces sons ?

Certains géologues ont cherché l'origine de la diversité des sons dans les différences de taille et de forme des grains ; d'autres ont évoqué des mécanismes d'interactions différents, mais les études ont été peu systématiques, et aucune théorie n'expliquait correctement la production de ces sons. Nos travaux ne résolvent pas complètement le problème, mais ils posent les bases d'une élucidation longtemps cherchée.

Sons et musiques

Certains sons produits par les sables n'ont rien d'énigmatique : quand on marche sur une plage, le sable crisse sous les pieds. Ce type de comportements s'observe sur toutes les plages : au bord des mers, des lacs ou des rivières du monde entier. En revanche, les sables mugissants ne se font presque exclusivement entendre qu'aux confins des déserts ou loin des rivages : ce sont eux qui ont étonné Marco Polo ou Charles Darwin.

Ceux qui les ont entendus les comparent aux sons d'instruments de musique. Parfois, ils sont émis à intervalles réguliers, tels des roulements de tambours ou de tambourins. Dans d'autres cas, ils ressemblent plus à des sons de trompettes ou de cloches. Des tonalités aussi cristallines ne se produisent que lorsque de petites quantités de sable se mettent en mouvement sous l'action d'une force qui ne crée qu'une seule fréquence. Dans le Nevada, en 1994, nous avons observé qu'une petite avalanche de sable émettait des sons similaires aux bourdonnements lents d'instruments utilisés par les aborigènes australiens.

La musique du désert

En crissant, les sables produisent des sons à des fréquences comprises entre 500 et 2 500 hertz durant moins d'un quart de seconde. Le son est composé d'un fondamental et de quatre ou cinq harmoniques. Les dunes mugissantes, d'autre part, produisent souvent des sons plus sourds, de fréquence inférieure, comprise entre 50 et 300 hertz ; ils durent généralement moins de quelques secondes, mais les plus grosses dunes émettent parfois pendant 15 minutes. Ces sons sont rarement purs : ils contiennent de nombreuses fréquences proches, mais aucun harmonique d'une fréquence fondamentale n'a jamais été observée.

Ces différences importantes ont fait conclure que les mécanismes d'émission des divers sons devaient être différents. Pourtant Peter Haff, de l'Université Duke, a fait crisser du sable de dunes mugissantes, prouvant qu'il existe un lien entre les deux phénomènes. Dans tous les cas, les sons résultent du déplacement des grains. Pour les crissements, la pression sur les grains supérieurs oblige les sables à se tasser et à se déplacer vers l'extérieur, sous les pieds. Dans

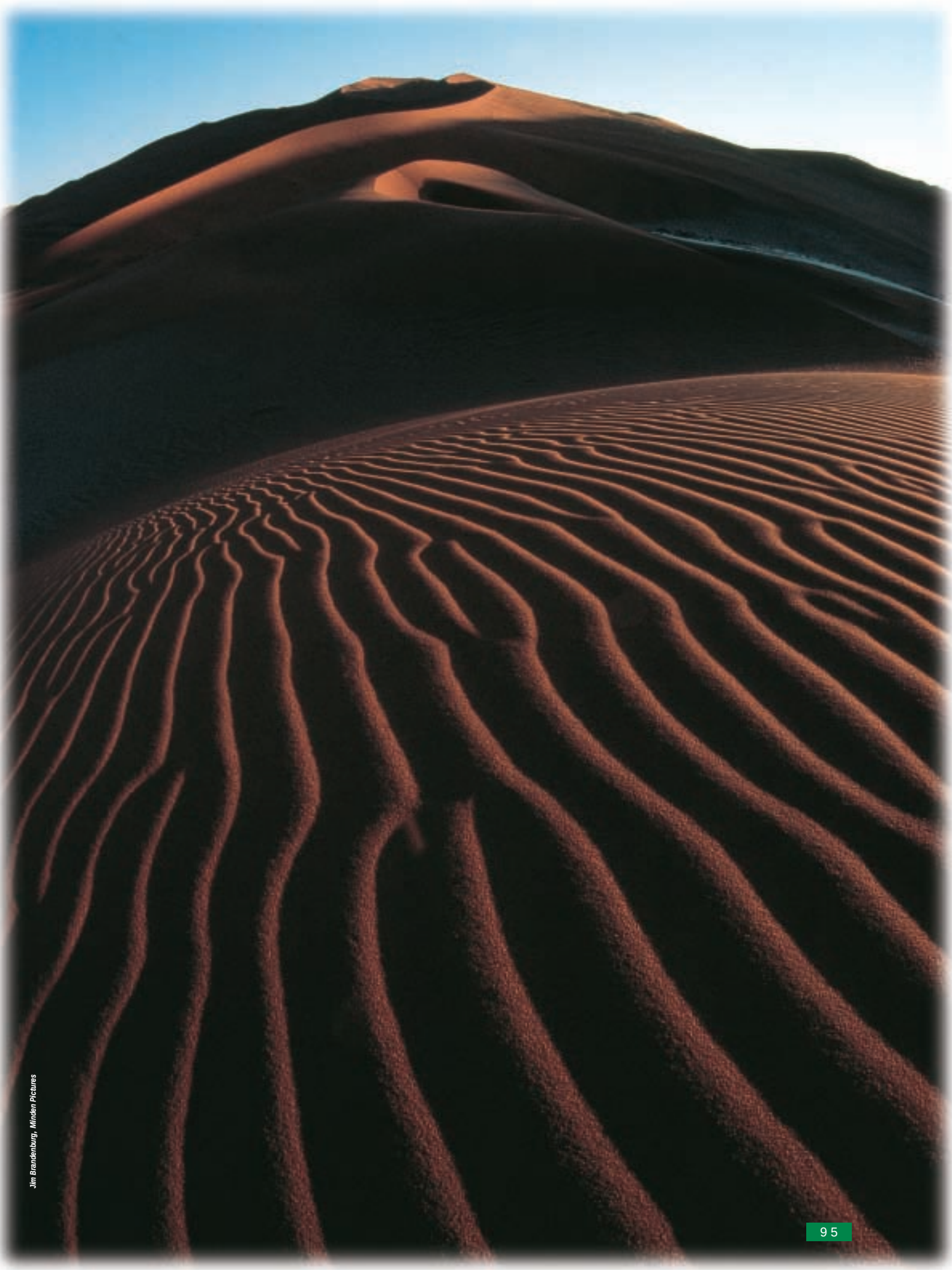
le cas des dunes mugissantes, les déplacements se produisent pendant des avalanches. On doit donc élucider le mécanisme des avalanches pour comprendre la composition spectrale des mugissements émis.

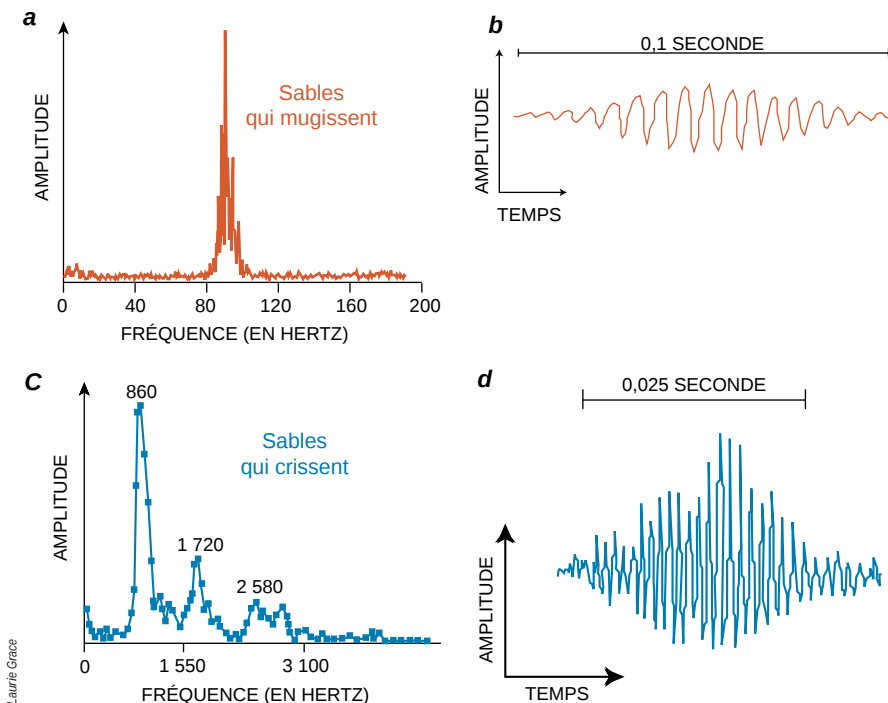
Pour qu'une avalanche se produise, le vent doit avoir donné à la dune un angle de talus égal à 35 degrés environ (pour le sable sec du désert). Lorsque cet angle est atteint, le sable du sommet est instable : les grains des couches supérieures glissent sur les grains sous-jacents, tombant dans les espaces libres, rebondissant et poursuivant leur descente. L'émission des sons résulte probablement de ce mouvement d'ensemble. Les plus grosses avalanches, où des pans entiers de sable glissent en bloc, sont les plus bruyantes. Dans certains endroits, lorsque beaucoup de sable glisse, les sons sont perçus jusqu'à dix kilomètres.

Les mystères qui entourent ces vibrations sont nombreux. Tout d'abord, on comprend mal la richesse de leur composition harmonique, c'est-à-dire la raison du grand nombre des fréquences simultanément émises. Au cours des années 1970, David Criswell et ses collègues de l'Université de Houston ont trouvé que chacune des fréquences semble correspondre à un temps de descente et de rebond propre.

La gamme de fréquences émises dépend de nombreux facteurs. Les émissions sonores des Montagnes de sables du Nevada sont à des fréquences comprises entre 50 et 80 hertz, alors que celles de Korizo, en Libye, s'échelonnent de 50 à 100 hertz, et celles du désert du Kalahari, en Afrique du Sud, de 130 à 300 hertz. De telles émissions, probablement

1. LES DUNES DE NAMIB, en Afrique du Sud, produisent des sons qui s'entendent à des kilomètres quand se forment des avalanches.





2. LES SONS ÉMIS PAR LES SABLES MUGISSANTS ont des fréquences proches d'une fréquence centrale (a) et ils durent longtemps (b). Les crissemments, au contraire, contiennent des harmoniques d'une fréquence fondamentale (c), mais ils sont très brefs (d).

dues aux divers modes de vibrations lors du mouvement des plaques de sable, sont rarement harmonieuses. Causées par le frottement de grandes quantités de sable, elles sont sourdes, voire assourdissantes, et les vibrations qui les accompagnent peuvent être si fortes qu'elles renversent un individu.

Examinons les phénomènes agissant sur les grains. La taille moyenne de ces derniers, qu'ils produisent des sons ou non, est de l'ordre de 0,3 millimètre. Habituellement les grains des dunes mugissantes sont de tailles très homogènes, en particulier au sommet de la crête, d'où le son est généralement émis. Une telle homogénéité favorise le glissement des couches de sables : si des grains de différentes tailles étaient mélangés, les petits grains viendraient entraver le mouvement des plus gros.

Toutefois, cette seule homogénéité n'explique pas toutes les émissions sonores. En Libye, dans le Korizo ou dans le Gelf Kebib, la règle semble même violée : les grains sont de tailles exceptionnellement variées. De surcroît, des dunes parfaitement silencieuses contiennent quelquefois des grains similaires aux grains de dunes sonores.

En revanche, les grains de sable des dunes mugissantes ont souvent

des surfaces inhabituellement régulières, avec des défauts de taille inférieure à quelques micromètres. Ces dunes, aux confins de grandes étendues de sable, sont composées de grains qui se sont usés en roulant dans le désert sur de longues distances. De même, les grains remaniés pendant très longtemps au cours des mouvements des dunes sont érodés. Les sables qui crissent, également, sont généralement très lisses.

Un examen attentif des sables des dunes mugissantes des Montagnes de sable ou du Kalahari montre pourtant que les grains ne sont pas tous sphériques ou fortement usés. En 1936, à Pretoria, A.D. Lewis obtint des émissions sonores à partir de grains de sel de forme cubique. Inversement, on n'a pas obtenu de sons avec des billes de verre : si la régularité de la surface des grains est une condition nécessaire à l'émission de sons, une rugosité minimale demeure indispensable.

En outre, l'humidité du sable peut modifier les frottements entre les grains ou provoquer des agrégations qui bloquent les mouvements de cisaillement. Les émissions de sons se produisent dans la partie des dunes qui sèche le plus vite : bien que les précipitations soient rares dans le désert, les dunes retiennent bien l'eau,

mais le sable sèche rapidement près de la surface et, notamment, près de la crête des dunes.

Dans la partie de la crête située sous le vent, la régularité des grains et l'absence d'humidité favorisent la production de sons au cours des mouvements du sable : comme le vent dépose préférentiellement ce dernier près du sommet, sur le bord versant de la dune, la pente augmente lentement jusqu'à ce qu'une avalanche se produise.

Généralement les avalanches se manifestent sous la forme du glissement de grandes plaques, qui se détachent du sommet des dunes. Dans les dunes mugissantes, ces plaques ne ralentissent pas lorsqu'elles glissent sur des pentes plus faibles, mais leur partie supérieure s'effondre et percute leur partie inférieure, comme une vague qui déferle. La rupture finale de la plaque de sable est inhabituellement turbulente.

Un siècle d'études

L'étude des sables mugissants a été compliquée par la rareté du phénomène et par la difficulté de reproduire des mugissements au laboratoire. De surcroît, la confusion qui a régné pendant des années entre les crissemments et les autres émissions sonores gêne la lecture des articles scientifiques anciens.

Le géologue américain Carrington Bolton publia l'une des premières études consacrées à ce phénomène en 1889 : il proposa que les émissions sonores soient dues à un mince film d'impuretés qui auraient été progressivement déposées par l'évaporation de l'eau. Les vibrations de l'air, entre les plans de cisaillement, auraient été à l'origine des émissions sonores. L'intensité et la hauteur des sons auraient été déterminés par les caractéristiques des grains. Bien qu'il se soit plus particulièrement intéressé aux crissemments, C. Bolton utilisa le même modèle pour expliquer les émissions sonores des dunes mugissantes.

À la même époque, le Britannique Cecil Carus-Wilson proposa que les crissemments soient dus aux frottements entre les grains. Il fut le premier à établir de manière crédible que les grains des sables mugissants étaient habituellement sphériques, très érodés et de tailles homogènes. Ces idées furent



Laurie Grace



Avec l'autorisation de Michael Bratz



Terrence Moore



Douglas Vaughn, Peter Arnold, Inc.

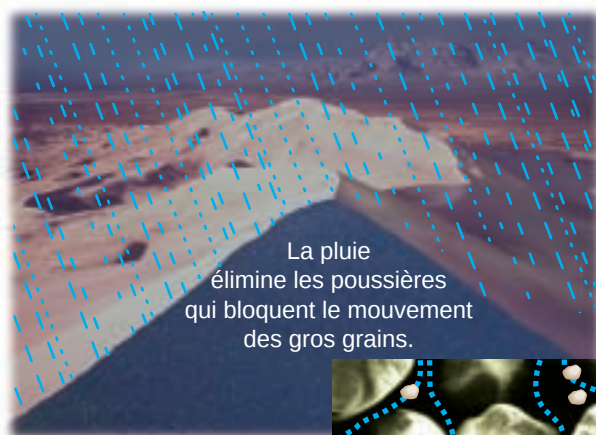


Jim Brandenburg, Minden Pictures

2. DES SABLES MUGISSANTS ont été entendus dans l'ensemble du monde (*points rouges*). Quelques dunes mugissantes sont représentées dans la partie inférieure de l'image.



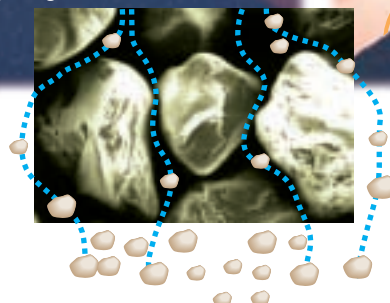
Le vent transporte le sable sur de longues distances ; il le polit et modèle les dunes.



La pluie élimine les poussières qui bloquent le mouvement des gros grains.



3. LES DUNES émettent des sons lorsque plusieurs conditions sont réunies. D'abord, des grains propres, secs et polis doivent être rassemblés au sommet de la dune. Une avalanche peut alors se produire lorsque la dune fait un angle de plus de 35 degrés environ. Les couches supérieures de sable se déplacent alors plus rapidement que les couches inférieures (schéma a, page ci-contre), se décalant alternativement vers le haut et vers le bas entre les grains (b, c, d). Ces mouvements répétitifs et organisés provoquent l'émission de sons.



Avec l'autorisation de F. Nori, P. Schultz et M. Bretz



4. LES GRAINS du sable recueilli sur une plage du lac Huron, dans le Michigan, sont anguleux (micrographie électronique de gauche). Les grains du sable crisseur des plages du lac Michigan

sont plus lisses (au milieu), tandis que le sable mugissant des Montagnes de sable (Nevada) présente des grains encore plus réguliers (à droite).

a posteriori quantifiées par D. Criswell et ses collaborateurs.

Puis, en 1966, l'ingénieur britannique R.A. Bagnold publia, dans les *Comptes rendus de l'académie royale des sciences britannique*, un article sur les contraintes dans les sables secs, les mécanismes de déplacement des grains et leurs relations avec l'émission sonore. Bagnold proposa que les crissements et les autres émissions sonores aient la même cause : la «dilatance» (voir la figure 3, à droite). Cette dilatance correspond à l'augmentation de volume qui résulte du glissement des grains, qui doivent se soulever un peu pour changer de position, en descendant d'un tas. De ce fait, lors du glissement d'une plaque, le volume d'air compris dans un tas (ou dans une dune) augmente et diminue alternativement, à mesure que les grains en mouvement se logent entre les grains inférieurs, puis se soulèvent.

Dans cette hypothèse d'un son dû à la dilatance, les fréquences des

sons produits par la vibration collective des grains varient comme l'inverse de la racine carrée de la taille moyenne des grains. Bien qu'élégant, le mécanisme ne permet pas de décrire complètement le phénomène des mugissements. Il n'explique pas, par exemple, comment quatre ou cinq modes de vibration sont engendrés à partir d'une seule avalanche de grains, et il n'explique pas non plus les sons graves et isolés qui accompagnent ce type d'événements.

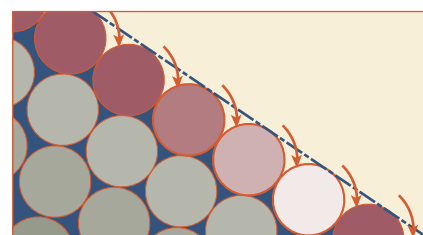
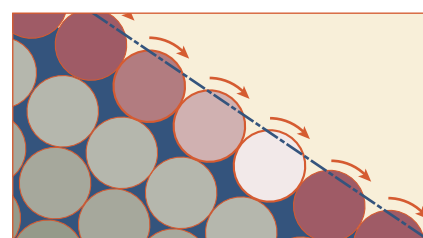
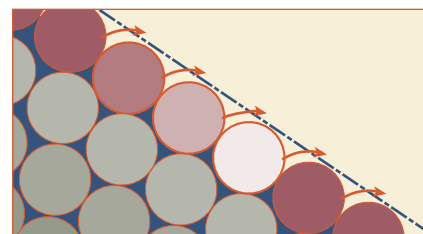
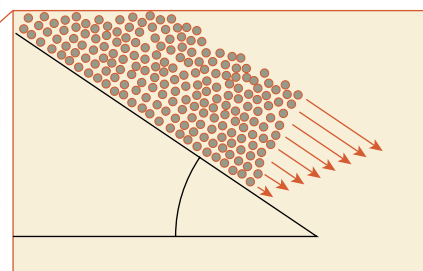
Les théories de Bagnold s'appliquent mieux aux crissements : selon les contraintes appliquées, différents types de cisaillements se produisent sur des plans, de manière analogue à ce qui se passe lors des avalanches. Seule l'amplitude de la force appliquée est différente. Là où le simple poids du sable provoque l'avalanche et induit des résonances, la pression sous le pied provoque des contraintes qui se traduisent par des crissements et des craquements ; les fréquences des sons émis

dans ce cas sont mieux en accord avec la théorie de Bagnold que dans le cas des émissions sonores des dunes mugissantes.

Crissements dans les chants

Les sables des dunes mugissantes crissent-ils également ? Cette idée fut avancée dès 1889 : Bolton écrivit que les sables d'Hawaii possédaient à la fois les propriétés sonores de ceux des plages et des déserts. Pendant les avalanches, ils produisent des sons analogues à ceux d'une dune égyptienne – le Jebel Nagous – et des ululements analogues à ceux produits par des sables de plages comme les sables d'Eigg, en Écosse, ou ceux de Manchester, dans le Massachusetts, quand ils sont secoués dans un sac.

Au cours des années 1970, P. Haff réussit à produire des crissements de haute fréquence en utilisant des sables provenant des dunes mugissantes



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-

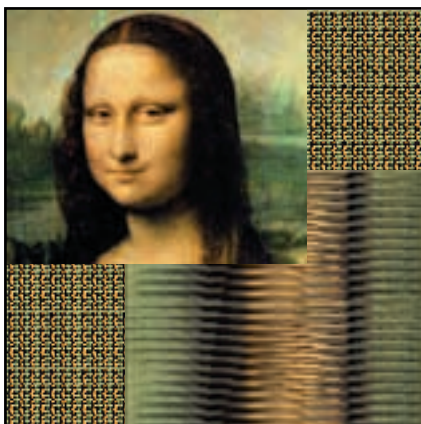
teuse pour mieux comprendre l'importance des phénomènes de cisaillement : connaissant cette composition, les chimistes pourront fabriquer des sables mugissants synthétiques, avec lesquels les physiciens essaieront de résoudre le mystère des sables qui chantent.

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.

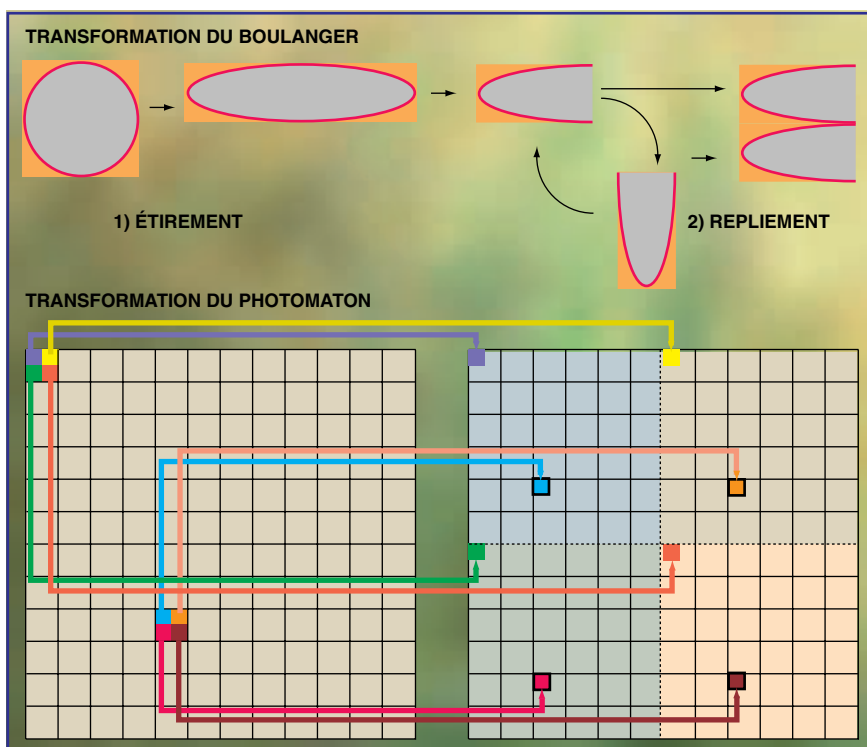
Avec des images composées d'un nombre fini de pixels (c'est toujours le cas en informatique), un miracle se produit : au bout d'un certain temps, l'image de départ réapparaît absolument identique. Ce temps de retour est parfois énorme, mais nous verrons comment le calculer.

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.