

les étoiles sont plus brillantes à l'approche de leur activité magnétique maximale. Certaines étoiles ont une variation d'éclat aussi faible que le Soleil – 0,1 pour cent sur le dernier cycle de 11 ans –, alors que la variation d'éclat d'autres étoiles atteint 0,6 pour cent lors d'un cycle. Aujourd'hui le Soleil varierait donc moins que par le passé.

Grâce aux observations stellaires des dernières années, les astrophysiciens ont retracé l'évolution des étoiles de type solaire. Les étoiles jeunes ont une période de rotation relativement courte, de quelques jours, et une activité magnétique intense et irrégulière. Des variations d'éclat de quelques pour cent accompagnent ces variations d'activité magnétique. Les étoiles jeunes sont toutefois moins lumineuses lors du pic d'activité, sans doute parce que les taches sombres sont si grandes qu'elles dominent les facules brillantes qui les entourent. Quand les étoiles vieillissent, leur rotation ralentit et leur activité magnétique décroît. Des minimums de Maunder apparaissent pour ces étoiles «plus vieilles». Leur éclat est maximum lorsque leur nombre de taches est élevé. La luminosité peut alors varier de un pour cent au cours d'un cycle.

Quelle influence sur la Terre?

Ces résultats indiquent un changement de luminosité d'au moins 0,4 pour cent entre la phase cyclique et le minimum de Maunder. Cette valeur correspond à une décroissance de l'émission nette d'énergie du Soleil de un watt par mètre carré au sommet de l'atmosphère terrestre. Des simulations effectuées au Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, montrent qu'une telle accalmie, si elle dure plusieurs décennies, peut refroidir la température moyenne de la Terre de un ou deux degrés. Ainsi s'expliquerait le refroidissement observé durant le minimum de Maunder.

Toutefois, les gaz à effet de serre libérés par l'activité humaine depuis le début de la Révolution industrielle, à la fin du XVIII^e siècle, peuvent réchauffer la Terre, en piégeant la chaleur qui autrement serait rayonnée vers l'espace. Ce réchauffement équivaut à l'apport de deux watts par mètre carré au sommet de l'atmosphère. Le Soleil n'a apparemment fourni qu'entre 0,5 et 1 watt par mètre carré à la Terre ces

derniers siècles. Si le chauffage direct est le seul moyen par lequel le Soleil fait varier le climat terrestre, le rôle des gaz à effet de serre devrait être dominant et avoir supplanté toute influence de l'activité solaire.

Le lien entre climat et taches solaires semble néanmoins persistant. Au cours des 100 dernières années, les températures sur la Terre ont varié parallèlement aux cycles solaires. En outre, les cernes de croissance des arbres révèlent que, au cours des 5 000 à 6 000 dernières années, six minima du magnétisme solaire sur sept coïncident avec des périodes de refroidissement terrestre. Et le cycle des taches solaires est corrélé à la circulation des vents stratosphériques, pour des raisons encore mystérieuses. Ainsi le Soleil influencerait aussi la Terre par des voies indirectes, mais puissantes.

Les variations des émissions ultraviolettes solaires, par exemple, peuvent modifier la quantité d'ozone dans la haute atmosphère, de même que sa dynamique. Des simulations récentes indiquent également que des vents dans la stratosphère inférieure peuvent répercuter des variations de l'éclat du Soleil jusqu'à la troposphère, où elles interagissent plus directement avec le système climatique. Ces sujets sont maintenant vigoureusement débattus. La découverte des moyens par lesquels le Soleil réchauffe la Terre fournit des informations cruciales concernant le rôle joué par l'humanité – et le rôle joué par le Soleil – dans le mécanisme de modification du climat.

Elisabeth NESME-RIBES est astronome à l'Observatoire de Paris. Sallie BALIUNAS est chercheur au Centre d'astrophysique de Cambridge (Massachusetts). Dmitry SOKOLOFF est professeur de mathématiques au Département de physique de l'Université de Moscou.

Jean-Claude PECKER, *Sous l'étoile Soleil*, Fayard, 1984.

Peter FOUKAL, *Le Soleil : une étoile variable*, in *Pour la Science* n° 150, avril 1990.

Robert SADOURNY, *Le climat de la Terre*, Dominos Flammarion, 1994.

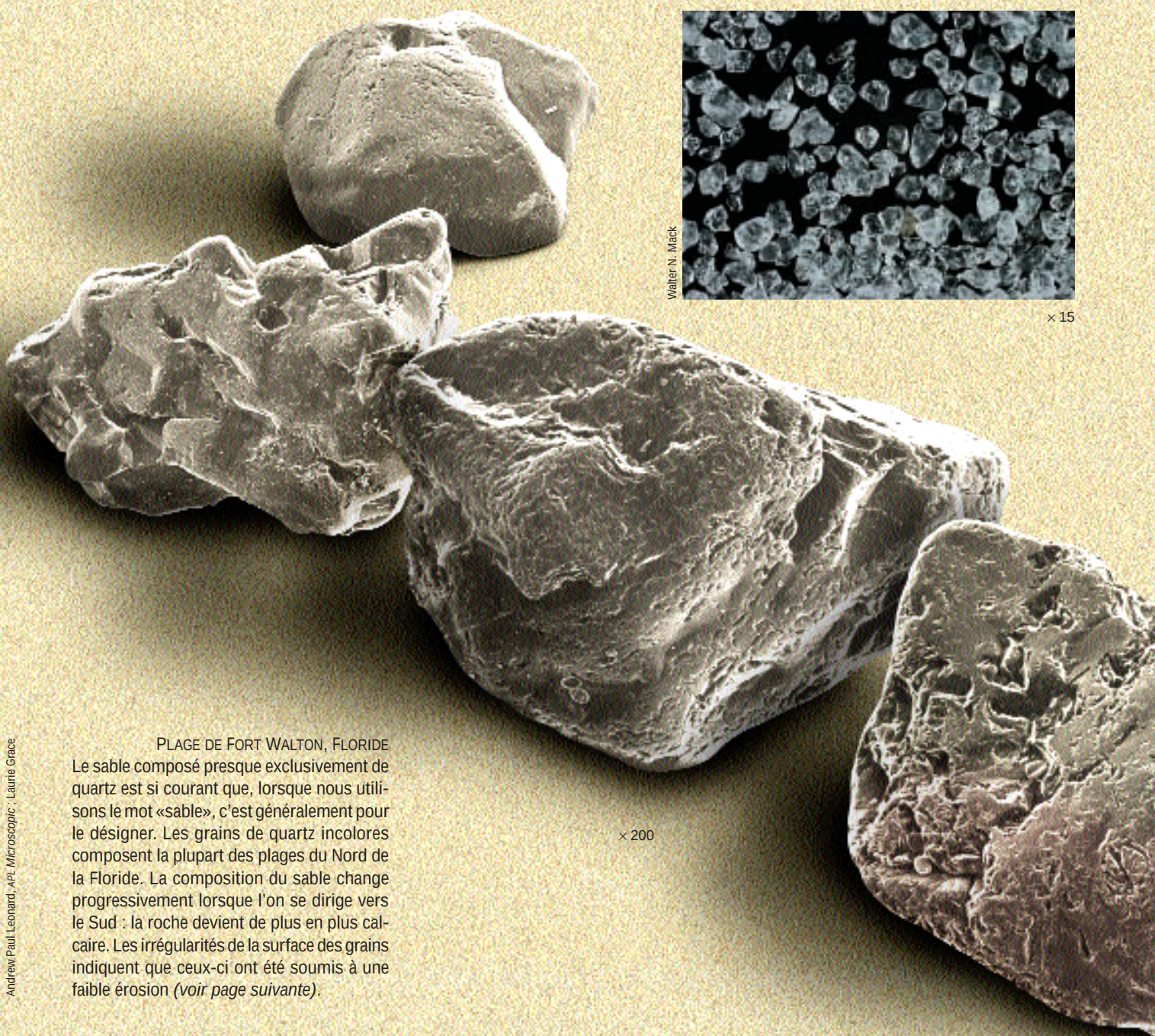
Kenneth J.H. PHILLIPS, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, 1992.

Helen WRIGHT, *Explorer of the Universe: A Biography of George Ellery*, American Institute of Physics Press, 1994.

Les sables du monde

WALTER MACK • ELIZABETH LEISTIKOW

*Le sable est l'un des matériaux les plus banals à la surface de la Terre.
C'est aussi l'un des plus variés.*



Walter N. Mack

× 15

× 200

PLAGE DE FORT WALTON, FLORIDE

Le sable composé presque exclusivement de quartz est si courant que, lorsque nous utilisons le mot «sable», c'est généralement pour le désigner. Les grains de quartz incolores composent la plupart des plages du Nord de la Floride. La composition du sable change progressivement lorsque l'on se dirige vers le Sud : la roche devient de plus en plus calcaire. Les irrégularités de la surface des grains indiquent que ceux-ci ont été soumis à une faible érosion (voir page suivante).

Aussi, lorsque vaincu il est enfin du sable, l'eau n'y pénètre pas exactement comme à la poussière. Gardant alors toutes les traces, sauf justement celles du liquide, qui se borne à pouvoir effacer sur lui celles qu'y font les autres, il laisse à travers lui passer toute la mer, qui se perd en sa profondeur sans pouvoir en aucune façon faire avec lui de la boue.

Le sable qui recouvre les plages est le produit d'une longue transformation géologique. En examinant les particules de sable sous un microscope, nous reconstituons des millions d'années d'histoire, des roches au sable, en passant par les rochers et les galets.

La plupart des sables proviennent de régions montagneuses. Les roches continentales – principalement du quartz et du feldspath – sont fracturées en rochers et en galets par des contraintes mécaniques (mouvements des glaciers, cycles de gel et de dégel). Les attaques chimiques de la végétation et de la pluie réduisent aussi ces rochers et ces galets en grains. Les géologues nomment «sable» les fragments de roche dont le diamètre est compris entre 0,05 et 2 millimètres. Les particules les plus grosses sont les «graviers», les plus petites le «limon».

Le ruissellement entraîne les grains dans les cours d'eau, où ils roulent et rebondissent au fond, puis s'accumulent, dans une zone de tourbillons ou à l'abri d'un rocher. Ils y restent parfois plusieurs années avant de poursuivre leur voyage : charriés par la rivière, ils s'éloignent alors des mon-

Le galet, Le parti pris des choses Francis PONGE

tagnes. Une partie du sable atteint le littoral, l'autre partie se dépose sur le trajet. Il faut près d'un million d'années à une rivière de taille moyenne pour déplacer ses dépôts sablonneux de 100 kilomètres. Pendant tout ce temps, le courant et les éléments chimiques contenus dans l'eau polissent les grains et les rendent brillants.

Le vent aussi transporte le sable. Partout où la végétation est clairsemée, il déplace les particules, qui sautent et tourbillonnent, s'élevant parfois jusqu'à 30 centimètres du sol. Ces grains déplacés par le vent ne sont pas polis ; leur surface devient opaque et rugueuse.

Toutes les plages de sable ne se forment pas à partir de fragments de roches arrachés aux montagnes. Certaines sont composées de particules de calcaire, issues de la mer ou de la côte. Là où l'eau est chaude et l'activité biologique importante, des restes d'invertébrés marins, plus ou moins fragmentés, se déposent aussi sur les plages. Les grains de «sable» de ces plages sont de loin les plus intéressants à observer au microscope : ce sont quelques-unes des œuvres d'art les plus colorées et les plus délicates fabriquées par la nature.



DÉSERT DU SAHARA, ENTRE LE CAIRE ET ALEXANDRIE

Ce sable a été érodé par le vent. Les surfaces ternes et opaques des grains sont le produit de l'érosion que subissent ces derniers lorsque le vent les déplace. Les particules transportées par le vent sont plus rugueuses que celles transportées dans l'eau, qui les polit : elles frottent les unes sur les autres. Les chocs subis par les grains de sable sont aussi plus violents que dans l'eau. Autre différence manifeste : les tailles des grains de sable des déserts sont généralement plus variées. L'eau tamise les sédiments plus sélectivement que l'air, déposant les particules de taille proche les unes à côté des autres.



× 7

Walter N. Mack



Walter N. Mack

× 5

INDIAN KEY, FLORIDE

Tous les coraux et tous les coquillages de cet échantillon ont perdu leur éclat : leur face extérieure est terne, piquée et couverte de calcaire. L'eau de mer chaude, la lumière directe du soleil et les pluies contribuent au transport vers la mer des carbonates contenus dans les végétaux morts et dans les squelettes d'animaux. L'image montre quatre coquilles de gastéropodes fusiformes et une coquille de gastéropode globulaire, ainsi que les restes d'au moins deux coquillages bivalves.



Walter N. Mack

× 6,5

PUNALUU, HAWAII

Le sable des plages noires d'Hawaï est composé d'obsidienne, verre volcanique formé par l'immersion soudaine de magma dans la mer. Le rapide refroidissement a provoqué une vitrification ; puis l'eau et les vagues ont érodé des fragments de ce verre et les ont transformés en sable fin, de couleur noire.



Walter N. Mack

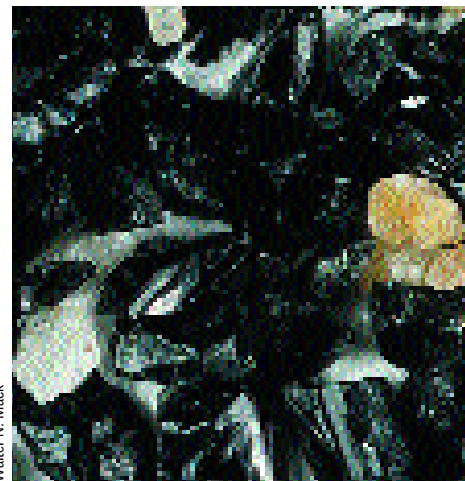
× 30

RIVE SUD DU LAC SUPÉRIEUR, MICHIGAN

Sur de nombreuses plages, des bandes noires marquent le niveau maximal des marées. Elles ne sont pas composées de débris organiques ni de sable gorgé de pétrole : elles contiennent des particules de magnétite. Plus lourdes que les grains qui les entourent, ces particules dures et magnétiques restent au bord de l'eau, tandis que les vagues poussent les fragments de quartz, plus légers, plus loin sur la plage (les grains rose et blanc sont du quartz ; les grains rouge foncé, probablement du grenat). Les navigateurs du XII^e siècle plaçaient de la magnétite, qu'ils nommaient « pierre d'aimant », dans un roseau creux ; déposé à la surface d'un récipient plein d'eau, ce roseau s'alignait suivant l'axe Nord-Sud, formant une boussole rudimentaire.

LAC NORTHERN LIGHT, ONTARIO, CANADA

Toutes les plages noires ne sont pas composées d'obsidienne ni de magnétite. Les plages du lac Northern Light sont constituées d'un dépôt de fins cristaux d'hornblende (un silicate). Le lac et sa plage d'hornblende sont des vestiges laissés par le retrait de la calotte glaciaire Nord-américaine à la fin de la dernière glaciation.



Walter N. Mack

Échantillons grandeur nature



Dan Wagner

PLAGE
DE FORT WALTON
Floride



DÉSERT DU SAHARA
Entre Le Caire et Alexandrie



INDIAN KEY
Floride

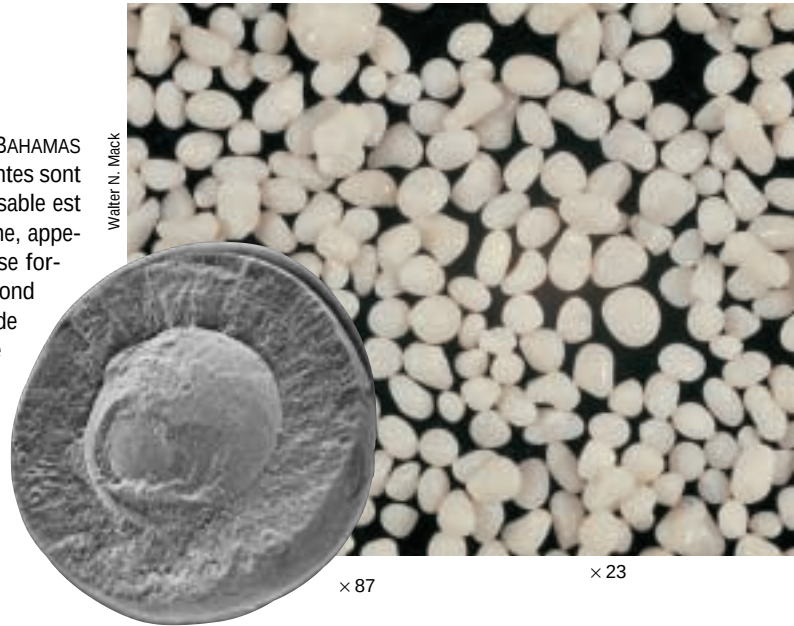


PUNALUU
Hawaï

HAWKSBILL CAY, EXUMA, BAHAMAS

Certaines des plages blanches les plus photogéniques et les plus étincelantes sont situées le long du golfe du Mexique et dans les îles des Bahamas. Leur sable est composé de particules de calcaire polies, aussi dures que de la porcelaine, appelées oolithes (du grec *ôon*, œuf). Comment ces grains en forme d'œuf se forment-ils ? Les vagues roulent des particules d'argile ou de sable fin sur le fond ondulé. Dans l'eau peu profonde, saturée en carbonates de calcium et de magnésium, ces particules sont recouvertes de couches concentriques de carbonates.

Au microscope électronique à balayage, la coupe partielle d'un grain d'oolithe révèle les couches successives de carbonate de calcium et de magnésium, empilées autour du noyau de la particule (*encore caché ici par des carbonates*).



Walter N. Mack

× 87

× 23



× 18

Walter N. Mack

PLAGE DE SILVER SANDS, GRAND BAHAMA, BAHAMAS

Ce «sable» est constitué presque exclusivement de morceaux de corail provenant des récifs proches. On observe en outre deux spicules en forme de cigare, la coupe transversale d'un ver marin, deux coquilles de gastéropodes et deux grands foraminifères rouges et ronds.

× 6



Walter N. Mack



× 23

SEAFORD, ANGLETERRE

La ville de Seaford est située au Sud de l'Angleterre, sur la Manche, où les courants sont forts et l'eau assez froide. Un échantillon de sable de la plage révèle une vie animale étonnamment nombreuse. Les grains bleu foncé et bruns sont des fragments de coquillages bivalves. Une coquille blanche de gastéropode (*en bas à gauche*) présente deux spires. Trois blocs de grains de sable sont vraiment agglomérés (*à l'extrême gauche, au centre et à l'extrême droite*). Les classiques grains de quartz sont dépolis ; toutefois, l'un d'eux (*à l'extrême droite*) est anguleux et sa surface est lisse, comme s'il avait été ajouté récemment aux grains les plus usés par l'érosion.



Dan Wagner

RIVE SUD
DU LAC SUPÉRIEUR
Michigan



LAC NORTHERN LIGHT
Ontario, Canada



HAWKSBILL CAY
Exuma, Bahamas



PLAGE DE SILVER SANDS
Grand Bahama, Bahamas

Le sable au musée

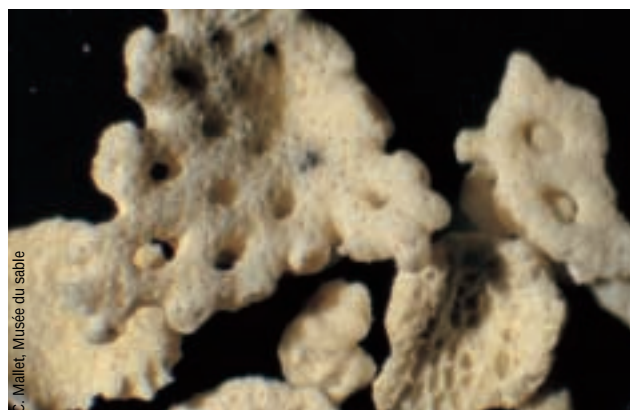
L'étude du sable fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques. C'est ce qui a motivé, en 1987, la création d'un Musée du sable, au collège Jean Monnet de Château-d'Olonne, en Vendée. Sa collection, rassemblée au départ par les élèves, puis par un réseau de plus en plus grand de bonnes volontés, est aujourd'hui, avec ses 4 300 échantillons, l'une des premières au monde. Il devrait être bientôt transformé en musée public.

La détermination de la composition d'un échantillon de sable requiert des connaissances en minéralogie et en biologie (s'il contient des restes de coquillages). La géologie, la géographie, la paléontologie et l'hydrologie (pour le transport) sont nécessaires à la reconstitution de son histoire. La compréhension des mouvements du sable, enfin, permet d'aborder la mécanique, en particulier la «physique des tas de sable».

Le projet ne s'intéresse pas seulement au sable «en bouteille». Nous suivons aussi, sur la plage voisine, les mécanismes de dépôt et d'enlèvement naturels du sable. Nous pouvons ainsi rassurer les industriels du tourisme : les dunes resteront encore longtemps!

Jean-Claude DANIEL, Musée du sable

× 16



FALUNS D'ANJOU, MAINE-ET-LOIRE

Les débris coralliens fossiles qui constituent le sable que l'on trouve dans la région d'Angers, à plus d'une centaine de kilomètres de la côte la plus proche, rappellent que ces terres ont été immergées et sous un climat chaud pendant le Miocène, il y a entre 5 et 25 millions d'années.

× 20



Walter N. Mack

× 17

SAINT-TROPEZ, VAR

Au large de Saint-Tropez, les récifs abritent de nombreux animaux dont les coquilles sont rejetées sur la plage par les vagues. Un prédateur affamé a percé des trous dans une coquille conique de gastéropode. L'entrée d'autres coquilles est bouchée par des débris profondément enfoncés. La longue coquille courbée et tubulaire appartenait à un mollusque du genre *Caecum*. Cette créature est initialement un minuscule escargot enroulé, qui grandit ensuite dans une seule direction. Au-dessous de lui, on aperçoit la corne blanche, légèrement érodée, d'un *Skeneopsis planorbis*.



C. Maillet, Musée du sable

× 20

CAVALAIRE-SUR-MER, VAR

Les grenats et les disthènes (silicates d'aluminium noirs) de cet échantillon proviennent de roches métamorphiques, formées en profondeur lors du plissement des Alpes pendant l'ère tertiaire. L'érosion a mis ces roches à nu, puis les a réduites en grains.

PLAGE DU TANCHET, CHÂTEAU-D'OLONNE, VENDÉE

Le sable de la plage la plus proche du Musée du sable est constitué en majorité de grains de quartz. On y observe aussi quelques débris de coquilles de moules. Les grains de quartz des plages vendéennes proviennent presque tous... du Massif central! L'écoulement les a d'abord transportés jusque dans la Loire, par laquelle ils ont gagné l'Atlantique. Les courants marins côtiers les ont ensuite répartis sur le littoral.

PLAGE DE SEVEN MILE, DONGARA, AUSTRALIE

Au large de la plage de Seven Mile, dans le canal de Geelvink, un plateau continental grouille de vie, avec des espèces typiques de l'océan Indien. On distingue de nombreux coraux et coquillages minuscules. Les éléments les plus originaux sont des «squelettes» d'éponges triaxiales, qui ressemblent à des glaçons, ainsi que des coquillages bivalves et des gastéropodes globulaires et discoïdes immatures.



Walter N. Mack

× 21,5

TAKETOMI SHIMA, ÎLES DE RYUKYU, JAPON

Quelques îles méridionales du Japon ont un sable étoilé, formé de tests de foraminifères, les enveloppes complexes avec de nombreux petits compartiments que fabriquent ces animaux unicellulaires. On classe ces animaux d'après la forme de leur test. L'échantillon montré ici contient essentiellement *Baculogypsina sphaerulata*. On voit aussi une coquille ronde d'*Amphistegina madagascariensis* (en haut à droite) et une coquille de gastéropode en forme de spirale.



Walter N. Mack

× 15



Dan Wagner

TAKETOMI SHIMA
Îles de Ryuku, Japon

Walter MACK a été professeur à l'Université du Michigan. Il collectionne des sables du monde entier. Elizabeth LEISTIKOW travaille pour la Société FSH/Mayo Health Systems.

Raymond SIEVER, *Sand*, Scientific American Library, Freeman, 1988.

Sur Internet, un musée japonais du sable est à l'adresse : <http://www.yo.rim.or.jp/~smiwa/museum/e-museum.html>.

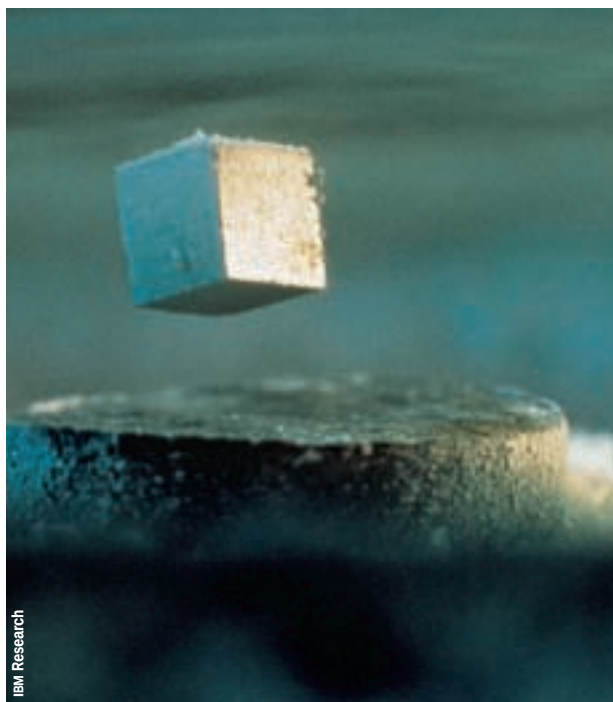
La supraconduction à haute température

JOHN KIRTLEY • CHANG TSUEI

Des expériences qui testent des phénomènes quantiques dans les matériaux conduisent vers une explication de la supraconduction à haute température.

Le 18 mars 1987, dès 19 heures 30, la salle de réception de l'hôtel Hilton de New York est comble. Plus de 2 000 physiciens s'y pressent, entassés jusque dans les couloirs, pour assister à une séance de communications du congrès de la Société américaine de physique. Cette séance, programmée à la va-vite en raison du grand nombre de communications envoyées en dernière minute, se prolonge jusqu'à trois heures du matin, sans que l'attention des participants faiblisse. Ceux-ci parleront ensuite d'un «Woodstock de la physique».

Quelques mois avant, à la fin de 1986, Georg Berdnoz et Alexander Müller, de la Société IBM à Zurich, ont fait sensation en annonçant qu'un oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane devient supraconducteur (il perd toute résistance électrique) au-dessous de la température critique de 35 kelvins (-238°C). Quoique basse, cette température est supérieure de plus de dix degrés aux températures critiques les plus élevées des supraconducteurs classiques, métaux ou alliages. Rapidement, des équipes se sont passionnées pour le phénomène ; leurs explorations les ont conduites à des matériaux nouveaux dont les températures critiques sont supérieures à 90 kelvins ; des rumeurs de supraconduction à 130 ou à 240 kelvins se sont même répandues. Cette animation est compréhensible : la décou-



1. LA LÉVITATION D'UN PETIT AIMANT au-dessus d'un supraconducteur à base d'yttrium préfigure peut-être des applications industrielles telles que la lévitation des trains.

verte d'un matériau qui serait supraconducteur à la température ambiante (autour de 300 kelvins) bouleverserait l'électricité et l'électronique.

Dès le mois de mars 1987, des physiciens présentent donc leurs résultats théoriques et expérimentaux sur les nouveaux supraconducteurs. Les utilisations potentielles de ces matériaux ne sont pas leur seule motivation. Certains d'entre eux craignent aussi que ces oxydes de cuivre, nommés cuprates, ne livrent leurs secrets à d'autres collègues ; le prix Nobel de physique a déjà été attribué quatre fois (un record pour un seul sujet) pour des

travaux sur la supraconduction. Ceux qui élaboreraient la théorie de la supraconduction à haute température seraient certainement honorés de cette distinction (quelques mois plus tard, G. Berdnoz et A. Müller reçoivent effectivement le prix Nobel de physique pour leur découverte).

Aujourd'hui, presque dix ans ont passé, mais des milliers de physiciens essaient encore de comprendre pourquoi et comment les cuprates sont supraconducteurs à de si hautes températures. Ces questions restent ouvertes, mais les progrès ont été considérables. Des expériences récentes montrent des différences fondamentales entre les cuprates et les supraconducteurs classiques : leurs résultats contribuent à réduire le nombre de

théories possibles. Elles indiquent en particulier que l'une d'entre elles mérite l'attention des physiciens : la théorie de l'onde de spin, selon laquelle la supraconduction est liée à l'excitation collective des moments magnétiques, ou spins, des atomes.

L'idée que le magnétisme soit à l'origine du phénomène est incompatible avec la théorie classique de la supraconduction à basse température. Cette dernière apparaît lorsque les électrons s'apparient en «paires de Cooper» (d'après Leon Cooper, de l'Université de l'Illinois, qui a introduit ce concept). Contrairement aux