



LUMIÈRE  
SOLAIRE

Les feuilles de certaines halophytes, tel cet *Atriplex*, portent à leur surface des cellules spécialisées appelées glandes à sel, qui stockent l'excédent de chlorure de sodium. Lorsqu'elles sont pleines, ces glandes à sel éclatent et dispersent leur contenu sur les feuilles : la mince pellicule argentée ainsi formée réfléchit la lumière du soleil et protège la plante du soleil. La vapeur d'eau s'échappe par des pores situés sur la face inférieure des feuilles.

À l'intérieur de chaque feuille, des cellules sont spécialement équipées pour gérer l'excédent de sel absorbé par la plante. La zone de stockage centrale de chacune de ces cellules est garnie de molécules qui permettent l'importation spécifique d'ions sodium ; les ions chlorure suivent. La forte concentration en ions sodium et en ions chlorure attire les molécules d'eau, ce qui maintient les cellules gonflées et la plante dressée.

est coûteuse, et l'évacuation de cette eau drainée pose d'autres problèmes. Ainsi, dans la vallée de San Joaquin, en Californie, les eaux de drainage déversées dans une zone marécageuse ont entraîné la mort et l'apparition de malformations chez des oiseaux aquatiques, car elles contiennent de fortes concentrations en sélénium, un élément assez abondant dans les sols de l'Ouest américain.

L'irrigation à l'eau de mer ne provoquerait pas ces difficultés, parce que

les exploitations établies sur le sol sablonneux des déserts côtiers sont généralement bien drainées. Nous avons ainsi irrigué les mêmes champs en continu avec de l'eau de mer pendant plus de dix ans sans constater d'accumulation d'eau ni de sels dans la zone racinaire. D'autre part, le déversement de sel dans les nappes aquifères des déserts salés n'est pas gênant, puisque ces nappes sont déjà salées. Enfin, comme nous proposons d'installer ces cultures sur des sols quasi nus, nous ne perturberons pas beaucoup les écosystèmes.

Bien sûr, les engrais chimiques excédentaires risquent de polluer la mer s'ils sont emportés par les eaux de ruissellement et d'infiltration, mais ils ne nuiront pas plus que les engrais des autres activités agricoles côtières. En outre, des cultures d'halophytes permettraient aussi d'épurer l'eau. Ainsi, les premières halophytes que nous avons cultivées au Mexique servaient à traiter les effluents d'un élevage de crevettes : les halophytes consommaient une partie des nutriments présents dans les effluents et réduisaient le volume de ces derniers.

Des cultures d'halophytes pourraient aussi épurer les eaux chargées en sélénium de la vallée de San Joaquin. Ces plantes absorbent assez de sélénium pour être utilisables comme complément alimentaire du bétail, mais pas assez pour devenir toxiques.

L'agriculture à l'eau de mer se développera-t-elle ? Plusieurs sociétés ont établi des fermes expérimentales de culture d'halophytes, tels que les *Salicornia* et les *Atriplex*, en Californie, au Mexique, en Arabie saoudite, en Égypte, en Inde et au Pakistan, mais, à notre connaissance, aucune de celles-ci n'est passée au stade de l'exploitation à grande échelle. Ce passage se fera-t-il, sous la pression des besoins alimentaires, de l'augmentation des coûts de production agricole et du manque de terres d'eau douce ?

Edward GLENN et James O'LEARY sont professeurs à l'Université d'Arizona, où Jed BROWN a préparé sa thèse de doctorat.

Emmanuel EPSTEIN et al., *Saline Culture of Crops : A Genetic Approach*, in *Science*, vol. 210, pp. 399-404, 24 octobre 1980.

*Saline Agriculture : Salt Tolerant Plants for Developing Countries*, National Academy Press, 1990.

E.P. GLENN, J.W. O'LEARY, M.C. WAT-

SON, T.L. THOMSON et R.O. KUEHL, *Salicornia Bigelovii* Toor : *An Oilseed Halophyte for Seawater Irrigation*, in *Science*, vol. 251, pp. 1065-1067, 1<sup>er</sup> mars 1991.

H. LIETH et A.A. AL MASOOM, *Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plants*, Séries : *Tasks for Vegetation Science*, vol. 28, Kluwer Academic Publishers, 1993.

E.P. GLENN, *Halophytes*, in *Encyclopedia of Environmental Biology*, Academic Press, 1995.



# Des sculptures en ciment

IAN STEWART

*D'étranges sculptures cimentent art, mathématiques et physique.*

**L**a prestigieuse revue *Nature* est éclectique : à côté d'importants articles de recherche, elle publie une chronique intitulée «Art et Science», dont le nom décrit bien le contenu. Dans le numéro du 11 décembre 1997, l'historien d'art Martin Kemp présente les remarquables paysages réalisés par l'artiste londonien Jonathan Callan. Toutefois, ces paysages ne sont pas peints : ce sont des sculptures qui ne ressemblent à rien de ce qui peut se voir sur la Terre ou sur tout autre monde connu. Plus précisément, ces paysages naissent quand on verse du ciment sur une planche perforée.

M. Kemp, qui enseigne l'histoire de l'art à l'Université d'Oxford, note une relation entre ces sculptures et des travaux récents en théorie de la complexité. Certains principes généraux semblent gouverner les paysages fantastiques de J. Callan ; par exemple, les pics les plus élevés se rencontrent dans les zones les plus éloignées des trous. Dans une lettre publiée dans un numéro suivant de *Nature* (29 janvier 1998), Adrian Webster, un astronome de l'Observatoire royal d'Édimbourg, explique l'étrange géométrie de l'univers de J. Callan à l'aide d'une branche classique des mathématiques, la théorie des cellules de Voronoï. Il explique également comment cette dernière illustre l'une des récentes découvertes majeures en astronomie : la structure en mousse de la répartition de matière dans l'Univers. S'il y eut jamais un exemple de l'unité des mathématiques, de l'art et de la science, c'est bien celui-là.

## LA NATURE CRÉATRICE

Depuis les toutes premières peintures rupestres, les artistes ont utilisé des phénomènes physiques et chimiques pour réaliser leurs chefs-d'œuvre : dans la Grèce antique, les sculpteurs savaient comment se fracturent les pierres et

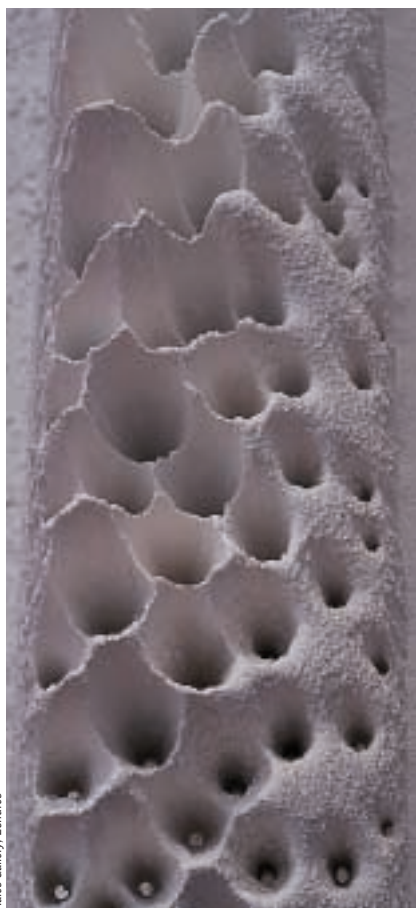
comment le bronze fondu coule dans un moule ; les peintres de la Renaissance connaissaient empiriquement les propriétés des pigments. Habituellement, le modelage des sculptures ou la réalisation des peintures résultent de la maîtrise de ces processus physico-chimiques. J. Callan appartient à un petit groupe d'artistes modernes qui veulent abandonner cette maîtrise. Ce n'est plus l'artiste, mais les processus physiques ou chimiques qui déterminent les caractéristiques principales de leurs œuvres.

Pour obtenir ses paysages, J. Callan part d'une planche horizontale, qu'il perce aléatoirement. Puis il saupoudre régulièrement du ciment sur la planche. Une partie du ciment tombe dans les trous et une autre s'entasse entre ces derniers. La sculpture durcit lorsqu'elle absorbe l'humidité de l'air. Le paysage final est une étrange alternance de pics et de cratères vertigineux. J. Callan le compare à une chaîne de montagnes terrestre : «Une géographie qui semble à la fois éminemment naturelle et hautement artificielle : les Alpes quand elles étaient neuves!»

## SCULPTURE ET TAS DE SABLE

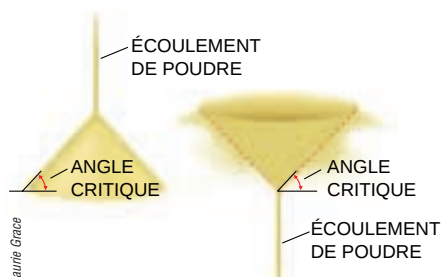
À propos de ces paysages, on devrait plutôt évoquer des tas de sable. Les ingénieurs civils savent bien comment les matériaux granulaires (sable, terre, ciment en poudre...) s'entassent. La caractéristique la plus simple et la plus importante est l'existence d'un «angle critique» : c'est la pente maximale qu'un tas de sable puisse adopter sans s'écouler. La surface du tas fait alors un angle constant avec le sol : l'angle critique. Quand on verse du sable sur une surface par un conduit assez étroit, la pente du tas augmente jusqu'à atteindre la valeur critique ; au-delà, le sable glisse au long de la pente, engendrant des avalanches qui restaurent la pente critique. Ainsi se forme invariablement – et spontanément – un cône de révolution.

Les spécialistes de la complexité étudient le mécanisme par lequel la pente atteint cette valeur critique et la nature des avalanches, petites ou grosses, qui l'accompagnent. Le physicien danois Per Bak nomma «criticalité auto-organisée» de tels phénomènes, et il proposa qu'ils modélisent nombre d'importantes caractéristiques du monde naturel, en particulier l'évolution des êtres vivants, où les avalanches concernent non des



Hélène Gallery, Londres

**1. Une sculpture en ciment de Jonathan Callan.**



Laurie Grace



Helios Gallery, Londres

**2. Les cratères des sculptures de J. Callan résultent de l'écoulement spontané de la poudre de ciment : quand l'angle d'un tas devient supérieur à un angle critique, une avalanche se déclenche (en haut). Sur la photographie inférieure, on voit la poudre entassée sous la plaque perforée qui porte les cratères.**

grains de sable, mais des espèces entières, et où les tas sont des objets dans des espaces imaginaires d'organismes potentiels.

Dans les œuvres de J. Callan, la structure du ciment en poudre autour de chaque trou est l'inverse de celle des tas de sable. Considérons une planche horizontale percée d'un unique trou. Loin de ce dernier, le ciment s'amoncelle dans toutes les directions suivant l'angle critique du ciment en poudre, créant une dépression conique ouverte vers le haut et qui pointe vers le trou (voir la figure 2). Ces cônes sont les cratères qui forment les saisissants paysages de J. Callan.

Quelle est la forme de la surface obtenue quand on dépose le ciment sur une plaque à plusieurs trous ? Chaque grain de ciment pris dans une avalanche s'écoule sous la planche par le trou le plus proche de son point d'impact initial. On peut alors prédire où seront les frontières entre les cratères coniques en divisant la planche en régions entourant chaque trou et for-

mées des points plus proches de ce trou que de tout autre. Une telle région est le «polygone d'influence» du trou. Si la planche est horizontale, les frontières de ces régions sont celles des cratères adjacents.

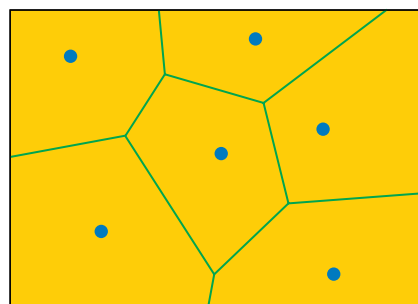
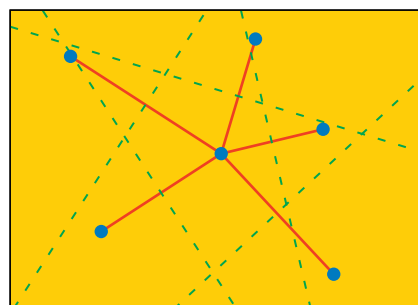
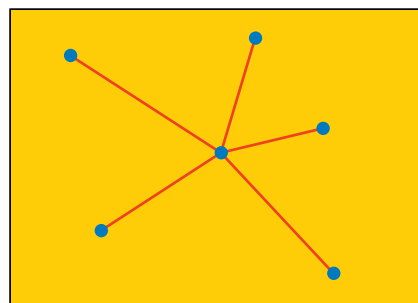
## TAS DE SABLE ET COSMOLOGIE

On détermine le polygone d'influence d'un trou en traçant tous les segments joignant ce trou aux autres trous, puis toutes les perpendiculaires à ces segments en leur milieu, c'est-à-dire leurs médiatrices (voir la figure 3). Le résultat est un réseau de médiatrices qui s'entrecroisent. On détermine alors la plus petite région convexe (pour laquelle toute droite qui prolonge n'importe lequel de ses bords ne coupe pas la zone) limitée par ces droites et contenant le trou choisi. Cette «cellule de Voronoï» est la région cherchée. Georgii Voronoï (1868-1908) fut un mathématicien russe qui étudia la théorie des nombres et les pavages dans les espaces à plus de deux dimensions. Les cellules de Voronoï eurent quelques autres dénominations (domaines de Dirichlet ou cellules de Wigner-Seitz, par exemple), car elles furent réintroduites dans de nombreux contextes. Chaque trou est dans une seule cellule de ce type et, toutes les cellules ensemble pavent le plan.

Les cratères de J. Callan sont des cônes ayant tous le même angle (l'angle de pente critique), qui se rencontrent à la verticale des côtés des cellules de Voronoï construites sur le système des trous. Avec cette géométrie, deux pentes se rencontrent à la même hauteur au-dessus de la planche : il n'y a pas de discontinuité de la surface.

Quelle est la forme des arêtes entre deux cratères voisins ? Il s'agit de l'intersection de deux cônes de même ouverture, symétriques par rapport au plan vertical médiateur du segment qui joint le fond des cratères. Cette intersection est contenue dans ce plan médiateur. Quelle courbe obtient-on si l'on coupe un cône par un plan parallèle à son axe ? Les anciens Grecs connaissaient déjà la réponse : une branche d'hyperbole. C'est la raison pour laquelle les paysages de J. Callan sont si tourmentés.

Et quel rapport avec l'astronomie ? Au lieu de trous dans un plan, imaginons des points dans un espace à trois dimensions, et remplaçons les médiatrices des segments qui joignent les trous par les plans médiateurs des segments qui joignent les points. Pour un point choisi, considérons tous les plans médiateurs des segments joignant



Laurie Grace

**3. On trace les cellules de Voronoï en dessinant les médiatrices des segments joignant les trous deux à deux.**

ce point à tous les autres. Nous nommerons encore cellule de Voronoï la plus petite région convexe limitée par ces plans et contenant le point considéré. C'est un polyèdre.

Les astronomes ont récemment découvert que la répartition de la matière dans l'Univers forme un réseau de tels polyèdres convexes : la majorité des amas galactiques semblent être situés aux frontières d'un tel réseau. Cette structure a été nommée modèle en bulles de Voronoï de l'Univers, car il fait penser à une mousse gigantesque.

Il existe une analogie imparfaite, mais éclairante entre la répartition de la masse dans l'Univers et la répartition du ciment dans les paysages de J. Callan : le ciment des sculptures atteint ses plus grandes hauteurs à la verticale des limites des cellules de Voronoï ; la propriété analogue, dans l'espace tridimensionnel, serait que, lors de l'expansion de l'Univers, la matière se concentre suivant les mêmes frontières. Ainsi la cosmologie rejoint l'art et les mathématiques.