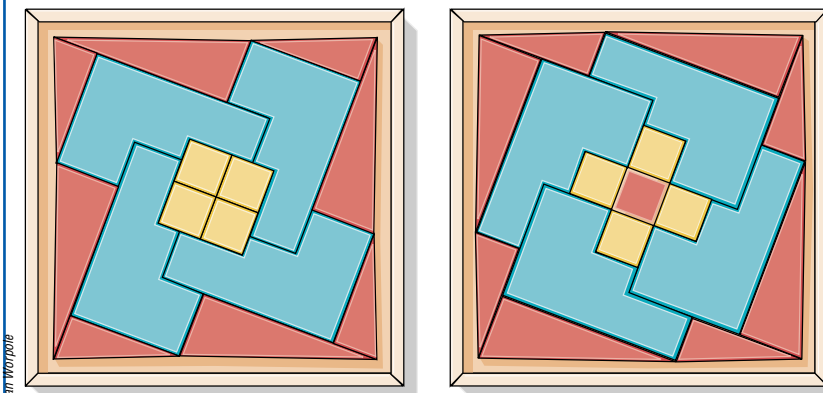


## Le paradoxe de l'aire manquante

**C**onsidérons les deux pavages ci-dessous. Chacun est composé des mêmes 16 pièces : quatre grands triangles rectangles rouges, quatre petits triangles rectangles rouges, quatre octogones bleus et quatre carrés jaunes. Dans le pavage de gauche, les pièces s'assemblent parfaitement, mais, dans le pavage de droite, un petit carré n'est

pas recouvert, au centre. Comment cela est-il possible ? Pourquoi la surface recouverte est-elle plus grande à gauche qu'à droite ?

Le secret de ce paradoxe, montré dans un article de 1961, sera révélé dans la rubrique « Tribune des lecteurs » du prochain numéro de *Pour la Science*.



propriétés numériques des nombres ou des mots (notez le nombre 666 formé par les nombres de lettres des trois parties de son nom). De nombreux lecteurs ont supposé que le docteur Matrix et sa jolie fille Iva Toshiyori étaient réels. Un lecteur japonais, en particulier, me signala que Toshiyori était un nom de famille des plus curieux, parce qu'il signifie «rue du vieil homme», en japonais : effectivement j'avais trouvé ce mot sur une carte de Tokyo et je l'avais donné à la fille du docteur Matrix, parce que j'avais décidé que celle-ci serait japonaise par sa mère.

Je regrette que ma rubrique se soit achevée avant 1997 : je n'aurais pas manqué d'interroger le docteur Matrix à propos du grotesque best seller inti-

mulé *La Bible : le code secret*, et j'aurais démonté les prétentions de son auteur. Celui-ci prétend prévoir l'avenir à partir des combinaisons de lettres que l'on peut extraire du texte hébreu de l'Ancien Testament en partant d'une lettre, puis en sautant un nombre donné de lettres plus loin, puis en sautant encore du même nombre de lettres plus loin, et ainsi de suite. Ce système aurait plu au docteur Matrix, mais méfions-nous de la numérologie : elle permet, par des procédés analogues, de trouver du sens dans n'importe quel ensemble de données ; le système de *La Bible : le code secret*, notamment, conduit également à des prévisions quand on l'utilise pour explorer *Guerre et Paix* ou *La recherche du temps perdu* !

Martin GARDNER est l'auteur de plus de 70 livres de science, de mathématiques, de philosophie ou de littérature. C'est une figure de la lutte contre le paranormal.

W.W. ROUSE BALL et H.S.M. COXETER, *Mathematical Recreations and Essays*, 13<sup>e</sup> édition, Dover Publications, 1987.

*La mathématique des jeux*, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1990.

*Visions géométriques*, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1990.

Martin GARDNER, *Jeux mathématiques du Scientific American* (adapté par Yves Roussel), Association pour le développement de la culture scientifique, Amiens, 1996.

Jean-Paul DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour la Science (diffusion Belin), Paris, 1996.

Yvon L'HOSPITALIER, *Énigmes et jeux logiques, résolution et construction*, éditions Eyrolles, Paris, 1998.

Bernard GERVAIS, *Les carrés magiques de 5*, éditions Eyrolles, Paris, 1998.

# L'irrigation à l'eau de mer

EDWARD GLENN • JED BROWN • JAMES O'LEARY

*La culture de plantes résistant au sel permettrait la production d'aliments pour le bétail dans des zones désertiques.*

**Q**ue mangeront les populations des pays tropicaux et subtropicaux dans 30 ans ? Selon l'Organisation des Nations unies, ces pays devront cultiver environ 200 millions d'hectares supplémentaires (soit l'équivalent d'un peu moins du tiers de la France) pour satisfaire leurs besoins alimentaires. Ils ne disposent toutefois que de 93 millions d'hectares potentiellement cultivables, dont la plus grande partie est aujourd'hui couverte de forêts, qu'il conviendrait plutôt de protéger.

L'eau, également, risque de manquer. Or, bien que 97 pour cent de l'eau présente sur la Terre se trouvent dans les océans, aucune des cinq plantes qui nourrissent l'essentiel de la population mondiale (le blé, le maïs, le riz, la pomme de terre et le soja) ne tolère le sel : arrosées par de l'eau de mer, elles se ramollissent lamentablement, puis elles se flétrissent et meurent en quelques jours. L'agriculture classique nécessite l'eau douce des rivières, des lacs, des nappes aquifères ou au moins de la pluie.

Pourtant, de nombreuses plantes qui résistent au sel poussent sur des terrains salés ou en présence d'eau de mer. Nous en avons cultivé dans les sols sablonneux de régions désertiques. Ce type de culture pourrait résoudre à la fois les pénuries d'eau et de terre : 43 pour cent de la surface des terres émergées est aride ou semi-aride, et environ 15 pour cent des déserts salés ou semi-salés seraient cultivables avec une irrigation à l'eau de mer, soit 130 millions d'hectares de nouvelles terres agricoles.

De telles cultures seront rentables si le coût du pompage de l'eau de mer est compensé par la vente des produits de culture. En outre, l'irrigation à l'eau de mer est durable si elle ne dégrade pas les sols. Nous avons montré que, à certaines conditions, ces deux objectifs sont réalisables.

L'irrigation à l'eau de mer est une idée ancienne, mais elle n'a été sérieusement expérimentée qu'il y a 50 ans : en 1949, Hugo et Elisabeth Boyko vont à Eilat, au bord de la mer Rouge, pour créer des paysages qui attireraient de nouveaux colons en Israël. Manquant d'eau douce, ils irriguent leurs plantations avec l'eau saumâtre d'un puits et avec de l'eau de mer ; ils observent que de nombreuses plantes poussent, dans un sol sableux, au-delà de leurs limites normales de salinité. Bien que les explications qu'ils donnent de ce résultat soient fausses, leur travail est le point de départ de nombreuses recherches agronomiques.

## Pas d'acclimatation au sel

Ces recherches ont suivi deux directions : l'acclimatation au sel d'espèces déjà cultivées, et la domestication de nouvelles espèces résistant au sel. En 1979, Emmanuel Epstein et ses collègues de l'Université de Davis obtiennent de petites quantités d'orge en irriguant avec de l'eau de mer des variétés issues de plusieurs générations cultivées en présence de faibles concentrations de sel. Malheureusement, aucune sélection classique, ni par insertion de gènes de résistance au sel par génie génétique, n'a produit de plante réellement cultivable. La salinité maximale, pour l'irrigation à long terme des espèces cultivées les plus tolérantes, tel le palmier dattier, est environ cinq grammes par litre, alors que la concentration de l'eau de mer est normalement de 35 grammes par litre (et plutôt de 40 grammes par litre le long des déserts côtiers tels que ceux de la mer

Rouge, du Nord du golfe de Californie et du golfe Persique).

Nous avons adopté l'autre approche : la domestication de plantes sauvages halophytes, c'est-à-dire tolérantes au sel. Cette approche nous semblait plus naturelle, car les plantes que nous cultivons aujourd'hui étaient initialement des espèces sauvages, et des populations se sont déjà nourries d'halophytes. Ainsi les Indiens Cocopah, à l'embouchure du Colorado, dans le golfe de Californie, consommaient des graines de l'herbe de Palmer (*Distichlis palmeri*).

Quelque 2 500 espèces halophytes, de toutes tailles (graminées, buissons et arbres), occupent des habitats variés, des marais côtiers aux déserts continentaux salés. Après en avoir collecté plusieurs centaines, nous avons évalué

**1. LES SALICORNES (ici, *Salicornia bigelovii*) poussent généralement dans des marais côtiers. On pourrait les cultiver, ainsi que d'autres plantes résistant au sel, dans les déserts côtiers pour nourrir le bétail et produire de l'huile.**





en laboratoire leur résistance au sel et leurs exigences nutritionnelles. Nous en avons retenu une douzaine, que nous avons tenté de cultiver, à partir de 1978, dans le désert côtier de Puerto Peñasco, sur la côte Ouest du Mexique. À l'aide d'eau de mer puisée directement dans le golfe de Californie, nous submergions quotidiennement les champs : les 90 millimètres de pluie annuelle moyenne étaient négligeables devant les 20 mètres d'eau de mer apportés en un an. Nous avons obtenu ainsi jusqu'à deux kilogrammes de biomasse sèche par mètre carré, à peu près autant

que si nous avions cultivé de la luzerne en l'irriguant avec de l'eau douce.

Parmi les halophytes les plus productives et les plus tolérantes au sel, on trouve plusieurs espèces de salicornes (*Salicornia*), de soude maritime (*Suaeda*) et le buisson à sel (*Atriplex*), de la famille des Chénopodiacees (qui rassemble près de 20 pour cent de toutes les espèces halophytes). Nous avons aussi obtenu de bons résultats avec des espèces herbacées telles les *Distichlis* (de la famille des Poacées) et des espèces à tiges rampantes et à feuilles succulentes telles que les *Batis* (de la famille des Batidacées).



Richard Jones





**2. L'AGRICULTURE À L'EAU DE MER** se fait par l'irrigation des champs (à gauche, pour une culture d'Atriplex, qui peut être transformé en fourrage pour le bétail) ou par aspersion (au centre) : on équipe alors les arroseurs de tuyaux en plastique pour éviter la corrosion des parties métalliques, au contact de l'eau de mer. Avec de simples réglages, des moissonneuses-batteuses récoltent ensuite les graines de salicorne (à droite).



Ces plantes sont-elles utilisables pour l'alimentation ? De nombreuses halophytes sont riches en protéines et en sucre, mais, pour survivre dans l'environnement salin, elles accumulent aussi beaucoup de sel qui réduit leur valeur nutritive parce qu'il n'apporte pas d'énergie tout en occupant du volume. La salinité élevée des halophytes limite aussi la quantité qu'un animal peut ingérer. Dans les pâturages ouverts, les halophytes ne sont généralement que des plantes de réserve, que les animaux paissent après l'épuisement des autres espèces.

Nous avons alors nourri des moutons et des chèvres en remplaçant 30 à 50 pour cent de leur ration de foin par des halophytes, *Salicornia*, *Suaeda* et *Atriplex* : les animaux ont pris autant de poids que les animaux d'un groupe témoin, nourris exclusivement au foin, et la qualité de leur viande n'a pas été modifiée. Contrairement à nos craintes initiales, les animaux ne montraient aucune aversion envers les halophytes ; ils semblaient même attirés par leur

goût salé, mais ils buvaient plus d'eau que ceux qui ne mangeaient que du foin, afin de compenser l'ingestion supplémentaire de sel. Au total, la quantité de viande formée par kilogramme de nourriture était inférieure de dix pour cent à celle du groupe témoin.

### Le potentiel de la salicorne

L'halophyte la plus prometteuse que nous ayons cultivée jusqu'à présent est la salicorne *Salicornia bigelovii*. Cette plante annuelle sans feuilles pousse dans les marais salés qu'elle colonise grâce à son abondante production de graines. Ces dernières contiennent autant d'huile (30 pour cent) et de protéines (35 pour cent) que le soja et d'autres oléagineux, et moins de trois pour cent de sel. Cette huile a une composition en acides gras analogue à celle de l'huile de carthame : les molécules, composées de glycérol lié à trois acides gras (des molécules composées exclusivement de carbone et d'hydrogène, à l'exception d'un groupe acide-COOH),

comportent plusieurs doubles liaisons entre les atomes de carbone ; cette «poly-insaturation» les rend diététiquement intéressantes. On l'extrait et on la raffine avec les mêmes installations que pour les autres oléagineux. Enfin, cette huile comestible possède un agréable goût de noix et une texture semblable à l'huile d'olive.

Les graines sont immangeables sans traitement, car elles contiennent des composés amers, nommés saponines. Ces derniers ne passent pas dans l'huile, mais ils restent dans les tourteaux et limitent les quantités que l'on peut mélanger à la ration alimentaire de poulets. Toutefois, aux quantités habituellement utilisées pour les compléments protéiques, on peut utiliser les tourteaux de salicorne dans l'alimentation du bétail : toutes les parties de la plante sont donc consommables.

Nous avons contribué à la création de plusieurs fermes expérimentales de culture de salicorne couvrant jusqu'à 250 hectares au Mexique, en Arabie saoudite et en Inde. Au cours

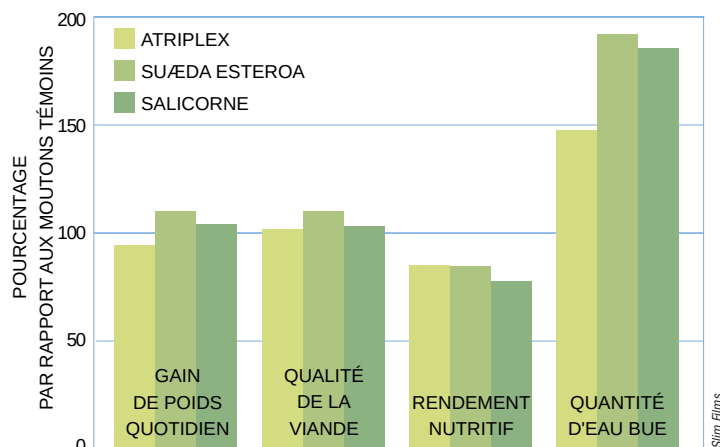
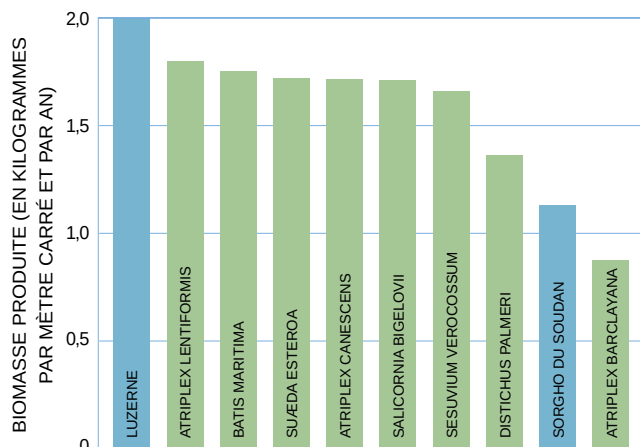
des six années d'essais en champ, au Mexique, les salicornes ont produit en moyenne 1,7 kilogramme de biomasse totale par mètre carré et 0,2 kilogramme d'huile par mètre carré. De tels rendements sont égaux, voire supérieurs, à ceux du soja et d'autres oléagineux irrigués à l'eau douce. Nous avons modifié les systèmes d'irrigation pour les protéger de la corrosion par l'eau de mer : dans les systèmes d'aspersion courants, nous insérons des tubes en matière plastique qui préviennent la corrosion des parties métalliques par

l'eau de mer. De même, on récolte les petites graines de salicorne, qui ne pèsent qu'environ un milligramme, à l'aide de moissonneuses-batteuses ordinaires réglées spécialement. Nous n'avons pas rencontré d'obstacle insurmontable lors du passage du champ d'essai à l'échelle des fermes pilotes.

### De l'eau, mais pas trop

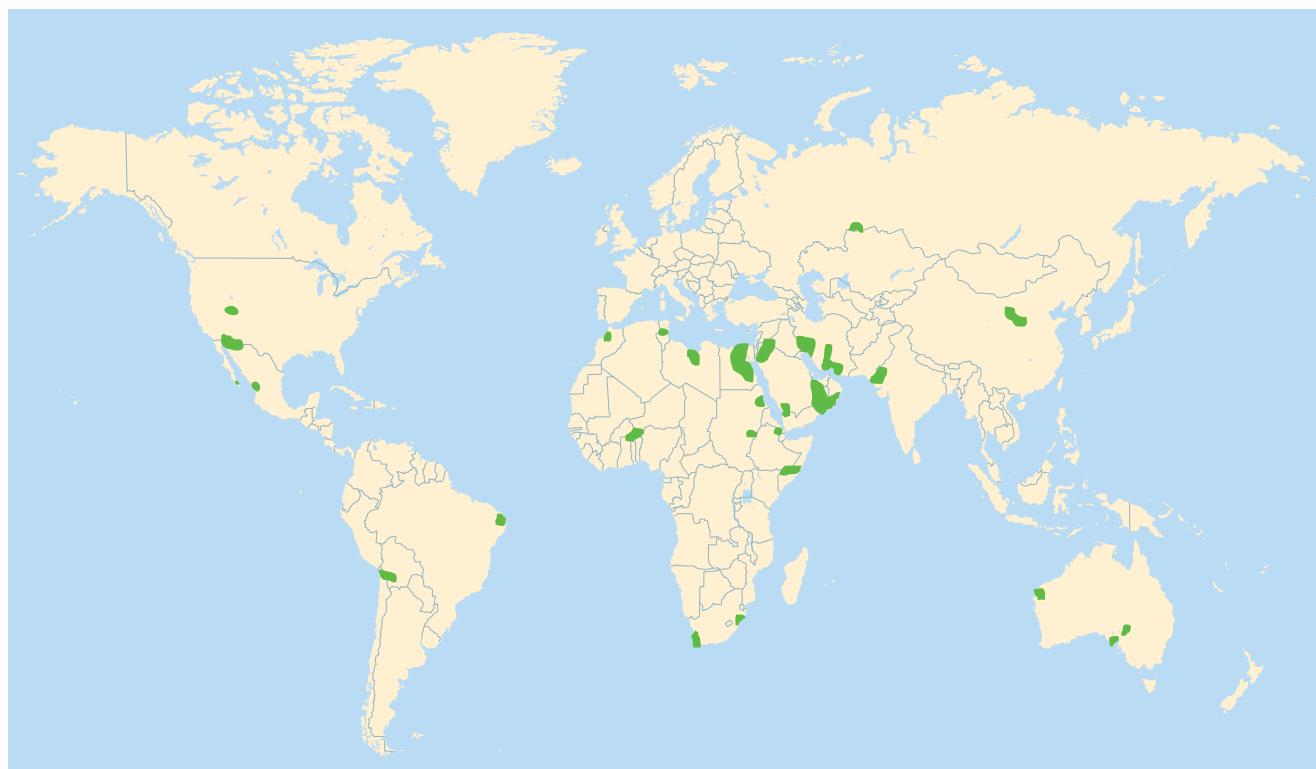
Quand on irrigue à l'eau de mer, on doit modifier les pratiques agronomiques. Avec de l'eau douce, les cultures ne sont

irriguées que lorsque le sol contient moins de 50 pour cent de sa capacité d'absorption d'eau, et l'on n'ajoute que la quantité d'eau qui a été absorbée par les plantes. En revanche, avec de l'eau de mer, l'irrigation doit être suffisante pour que le sel ne s'accumule pas près des racines à des concentrations qui stopperaient la croissance des plantes : lors de nos premiers essais, nous inondions quotidiennement les champs, ce qui coûtait cher en pompage. Pourrions-nous réduire l'irrigation sans faire chuter le rendement ?



**3. LES RENDEMENTS** de cultures tolérantes au sel et irriguées à l'eau de mer sont proches de ceux de deux plantes classiques irriguées à l'eau douce et utilisées pour l'alimentation du bétail : le foin de luzerne et le foin de sorgho du Soudan (à gauche, barres bleues). Des moutons nourris avec un complément de plantes tolérantes au

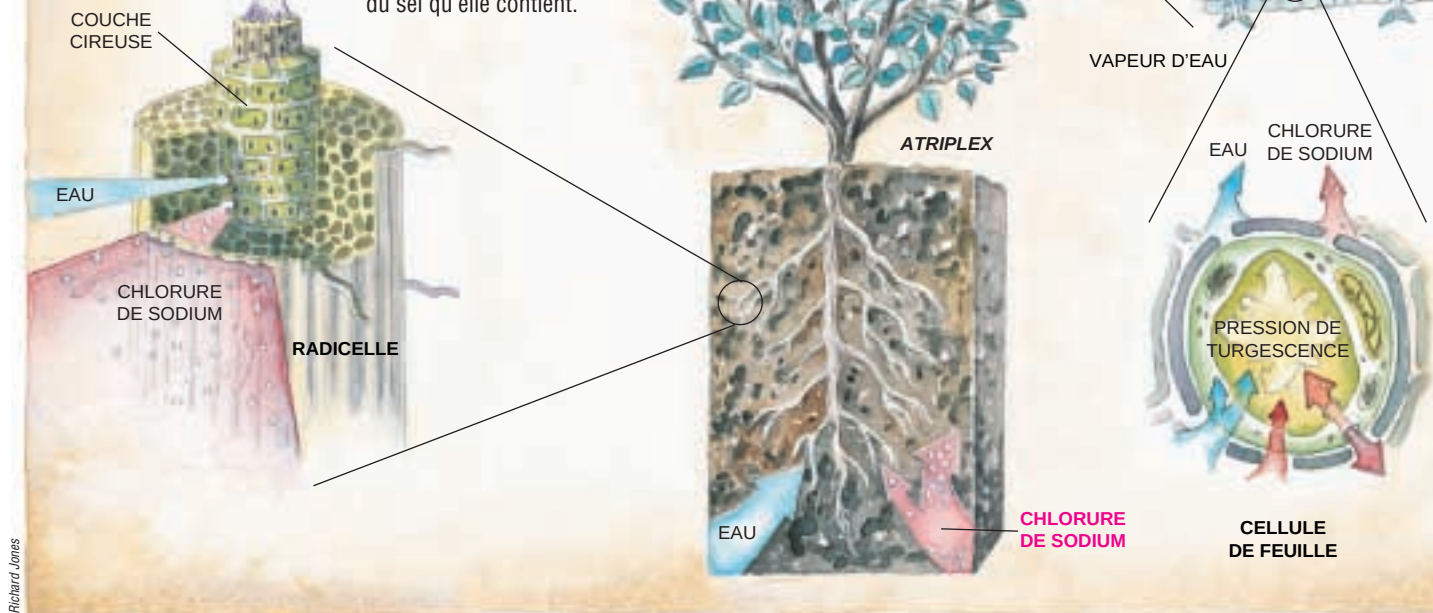
sel, tel l'*Atriplex*, les salicornes ou la *Suaeda*, prennent autant de poids que des moutons nourris seulement avec du foin, et leur viande est de qualité équivalente, bien qu'il faille les nourrir un peu plus pour obtenir la même masse de viande et qu'ils boivent presque deux fois plus d'eau (à droite).



**4. DES DÉSERTS SALÉS** (en vert) pourraient accueillir des cultures irriguées à l'eau de mer ou avec de l'eau de nappes aquifères salées.

## Anatomie d'une halophyte

Certaines plantes tolérantes au sel, ou halophytes, ont dans leurs racines, dans leurs feuilles ou dans leurs cellules plusieurs mécanismes de protection contre l'eau de mer. Les cellules de la couche externe de chaque radicule sont presque imperméables au chlorure de sodium. De plus, les cellules de la couche interne sont reliées par une couche cireuse, qui évite la diffusion de l'eau salée entre elles ; l'eau traverse alors ces cellules, où elle est débarrassée de la plus grande partie du sel qu'elle contient.



Richard Jones

Afin d'étudier cette question, nous avons installé, dans les champs d'essai, des bacs aux parois latérales étanches et au fond percé de trous. Nous avons cultivé les zones ainsi équipées comme le reste du champ, et nous avons collecté l'eau d'infiltration qui en sortait, mesurant son volume et sa concentration en sel. Nous avons ainsi démontré que la salicorne a besoin de trois mètres d'eau par an, soit 35 pour cent de plus qu'une culture équivalente, telle la luzerne, irriguée à l'eau douce pour fournir le même rendement. Ce supplément d'eau est nécessaire parce que la plante dessale l'eau qu'elle absorbe : la concentration en sel dans l'eau au voisinage des racines est donc bien supérieure à la concentration en sel dans l'eau de mer, et fait chuter le rendement lorsqu'elle dépasse 100 grammes par litre.

L'agriculture à l'eau de mer peut-elle être concurrentielle ? Dans toute culture irriguée, c'est surtout le pompage de l'eau qui coûte : ce coût est directement proportionnel à la quan-

tité d'eau pompée et à la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée. Bien que les halophytes requièrent plus d'eau que des cultures traditionnelles, les exploitations irriguées à l'eau de mer sont situées près du niveau de la mer. La hauteur de pompage est donc faible par rapport à celle des fermes qui doivent puiser leur eau dans des puits de plus de 100 mètres de profondeur parfois. Ces coûts de pompage inférieurs devraient donc compenser les éventuelles infériorités de rendement des cultures irriguées à l'eau de mer dans les régions désertiques. D'autant que, nous l'avons vu, l'agriculture à l'eau de mer n'exige pas d'équipements spéciaux coûteux.

La salicorne, qui est aujourd'hui notre plus grande réussite, n'est toutefois pas une culture parfaite. Les tiges versent à l'approche de la moisson, et les graines se dispersent avant la récolte : on ne récupère que 75 pour cent des graines, contre 90 pour cent pour la plupart des autres récoltes. Enfin, pour que les salicornes donnent de bons rende-

ments en graines, les plantes doivent pousser pendant une centaine de jours environ à température fraîche avant la floraison. Aujourd'hui, cette culture est donc limitée aux pays subtropicaux qui bénéficient d'hivers frais et d'étés chauds, alors que certaines des grandes étendues de déserts côtiers sont plutôt situées dans des zones tropicales comparativement plus chaudes.

### Éviter l'accumulation du sel

L'agriculture irriguée à l'eau de mer est-elle durable ? Dans les régions arides, on cultive souvent dans des dépressions sans exutoire, et la faiblesse du drainage provoque rapidement, même avec une irrigation à l'eau douce, une accumulation de sel dans la nappe phréatique. Entre 20 et 24 pour cent des zones irriguées par de l'eau douce dans le monde souffriraient de l'accumulation progressive de sel et d'eau dans la zone racinaire. L'installation de systèmes de drainage souterrains



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

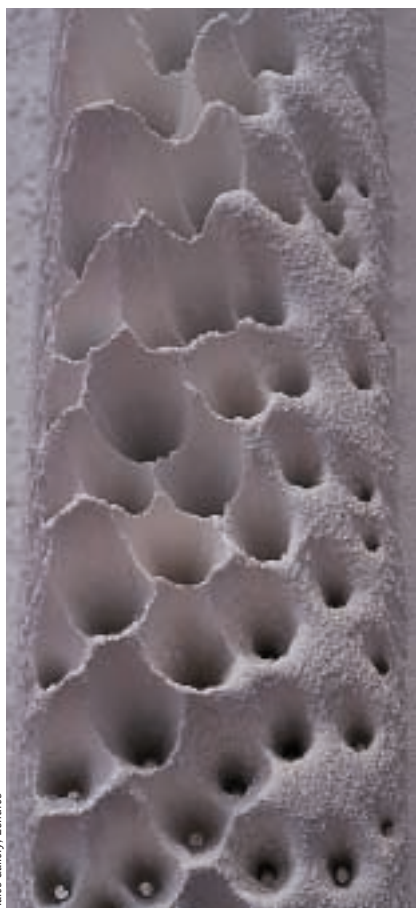
comment le bronze fondu coule dans un moule ; les peintres de la Renaissance connaissaient empiriquement les propriétés des pigments. Habituellement, le modelage des sculptures ou la réalisation des peintures résultent de la maîtrise de ces processus physico-chimiques. J. Callan appartient à un petit 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



Helios Gallery, Londres

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