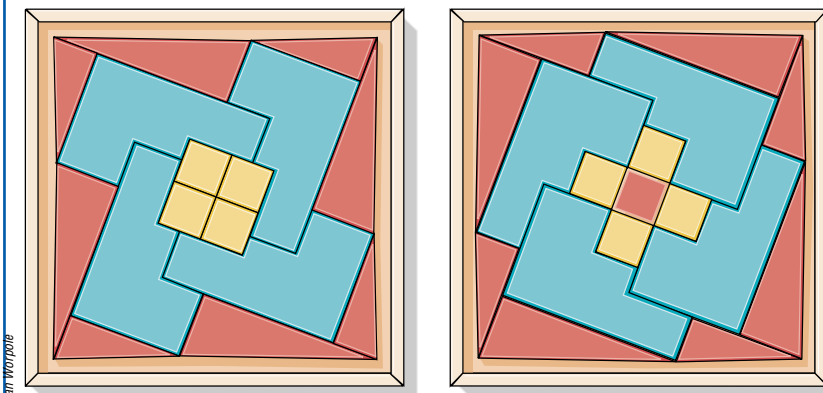


Le paradoxe de l'aire manquante

Considérons 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-

ulé *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^e 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.

Que 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 submergeons 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).





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

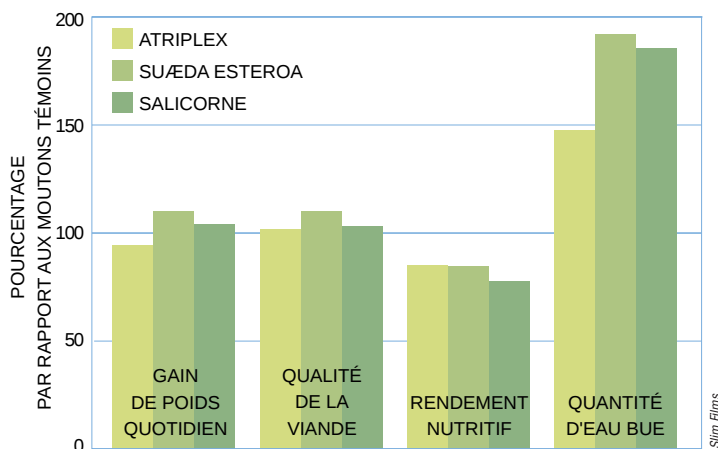
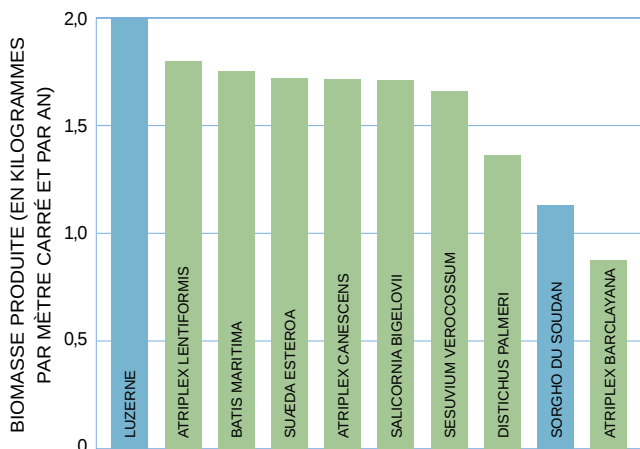
des six années d'essais en champ, au Mexique, les salicornes ont produit en moyenne 1,7 kilogramme de biomasse totale par mètre carré et 0,2 kilogramme d'huile par mètre carré. De tels rendements sont égaux, voire supérieurs, à ceux du soja et d'autres oléagineux irrigués à l'eau douce. Nous avons modifié 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

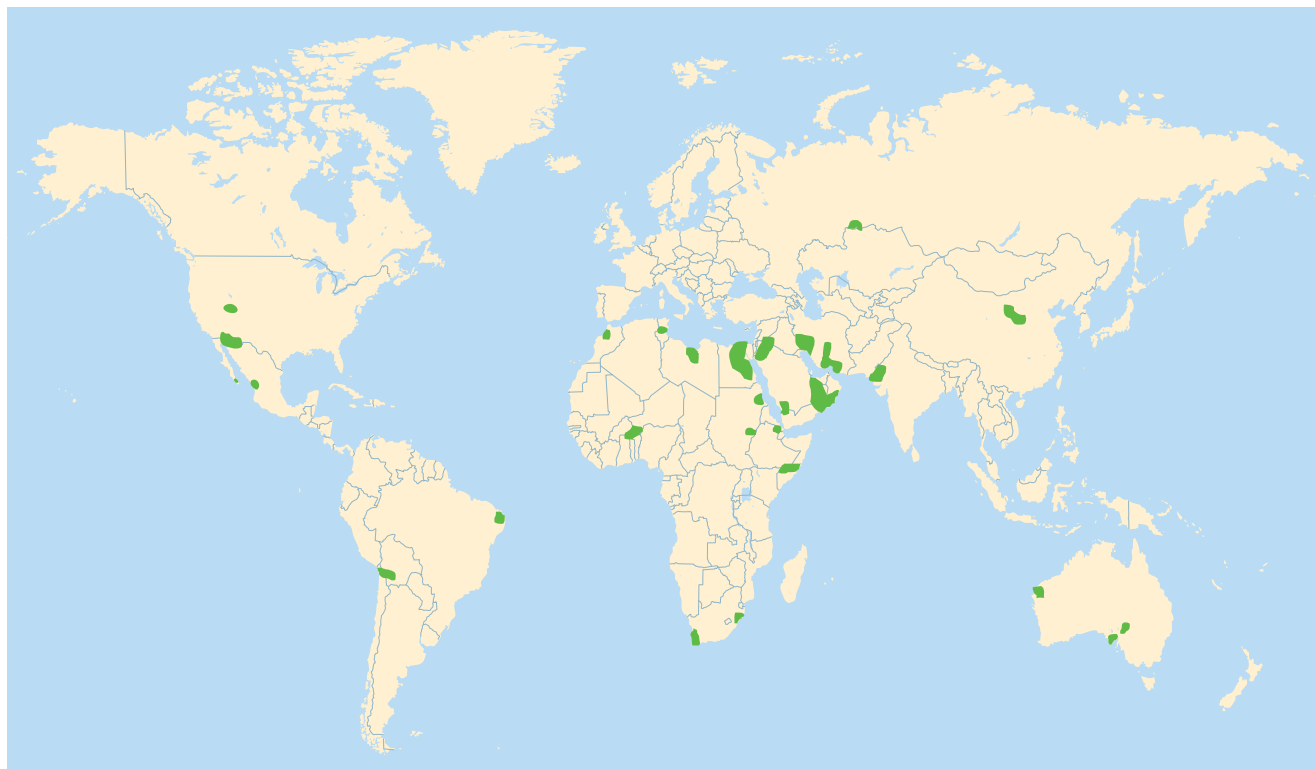
Quand on irrigue à l'eau de mer, on doit modifier les pratiques agronomiques. Avec de l'eau douce, les cultures ne sont

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.