

dables, qui sont injectées sous la peau ou placées dans la cavité abdominale à l'aide d'une seringue. Il suffirait de moins d'un gramme de cellules de Langerhans porcines encapsulées pour fournir à un diabétique l'insuline nécessaire. Le volume de tels implants resterait inférieur à quelques dizaines de centimètres cubes.

Au cours d'expériences récentes, des cellules d'îlots de Langerhans encapsulées provenant de vaches sont restées actives chez des chiens pendant six semaines. Diverses études réalisées sur des souris, des rats et des lapins montrent que des cellules de porc encapsulées devraient fonctionner chez des patients quelques mois, voire plus d'un an. Les minuscules emballages finiraient par être dégradés, de sorte que l'on n'aurait pas à retirer les anciennes capsules avant de reconstituer le stock de cellules de Langerhans. Des essais cliniques visant à évaluer cette méthode devraient commencer dans moins d'un an.

Des hôtes menaçants

Les xénotransplantations, si elles deviennent réalité, soulèveront des questions biologiques et éthiques. Plusieurs spécialistes redoutent que des donneurs animaux n'hébergent des agents pathogènes qui, tels le virus *Ebola* ou l'agent de la maladie de la vache folle, menaceraient la santé humaine. Après avoir contaminé un patient greffé, ces agents pathogènes pourraient se répandre dans la population générale et y déclencher une épidémie. Aujourd'hui, les biologistes pensent que le VIH, le virus de l'immunodéficience humaine responsable du SIDA, est un virus d'origine simiesque qui, après avoir franchi la barrière interspécifique, a infecté l'homme.

Ainsi, les transplantations de tissus de singes pourraient menacer la santé générale. En revanche, si les donneurs étaient des porcs, la menace serait moindre. Depuis des milliers d'années, l'homme vit à proximité du porc et, hormis quelques virus de grippe, peu de maladies graves d'origine porcine semblent avoir touché l'homme.

Les porcs pourraient être des donneurs intéressants pour d'autres raisons : ils sont faciles à élever ; la dimension et la physiologie de leurs organes sont comparables à celles des organes humains ; certains élevages sont exempts de tout agent pathogène

Le risque des virus clandestins

Malgré des siècles de cohabitation, les porcs ont transmis peu d'agents pathogènes à l'homme ; cela semble garantir que des transplantations d'organes de porc ne pourraient engendrer de nouvelles maladies dangereuses. Pourtant la prudence est de rigueur.

Certains rétrovirus, des virus qui introduisent leur matériel génétique directement dans l'ADN de l'hôte, pourraient être une menace. Comme les autres mammifères, les porcs ont des provirus dans leur patrimoine génétique, c'est-à-dire des séquences génétiques qui peuvent produire des particules virales infectieuses ; de tels gènes viraux représentent environ un pour cent de l'ADN humain. La présence de ces séquences s'explique par des infections rétrovirales subies par les ancêtres des mammifères actuels, lorsque les virus ont introduit leur génome dans des spermatozoïdes ou dans des ovocytes. La descendance des animaux infectés conserva ces gènes viraux, qui furent ensuite transmis de génération en génération. Avec le temps, la plupart de ces virus ont évolué et sont devenus inoffensifs pour leurs hôtes, mais quelques-uns conservèrent un pouvoir pathogène.

Quelles seraient les conséquences de l'introduction, par l'intermédiaire d'organes greffés, de provirus de porcs chez un patient ? La transplantation offrirait au virus un accès direct aux cellules humaines et, de surcroît, l'hôte serait particulièrement vulnérable, puisque son système immunitaire serait volontairement affaibli pour éviter le rejet de l'organe transplanté. Les provirus de porc risqueraient de se transformer en rétrovirus pathogènes. En outre, ces rétrovirus de porc, une fois implantés chez l'homme, risquent de muter et de se combiner avec des rétrovirus humains, produisant un agent pathogène de type nouveau. Les risques sont notables : contrairement aux virus responsables d'une grippe de courte durée, certains rétrovirus sont à l'origine de cancers et d'infections durables.

Les biologistes moléculaires cherchent à identifier les provirus dangereux qui seraient dissimulés dans l'ADN de porc et à les éliminer des troupeaux reproducteurs. Les manipulations génétiques nécessaires exigeront encore de nombreuses années d'effort, mais ces études devraient éviter que les xénotransplantations ne soient à l'origine de nouvelles maladies humaines.

connu. Enfin, contrairement aux primates, les porcs soulèvent peu d'opposition éthique : le porc est un animal que l'homme a l'habitude de tuer pour se nourrir.

Toutefois, les greffes de tissus porcins sont encore loin d'être une réalité. Même quand ils sauront maîtriser le rejet immunitaire, les biologistes devront confirmer que les organes transplantés fonctionnent correctement chez le nouvel hôte. En fait, des cœurs et des

reins de porcs ont fonctionné chez des primates pendant plusieurs semaines, et ce devrait être aussi le cas chez l'homme. De nombreuses années s'écouleront avant que des médecins ne parviennent à déjouer les mécanismes de l'évolution et à remplacer n'importe quel organe défaillant par son équivalent prélevé sur un animal. En revanche, la greffe de cellules isolées devrait bientôt faire partie des procédés médicaux usuels.

Robert LANZA dirige le département de transplantation de la Société *Bio-Hybrid Technologies*, à Shrewsbury, que dirige William Chick. David COOPER est immunologiste à la Faculté de médecine de Harvard et à l'hôpital général du Massachusetts.

F.H. BACH, S.C. ROBSON, H. WINKLER, C. FERRAN, K.M. STUHLMEIER, C.J. WRIGHTON et W.W. HANCOCK, *Barriers to Xenotransplantation*, in *Nature Medicine*, vol. 1, n° 9, pp. 869-873, septembre 1995.

L.E. CHAPMAN, T.M. FOLKS, D.R. SALO-

MON, A.P. PATTERSON, T.E. EGGERMAN et P.D. NOGUCHI, *Xenotransplantation and Xenogeneic Infections*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 333, n° 22, pp. 1498-1501, 30 novembre 1995.

Yearbook of Cell and Tissue Transplantation 1996/1997, sous la direction de Robert P. Lanza et William L. Chick, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Xenotransplantation : The Transplantation of Organs and Tissues between Species, 2^e édition, sous la direction de D.K.C. Cooper, E. Kemp, J.L. Platt et D.J.G. White, Springer-Verlag, 1997.

Engrais et démographie

VACLAV SMIL

Pour nourrir la population du Globe, on doit utiliser tant d'engrais azotés que la répartition de l'azote sur la Terre a été modifiée de manière spectaculaire, voire dangereuse.

Le quasi quadruplement de la population mondiale, au XX^e siècle, a de nombreuses causes, mais l'une des principales est méconnue : c'est la synthèse de l'ammoniac à partir de l'azote de l'atmosphère par l'industrie chimique. En effet, grâce aux engrais qui sont fabriqués à partir de l'azote, l'agriculture s'est affranchie des limites séculaires de production de la nourriture, et la population mondiale dispose de suffisamment de nourriture (du moins en moyenne).

Pourquoi l'azote est-il important ? Il se trouve dans la matière vivante en proportion inférieure à celles du carbone, de l'hydrogène ou de l'oxygène,

mais, alors que ces trois éléments sont rapidement intégrés à nos tissus par l'intermédiaire de l'eau et de la nourriture, l'azote de l'atmosphère n'est pas assimilé quand nous respirons. Seule une infime partie existe sous une forme qui puisse être absorbée et assimilée par les plantes, par les animaux et par l'homme.

L'azote est cependant un élément indispensable à la synthèse de l'ADN et de l'ARN, ces molécules qui contiennent et transfèrent l'information génétique de toutes les cellules, et il figure dans le squelette des protéines, ces molécules qui sont à la fois les briques et les ouvriers de l'organisme. L'organisme humain et celui des animaux

supérieurs ne synthétisent pas ces molécules à partir de l'azote présent dans l'air ; ils doivent puiser des composés azotés dans la nourriture, laquelle n'est équilibrée que si l'azote est en quantité suffisante, sous la forme de protéines animales ou végétales.

La chimie particulière de l'azote explique que seules les plantes sachent extraire cet élément de l'atmosphère. Les molécules de diazote, qui forment 78 pour cent de l'atmosphère, sont constituées de deux atomes d'azote. Elles sont si stables qu'elles se transforment difficilement en des formes réactives, absorbables par les plantes. Si la foudre parvient à les dissocier, la majeure partie de la « fixa-



tion» naturelle de l'azote (c'est-à-dire la dissociation de la molécule de diazote et l'incorporation ultérieure des deux atomes d'azote dans l'ammoniac) est l'œuvre de bactéries. Les bactéries fixatrices d'azote les plus importantes sont celles du genre *Rhizobium*, qui vivent en symbiose avec les plantes légumineuses ; les cyanobactéries, qui vivent soit à l'état libre, soit en association avec certaines plantes, fixent également l'azote.

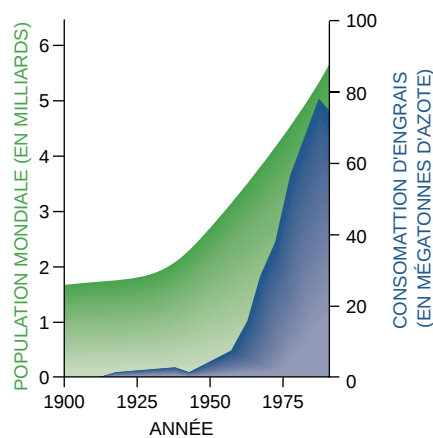
Un problème qui ne date pas d'hier

Les végétaux et des phénomènes naturels variés appauvrissent les sols en azote, de sorte que les carences sont fréquentes. L'agriculture, avant la Révolution industrielle, régénèrait les champs en les engraisant avec les résidus des récoltes précédentes ou avec des déchets organiques d'origine animale ou humaine. Toutefois ces déchets contenaient l'azote en concentrations si faibles qu'ils devaient être apportés en quantités considérables pour satisfaire les besoins. Aussi les agriculteurs devaient-ils alterner les cultures de céréales avec celles de pois, de haricots, de lentilles et d'autres légumineuses. Les bactéries fixatrices d'azote qui vivent dans les racines de

ces plantes enrichissaient les champs. Parfois on plantait des légumineuses (ou, en Asie, des fougères du genre *Azolla* qui abritent des cyanobactéries fixatrices d'azote) uniquement pour l'apport d'engrais qu'elles assuraient ; le labourage ultérieur enfouissait ces plantes sous forme d'engrais vert, sans qu'aucun produit ne soit récolté. Ce type d'agriculture biologique a atteint son apogée au début du XX^e siècle dans les basses plaines de Java, dans le delta du Nil, en Europe et dans de nombreuses régions de Chine et du Japon.

Le recyclage de déchets humains ou animaux, associé à la culture d'engrais vert, apporte environ 200 kilogrammes d'azote par hectare et par an. On peut alors produire 200 à 250 kilogrammes de protéines végétales, ce qui limite la densité de population à une quinzaine de personnes dans les régions tempérées.

En pratique, les densités de population étaient invariablement inférieures. En Chine, au début du siècle, les terres ne nourrissaient que cinq à six personnes par hectare. Lors des dernières décennies d'agriculture biologique au Japon, la population était un peu plus dense qu'en Chine, mais la pêche palliait les déficiences de l'agriculture. Dans les régions fertiles d'Europe, au XIX^e siècle, la densité de



Bryan Christie

2. LA POPULATION MONDIALE a considérablement augmenté au XX^e siècle, en raison de l'utilisation d'engrais azotés.

population était également de cinq personnes par hectare, quand les agriculteurs pratiquaient exclusivement une agriculture de type traditionnel.

La différence entre la densité maximale théorique et la densité limite pratique résulte de plusieurs facteurs : la productivité des terres est limitée par l'irrégularité des précipitations ; les ravageurs prélèvent une proportion notable des récoltes, et une partie des terres était consacrée à des cultures non alimentaires, telles les plantes à fibres, pour l'habillement, ou diverses plantes

1. L'AGRICULTURE qui est pratiquée dans les champs écossais (ci-dessous), repose sur la production industrielle d'engrais azotés, par un procédé qui est né dans les années 1910. Ce procédé, dit synthèse de Haber-Bosch, est utilisé par de nombreuses usines de synthèse de l'ammoniac, dans le monde entier (cartouche à droite).



Eric Freedman, Bruce Coleman Inc.

Jason Hawkes, Julian Cotton Photo Library

	N ₂ AZOTE GAZEUX	NH ₃ AMMONIAC	CO(NH ₂) ₂ URÉE	ACIDES AMINÉS	PROTÉINES
MODÈLE MOLÉCULAIRE					
TENEUR EN AZOTE	100%	82%	47%	8%–27%	~16%
ABONDANCE DANS LA BIOSPHERE (EN MILLIARDS DE TONNES)	10 000	10	0.01	10	1
					
	AZOTE	HYDROGÈNE	OXYGÈNE	CARBONE	SOUFRE

LES COMPOSÉS AZOTÉS se retrouvent partout dans la biosphère. La molécule de diazote (N₂), qui représente 78 pour cent de l'atmosphère, est composée de deux atomes liés si fortement qu'ils réagissent difficilement. Pour se développer, les végétaux ont besoin de composés azotés réactifs tels que l'ammoniac (NH₃) et l'urée (CO(NH₂)₂). Les abondances relatives des divers composés azotés de la biosphère sont données avec une précision d'un facteur dix.

médicinales. Comment satisfaire les besoins, quand manquaient des zones non cultivées qui puissent être converties soit en zones de pâturage, soit en terres arables pour l'expansion de l'agriculture? Le seul recours était l'engrais vert, mais il imposait de renoncer à une saison de culture. C'est pourquoi les agriculteurs ont progressivement appris à alterner les cultures de légumineuses à graines avec les cultures de céréales. La pratique, également, a ses limites : les rendements en légumineuses sont faibles, les produits sont souvent difficiles à digérer, et leur faible concentration en protéines du gluten les rend peu aptes à la confection de pain ou de pâtes alimentaires.

Un sol fertile pour la science

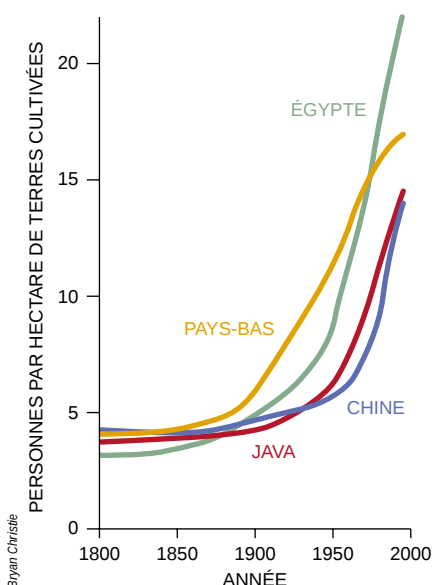
Les progrès de la chimie, surtout au XIX^e siècle, révélèrent le rôle crucial de l'azote dans la production agricole et la rareté des formes utilisables de cet élément. Les chimistes comprirent également que deux autres éléments, le potassium et le phosphore, limitaient parfois les rendements agricoles, mais que les carences de ces derniers éléments pouvaient être facilement corrigées : il suffisait d'épandre de la potasse directement extraite des mines pour pallier les carences en potassium, tandis que l'enrichissement en phosphore s'obtenait par l'ajout d'acide à des roches riches en phosphate pour les convertir en composés solubles, absorbables avec l'eau par les racines. L'azote, toutefois, restait un élément rétif : à la fin des années 1890, agronomes et chimistes préoyaient une crise de l'azote, due à l'intensification de l'agriculture.

L'utilisation de nitrates minéraux (provenant des déserts chiliens) et de guano (des excréments d'oiseaux récoltés sur les îles Chincha, dans une partie du Pérou où il ne pleut jamais) et la récupération du sulfate d'ammonium, dans les hauts-fourneaux, soulagèrent momentanément certains agriculteurs. En Allemagne, en 1898, l'industrie chimique mit au point un procédé de synthèse de la cyanamide (laquelle libérait de l'ammoniac) par réaction du charbon avec la chaux vive et l'azote pur ; cependant le procédé consommait trop d'énergie pour être rentable. Il en était de même pour la production d'oxydes d'azote, par passage d'un courant d'azote et d'oxygène dans un arc électrique. Seule la Norvège, qui disposait d'énergie hydroélectrique bon marché, fabriqua

des engrais azotés par ce procédé à partir de 1903, mais sa production fut limitée.

À cette époque, Fritz Haber, de l'Université technique de Karlsruhe, se fonda sur les travaux d'Henry Le Chatelier et de Walther Nernst pour mettre au point un procédé de synthèse de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène gazeux, en les comprimant jusqu'à une pression de 200 atmosphères et à une température de 500 °C, en présence d'un catalyseur à base d'osmium. Le procédé de Haber était si prometteur que le directeur de la Société BASF demanda à ses meilleurs ingénieurs, Carl Bosch et son collègue M. Mittasch, d'étudier la mise au point d'un procédé industriel fondé sur la réaction de Haber. Le problème était difficile, car les réacteurs, en acier, devaient résister à des pressions et températures élevées ; or ces aciers libéraient des impuretés qui empoisonnaient les catalyseurs. Après dix ans d'études coûteuses, la BASF ouvrit la première usine de synthèse d'ammoniac à Oppau, en 1911 ; elle était relayée par une usine voisine, qui transformait l'ammoniac en sulfate d'ammonium. La capacité de production d'ammoniac fut bientôt doublée pour atteindre 60 000 tonnes par an, ce qui assura l'autosuffisance de l'Allemagne en composés azotés... qui furent bientôt utilisés pour la fabrication des explosifs.

Les difficultés économiques de l'après-guerre limitèrent la diffusion du procédé Haber-Bosch, de sorte que la production mondiale d'ammoniac resta inférieure à cinq millions de tonnes jusqu'à la fin des années 1940. Au cours des années 1950, l'utilisation des engrais azotés augmenta progres-



3. LA DENSITÉ DE POPULATION n'a augmenté dans les pays agricoles qu'après l'avènement des engrais azotés.

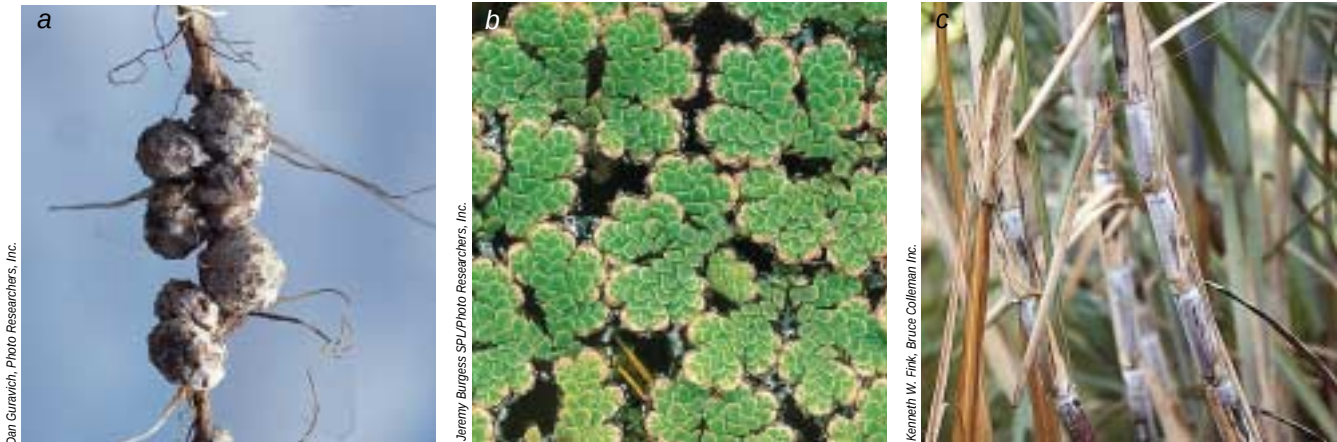
sivement pour atteindre dix millions de tonnes. Puis, dans les années 1960, les innovations techniques permirent de réduire de 90 pour cent les quantités d'électricité nécessaires pour cette synthèse, ce qui permit la construction d'usines plus grandes et plus rentables. L'augmentation exponentielle de la demande multiplia par huit les ton-

nages mondiaux d'engrais azotés de synthèse.

Ces engrais, qui n'étaient initialement utilisés que par les pays riches, furent également consommés par les pays en développement : les pays industrialisés employaient 90 pour cent des engrais azotés au début des années 1960, mais moins de 70 pour

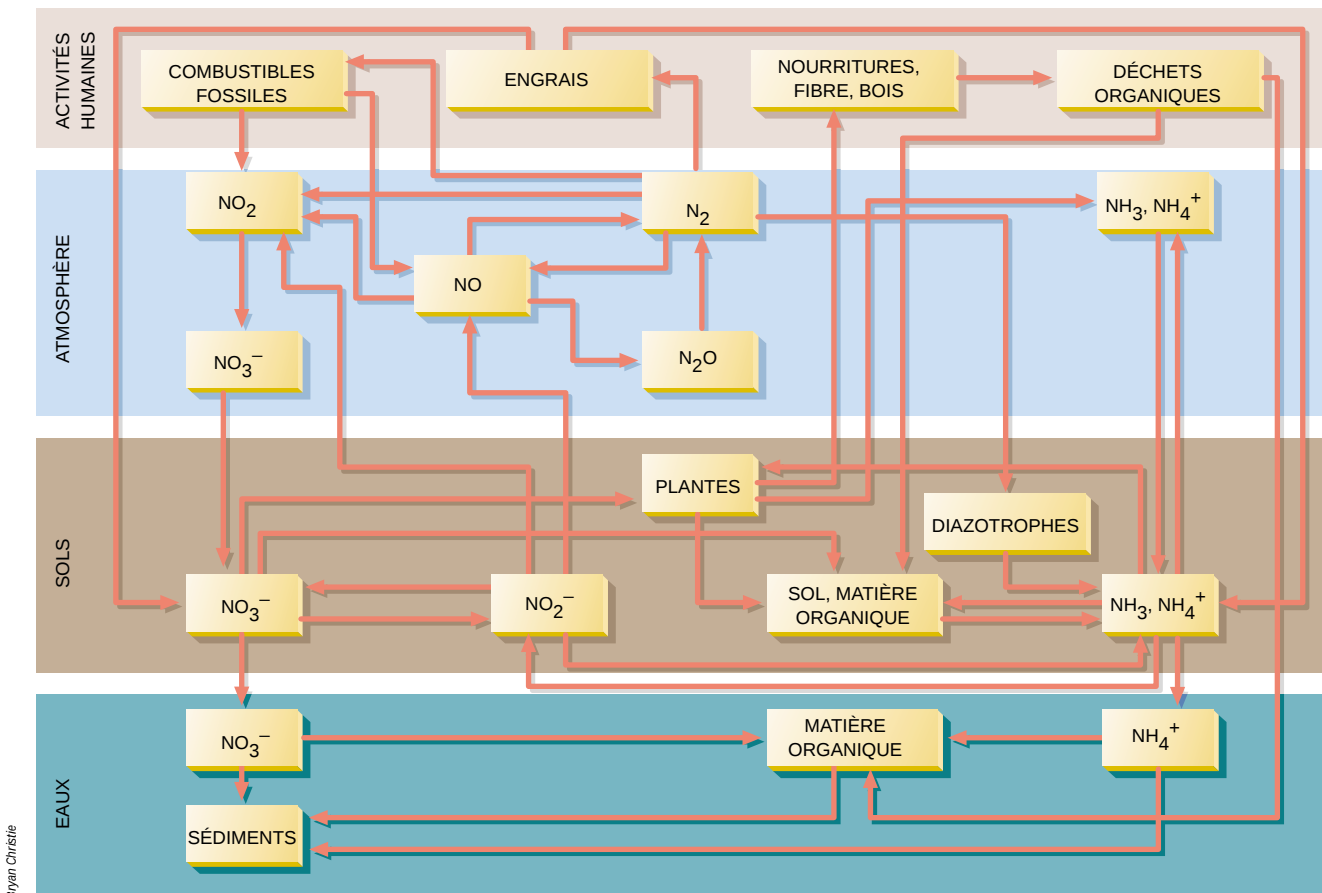
cent dans les années 1980. Aujourd'hui les pays en développement utilisent plus de 60 pour cent de la production mondiale d'engrais azotés.

Quelle est l'importance réelle des engrais azotés de synthèse pour l'agriculture mondiale? Cette question géopolitique importante est difficile, car on connaît mal les entrées et les sorties



4. LES BACTÉRIES FIXATRICES D'AZOTE, micro-organismes capables d'utiliser l'azote atmosphérique pour synthétiser des composés azotés assimilables, vivent dans des nodules, sur les racines des plantes

de la famille des légumineuses telles que le soja (a). On les rencontre également dans les fougères du genre *Azolla* (b), ainsi que dans les tiges de la canne à sucre (c).



5. L'AZOTE est présent dans des molécules différentes, selon qu'il se trouve dans l'eau, dans le sol, dans l'atmosphère ou dans la couverture végétale. L'azote s'échange constamment entre

ces diverses formes. L'avènement de la production industrielle des engrais azotés de synthèse a profondément bouleversé le cycle naturel de cet élément.



6. L'EUTROPHISATION des eaux trop enrichies en azote, en raison d'un lessivage de sols agricoles excessivement engraisés, se manifeste par une prolifération des algues ; leur décomposition absorbe l'oxygène dissous, ce qui tue les faunes aquatiques.

d'azote dans les champs. Toutefois une analyse détaillée des divers types d'apport permet d'estimer à quelque 175 millions de tonnes la quantité totale d'azote qui entre chaque année dans les sols ; la moitié de cette quantité est assimilée par les plantes cultivées. Les engrais de synthèse fournissent environ 40 pour cent de l'azote absorbé par ces cultures. Comme celles-ci fournissent – soit directement sous la forme de plantes, soit indirectement sous la forme d'aliments d'origine animale – 75 pour cent de l'azote présent dans les protéines consommées (le reste est fourni par le poisson, par la viande et par les produits laitiers produits par le pâturage), on estime qu'un tiers des protéines consommées par la population mondiale dépend des engrais azotés de synthèse.

Toutefois un tel calcul n'indique pas que tous les engrais azotés utilisés soient indispensables. Si l'on utilise tant d'engrais de synthèse en Europe et aux États-Unis, c'est surtout parce que l'on veut produire des aliments pour le bétail, dont on consomme la viande. Et même si l'on réduisait de moitié la quantité de protéines animales consommées par les Européens et par les Américains en les persuadant de manger moins de

viande, ces populations bénéficieraient encore d'une alimentation adéquate.

Inversement, on sous-estime l'importance des engrais azotés en observant simplement que la quantité de protéines consommées par la population mondiale dépend pour un tiers des engrais de synthèse : c'est l'existence même d'un certain nombre de pays à territoire limité et à population importante qui dépend de ces molécules. Avec la raréfaction des nouvelles terres, les agriculteurs de ces pays, qui consomment peu de viandes, doivent employer des quantités massives engrais azotés, pour produire suffisamment.

L'excès en tout, un défaut

L'introduction massive d'engrais azotés dans les sols et dans les eaux nuit à la santé des peuples comme à l'équilibre écologique du Globe. Des concentrations excessives en nitrates provoquent des syndromes graves, telle la méthémoglobinémie, ou « maladie des bébés bleus », et peut-être des cancers. En outre, le lessivage de ces sels solubles peut gravement polluer les eaux de surface et les nappes phréatiques, dans les zones où les engrais sont massivement épandus : depuis

une trentaine d'années, la pollution par les nitrates est devenue un grave problème écologique. Ainsi, l'eau de puits de nombreuses régions de la ceinture céréalière des États-Unis et l'eau de la nappe phréatique de nombreuses régions d'Europe de l'Ouest contiennent des concentrations en nitrates dangereusement élevées ; des concentrations bien supérieures aux limites légales sont mesurées dans les rivières qui drainent les zones cultivées, ainsi que dans de grands fleuves tels que le Rhin ou le Mississippi.

De surcroît, les engrais azotés qui s'écoulent dans les mares, lacs et baies côtières provoquent souvent leur eutrophisation : l'enrichissement des eaux en un nutriment qui était préalablement présent en quantité limitée suscite une croissance explosive des algues et des cyanobactéries, dont la décomposition ultérieure capte l'oxygène, qui vient alors à manquer aux autres créatures ; les poissons et les crustacés en meurent. La baie de San Francisco et de vastes parties de la mer Baltique souffrent d'eutrophisation ; dans le Queensland, en Australie, le lessivage des champs cultivés menace également certaines parties de la grande barrière de corail, qui risquent d'être recouvertes par les algues.

Si l'eutrophisation est due à la solubilité des nitrates, qui sont propagés par les eaux, la persistance localisée de certains composés riches en azote est également nuisible, car elle acidifie les sols (ceux-ci sont également acidifiés par des composés soufrés qui, libérés dans l'atmosphère par les combustions, reviennent dans les sols avec les précipitations). Dans les régions où l'on n'épand pas de chaux pour lutter contre cette acidification, les oligo-éléments et les métaux lourds du sol sont dissous, et ils polluent l'eau potable.

L'utilisation massive d'engrais azotés s'accompagne également d'un rejet de grandes quantités de monoxyde d'azote (NO) dans l'atmosphère. Les concentrations en ce gaz, qui est produit par l'action des bactéries du sol sur les nitrates, sont encore faibles, mais le composé participe à deux phénomènes inquiétants. Il contribue à la destruction de la couche d'ozone de la stratosphère ; aux altitudes inférieures, dans la troposphère, le monoxyde d'azote produit un effet de serre. Or, dans l'atmosphère, la durée de vie d'une molécule de monoxyde d'azote est supérieure à un siècle, et chaque molécule absorbe envi-

ron 200 fois plus de chaleur qu'une molécule de gaz carbonique.

Une autre modification néfaste de l'atmosphère est amplifiée par le dioxyde d'azote (NO_2), qui est libéré par les micro-organismes qui agissent sur les engrais azotés. Cet oxyde (qui est d'ailleurs produit en quantités encore supérieures lors des combustions) réagit, en présence du rayonnement solaire, pour produire le smog photochimique. Bien que le dépôt de composés azotés contenus dans l'atmosphère favorise la croissance des végétaux dans des prairies ou dans des forêts carencées en azote, des doses excessives risquent de surcharger des écosystèmes sensibles.

Lorsque l'on a commencé à utiliser les engrais azotés de synthèse, on ne prévoyait pas ces nuisances et, même aujourd'hui, on s'en préoccupe moins que de l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Pourtant, tout comme la libération massive de dioxyde de carbone, l'introduction d'azote réactif dans l'environnement est une expérience géochimique risquée.

De l'habitude à la dépendance

Les émissions de dioxyde de carbone, et les menaces qu'elles font encourir au climat, peuvent être réduites par un ensemble de mesures économiques et techniques. Même sans crainte d'un réchauffement des climats, on doit se préoccuper du remplacement des combustibles fossiles, car ces derniers se raréfient. En revanche, nous n'avons aucun moyen de cultiver les végétaux sans apport d'azote, et aucun procédé ne pourrait aujourd'hui remplacer la synthèse de Haber-Bosch.

Le génie génétique créera peut-être un jour des bactéries symbiotiques du genre *Rhizobium* qui fourniront directement de l'azote aux céréales, ou bien il obtiendra des végétaux fixant directement l'azote, mais la recherche n'a pas encore abouti. L'humanité devra augmenter sa consommation d'engrais azotés de synthèse pour nourrir les milliards de personnes qui naîtront avant que la population mondiale ne cesse de croître.

Une stabilisation rapide de la population globale et l'adoption générale du végétarisme pourraient réduire

Le curieux destin de Fritz Haber



UPI/Corbis-Bettmann

FRITZ HABER reçut le prix Nobel de chimie en 1918, malgré son activité durant la guerre.

n'était pas de son avis ; notamment sa première femme, tourmentée par l'épouvantable contribution de son mari à cette guerre, se suicida la veille de la première utilisation des gaz, en 1915. Condamné par le milieu scientifique, Haber poursuivit néanmoins ses recherches. Plus tard, les mesures antisémites des nazis le firent partir pour l'Angleterre (il était juif). Il mourut en 1934 à Bâle.

Malgré la remarquable contribution de Fritz Haber à la chimie et malgré sa découverte du procédé industriel de synthèse de l'ammoniac, le Comité Nobel lui accorda avec réticence le prix Nobel de chimie en 1918. Directeur de l'Institut Kaiser Wilhelm de chimie physique au cours de la Première Guerre mondiale, il avait introduit le chlore, puis le phosgène et l'ypérite, comme gaz de combat, parce qu'il était persuadé que de telles armes permettraient aux armées allemandes de remporter une victoire-éclair, qui réduirait les souffrances générales. Tout le monde



Corbis-Bettmann

LES GAZ DE COMBAT ont fait d'innombrables morts lors de la Première Guerre mondiale.

les besoins en engrais azotés, mais peut-on raisonnablement s'attendre à de telles transformations ? À défaut, on devra améliorer l'utilisation des engrais : on obtient des résultats impressionnants en surveillant les concentrations en azote disponible dans le sol et en réglant les apports sur les besoins.

On ne peut apprécier le potentiel réel de l'« agriculture biologique » qu'en conservant ces considérations géopolitiques à l'idée. Si la rotation des cultures, la culture des légumineuses, l'entretien des sols et le recyclage des déchets organiques sont des techniques utiles, elles ne satisferont pas les besoins croissants des pays très peuplés qui manquent de terres cultivables. Si tous les agriculteurs revenaient aux méthodes traditionnelles de l'agriculture biologique, on constaterait rapidement que celles-ci ne sont pas en

mesure de nourrir la population mondiale, car l'azote est trop rare, dans les sols, pour nourrir six milliards d'hommes.

Lorsque l'Académie des sciences de Suède décerna le prix Nobel de chimie à Fritz Haber, en 1918, elle mentionna qu'il avait créé « un moyen extrêmement important d'améliorer la production agricole et le bien-être de l'humanité ». Toute dithyrambe qu'elle soit, cette description est insuffisante : aujourd'hui, deux milliards de personnes sont en vie parce que les protéines de leur organisme contiennent de l'azote qui est dû au procédé Haber-Bosch. À moins d'avancées du génie génétique, la plupart des protéines nécessaires à la survie et à la croissance des deux autres milliards de personnes, à naître dans les deux prochaines générations, proviendront de la même source.

Vaclav SMIL est professeur de géographie à l'Université du Manitoba.

Vaclav SMIL, *Population Growth and Nitrogen : An Exploration of a Critical Existential Link*, in *Population and Development Review*, vol. 17, n° 4, pp. 569-601, décembre 1991.

James N. GALLOWAY, William H. SCHLESINGER, Hiram LEVY II, Anthony MICHAELS et Jerald L. SCHNOOR, *Nitrogen Fixation : Anthro-*

pogenic Enhancement – Environmental Response, in *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 9, n° 2, pp. 235-252, juin 1995.

Ester van der VOET, Rene KLEIJN et Udo de HAES, *Nitrogen Pollution in the European Union : Origins and Proposed Solutions*, in *Environmental Conservation*, vol. 23, n° 2, pp. 120-132, 1996.

Vaclav SMIL, *Cycles of Life : Civilization and the Biosphere*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

Sablier inversé

PIERRE ÉVESQUE

L'étrange comportement du sable quand on fait vibrer un sablier où les grains montent, au lieu de descendre.

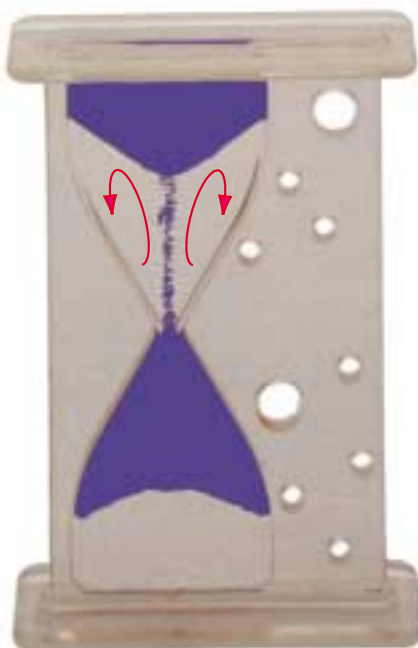
Étrange sablier ! L'écoulement du temps y est mesuré, non par la descente de grains de sable, mais par la montée de billes qui flottent dans un liquide. En avril 1995, nous en avons analysé le fonctionnement et avons vu que la chambre supérieure est le siège de deux circulations en sens opposés, engendrées par le déplacement du liquide, quand des billes remontent au centre de la chambre. Cet effet est semblable à celui qu'avait observé le médecin britannique M. Boycott, dans du sang coagulé qui sédimentait : les caillots qui descendent dans un tube vertical sont ralentis par le fluide qu'ils déplacent, mais la descente est facilitée quand le tube est incliné, parce que les caillots s'écoulent près de la face inférieure du tube, sans être gênés par le fluide qui remonte, au-dessus d'eux.

Nous avons également observé que, dans cette même chambre supérieure, la remontée des particules est plus lente près des parois verticales qu'au centre, et nous avons conclu que ce phénomène était dû à la viscosité du liquide environnant. Enfin nous avons remarqué l'existence d'une cheminée, dans la partie inférieure occupée par les billes : cette cheminée alimente en liquide la partie inférieure de la chambre inférieure, à mesure que les billes quittent cette dernière ; elle ressemble (en sens inverse) à la cheminée d'un volcan provoquée par l'expulsion des laves.

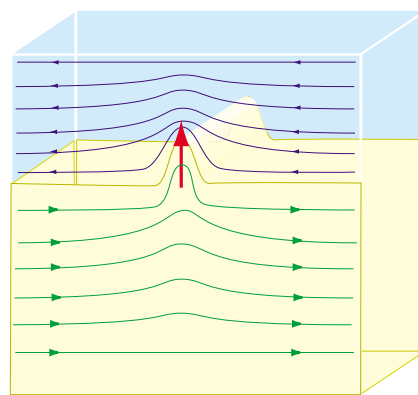
Je vous propose de reprendre le même sablier afin d'explorer d'autres effets hydrodynamiques. Nous nous limiterons à ceux qu'induisent des vibrations sur la forme de l'interface entre un liquide et un milieu granulaire (tas de sable ou tas de billes). Nous verrons que ces effets peuvent aussi être obtenus à l'interface de deux liquides.

Ces expériences permettent d'illustrer le comportement fluide d'un milieu granulaire. Nous verrons que, dans les cas examinés, les forces de frottement (forces visqueuses ou forces de frottement solide entre grains) sont négligeables et que les comportements

observés résultent des effets d'inertie dans les fluides incompressibles. Toutefois, avant d'examiner cette expérience avec le sablier inversé, nous examinerons une expérience similaire, dans une cellule de géométrie plus simple.



1. Circulation du liquide sous l'action de la montée des billes, dans un sablier inversé.



2. Une protubérance du milieu granulaire (en jaune) s'allonge dans le liquide qui surmonte ce milieu, parce que la vitesse augmente dans le liquide au passage de la protubérance : de ce fait, la pression diminue...

UNE EXPÉRIENCE DE VIBRATION

À l'aide de plaques de plexiglas, construisons une cellule rectangulaire, transparente, d'un centimètre d'épaisseur et de hauteur bien supérieure à l'épaisseur. Fixons cette cellule contre le cône d'un haut-parleur puissant, relié à un amplificateur où nous injectons l'enregistrement d'un *la* de diapason, le volume étant réglé au maximum (voir la figure 3). Ainsi nous pouvons faire vibrer la cellule horizontalement.

Remplissons à moitié la cellule de sable, complétons le remplissage avec de l'eau, et fermons hermétiquement sans laisser d'air. Lorsque la cellule est au repos, la pesanteur fait sédimer les particules. La surface du tas de sable dans l'eau peut être horizontale ou inclinée, mais l'inclinaison ne peut être supérieure à un angle nommé angle de talus : la stabilité du sable dans une configuration inclinée résulte de l'existence d'un frottement solide entre les grains de sable ; en raison de ces forces de frottement, les grains des couches supérieures ne roulent pas sur les grains inférieurs.

Faisons alors vibrer la cellule horizontalement avec une amplitude a et une fréquence f fixes. Une telle vibration correspond à une accélération qui dépend du temps : aussi, dans la cellule, les particules sont soumises à une gravité effective qui est la somme de cette accélération et de l'accélération de la pesanteur. Cette accélération résultante oscille périodiquement autour de la verticale d'un angle β donné par $\tan \beta = 4\pi^2 a f^2 / g$.

Lorsque les amplitudes de vibration sont limitées, la gamme des inclinaisons possibles de la surface libre du sable diminue d'autant plus que les variations d'accélération imposées par la vibration sont importantes : toutes les pentes supérieures à $\phi - \beta$ sont déstabilisées. Ainsi, si l'angle β est inférieur à l'angle de talus ϕ , la surface libre reste stable dans une gamme d'inclinaisons, qui diminue quand l'amplitude de vibration croît. Puis, lorsque l'angle β devient supérieur à l'angle de talus ϕ , aucune surface libre n'est plus en équilibre, et l'on observe un va et vient rapide du sable, qui oscille autour d'une position d'équilibre : le sable se « liquéfie ». Un stroboscope nous montrera que le détail de la surface libre moyenne horizontale, créée par la vibration, a des caractéristiques insoupçonnées.

Avant de construire le stroboscope qui montrera les phénomènes invisibles à l'œil nu, remarquons que l'observation de la surface du sable redevient facile si l'on vibre encore plus fort la cellule : cette surface est ridée avec des rides perpendicu-