

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.

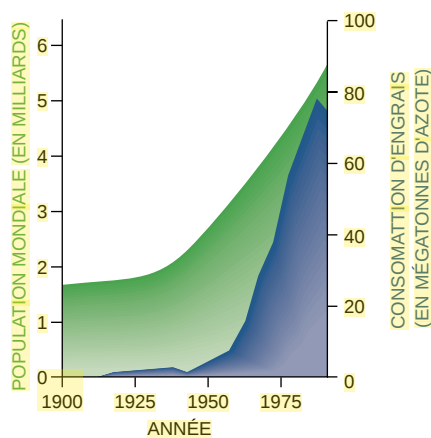
Un problème qui ne date pas d'hier

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

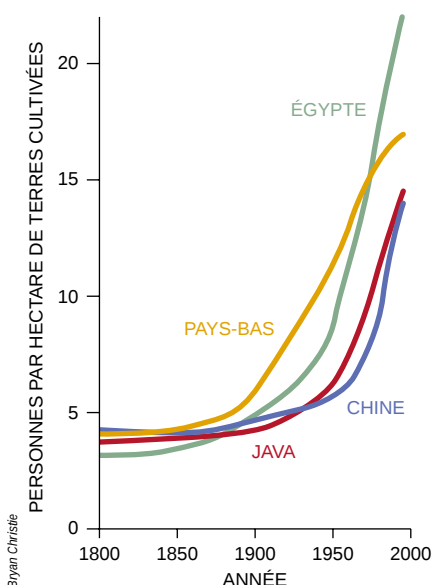
Les progrès de la chimie, surtout au XIX^e siècle, révélèrent le rôle crucial de l'azote dans la production agricole et la rareté des formes utilisables de cet élément. Les chimistes comprirent également que deux autres éléments, le potassium et le phosphore, limitaient parfois les rendements agricoles, 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 prévoyaient 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.