

n'y a pas d'azote qui sort du sol, parce qu'il n'y a pas d'eau qui le quitte. Ainsi, pendant trois ou quatre années peu pluvieuses, les concentrations en nitrate n'augmentent plus dans des nappes à renouvellement rapide. Les promoteurs de ces expérimentations crient alors victoire, et... les concentrations remontent à la première pluie.

La lenteur de la production du nitrate est accompagnée de la lenteur de son transfert dans le sous-sol au-dessus de la nappe. Ainsi, en Champagne, les profils de concentration du nitrate dans la zone du sous-sol non saturée en eau, au-dessus de la nappe de la craie, montrent que la progression des nitrates vers la nappe est d'environ un mètre en une année et demie. Les concentrations dans la partie supérieure du sous-sol non saturé étant plus élevées que dans la nappe, la concentration dans celle-ci va certainement s'accroître dans les prochaines années.

Les matières organiques, précieux réservoir d'azote

Que peuvent alors faire les agriculteurs ? D'abord, ne pas aggraver la situation, en préservant en priorité les matières organiques du sol. Pendant plusieurs décennies, cette préservation était un objectif des agronomes : ils croyaient que la concentration des sols en matières organiques était un paramètre essentiel de la fertilité. Puis cette pratique a été abandonnée : la fertilisation azotée a permis l'accroissement régulier des rendements tandis que les concentrations en matières organiques des sols cultivés chutaient. Ces matières organiques détruites sont parfois la source d'une bonne part des nitrates contenus aujourd'hui dans les nappes !

Ainsi, la teneur en matières organiques du sol de la prairie Nord américaine a diminué de 70 pour cent depuis son retournement en 1888 pour la culture de blé. L'incorporation de matières organiques venues du blé ne compense pas cette diminution. Notons d'ailleurs que le carbone de ces matières organiques détruites a été oxydé en dioxyde de carbone, gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère : ce n'est que l'une des nombreuses relations qui couplent les cycles de l'azote et du carbone.

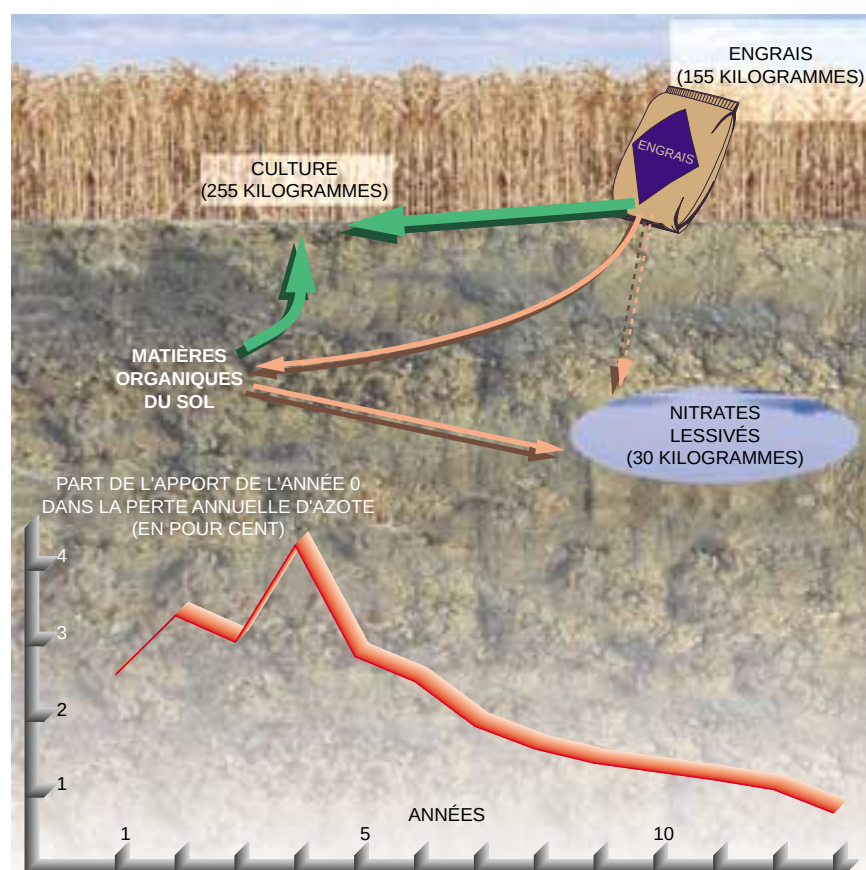
Un autre exemple de dégradation du sol, naturelle cette fois, illustre le lien entre la destruction des matières organiques du sol et la concentration du nitrate dans la nappe sous-jacente.

Ainsi la concentration du nitrate est-elle très élevée dans la nappe aquifère du Grand Erg, au Sahara. Dans les zones d'affleurement de la nappe, le nitrate précipite même en sels, encore utilisés il y a quelques décennies par des tribus touarègues pour la fabrication de poudre. Ces nitrates proviennent en grande partie de la minéralisation, puis de la nitrification, de l'azote contenu dans les matières organiques des sols qui s'étaient formés lors de la période dite pluviale, il y a 6000 ans : la végétation et la faune se sont développées dans le Sahara, au moins localement, puis ont disparu à la suite d'importants changements climatiques et de l'aridification qui a conduit à la situation actuelle.

Au-delà de leur intervention dans le cycle de l'azote, les matières organiques du sol ont d'autres rôles : elles transportent, quand elles sont solubles, des micropolluants (pesticides, métaux lourds) et contrôlent en partie le devenir de ces molécules et de ces éléments dans le milieu naturel. Elles inter-

viennent aussi sur la stabilité des sols et sur leur potentiel de résistance à l'érosion. Enfin, contenant beaucoup de carbone organique, à l'état réduit, elles sont des réducteurs, et réagissent chimiquement avec de nombreux composés dans le sol, notamment avec les nitrates. Ainsi, dans de nombreux milieux anaérobies, où il n'existe pas de dioxygène dissous, vivent des bactéries qui respirent l'oxygène de l'ion nitrate et transforment celui-ci en diazote : le carbone des matières organiques s'oxyde en gaz carbonique, tandis que le nitrate est réduit. Ce processus naturel de dépollution est la dénitrification, qui boucle le cycle externe de l'azote. C'est encore un exemple du couplage entre les cycles de l'azote et du carbone.

Cette dénitrification se produit naturellement dans des eaux souterraines profondes, sous les terres cultivées, dans de très nombreux sites en France, en Angleterre, en Afrique du Sud ou aux États-Unis. Ainsi, dans la nappe de la craie du Nord de la



3. LES NITRATES LESSIVÉS au cours d'une année ne proviennent que pour une faible part des engrais apportés cette année là. Ces derniers sont surtout utilisés par les plantes et réorganisés en matières organiques du sol (en haut, les chiffres correspondent à une année). La part, dans la perte annuelle, de l'azote apporté une année donnée décroît lentement au cours de la douzaine d'années suivantes (courbe en rouge).

France, la concentration du nitrate chute par endroits de plus de 100 milligrammes par litre à zéro, en quelques centaines de mètres, grâce à l'action de ces bactéries.

Dans la plaine de l'Allemagne du Nord, la concentration de nitrate dans les nappes est aussi souvent quasi nulle, en dépit d'une agriculture intensive. C'est, là encore, grâce à l'action de bactéries dénitrifiantes. Ces bactéries ont une action légèrement différente : elles réduisent les nitrates en oxydant des sulfures de fer (où le soufre est réduit), abondants dans le sol, et non pas le carbone réduit des matières organiques. La réaction libère ainsi des sulfates (où le soufre est oxydé). Depuis les années 1960, il n'y a pas d'augmentation de la concentration de nitrate dans les nappes, malgré une agriculture intensive, mais, en contrepartie, on y observe un accroissement régulier des concentrations en sulfate, qui se rapprochent dangereusement de la norme de potabilité pour ce composé.

La dénitrification se produit aussi en surface dans des zones humides, tels les sols engorgés des bordures boisées des grands fleuves. Là, sur quelques dizaines de centimètres de profondeur dans le sol et sur quelques dizaines de mètres latéralement, les eaux chargées de nitrate, lessivés latéralement, peuvent être dénitrifiées par des bactéries, qui oxydent simultanément du carbone en dioxyde de carbone. Cette dénitrification est efficace (trois kilogrammes d'azote par hec-

tare et par jour) : la pollution est ainsi réduite avant que ces eaux de surface ne rejoignent les rivières et les fleuves.

Divers travaux ont montré que l'on peut facilement promouvoir la dénitrification par des bactéries dans les eaux souterraines peu profondes, par exemple dans des nappes alluviales : il suffit d'injecter dans la nappe polluée par les nitrates de petites quantités de carbone organique soluble, de l'alcool par exemple. Dans toutes les expériences, la dénitrification démarre, sous l'action des bactéries naturellement présentes dans le milieu, et devient très efficace. Toutefois, très rapidement, les pores de l'aquifère sont colmatés par les corps bactériens de la biomasse dénitrifiante qui se reproduit trop rapidement : à terme, l'eau circule plus mal, introduisant un dysfonctionnement hydraulique de la nappe.

La pollution passe de l'eau à l'air

Par ailleurs, la dénitrification naturelle a une contrepartie : elle transfère vers l'atmosphère une partie de la pollution du sol et de l'eau. Le nitrate, forme la plus oxydée, est transformé en diazote, forme réduite, par une chaîne de réactions qui produisent de nombreux composés intermédiaires. Or, le rendement de la dernière de ces réactions, qui transforme l'oxyde nitreux en azote, est faible dans de nombreux milieux. La dénitrifica-

tion produit alors de l'oxyde nitreux, gaz stable dans la basse atmosphère (son temps moyen de résidence y est de 150 ans), responsable d'un fort effet de serre (six pour cent de l'effet additionnel depuis 1765) et qui contribue à la destruction de l'ozone dans la stratosphère, qu'il atteint à cause de sa longue durée de vie.

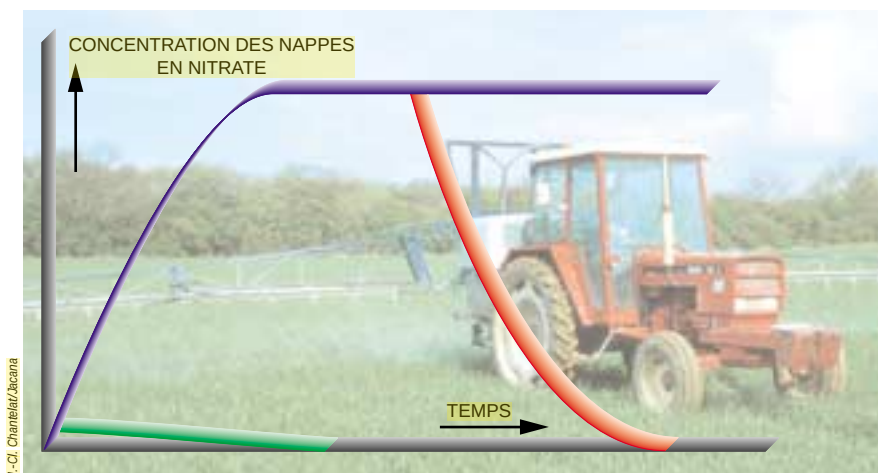
Ainsi, on cultive du colza pour produire du biocarburant, afin d'économiser du combustible fossile et de rejeter moins de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Mais cette culture nécessite des apports d'engrais, et elle est responsable, à certaines périodes de l'année, d'excédents de nitrate dans le sol. Des équipes de l'INRA de Grignon et de Dijon ont montré que la dénitrification naturelle peut alors se produire et émettre de l'oxyde nitreux, dont le fort effet de serre annihilerait le gain associé au dioxyde de carbone qui n'a pas été émis.

Quelles voies de recherche permettront-elles de relever le défi de l'agronomie écologique et économiquement rentable? L'exemple de l'oxyde nitreux montre que nous devons prendre en compte l'ensemble des cycles biogéochimiques de la surface (cycles de l'eau, de l'azote, du carbone), dans le sol, dans la plante et dans l'atmosphère, ainsi que leurs couplages.

L'échelle naturelle d'étude de ces cycles est celle du bassin versant, voire de la région. Nous avons vu en effet que le fonctionnement écologique des agrosystèmes est couplé à celui des écosystèmes naturels qui les jouxtent : la dénitrification n'est que l'un des processus de dépollution qui se produisent dans les zones engorgées d'eau des bords de rivière.

En outre, les durées caractéristiques des cycles sont supérieures à l'année, donc à la période de la production végétale, et souvent en décalage avec celle-ci. Contrairement aux expériences de type agronomique, de courte durée, les expérimentations environnementales requièrent donc de longues durées, dans le cadre d'observatoires de terrain.

La compréhension des écosystèmes naturels guiderait aussi les efforts vers une agronomie à faible niveau d'intrant, notamment d'engrais. Ainsi, avec le laboratoire Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques, de l'Université Paris 6 et de l'École normale supérieure, nous avons étudié le



4. LA QUANTITÉ DE NITRATE qui arrive chaque année dans une nappe aquifère (*courbe en bleu*) est la somme des pertes dues aux apports annuels successifs d'engrais (*dont un élément est montré en vert*). Lorsque l'on commence à utiliser des engrais, cette quantité augmente pendant plusieurs années, puis elle se stabilise : les pertes de nitrate compensent les apports. Le retour à l'équilibre antérieur (*courbe en rouge*), par la suppression des engrais, ne serait obtenu qu'après une longue durée.

cycle de l'azote dans la savane : celui-ci y est presque totalement fermé, sans pertes par lessivage et sans dénitrification notable.

Bien que les sols soient peu fertiles (ils produisent peu d'azote minéral, notamment de nitrate), la productivité atteint presque celle d'un champ de blé. Pourquoi n'y a-t-il pas de nitrate dans le sol ? Les plantes herbacées de la savane sont pérennes. Après leur mort, leur azote organique est minéralisé sous forme d'ammonium. L'ammonium, chargé positivement contrairement au nitrate, est retenu par l'argile et par l'humus ; il n'est pas lessivé, pas dénitrifié. Il est réutilisé, presque sans aucune perte, par la nouvelle génération de plantes. Il semble que les plantes empêchent le sol de nitrifier : elles posséderaient un système inhibiteur de nitrification, tel qu'en ont recherché, sans beaucoup de succès, les agronomes.

Pour remédier aux pollutions associées à l'azote, il reste à inventer de nouvelles pratiques dont nous savons que les résultats ne seront apparents qu'après de nombreuses années. L'interdiction des chlorofluorocarbones, dont physiciens et chimistes de l'atmosphère ne nous prédisent les premiers effets bénéfiques sur la couche d'ozone que dans plusieurs décennies, sera un exemple à suivre.

André MARIOTTI est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris, où il dirige l'UMR 7618 INRA / CNRS.

A. P. KINZING et R. H. SOCOLOW, *Human Impacts on the Nitrogen Cycle*, in *Physics Today*, novembre 1994.

A. MARIOTTI, *Dénitrification in situ dans les eaux souterraines : processus naturels ou provoqués : une revue*, in *Hydrogéologie*, vol. 3, pp. 43-68, 1994.

D. DENYS, A. MARIOTTI, J.C. MULLER, M. GRABLY, B. MARY et B. NICOLARDOT, *Utilisation conjointe de la lysimétrie et des techniques de marquage isotopique pour étudier le bilan de l'azote des sols cultivés*, in *Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France*, vol. 81, n°4, pp. 131-162, 1995.

C. HÉNAULT et J. C. GERMON, *Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) par les sols*, in *Agronomie*, vol. 15, pp. 321-355, 1995.

Vaclav SMIL, *Engrais et démographie*, in *Pour la Science*, septembre 1997.