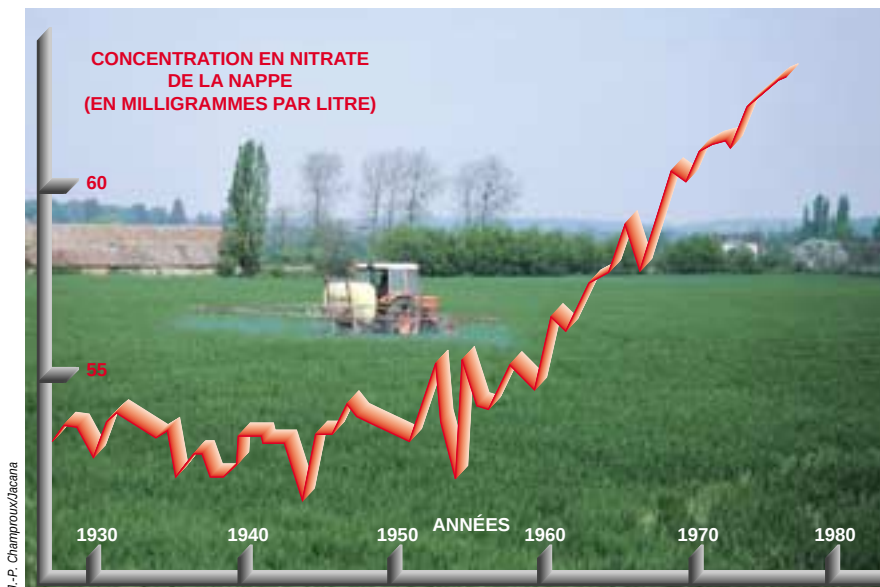




J.-P. Champrou/Jacana

**2. LA CONCENTRATION EN NITRATE** augmente dans la nappe aquifère de la Brie à cause de l'épandage d'engrais azotés. Bien que les agriculteurs maîtrisent mieux cet épandage depuis quelques années, la norme de potabilité de l'eau, de 50 milligrammes par litre, est dépassée, comme dans la plupart des régions de grandes cultures.

53 milligrammes de nitrate par litre en moyenne, déjà supérieure à la norme de potabilité.

Comment réduire ces concentrations ? Les agriculteurs pourraient-ils réduire les pertes par une gestion encore meilleure de la fertilisation et un contrôle plus fin du cycle de l'azote dans le sol ? C'est peu vraisemblable, pour deux raisons. D'abord, le lessivage des nitrates dépend beaucoup de paramètres incontrôlables, tels que la température ou la pluviométrie. Ensuite, les nitrates lessivés au cours d'une année donnée ne proviennent que pour une toute petite part du lessivage direct des engrais apportés cette année-là : leur origine principale est la matière organique du sol, qui stocke l'azote pendant très longtemps.

À la station INRA de Châlons en Champagne, avec Bernard Nicolardot, nous suivons les flux des minéraux qui sortent du sol dans les eaux d'infiltration, à l'aide de cases expérimentales. Il s'agit de cubes de sol non perturbé de deux mètres de côté, dont les flancs latéraux sont murés et dont le plancher est une plaque d'inox perforée : nous recueillons, dans un espace vide situé au-dessous, l'eau qui a traversé la case et nous l'analysons.

Chaque année, le sol est fertilisé en surface avec l'équivalent de 150 kilogrammes d'azote par hectare. En 1982, nous avons utilisé un engrais qui contenait un isotope stable de

l'azote, rare dans le milieu naturel, l'azote 15 (dont le noyau atomique contient 15 protons et neutrons, au lieu de 14 dans la forme d'azote la plus répandue). Depuis 16 ans, des nitrates contenant ces atomes d'azote 15 ressortent de la case expérimentale à deux mètres de profondeur, à raison, chaque année, de 1 à 1,5 pour cent de l'apport initial de 1982 (voir la figure 3). La même expérience montre qu'un sel non réactif (qui n'est pas, comme le nitrate, réorganisé dans le sol), tel le chlorure, appliqué dans les mêmes conditions, est éliminé en trois ou quatre ans.

L'azote apporté sous forme d'engrais et qui n'est pas consommé dans l'année par les plantes reste donc longtemps dans le sol. Il est réorganisé en matières organiques à renouvellement rapide qui participent au cycle interne de l'azote, que nous avons décrit au début de cet article. Les matières organiques se minéralisent progressivement, puis sont nitrifiées et elles libèrent des nitrates dans le milieu. Les nitrates lessivés proviennent donc en partie de fuites de ce cycle, qui surviennent à toute époque de l'année. Par exemple, l'hiver, si la température remonte et qu'il pleut, les bactéries qui assurent la minéralisation et la nitrification reprennent leur activité alors qu'aucune plante en période de forte croissance ne consomme le nitrate : celui-ci est emporté dans la nappe aquifère.

## Des pertes faibles, mais durables

Sur 15 ans, alors qu'il sort en moyenne du sol 38 kilogramme d'azote par hectare et par an sous forme de nitrate, la perte moyenne annuelle correspondant à l'apport de 1982 est de seulement 0,7 kilogramme d'azote par hectare. Chaque apport annuel est donc responsable d'une petite perte annuelle, mais pendant très longtemps : ces pertes s'additionnent, expliquant les grandes quantités de nitrate perdues après une quarantaine d'années de fertilisation régulière.

Cet énorme tampon de matière azotée que sont les matières organiques mortes du sol et l'humus (environ 50 000 milliards de kilogrammes d'azote sur Terre) est donc une source importante des nitrates lessivés, et qui les produit lentement. Nous ne comprendrons complètement le cycle de l'azote que lorsque nous aurons défini et caractérisé les différents types de matières organiques impliqués dans le cycle interne court (organisation et minéralisation), et que nous connaîtrons leur comportement à long terme et leurs interactions avec les transferts d'eau.

Nous pouvons toutefois dès à présent proposer une modélisation simple de l'accroissement des concentrations de nitrate dans les nappes, en additionnant les pertes correspondant aux apports annuels successifs (voir la figure 4). On obtient d'abord une période d'accroissement de la concentration en nitrate, puis cette concentration se stabilise : un nouvel équilibre dynamique, qui inclut les apports par l'homme, s'établit. On comprend mieux ainsi pourquoi la pollution azotée, qui a débuté vers les années 1950, a mis tant de temps à s'installer.

Avons-nous atteint le nouvel équilibre ? Nous ne le savons pas. Nous ne savons même pas où nous en sommes de la courbe d'accroissement de la concentration en nitrate : au milieu ? en haut ? près de l'équilibre dynamique ? Cette modélisation démontre toutefois que même si l'on arrêta tout apport d'engrais, hypothèse absurde, le retour à l'état antérieur durerait plusieurs décennies.

On comprend ainsi la déception apportée par des expérimentations de diminution à grande échelle des doses d'engrais. La variabilité inter-annuelle des pertes en azote est très grande : dans le meilleur des cas, il ne pleut pas, et il

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.

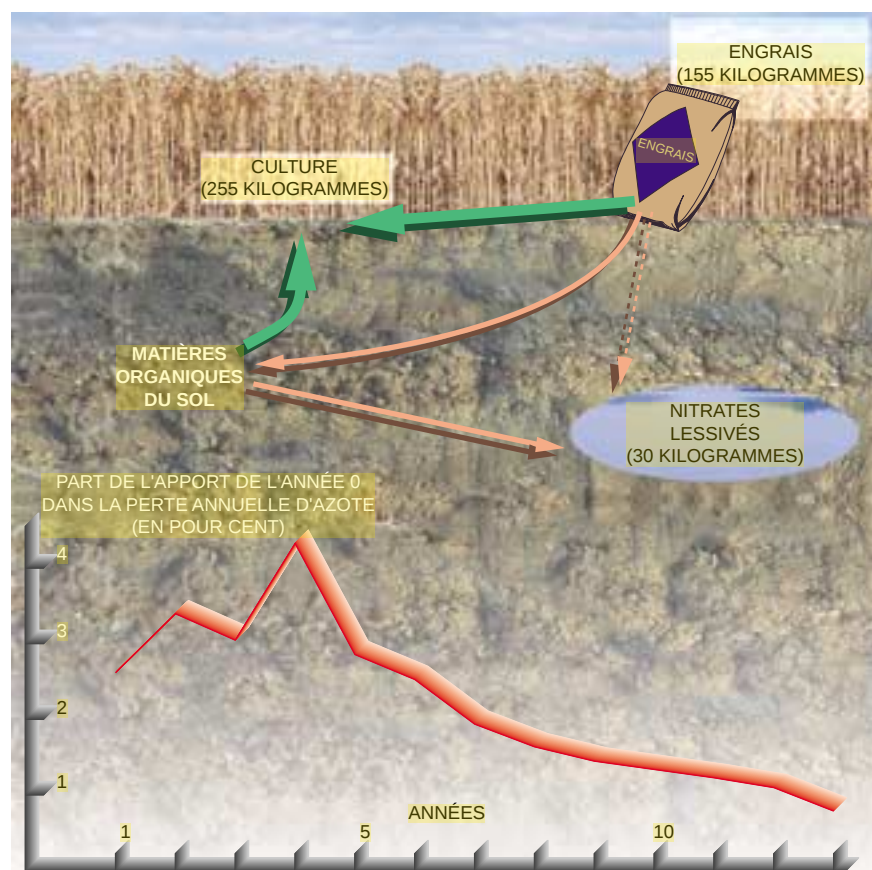
Un autre exemple de dégradation du sol, naturelle cette fois, illustre le lien entre la destruction des matières organiques du sol et la concentration du nitrate dans la nappe sous-jacente.

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 6 000 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).