
Transferts de nutriments des sols vers les eaux - Influence des pratiques agricoles

Synthèse bibliographique

Nadine Turpin, Françoise Vernier et François Joncour

L'azote et le phosphore présents dans les eaux constituent des nutriments pour la microflore et sont indispensables au fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Cependant, depuis plusieurs décennies, l'augmentation continue d'apports de ces nutriments vers les eaux douces, s'ajoutant aux pollutions par les micro-organismes, les résidus de pesticides et les matières organiques, s'est traduite par une dégradation sensible de la qualité de ces eaux. D'une part, l'apport aux populations d'une eau conforme aux normes de potabilité (en Europe moins de 50 milligrammes de nitrates par litre) pose des problèmes de plus en plus aigus. D'autre part, l'augmentation de la quantité de phosphore a provoqué des phénomènes d'eutrophisation en eaux douces, avec prolifération de phytoplancton et de végétaux. Des proliférations algales liées aux flux d'azote ont été constatées en eaux marines. Le déséquilibre des quantités relatives d'azote et de phosphore dans les eaux, enfin, perturbe fréquemment les écosystèmes, avec dans certains cas apparition de cyanophycées produisant des neuro-toxiques (Auby, 1994).

La dégradation de la qualité des eaux douces peut être provoquée par des pollutions d'origine ponctuelle ou diffuse. Les sources de pollutions *ponctuelles* sont surtout domestiques, industrielles, ou liées aux bâtiments d'élevage. Elles se traduisent par des rejets, dans les cours d'eau, de nutriments ou de substances chimiques, soit constants tout au long de l'année, soit avec des pointes saisonnières pour les agglomérations ou les industries. Les origines de ces rejets peuvent être inventoriées, localisées géographiquement et des mesures de qualité peuvent être effectuées en des points pré-

cis. Ces pollutions sont théoriquement maîtrisables, sous réserve d'y mettre les moyens techniques et financiers adaptés. La pratique est différente : ainsi, une proportion importante des industries (90 % des établissements représentant 50 % des flux émis) fait l'objet d'une évaluation forfaitaire (Institut Français de l'Environnement, 1996).

A contrario, les sources de pollutions *diffuses* sont réparties sur l'ensemble d'un territoire et les transferts vers les cours d'eau se produisent de façon intermittente. Les pollutions diffuses peuvent avoir plusieurs origines : assainissement individuel (la multitude des sources empêche les mesures), ruissellement en zone imperméabilisée (villes, routes), traitements avec des produits phytosanitaires en zone urbaine ou sur les lignes SNCF, activités agricoles et d'élevage.

Historiquement, la lutte contre la pollution des eaux s'est d'abord orientée vers les pollutions ponctuelles d'origine domestique ou industrielle (réduction de points noirs). Puis les pollutions diffuses, plus difficilement quantifiables, ont été mieux évaluées, tant en caractéristiques (nutriments, toxiques) qu'en ordres de grandeur : elles sont désormais reconnues comme une source potentielle conséquente de dégradation de la qualité des eaux.

Le rôle de l'agriculture (encadré 1) dans l'augmentation de la pollution d'origine diffuse est établi pour l'azote (Henin, 1984), et, dans une moindre part pour le phosphore (Cemagref-CACG, 1997) : dans les grands bassins versants, les apports diffus agricoles représentent plus de 70 % de l'azote exporté par les eaux ; en revanche, moins de 50 % du phosphore total exporté provient de l'agriculture (et moins de 10 % si le

Nadine Turpin
Cemagref
17 av. de Cucillé
35044 Rennes
Cedex
Françoise Vernier et François Joncour
Cemagref
50 av. de Verdun
BP 3
33611 Gazinet
Cedex

bassin comporte une ou plusieurs agglomérations conséquentes).

Toutes les formes de nutriments issus des activités agricoles que l'on retrouve dans l'eau, à l'exception des rejets accidentels, se sont trouvées à un moment donné en contact avec le sol, qui joue un rôle régulateur.

Cet article décrit les phénomènes de transfert de nutriments des sols vers les eaux, susceptibles de générer des pollutions diffuses : les formes présentes dans le sol, les formes transférables vers les eaux douces, l'influence des pratiques agricoles sur les formes de nutriments et sur leurs transferts.

Encadré 1

Les ordres de grandeur des quantités de nutriments exportés vers les eaux en fonction de l'occupation du sol

Les valeurs de pertes en nutriments selon l'occupation du sol d'un bassin versant présentées dans ce tableau proviennent des résultats d'études ou d'articles de la littérature qui abordent la quantification des flux d'azote, phosphore et Matière En Suspension (MES) à l'échelle d'un bassin versant selon des méthodologies variables. Les résultats restent étroitement liés à un contexte pédoclimatique déterminé, une certaine généralisation ne peut donc s'envisager que sous forme de « fourchettes » de flux. Les résultats, issus d'études menées sur plusieurs années, avec des mesures de qualité des eaux en continu et dans des contextes pédoclimatiques relativement proches, ont été privilégiés. Que ce soit pour l'azote ou le phosphore, on peut constater le lien entre occupation du sol et flux de nutriments, qui s'accroissent des zones extensives (forêts, prairies) aux zones intensives de cultures et d'élevage.

Occupation du sol	P en kg/ha/an	N en kg/ha/an
Forêt	< 0,30	1 à 3
Pelouse drainée	0,01 à 0,23	1,9 à 14
Prairies et forêt	0,02 à 1,7 (prairies)	0,3 à 3,5
Prairies extensives	-	1 à 5
Prairies intensives	-	5 à 35
Polyculture	0,08 à 2,4	-
Polyculture élevage	0,08 à 1,3	6 à 18
Polyculture élevage intensif	-	27 à 76
Céréaliculture	0,03 à 1,24	6 à 35
Vigne	0,07 à 6,95	-
Agriculture	0,16 à 0,69	-
Élevage intensif	-	33 à 50

Les nutriments existent sous plusieurs formes en équilibre

■ L'azote

L'azote se trouve présent dans et à la surface des sols sous des formes minérales, et surtout organiques (figure 1). Des phénomènes de transformations biochimiques permettent le passage d'une forme à l'autre : l'azote participe à des cycles biologiques dans le sol, essentiellement dans la couche colonisée par les racines des plantes.

L'azote du sol est présent essentiellement sous forme organique

La plus grande part de l'azote présent dans le sol (95 %) est incorporée dans des molécules organiques. Cette fraction organique est à 90 % une fraction passive et difficilement décomposable : c'est l'azote organique stable. Les 10 % restants de l'azote organique (composés protéiques de la biomasse et des résidus de récolte) constituent le pool d'azote organique labile (Kauark Leite, 1990).

L'azote organique provient de la décomposition des résidus organiques (humification), d'une part, et des réactions de synthèse bactérienne à partir des formes d'azote minéral (phénomène d'immobilisation, parfois appelé organisation) d'autre part.

Le sol peut perdre de l'azote organique par érosion, qui entraîne l'azote organique complexé aux particules de sol, et surtout par minéralisation. Un entraînement vertical de l'horizon labouré vers l'horizon immédiatement inférieur est parfois mentionné en sol brun acide (Simon, 1992).

De nombreux facteurs régissent l'équilibre entre les phénomènes de minéralisation et d'immobilisation (figure 2), qui ont lieu selon des cycles de longueur très différente : de quelques jours à plusieurs centaines d'années selon les composés mis en œuvre.

L'azote minéral

La fraction minérale de l'azote du sol est surtout constituée d'azote ammoniacal (NH_4^+ , NH_3) et

Transferts de nutriments des sols vers les eaux : influence des pratiques agricoles...

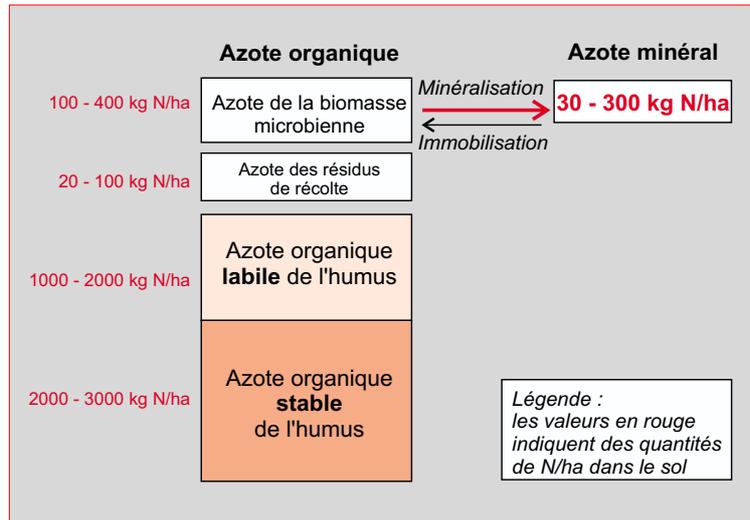
d'azote nitrique (NO_3^-). Ces formes sont en équilibre entre elles, par des réactions biochimiques d'ammonification et de nitrification.

La minéralisation de l'azote organique et les apports d'engrais minéraux constituent la principale source d'azote minéral dans le sol (Jarvis, 1996), à côté des précipitations et de la fixation d'azote atmosphérique (fixation symbiotique par les légumineuses, ou asymbiotique).

C'est sous cette forme minérale que l'azote est absorbé par les plantes. En période de croissance des cultures (fortes exigences), la forme nitrique prédomine sur la forme ammoniacale. La cinétique d'absorption des plantes varie en fonction du stade végétatif et selon les espèces ; elle est bien connue pour les céréales et le maïs, en cours d'étude pour certaines graminées, mais mal connue pour les prairies, surtout celles exploitées par pâturage. L'absorption par les végétaux est faible lors de la germination des plantes, maximale lors de la période végétative, puis diminue lors de la phase de maturation.

Les pertes en azote minéral vers les autres compartiments de l'écosystème sont liées à plusieurs types de phénomènes (figure 2) :

– *physiques* : entraînement vers le réseau hydrographique par ruissellement et par lixiviation¹ ;

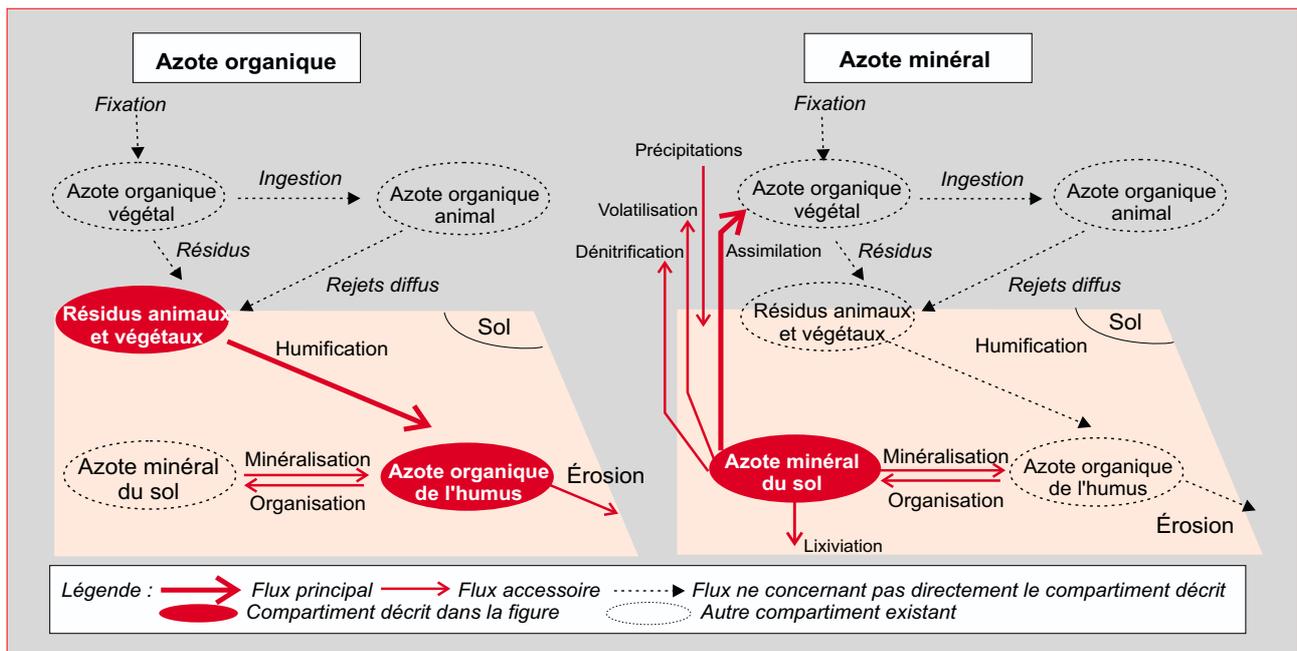


– *biologiques* : absorption de l'azote minéral par les plantes, organisation par la microflore, dénitrification biologique (transformation de l'azote minéral en des formes gazeuses, N_2 et NO_x) ;

▲ Figure 1. – Compartiments de l'azote dans le sol (d'après Corpen, 1993).

1. La lixiviation est un entraînement de sels solubles. A ne pas confondre avec le lessivage, migration dans la couche de sol de particules en suspension.

▼ Figure 2. – Transformations de l'azote dans le sol.



– *chimiques* : volatilisation de l'azote ammoniacal du sol ou des résidus animaux et végétaux, dénitrification chimique en sols acides (Kauark Leite, 1990). Les pertes par volatilisation et dénitrification peuvent être très importantes.

Les transferts d'azote vers l'eau se font préférentiellement sous forme de nitrates

Toutes les formes d'azote présentes dans le sol ne sont pas transférables par les mêmes voies. Les quantités les plus importantes transfèrent sous forme nitrique par *lixiviation* (l'ion nitrate est très soluble). Les quantités d'azote ainsi entraînées dépendent de nombreux facteurs tels que la quantité d'azote nitrique présente dans le sol, sa répartition le long du profil de sol, la quantité d'eau drainée, la fréquence et la répartition des pluies dans l'année. L'azote entraîné par lixiviation rejoint les eaux de surface par *ruissellement subsuperficiel*, et parfois par réalimentation des cours d'eau *via* les nappes. L'azote des engrais et des effluents d'élevage après les épandages, et l'azote organique adsorbé sur les particules de sol peuvent *ruisseler* rapidement en surface.

Différents niveaux d'approche permettent d'appréhender les phénomènes qui sont à l'origine du transfert de l'azote des sols vers l'eau (Jarvis *et al.*, 1996) :

– dans les microsites du sol, c'est l'environnement physico-chimique qui conditionne le déplacement des équilibres biochimiques de minéralisation, réorganisation, volatilisation et dénitrification de l'azote ;

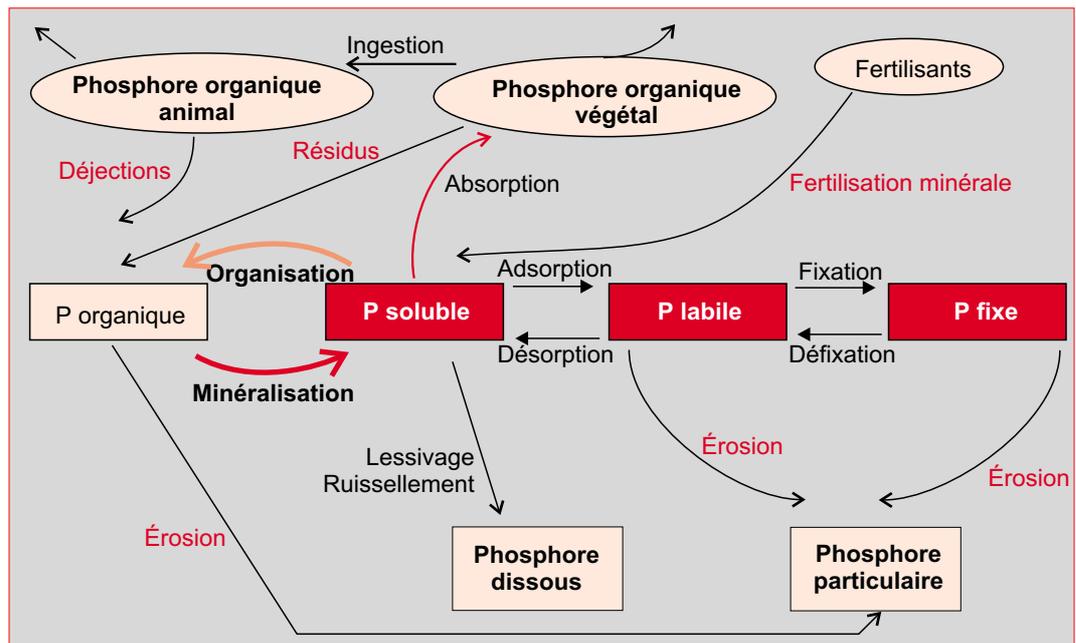
– à l'échelle de la parcelle, les pratiques agricoles ont des conséquences à court terme, mais aussi à moyen et long terme, de façon plus ou moins maîtrisée, sur l'ampleur relative des différentes réactions (Sebillotte, 1990) (voir paragraphe - L'influence des pratiques agricoles) ;

– dans le bassin versant, les conditions climatiques déterminent la fréquence des événements susceptibles d'entraîner l'azote de la zone racinaire vers les eaux ; l'aménagement de l'espace contribue à accélérer, ou au contraire à ralentir, les transferts vers les aquifères les plus importants. De l'azote minéral présent dans un sol peut mettre plusieurs mois à lixivier dans le profil, alors qu'il ne mettra que quelques semaines, voire quelques heures à atteindre la mer une fois qu'il se retrouve dans une rivière.

■ Le phosphore

Le phosphore est un élément peu soluble, présent principalement dans les horizons de surface des sols (figure 3) et dans la biomasse. Le phosphore se trouve dans le sol sous de multiples formes, or-

Figure 3. – Cycle du phosphore dans le sol.



ganiques et minérales, très liées aux particules de sol, et régies par des équilibres complexes.

Le phosphore du sol est essentiellement sous forme minérale (inorganique)

Le phosphore inorganique peut être associé avec les particules minérales du sol, emprisonné dans le réseau cristallin, adsorbé à la surface de certains constituants ou, en faible quantité, dissous dans la solution du sol.

Le déplacement du phosphore de la solution du sol vers la phase solide (et *vice-versa*) est la conséquence de plusieurs équilibres entre les différentes formes de phosphore. Le phénomène résultant est appelé *sorption*. Le comportement du phosphore minéral peut être résumé par une double réaction (encadré 2).

Le phosphore dissous est la seule forme directement assimilable par les plantes. Les réactions qui régissent l'équilibre entre les formes labiles et dissoutes sont relativement rapides, et la concentration en phosphore dans la solution de sol est en équilibre. Les réactions qui régissent l'équilibre entre les formes labiles et non labiles sont par contre très lentes devant les cinétiques d'absorption par les plantes, et de ce fait, une grande partie des réserves en phosphore des sols n'est pas accessible par la végétation : la nutrition des plantes en phosphore n'est pas limitée par leur capacité physiologique d'absorption, mais par la concentration de la solution du sol.

Le potentiel de sorption d'un sol - sa capacité à « sorber » le phosphore - est très variable (100 à 2 600 mg P/kg de terre brute). Il est en général plus élevé dans les horizons de sub-surface, car les phosphates déjà sorbés dans l'horizon superficiel diminuent le potentiel de sorption de cet horizon.

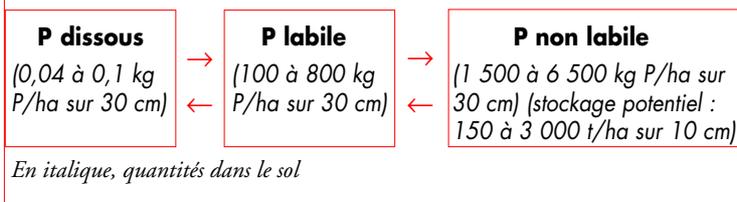
Le phosphore organique ne représente que de faibles quantités dans le sol

Le phosphore organique est un des constituants de la matière organique du sol et subit des cycles de minéralisation et de réorganisation, de la même façon que pour l'azote. L'humus contient de 0,25 à 0,50 % de phosphore, ce qui représente entre 10 et 110 kg de phosphore organique par hectare.

Dans les sols biologiquement actifs, et quelle que soit la cause de cette activité, la minéralisation l'emporte sur l'immobilisation du phosphore dans les

Encadré 2

Comportement du phosphore minéral



cellules de micro-organismes produites pendant le processus de décomposition : l'accroissement de phosphore organique dans les sols ne peut donc résulter que de l'apport de résidus organiques.

Les transferts de phosphore sont liés aux phénomènes d'érosion et de ruissellement

Sous climat océanique, où l'érosion hydrique est prédominante (Henin, 1984), les transferts de phosphore des sols vers les eaux superficielles sont essentiellement liés aux phénomènes d'érosion et de ruissellement. La lixiviation du phosphore reste un phénomène marginal, sauf dans certaines conditions très particulières (sols très sableux des Pays-Bas, ou du Nord de l'Allemagne, par exemple).

Le phosphore transféré des écosystèmes terrestres aux écosystèmes aquatiques par le ruissellement peut affecter les formes solubles (orthophosphate inorganique, complexes solubles organiques) comme les formes particulières (organiques et minérales). Le phosphore est cependant transporté, à partir des surfaces cultivées, préférentiellement (75 à 90 %) sous forme particulière (Dorioz, 1996). Ces pertes en phosphore ne représentent qu'une très faible partie du phosphore retenu dans les sols (Sharpley, 1995).

Le phosphore est le facteur limitant de la production algale dans les eaux douces. Cependant tout le phosphore présent dans les cours d'eau n'est pas assimilable par la biomasse algale : le phosphore subit dans les cours d'eau un cycle de solubilisation - sédimentation (Dorioz, 1996). Il est transporté par bonds successifs lors des crues (Cann, 1990), sédimente dans les parties de rivières plus calmes, et peut être provisoirement stocké par les rives et dans les zones humides. La rétention des formes solubles par les zones rivulaires est mal connue.



▲ Photo 1. – L'agriculture a une influence sur la pollution diffuse à la fois par la densité de l'élevage, le choix des cultures et la gestion de l'espace.

L'influence des pratiques agricoles

L'agriculteur essaie, par ses pratiques culturales, de créer un état du milieu (le sol) qui optimise la croissance des plantes (photo 1). Ses interventions comprennent : l'aménagement des parcelles (haies, talus, fossés, installation de drainage), toutes les façons culturales dont l'objet est d'amener le sol à une structure favorisant la germination puis la croissance des plantes, la fertilisation et les traitements de protection des cultures, l'irrigation (avec des installations fixes ou du matériel mobile).

Les agriculteurs sont amenés à prendre plusieurs types de décisions pour piloter leurs exploitations. A un niveau *stratégique*, l'agriculteur fixe les objectifs à long terme de son exploitation : il détermine quelles sont les productions qu'il souhaite obtenir, quelle trajectoire il projette pour son exploitation, et les investissements qu'il va réaliser. A un niveau *tactique*, l'agriculteur combine ses facteurs de production pour atteindre ses objectifs. C'est au niveau tactique que zootechniciens, agronomes et gestionnaires travaillent le plus souvent. A ce niveau se définissent les composantes du système d'élevage, les itinéraires techniques végétaux, leurs interactions, en fonction des objectifs de l'exploitant. Au niveau *opérationnel*, l'agriculteur effectue les divers travaux qu'il avait prévus, en les adaptant selon les contraintes quotidiennes qu'il rencontre.

Ces pratiques influent sur la taille des compartiments de nutriments dans le sol (figure 4), modi-

fient les équilibres entre ces compartiments, et par là même ont des répercussions sur la pollution diffuse. Cette influence peut agir à court terme (quelques jours à quelques semaines), à moyen (quelques mois) et long terme (plusieurs années). Ainsi, la dynamique des filières de production, la densification des exploitations sur un territoire vont provoquer une augmentation lente, mais sensible, de la taille des compartiments dans le sol, et augmentent « structurellement » les risques de pollution diffuse. Les flux de nutriments mis en jeu, peuvent devenir importants, aussi bien dans des bassins versants de grandes cultures (figure 5) que dans des bassins d'élevage (figure 6). Les choix des agriculteurs se combinent avec l'historique des parcelles, leur répartition spatiale, l'aménagement de l'espace, la sensibilité du milieu et génèrent des risques de pollution à moyen terme. Enfin, les pratiques quotidiennes des agriculteurs, leur adéquation par rapport aux pluies, au stade végétatif des cultures, peuvent ajouter des risques à court terme.

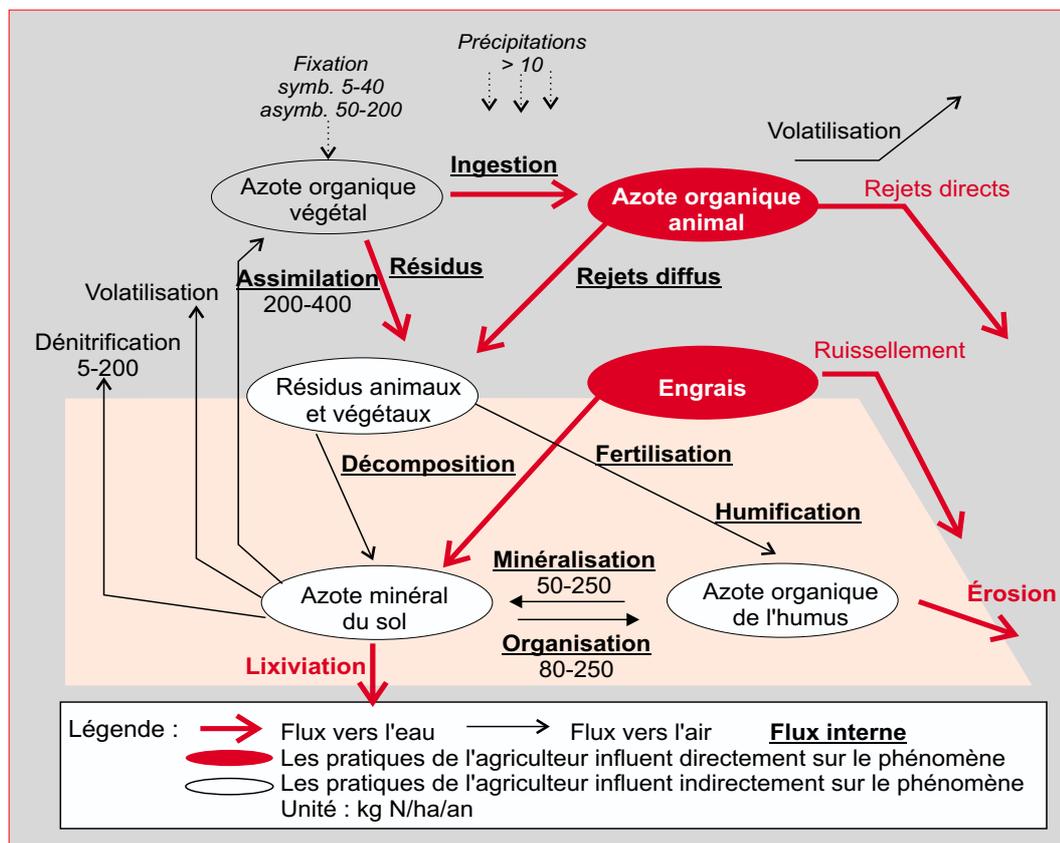
La complexité des systèmes étudiés a conduit les organismes de recherche à développer des outils à partir des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour analyser et caractériser spatialement les systèmes et les contraintes en jeu, évaluer des pressions polluantes, définir des zones homogènes de risque... A l'échelle du bassin versant, des modèles hydrologiques et de transfert de nutriments, couplés à un SIG, pourraient permettre de terme de s'affranchir du recueil de chroniques de données hydrologiques et de pratiques, très lourd à mettre en œuvre, mais leur utilisation relève encore du domaine de la recherche.

■ Le choix de la culture

Contrairement aux idées généralement répandues, et qu'il s'agisse de pollution diffuse par l'azote ou le phosphore, il n'existe pas *une* culture à risque, ni *un* système de production à risque (Sebillotte *et al.*, 1990), tout dépend du contexte géographique, pédoclimatique et hydrologique, ainsi que des pratiques quotidiennes des agriculteurs : pour qu'il y ait pollution diffuse, deux conditions doivent être réunies : la présence d'un élément sous une forme transférable, dans ou à la surface d'un sol, et l'apparition d'un élément déclenchant (le plus souvent un épisode pluvieux ou une crue).

La culture implantée (photo 2) a des conséquences sur l'importance de l'assimilation de nutriments,

Transferts de nutriments des sols vers les eaux : influence des pratiques agricoles...



◀ Figure 4. – Transformations de l'azote dans le sol et transferts vers les eaux.

la cinétique de cette assimilation par rapport aux fournitures du sol, l'état de surface du sol, l'espace colonisé par les racines et la composition des résidus qui restent sur la parcelle après cette culture.

L'incorporation des résidus de récolte a un effet variable selon leur composition : la teneur relative en carbone et en azote (rapport C/N), ou en carbone et en phosphore (rapport C/P), influence l'équilibre entre les phénomènes de minéralisation de la matière organique et de son organisation.

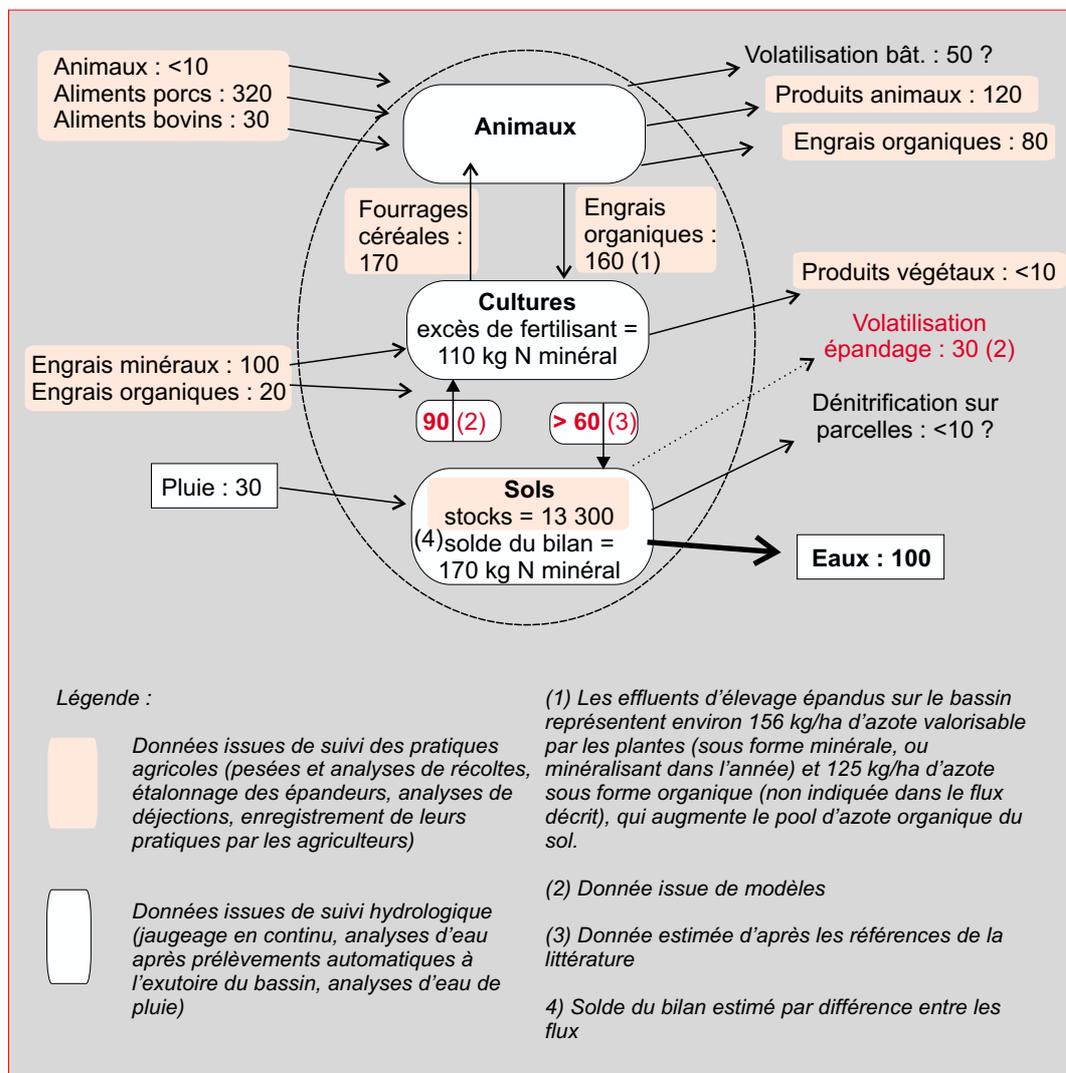
Les quantités de phosphore organique des sols sont cependant peu importantes devant les quantités de phosphore minéral, et la minéralisation du phosphore organique est peu étudiée. Au contraire, la gestion des résidus de récolte est importante pour les risques de pollution azotée, car les échanges entre les compartiments minéral et organique de l'azote du sol peuvent générer des flux importants : les résidus riches en cellulose induisent une immobilisation à court terme de l'azote minéral du sol en azote organique par la microflore du sol,

	Polyculture (charente)	Matouse (BV forestier)	Garroueyre (BV mixte)	Qeytive (BV forestier)	Lambrusse (BV mixte)
Nitrates (en N)	22*	0,3	18,6	1,7	18,1
Azote minéral total (en N)		0,33	18,7	1,8	19,0
Phosphore total	0,41*	0,03	0,03	0,05	0,3

◀ Figure 5. – Pertes en nutriments (kg/ha/an) en fonction de l'occupation du sol (forêt, cultures et mixte forêt/agriculture).

* Moyenne sur 5 années

source : Cemagref Bordeaux, 1992, 1996.



▲ Figure 6. – Exemple de flux d'azote sur un bassin versant d'élevage, dans le Finistère (cas du Kerouallon, bassin de 600 hectares, dont 480 hectares de SAU) – flux annuels et stocks d'azote en kg/ha de SAU sur le bassin, année 1994 (Turpin, 1996).

contrairement aux résidus organiques riches en azote qui provoquent une minéralisation (Recous, 1995). Le retournement des prairies (à rapport C/N bas) provoque ainsi des minéralisations particulièrement importantes, et qui ne sont pas toujours utilisables par la culture suivante. Les excès d'azote ainsi libérés sont susceptibles d'être lixivés. Au contraire, l'incorporation dans le sol de pailles de céréales (à rapport C/N élevé) favorise l'organisation, et peut donc limiter les quantités d'azote

susceptibles d'être lixivés, au moins à court terme.

La succession culturale sur les parcelles conditionne la durée de l'interculture. Un sol laissé nu, surtout en période hivernale (pluvieuse sous nos climats), présente un risque important de pertes par lixiviation et par ruissellement. Plus la durée de l'interculture est longue, plus les risques de transferts sont importants. Certaines successions culturales (maïs sur maïs par exemple, maïs pas seulement), induisent ainsi des risques (photo 3)



F. Vernier, Cemagref Bordeaux

▲ Photo 2. – La vigne occupe les pentes plus marquées. Elle peut être enherbée ou non entre les rangs et son sens de plantation par rapport à la pente varie également.

plus importants de transferts (Vernier et Beuffe, 1997).

▲ La fertilisation

La fertilisation est en général la première intervention incriminée lors du constat de pollutions diffuses. La surfertilisation par rapport aux besoins des plantes conduit, en effet, à plus ou moins long terme à une augmentation des flux de nutriments vers les aquifères. Mais, même si la fertilisation est raisonnée, des transferts importants de nutriments vers les eaux peuvent être la conséquence d'apports d'engrais.

Les apports d'engrais de synthèse

Pour tous les engrais de synthèse, un risque de transfert vers les eaux existe, surtout pendant les jours suivants les apports, si des précipitations surviennent (Sebillotte *et al.*, 1990).

Pour l'azote, lorsque les apports d'engrais ont été supérieurs, compte tenu de la fourniture du sol, à la consommation réelle de la culture, un risque de pollution à moyen terme existe : tout d'abord, pendant la période végétative, une partie de l'azote minéral en excès peut lixivier. Le plus souvent, s'il y a eu surfertilisation, un reliquat azoté subsiste dans le sol après la récolte : schématiquement, s'il n'est pas consommé par une culture suivant immédiatement cette récolte, une grande partie de ce reliquat va être entraînée par les eaux pendant la période d'interculture. Enfin, le niveau de fertilisation azotée sur une parcelle influence à long terme la taille du compartiment actif de la matière organique du sol, susceptible de minéraliser, et de participer au *pool* d'azote lessivé (Machet, 1995).

Dans le cas du phosphore, une grande partie des réserves du sol n'est pas assimilable directement par la végétation. En effet, les plantes utilisent cet élément sous forme soluble (éventuellement, les sucs racinaires acides solubilisent une partie du phosphore lié) : cette forme est en équilibre avec les fractions liées avec les particules de sols, mais

Photo 3. – Effet de ruissellement en sol limoneux après plasticulture de maïs (parcelle en Ile-et-Vilaine, après un hiver exceptionnellement pluvieux).



N. Turpin, Cemagref Rennes

les réactions s'effectuent avec des vitesses très faibles devant celles de croissance des plantes. Les agriculteurs ont donc tendance à apporter au sol des engrais phosphatés en quantités supérieures aux besoins des cultures, de façon à pouvoir couvrir ces besoins tout en tenant compte d'une large fixation du phosphore des engrais par le sol.

Les apports d'engrais phosphatés (minéraux et organiques) se retrouvent relativement vite sous des formes liées aux sols, dont ils contribuent à l'enrichissement. Dans le cas général, seule une très faible fraction des excès d'apports se retrouve dans l'eau (Turpin, 1996). Par contre, par l'enrichissement des sols qu'ils provoquent, ces excès d'apports constituent un risque à long terme (quelques centaines d'années) pour les transferts vers l'eau (United States Department of Agriculture, 1991).

Le cas particulier des engrais organiques

Le raisonnement de la fertilisation est plus délicat lorsqu'on apporte sur les parcelles des effluents d'origine animale, dont la valeur fertilisante, à court et moyen terme, est plus difficile à évaluer que celles des engrais minéraux (Ziegler, 1991). En effet, les pratiques d'élevage peuvent modifier sensiblement leur composition d'une exploitation à l'autre (voir paragraphe - Les pratiques d'élevage). De plus, les engrais organiques contiennent à la fois de l'azote minéral (directement assimilable par les plantes mais susceptible de migrer rapidement par lixiviation) et de l'azote organique, dont la minéralisation plus lente libère de l'azote, à un rythme qui dépend du climat de l'année considérée, et parfois à des périodes où cet azote n'est pas très bien valorisé par les cultures (Comifer, 1996).

Les effluents de bovins contiennent de l'azote et du phosphore dans des proportions qui correspondent aux besoins de la plupart des cultures. Ce n'est pas le cas des effluents de porcs et de volailles, qui sont proportionnellement plus riches en phosphore. Cette disproportion est accentuée lorsque l'effluent épandu a été traité par les procédés les plus courants, qui diminuent sa teneur en azote mais conservent sa teneur en phosphore. Dans la mesure où la fertilisation est généralement calculée pour couvrir les besoins en azote des cultures, celles-ci reçoivent un excès de phosphore si elles sont fertilisées avec des engrais organiques provenant de porcs ou de volailles.

■ Les autres pratiques culturales

Le *travail du sol*, par fragmentation des mottes et agrégats, par accroissement de la porosité structurale, agit sur la minéralisation de la matière organique du sol : après un labour, une minéralisation accrue augmente à court terme l'azote minéral du sol, et donc les risques de lixiviation. À l'inverse, par augmentation de la porosité, le labour diminue les risques de ruissellement. Les études comparatives de travail du sol (labours comparés à des techniques de semis direct), indiquent à moyen terme que dans les parcelles labourées, la matière organique se trouve sous des formes plus labiles, et que le « *turn over* » de nutriments est plus rapide que dans des parcelles non labourées. À l'échelle de bassins versants, des techniques de travail du sol (comme le labour perpendiculaire à la pente) et l'utilisation de matériel adapté peuvent limiter les entraînements de terre et le phénomène de ruissellement (Gril, 1991).

L'implantation de *cultures intermédiaires* (pièges à nitrates) permet de limiter la lixiviation pendant l'interculture, par des prélèvements d'azote du sol par la culture intermédiaire, et la réduction de l'érosion. Mais cette implantation peut poser des problèmes techniques (intervention sur les parcelles à des périodes de pointes de travail, germination difficile de la culture intermédiaire), agronomiques (effet sur la culture suivante et sur le sol), ou économiques (coût de la mise en place et de la destruction). Les effets à long terme d'enfouissements répétés de cultures intermédiaires sur la teneur en azote du sol sont encore mal connus.

■ L'aménagement des parcelles et la gestion de l'espace

Les techniques d'irrigation ou de drainage du sol peuvent jouer un rôle dans les phénomènes de transfert. Le drainage contribuerait à l'exportation rapide d'une eau chargée en nitrates (Arlot, 1990). Cependant, en favorisant la pénétration de l'eau, il peut s'avérer efficace pour limiter le ruissellement, et accroître la zone de prospection des racines.

L'impact de l'irrigation est controversé (photo 4) : il semble dépendre de la nature du sol, du système d'irrigation employé (et de la qualité de son réglage) et des fertilisants associés. Ainsi, la quantité d'eau apportée devrait être adaptée au stade de développement et aux besoins des plantes, à la

réserve hydrique du sol (variable selon le type de sol, et dans le temps), mais elle est souvent mal évaluée. Des excès d'eau localisés peuvent provoquer de la lixiviation, même en été.

A l'échelle de bassins versants, l'impact d'aménagements comme les haies, les talus, les fossés, les zones rivulaires, commence seulement à être évalué, aussi bien pour l'azote que pour le phosphore : d'une part l'impact réel de tel ou tel type d'aménagement n'a pas toujours été étudié, et d'autre part des efforts importants restent à faire pour tester l'efficacité réelle de la répartition de plusieurs types d'aménagements dans l'espace.

■ Les pratiques d'élevage

L'alimentation apportée aux animaux a d'abord pour objectif de couvrir leurs besoins, de façon à les maintenir en bonne santé et à permettre une production (lait, viande, œufs). Les apports d'aliments techniquement recommandés tiennent compte de la variabilité entre les animaux, et d'une certaine marge de manœuvre : ces apports ne sont pas raisonnés pour réduire les rejets (photo 5).

L'animal ne stocke que de faibles quantités d'azote : tout excès d'azote dans la ration par rapport aux besoins de l'animal est rejeté (Simon *et al.*, 1992). Mais, même en conditions d'alimentation calculées au plus juste, les rejets représentent globalement 70 à 80 % de l'azote ingéré. Le phosphore est très peu digestible : les quantités apportées pour couvrir les besoins des animaux sont très supérieures à celles contenues dans leurs productions, et les excès se retrouvent dans les déjections.

Le type d'effluent est en général la conséquence des techniques d'élevage, il n'est que très rarement déterminé en fonction de sa valorisation possible par les cultures : les rejets des animaux subissent une transformation dans les bâtiments (volatilisation d'une partie de l'azote minéral, dilution par les eaux de pluie ou de lavage, mélange avec une litière éventuelle, processus de dégradation biologique des composés organiques, etc.). Aussi, le produit qui sort du bâtiment peut être très différent des rejets bruts. Pour les élevages bovins en particulier, l'agriculteur peut être amené à gérer en sortie de bâtiment plusieurs produits aux caractéristiques de composition et aux valeurs agronomiques très diverses : fumiers, lisiers, eaux plus ou moins chargées.



F. Vernier, Cemagref Bordeaux

▲ Photo 4. – Grande parcelle de maïs irrigué, Charente (1996). Des excès d'eau peuvent provoquer de la lixiviation, même en été.

Dans les exploitations d'élevage, l'organisation du travail prime souvent sur l'efficacité agronomique pour la gestion des effluents animaux. Pour des raisons d'organisation de son exploitation (vidange de fosses qui risquent de déborder après une période pluvieuse, ou nettoyage des étables avant la rentrée des bovins, par exemple), l'agriculteur peut être amené à épandre des déjections à des époques inappropriées, ou en grandes quantités sur

Photo 5. – La gestion du pâturage et de l'alimentation apportée à l'étable sont prépondérantes dans l'impact des élevages bovins sur la qualité de l'eau (troupeau de vaches laitières, en pâturage en mai, valorisant très mal l'herbe car alimentées avec du maïs à l'étable en même temps). ▼



N. Turpin, Cemagref Rennes

des cultures à faibles besoins, mais dont les parcelles sont disponibles, ou proches des bâtiments. De plus, une partie des déjections animales, émises pendant la pâture, n'est pas maîtrisable par les agriculteurs.

Enfin, dans certaines régions où les élevages sont très denses, la concentration d'animaux sur de petites surfaces peut amener des excès importants d'apports d'effluents aux cultures (figure 6).

Conclusion

Les phénomènes en jeu dans les transferts de nutriments des sols vers les eaux sont complexes et souvent difficiles à quantifier. Leur compréhension relève encore dans de nombreux cas du domaine de la recherche, et impliquent plusieurs disciplines scientifiques dont le champ traditionnel de recherche n'intègre pas obligatoirement les préoccupations environnementales : l'agronomie, la zootechnie, l'hydrologie et l'hydrobiologie, etc.

Le sol a un rôle central dans tous les mécanismes de transfert de l'azote et du phosphore vers les eaux superficielles et sa prise en compte est indispensable pour évaluer les risques d'entraînement et de lixiviation des nutriments, raisonner la fertilisation, établir un bilan, adapter une irrigation. Les pratiques agricoles ont des conséquences sur les transferts de nutriments des sols vers les eaux à court terme, mais elles influent aussi sur plusieurs compartiments dans le sol, et de ce fait ont aussi des conséquences à moyen et long terme sur les risques de pollution diffuse.

Les résultats des études menées pendant plusieurs années par les organismes de recherche, dont le Cemagref, sur les pertes en azote, phosphore et MES des bassins versants ont mis en évidence la corrélation entre occupation du sol et qualité des eaux. Les zones de forêts et prairies extensives ne connaissent pas les mêmes problèmes d'augmentation de nutriments dans les eaux que les zones d'agriculture et d'élevage intensifs. Les flux de

Encadré 3

Les opérations de lutte contre la pollution diffuse d'origine agricole

Les agriculteurs ne sont pas les seuls usagers de l'espace rural. Même en Bretagne, région très agricole, ils ne sont plus depuis quelques années majoritaires dans les communes rurales. Les intérêts divergents des différents acteurs de l'espace rural peuvent devenir source de conflits (accès à la ressource en eau, qualité des milieux aquatiques pour la flore, la faune ou la récréation, usages de l'espace entre agriculteurs et lotissements, etc.) Les décideurs régionaux sont confrontés à des contraintes liées au maintien (ou à la restauration) d'une activité économiquement rentable (l'agriculture), dans un contexte de préservation de la qualité des milieux, objectif soutenu par une demande sociale forte.

Pour lutter contre la pollution des eaux, plusieurs types d'actions sont développées depuis quelques années. On peut citer les opérations Ferti-Mieux, opérations locales de conseils aux agriculteurs ayant pour objectif la lutte contre les pollutions nitrées (la plupart de ces opérations concernent des grandes cultures). Pour les pollutions liées aux élevages (rejets directs, maîtrise des apports d'effluents), un programme national (PMPOA¹) a été mis en place depuis 1993 : ce programme consiste en une aide aux agriculteurs qui souhaitent améliorer la gestion de leurs effluents d'élevage. La démarche adoptée dans les PDD (Plans de Développement Durable) propose à des agriculteurs très motivés une réflexion sur leur système de production, de façon à l'orienter vers un système durable (au sens de la Conférence de Rio) ; malheureusement, dans la pratique, cette démarche est difficile à intégrer par les agriculteurs, notamment en raison du manque de soutien financier pendant les années de transition. Des mesures agri-environnementales, avec des cahiers des charges nationaux (réduction d'intrants par exemple) ou locaux (protection de la faune et de la flore), ont été initiées en France depuis quelques années. La mise en place de ces mesures est malheureusement trop récente pour qu'un impact sur le milieu puisse être mesuré dans beaucoup de cas.

1. PMPOA : Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole dues aux élevages.

nutriments sont variables en fonction du contexte pédoclimatique et des pratiques.

La lutte contre les pollutions diffuses d'origine agricole (encadré 3) passe par une meilleure compréhension des phénomènes à court et long terme, ainsi que par des propositions d'actions à plusieurs échelles : au niveau des exploitations par le développement de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement (fertilisation raisonnée, gestion de l'interculture...), à l'échelle d'un bassin versant ou d'une petite zone avec une gestion raisonnée de l'espace (enherbement, utilisation de zones hu-

mides...), à l'échelle d'un territoire plus vaste par la prise en compte dans la politique d'aménagement des contraintes liées aux milieux, du poids respectif et de l'organisation géographique des activités présentes sur ce territoire. □

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement Régine Loubat, Chantal Gardes et Sophie Charton pour la constitution de la base documentaire, Jean-Louis Bourdais, Ramon Laplana et Gildas Le Bozec pour les relectures successives du document.

Résumé

L'azote et le phosphore existent dans le sol sous de multiples formes. C'est surtout sous forme de nitrates, solubles, que le transfert d'azote a lieu. Le phosphore, très lié au sol, est transféré par érosion et ruissellement. Les pratiques agricoles influent sur les formes et les quantités transférées, et sur les conditions du transfert vers les eaux. La fertilisation, les rotations, la gestion des résidus de récolte, la gestion des déjections animales sont les facteurs qui influent sur les quantités d'azote transférables ; l'irrigation et le drainage jouent un rôle sur les délais entre les sols et les eaux. Les aménagements parcellaires, les rotations culturales, le travail du sol peuvent dégrader la surface du sol et augmenter le ruissellement du phosphore ; une surfertilisation systématique, en particulier dans les exploitations d'élevage, augmente les départs de phosphore à long terme.

Abstract

Nitrogen and phosphorus are found in the soil in various forms. Nitrogen is usually leached in the form of soluble nitrates. Phosphorus is strongly bound to the soil and is carried by erosion and run-off. Farming practices have an effect on the forms of nutrients and the amounts lost and on the way in which they are carried into water courses. Fertilisation, crop rotation, crop residue management, animal effluent management affect the amounts of nitrogen that may be leached; irrigation and drainage techniques play a role in the time taken for the leaching from soil to water. Field improvements, crop rotation and ploughing techniques can damage the soil surface and increase the run-off of phosphorus; regular over fertilisation, especially in stock-breeding farms, increase the loss of phosphorus in the long term. This summary brings together the most recent information on the various aspects of nutrient transfer.

Bibliographie

- ARLOT, M.-Z.-D., 1990. Drainage agricole et lessivage des nitrates. *Actes du colloque*, Nitrates, agriculture, eau, Paris, p. 263-268.
- AUBY, I., MANAUD, F., MAURER, D., TRUT, G., 1994. Étude de la prolifération des algues vertes dans le bassin d'Arcachon, 163 p. + annexes.
- BEUFFE, H., LAPLANA, R., GAILLARD, B., 1994. Bilan trophique des plans d'eau landais et quantification des apports nutritifs aux étangs d'Aureilhan et de Soustons, Cemagref Bordeaux division Qualité des eaux.
- CANN, C., 1990. Le phosphore : de l'agriculture vers l'eau, *Informations Techniques* du Cemagref, 80 (1) p. 1-8.
- Cemagref et CAGC, 1997. Pollution diffuse par l'azote, le phosphore et les matières en suspension : influence des pratiques agricoles et d'élevage, *Rapport* à l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, Cemagref, avril 1997, 263 p.
- COMIFER, 1996. Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles, COMIFER, 59 p.

- DORIOZ, J.-M., 1996. Transferts de phosphore des bassins versants agricoles vers les eaux de surface : ordre de grandeur, mécanismes, facteurs de risque, maîtrise. *Actes du colloque*, Forum « Sécheresse, pollution, inondations, érosion », Poitiers, 29, 30 septembre, 1er octobre 1996.
- GRIL, J.-J., DUVOUX, B., 1991. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion : conditions d'adaptation des méthodes américaines, Cemagref, 157 p.
- HENIN, S., 1984. La pollution par les nitrates : les problèmes à résoudre, *Actes du colloque*, La pollution par les nitrates, 23-24 octobre 1984. p. 16-28.
- Institut Français de l'Environnement, 1996. Indicateurs de performance environnementale de la France, Lavoisier, 125 p.
- JARVIS, S.-C., STOCKDALE, E.-A., SHEPHERD, M.-A., POWLSON, D.-S., 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils : processes and measurement, *Advances in Agronomy*, n° 57, p. 87-235.
- KAUARK LEITE, L., 1990. Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole, *Thèse* de l'université de Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 341 p.+ annexes.
- MACHET, J.-M.-R.-S., 1995. La gestion de l'interculture. Une nécessité pour limiter le lessivage des nitrates, *Perspectives Agricoles*, n° 206 (octobre) : IV-VIII.
- RECOUS, S., 1995. Incorporation des résidus végétaux. Quel effet sur la dynamique de l'Azote, *Perspectives Agricoles*, 206 (octobre) : IX-XV.
- SEBILLOTTE, M., MEYNARD, J.-M., 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. *Actes du colloque*, Nitrates-Agriculture-Eau, Paris, p. 289-313.
- SHARPLEY, A.-N., 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus, *Journal of Environmental Quality*, n° 24, p. 920-926.
- SIMON, J.-C., CORREL, L., VERTES, F., 1992. Niveau d'intensification, excédents d'azote et risques de pertes par lessivage. *Fourrages*, n° 129, p. 108-109.
- TURPIN, N., CANN, C., TRANVOIZ, M., *et al.*, 1996. Expérience pilote de Landivisiau. *rapport final* à l'Union Européenne dans le cadre des expériences pilotes Life visant à restaurer la qualité des eaux de la Rade de Brest, Cemagref Rennes, INRA Rennes, EDE Finistère, octobre 1996, 35 p.
- United States Department of Agriculture, 1991. St Albans Bay Rural Clean Water Program. Vermont Water Resources Research Center, mai 1991, 508 p.
- VERNIER, F., BEUFFE, H., 1997. Pratiques et qualité des eaux. Bassins versants de l'Arriou et du Tagon. *Rapport technique* à la région Aquitaine, Cemagref Bordeaux, avril 1997, 87 p.
- ZIEGLER, D., HEDUIT, M., 1991. Engrais de ferme : valeur fertilisante, gestion, environnement. Institut Technique de l'Élevage Bovin, 35 p.