

Pertes d'azote dans les systèmes de culture à base de maïs ensilé.

Causes et remèdes

P. Castillon

Le drainage de nitrate constitue la principale perte d'azote liée à la culture du maïs, en relation avec sa courte période d'absorption mais surtout en lien avec les caractéristiques du système de culture. Diverses solutions existent pour réduire ces pertes.

RESUME

La capacité de croissance importante du maïs lui permet d'absorber des quantités d'azote considérable. Après la récolte, l'azote minéralisé risque d'être lessivé au cours de l'hiver. Les apports organiques ou minéraux effectués sur le maïs, s'il correspondaient à des objectifs de production supérieurs au rendement obtenu, ou le retournement d'une prairie peuvent accroître les quantités d'azote lessivé. Pour limiter ces pertes d'azote, la première solution est le raisonnement de la fertilisation azotée, prenant en compte la minéralisation de la matière organique, les apports organiques... et un objectif de production réaliste. Lorsque les pertes risquent d'être importantes, l'implantation d'une culture intermédiaire est une solution efficace.

MOTS CLES

Azote, culture dérobée, eau du sol, engrais organique, environnement, irrigation, maïs, nitrate, production fourragère, système fourrager.

KEY-WORDS

Catch crop, environment, forage production, forage system, irrigation, maize, nitrate, nitrogen, organic fertilizer, soil water.

AUTEUR

ITCF, F-31450 Baziège ; pcastillon@itcf.fr

Dans les écosystèmes cultivés, l'azote peut être perdu, c'est-à-dire définitivement inutilisable pour la production agricole de l'aire concernée, soit sous forme gazeuse qui diffuse dans l'atmosphère, soit sous la forme d'ion nitrate entraîné par les eaux de drainage ou de ruissellement vers les aquifères récepteurs (nappes phréatiques, rivières, lacs).

Les pertes gazeuses concernent principalement l'azote nitrique qui est transformé en N₂ ou en oxydes d'azote lorsque l'oxygène vient à manquer dans le sol. Mais le drainage du nitrate (les termes de lixiviation et, à tort, de lessivage (Lozet et Mathieu, 1986) sont aussi employés) constitue très souvent la principale cause de pertes d'azote dans les parcelles cultivées et le maïs s'est vu attribuer vis-à-vis de ce problème une réputation peu enviable. Or, les pertes d'azote après un maïs ensilage sont très variables en fonction des conditions de sol et de climat (tableau 1) et selon la nature du système de culture dans lequel s'intègre l'espèce. Pour des raisons diverses, ces pertes peuvent être importantes, mais l'agriculteur dispose de solutions pour les réduire.

Tableau 1 : Variabilité des quantités d'azote nitrique perdu par drainage après la récolte du maïs ensilé dans quelques dispositifs expérimentaux.

Table 1 : Variations in the amounts of nitrogen lost by drainage after a silage maize harvest in a few experimental lay-outs.

Lieu	Organisme	Période	Méthode de mesure	N-NO ₃ (kg/ha)
Quimper (29)	INRA	1973-1988	Lysimètres	60 - 250
Mirecourt (88)	INRA	1990-1993	Bougies poreuses + bilan hydrique	16 - 263
Ognoas (40)	Inst. Elevage	1994-1998	Drains + lysimètres	18 - 168
Crecom (22)	CA 22	1995-1998	Mesure sol + LIXIM	40 - 103
Kerlavic (29)	EDE 29, ITCF	1995-1998	Bougies poreuses + lysimètres	54 - 106
La Jaillière (44)	ITCF	1992-1999	Dispositif drainage	18 - 49

1. Le maïs et sa nutrition azotée

Son appartenance au groupe des plantes en C4 fait du maïs une espèce dotée d'une remarquable efficacité de l'azote qu'il absorbe. Lorsque sa nutrition azotée est optimale, c'est-à-dire lorsqu'elle est juste suffisante pour assurer la croissance maximale des plantes, la teneur en azote "critique" est déduite de l'équation : % Nc = 3,4 MS^{-0.37} dont le domaine de validité s'étend de 1 à 22 tonnes de matière sèche par ha (Plénet et Lemaire, 1999). A maturité, la teneur en azote de la plante est par conséquent relativement faible, et d'autant plus que le niveau de production est élevé, justifiant ainsi la complémentation azotée apportée aux animaux dont la ration est basée sur le maïs ensilage.

L'aptitude du maïs à prélever l'eau et donc l'azote dans le sol est assez limitée. Elle est par exemple plus faible que celle du sorgho qui appartient pourtant au même groupe des plantes en C4 (Lemaire *et al.*, 1996). Néanmoins, lorsque les conditions climatiques sont favorables (disponibilité en eau, rayonnement et températures élevés) la capacité de croissance du maïs, qui dépend aussi du type variétal, lui permet d'absorber des quantités importantes d'azote (figure 1). Par ailleurs, en présence d'une forte disponibilité d'azote dans le sol, le maïs en absorbe davantage que le strict minimum requis pour assurer la vitesse de croissance maximale. Ce phénomène nommé "consommation de luxe" est commun à la plupart des espèces et permet, dans certains cas, le recyclage d'azote qui sans cela serait susceptible d'être perdu.

L'essentiel de l'azote qui participe à la production de la biomasse est absorbé pendant une courte période d'environ 2 mois qui s'étend du stade 8 feuilles à la fin de la floraison (Lubet et Juste, 1985). Pendant cette période, l'absorption d'azote par le maïs est intense (figure 2) et la satisfaction des besoins des plantes implique une forte disponibilité d'azote dans la rhizosphère. Le reliquat d'azote minéral de la culture précédente et la minéralisation de la matière organique y contribuent pour une part d'autant plus importante que la pluviosité de l'hiver et du printemps est faible. La fertilisation azotée, organique ou minérale, a pour fonction d'en assurer le complément indispensable.

Figure 1 : Variabilité de la quantité d'azote accumulé dans la biomasse aérienne du maïs Volga irrigué, à l'optimum de fertilisation azotée (20 essais en France, de 1993 à 1997).

Figure 1 : Variations in the amounts of nitrogen accumulated in the above-ground biomass of irrigated maize, cv. Volga, with an optimal nitrogen fertilization (20 trials in France, from 1993 to 1997).

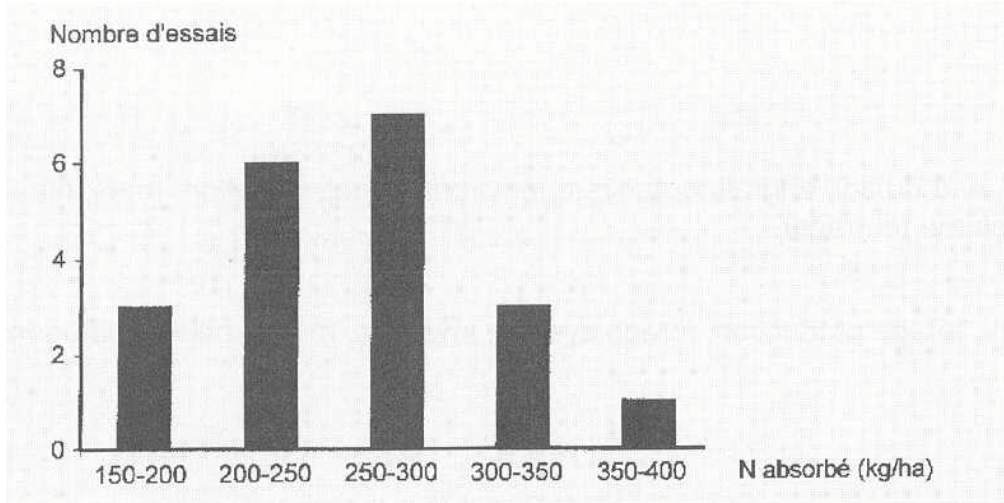
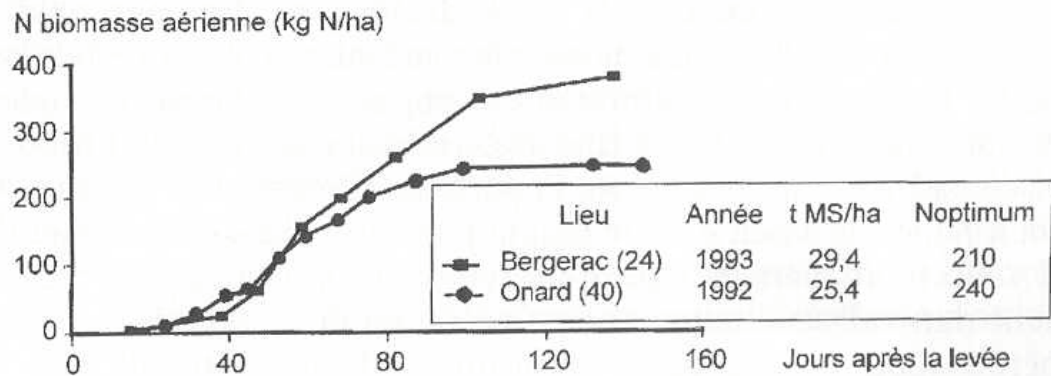


Figure 2 : Dynamique d'accumulation de l'azote dans la biomasse aérienne du maïs Volga fertilisé à l'optimum dans 2 essais.

Figure 2 : Nitrogen accumulation dynamics in the above-ground biomass of maize, cv. Volga, receiving an optimal nitrogen fertilization in 2 trials.



Trois semaines environ après la floraison, l'azote absorbé cesse d'être efficace pour la production (Plénet, 1995). Cela ne signifie pas l'arrêt de l'absorption. En effet, puisque les racines continuent de puiser l'eau dans le sol, elles y prélèvent aussi l'azote en solution. Cet azote, qui ne contribue plus que très peu à la production, s'accumule néanmoins dans les plantes en quantité d'autant plus élevée qu'il est abondant dans le sol. Il provient essentiellement de la minéralisation d'été dont une partie, à laquelle s'ajoute l'azote minéralisé en automne, reste dans le sol et peut être perdue par lixiviation et éventuellement dénitrification si l'automne et l'hiver sont très pluvieux. La faible capacité d'organisation d'azote qu'induit l'absence de restitution des tiges et des feuilles, dont le rapport C/N est élevé, ne peut qu'amplifier l'importance de ces pertes.

Ainsi, grâce à ses fortes capacités de croissance, le maïs peut mobiliser des quantités importantes d'azote mais seulement pendant une courte période de l'année. De ce fait, les pertes d'azote par drainage ou dénitrification peuvent être importantes, surtout en automne et hiver, mais également au printemps car l'absorption par le maïs ne devient importante que tardivement, lorsqu'il atteint le stade 8 feuilles.

2. Pertes d'azote et caractéristiques du système de culture

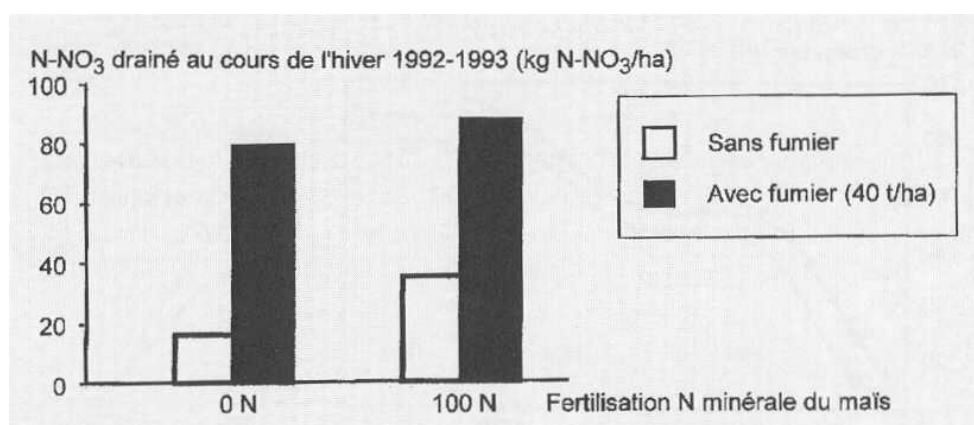
Les pertes d'azote peuvent en partie être imputées aux caractéristiques intrinsèques de l'espèce (enracinement limité, courte période d'absorption...), mais c'est avant tout aux caractéristiques du système de culture (nature des successions culturales, quantités, nature et fréquence des apports organiques, modalités de travail du sol...) dans lequel s'intègre le maïs ensilé qu'incombe la plus grande part de responsabilité.

La durée pendant laquelle le sol demeure dépourvu de végétation active (apte à prélever eau et azote en abondance) constitue la clé du problème. Dans certaines rotations culturales, cette durée peut excéder 6 mois. Ceci est particulièrement le cas des monocultures de maïs ou de certaines successions telles que céréales/maïs, colza/maïs ou pois/maïs. A la durée de ces intercultures s'ajoute la première partie du cycle de développement du maïs pendant laquelle il n'est capable d'intercepter que peu d'azote présent dans le sol. Cette longue période, qui s'étend de la récolte de la culture précédente au stade 8 feuilles du maïs, est propice à l'action des pluies responsables du drainage du nitrate ou de sa dénitrification.

Sa qualité de " tête de rotation " et le fait que le sol demeure longtemps " libre " et portant au printemps font du maïs la culture à qui l'on destine prioritairement les apports de fumier ou de lisier, souvent d'ailleurs en excès par rapport à ses stricts besoins en éléments fertilisants. Ces effluents contiennent en proportions variables de l'azote organique et minéral. La part de ce dernier qui n'est pas volatilisée au moment de l'épandage connaît dans le sol le même devenir que celui d'un engrais minéral (Morvan, 1999). L'azote organique est quant à lui soumis au processus de minéralisation caractérisé par deux phases distinctes (Jensen *et al.*, 1999). Une première phase de minéralisation rapide dont la vitesse est fortement tributaire des conditions de température et d'humidité dans le sol. Elle dure plusieurs mois, mais ne dépasse guère une année. Au terme de cette période, on peut considérer que tout l'azote apporté par l'effluent et présent dans le sol a rejoint le stock d'azote organique stable du sol. Sa minéralisation s'effectuera alors lentement au rythme de quelques pour cent seulement minéralisés chaque année. La durée de la première phase de minéralisation est telle que souvent une part importante de celle-ci se réalise après la récolte du maïs. L'azote minéral ainsi produit s'accumule dans le sol puis est soumis à l'action des pluies d'automne et d'hiver. De ce fait, même sans apport d'engrais azoté minéral pour la culture, après un maïs ensilé ayant reçu un apport de fumier, le drainage peut véhiculer des quantités importantes d'azote (Benoit, 1994 ; figure 3).

Figure 3 : Azote nitrique perdu par drainage hivernal après un maïs ensilé ayant reçu 40 t/ha de fumier en hiver (INRA de Mirecourt, 1992-1993).

Figure 3 : Nitrate losses by winter drainage after a silage maize crop fertilized with 40 t/ha farmyard manure in winter (INRA, Mirecourt, 1992-1993).



A quantité identique d'azote efficace pour la culture, les lisiers sont de ce point de vue moins préjudiciables que les fumiers. Les lisiers contiennent en effet une part plus importante de leur azote sous forme ammoniacale ou organique très rapidement minéralisable, que le maïs peut donc absorber. Par conséquent, il reste dans le sol après la récolte moins d'azote organique susceptible d'être minéralisé puis drainé (tableau 2).

Tableau 2 : Influence de la nature de l'engrais de ferme sur la quantité d'azote drainé après un maïs ensilé (Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor, Crécom).

Table 2 : Influence of the kind of farmyard fertilizer on the amount of nitrogen leached after a silage maize crop (Chambre d'Agriculture of Côtes d'Armor, Crécom).

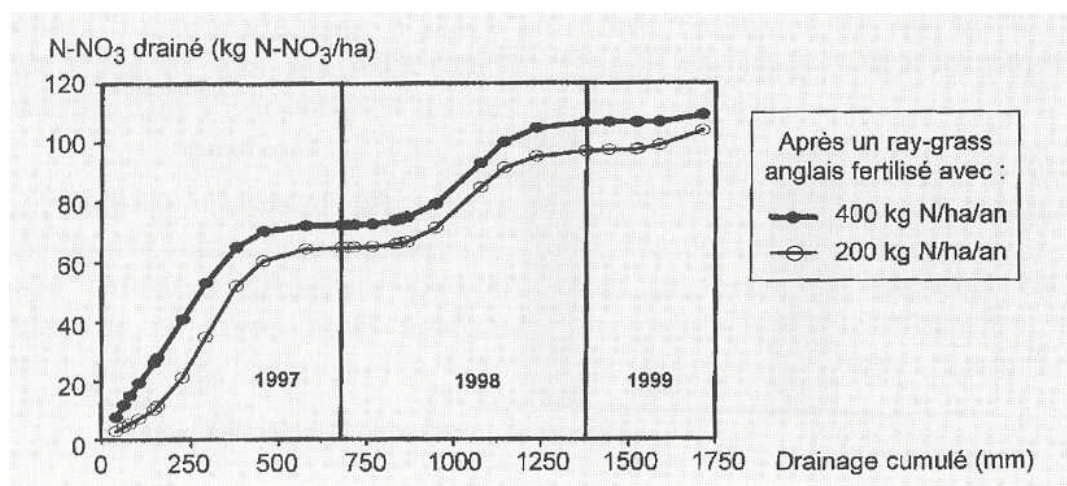
Nature de l'effluent	Lisier	Fumier
Production du maïs (t MS/ha)	10,5	10,4
N total apporté par l'effluent (kg N/ha)	99	224
N "efficace" apporté par l'effluent (kg N/ha)	60	67
N apporté par les engrais minéraux (kg N/ha)	11	25
N nitrique lixivié (kg N-NO ₃ /ha)	40	56

Lorsque la destruction d'une prairie précède l'implantation du maïs, le problème est de même nature. Une quantité importante d'azote organique est minéralisée au cours de l'année qui suit cette destruction. La quantité d'azote minéral ainsi produite peut dépasser les capacités d'absorption du maïs lorsque sa production est faible et, quoiqu'il en soit, une partie est libérée après la récolte. Cet azote minéral excédentaire est ensuite soumis au drainage hivernal (figure 4).

La contribution des fumiers, des lisiers ou des prairies détruites à l'alimentation azotée du maïs est trop souvent soit ignorée soit sous-estimée par les éleveurs. De ce fait, la culture reçoit des fertilisations azotées inutiles ou excessives qu'elle n'est pas toujours à même d'absorber. Il en résulte un reliquat d'azote minéral, présent dans le sol à la récolte, dont l'importance croît avec l'excès de la fertilisation azotée (Simon et Le Corre, 1992). Bien évidemment, ce reliquat est ensuite soumis à l'action des pluies d'automne et d'hiver.

Figure 4 : Quantité d'azote nitrique perdu par drainage d'un sol nu, après destruction au printemps d'une prairie de ray-grass anglais pâturée pendant 8 ans (Kerlavic, Finistère).

Figure 4 : Amount of nitrate N lost by drainage of a bare soil, after destruction in spring of a Perennial ryegrass pasture grazed during 8 years (Kerlavic, Finistère).



3. Limiter les pertes d'azote après une culture de maïs ensilé...

Pour limiter les pertes d'azote, l'éleveur dispose d'un ensemble de solutions techniques, préventives ou curatives, dont la mise en œuvre est simple pour certaines, onéreuses pour d'autres et contraignantes pour quelques unes.

Le raisonnement de la fertilisation minérale et organique est un préalable qui s'impose à tous, même si dans certains cas les méthodes proposées sont jugées peu précises. Les outils de diagnostic rapide de l'état de nutrition azotée des plantes (mesure de la teneur en nitrate de jus de base de tige, mesure indirecte de la teneur en chlorophylle des feuilles) constituent dans ce domaine des éléments de progrès indéniables.

L'irrigation permet aux plantes soumises à la sécheresse d'absorber une part plus grande de l'azote disponible dans le sol et de mieux le valoriser (Dalla Costa et Giovanardi, 1994). Elle permet ainsi de réduire quelque peu le reliquat d'azote minéral présent dans le sol à la récolte et les pertes par drainage qui en découlent (figure 5). En outre, l'augmentation de la production qu'elle induit peut amener à réduire la part de surface dévolue au maïs.

Figure 5 : Influence du régime d'irrigation sur la production du maïs et sur la perte d'azote par drainage (ITCF, Rouffach, Haut-Rhin, 1997-1998).

Figure 5 : Influence of the irrigation pattern on the yield of a maize crop and on the nitrogen losses by drainage (ITCF, Rouffach, Haut-Rhin, 1997-1998).

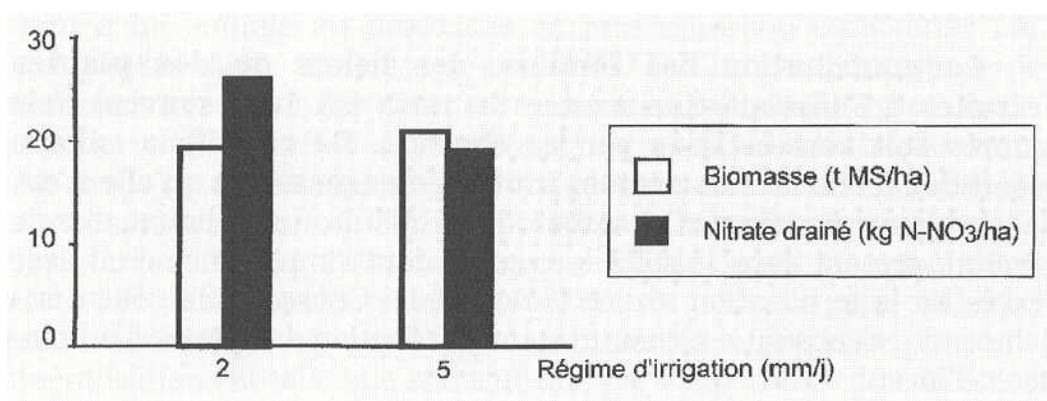
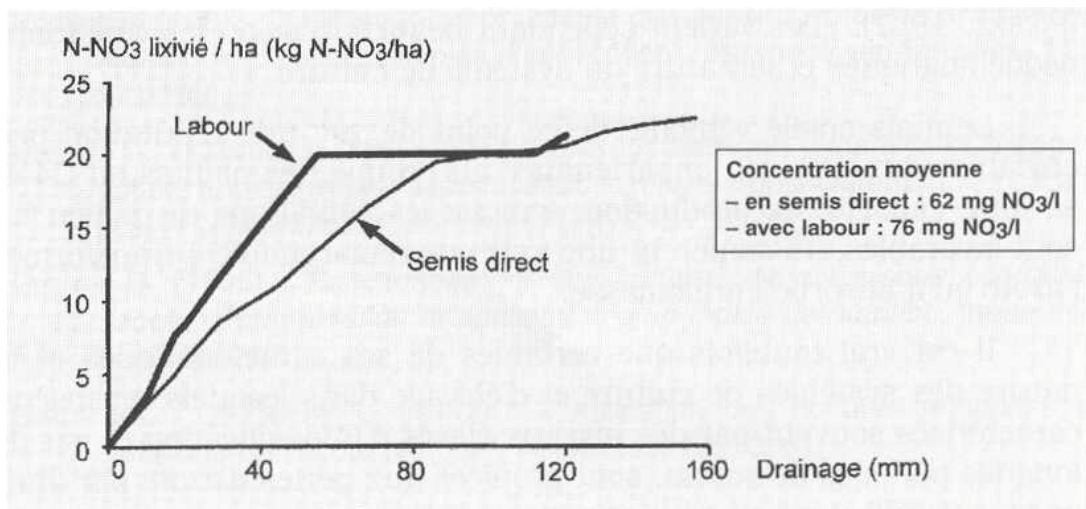


Figure 6 : Influence du mode d'implantation des cultures sur la quantité d'azote nitrique perdu par drainage après la récolte d'un maïs ensilé suivi d'un blé (La Jaillière, Loire-Atlantique, 1992-1993).

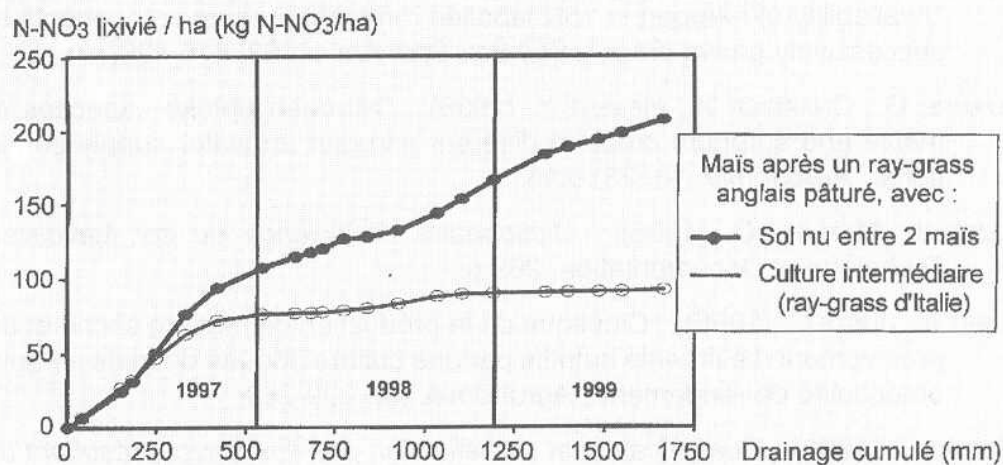
Figure 6 : Influence of the method of crop establishment on the amount of nitrate N lost by drainage after the harvest of a silage maize crop followed by wheat (La Jaillière, Loire-Atlantique, 1992-1993).



Les techniques d'implantation de la culture semblent en revanche n'avoir que très peu d'effet, y compris lorsque la simplification du travail du sol est poussée à son extrême : le semis direct. Seules des modifications du mode de circulation de l'eau et de la vitesse de transfert de l'azote vers l'aquifère récepteur peuvent en résulter (figure 6).

Figure 7 : Influence d'une culture intermédiaire de ray-grass d'Italie sur la quantité d'azote nitrique perdu par drainage pendant 3 ans de monoculture maïs après destruction d'un ray-grass anglais pâturé (Kerlavic, Finistère).

Figure 7 : Influence of an Italian ryegrass catch crop on the amount of nitrate N lost by drainage during a 3-year maize monoculture following the destruction of a grazed Perennial ryegrass ley (Kerlavic, Finistère).



Lorsque les pertes d'azote risquent d'être importantes et que la succession des cultures le permet, la mise en place d'une culture intermédiaire piège à nitrate constitue la solution la plus efficace (figure 7). Facile à implanter dans l'interculture qui sépare une espèce récoltée tôt (céréale, colza, pois...) d'un maïs, elle peut aussi parfaitement s'envisager dans l'interculture qui sépare un maïs ensilé de l'implantation d'une culture au printemps suivant (maïs ou autre). Le semis sous couvert d'un maïs précoce lorsqu'il atteint 4 à 8 feuilles visibles s'est avéré une alternative intéressante quand la réussite d'un semis après la récolte n'est pas garantie. En effet, sans que la culture intermédiaire atteigne un développement tel qu'elle constitue une gêne pour le maïs, elle devient apte à capter des quantités importantes d'azote minéral dans le sol très rapidement après la récolte du maïs.

Conclusion

Qu'il soit cultivé ou non, tout écosystème est générateur de pertes d'azote, sous formes gazeuses vers l'atmosphère, ou sous forme nitrique dans l'eau. Parfois importantes dans les écosystèmes cultivés (Pierre, 1987), elles varient cependant beaucoup selon les conditions pédoclimatiques et la nature du système de culture.

Le maïs ensilé véhicule de ce point de vue une réputation peu enviable alors que son appartenance au groupe des plantes en C4 et sa forte capacité de production, lorsque les conditions du milieu lui sont favorables, lui confèrent une aptitude remarquable à transformer l'azote qu'il absorbe en biomasse.

Il est vrai toutefois que certaines de ses caractéristiques et la nature des systèmes de culture et d'élevage dans lesquels il s'insère, caractérisés souvent par des niveaux élevés d'intensification et par de longues périodes de sol nu, sont propices aux pertes d'azote par drainage, ruissellement ou dénitrification.

Lorsque les pertes d'azote risquent d'être importantes, par exemple quand la fertilisation minérale ou organique s'avère excessive par rapport à la production récoltée, il existe des solutions agronomiques pour en

atténuer l'importance. La mise en place de cultures intermédiaires qui peuvent aussi s'inscrire dans le système fourrager, en représente sans conteste l'exemple le plus efficace.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.
"Fourrages annuels et environnement",
les 28 et 29 mars 2000.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Benoit M. (1994) : "Risques de pollution des eaux sous prairie et sous culture. Influence des pratiques d'apport d'engrais de ferme", *Fourrages*, 140, 407-420.

Dalla Costa L., Giovanardi R. (1994) : "Nitrogen fertility and water régime influence on N use efficiency in sunflower and maize", *Proc. 3rd ESA Congr.*, Abano - Padova, Italy, 98-99.

Jensen B., Sorensen P., Thomsen I.K., Jensen E.S., Christensen B.T. (1999) : "Availability of nitrogen in ¹⁵N labelled ruminant manure components to successively grown crops", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 416-423.

Lemaire G., Charrier X., Hebert Y. (1996) : "Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions", *Agronomie*, 16, 231-246.

Lozet J., Mathieu C. (1986) : *Dictionnaire de science du sol*, Lavoisier, Technique et Documentation, 269 p.

Lubet E., Juste C. (1985) : "Cinétique de la production de matière sèche et de prélèvement d'éléments nutritifs par une culture irriguée de maïs à haute potentialité de rendement", *Agronomie*, (3), 239-250.

Morvan T. (1999) : *Quantification et modélisation des flux d'azote résultant de l'épandage de lisier*, thèse, Université de Paris 6, 157 p.

Pierre D. (1987) : "Utilisation agronomique des bassins versants. Problèmes méthodologiques, exemples d'application", *Perspectives Agricoles*, 115, 171-183.

Plenet D., Lemaire G. (1999) : "Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration", *Plant and Soil*, 216, 65-82.

Plenet D. (1995) : *Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition*, thèse INP Lorraine, 247 p.

Simon J.C., Le Corre L. (1992) : "Fertilisation des cultures annuelles et lessivage de l'azote nitrique", *Fourrages*, 129, 3-10.

SUMMARY

Nitrogen losses in cropping systems based on silage maize. Causes and cures

Maize has a considerable growth capacity ; it is able to absorb large amounts of nitrogen. After harvest, there is a risk of mineral nitrogen being leached during winter. Certain features of the cropping system may increase the amount of nitrogen leached, such as organic or mineral dressings that correspond to a higher yield than that actually obtained, and also the ploughing-up of a ley. To limit these nitrogen losses, the first solution is to determine the nitrogen fertilization in a reasoned way, taking into account the mineralization of the organic matter, the organic inputs... and also a realistic yield prospect. If there is a risk of major losses, the establishment of a catch crop is an efficient solution.