

Lessivage d'azote en monoculture de maïs, en sol granitique du Finistère

J-C. Simon et L. Le Corre

Depuis quelques années, on observe en Bretagne une augmentation régulière des teneurs en nitrates des eaux distribuées pour la consommation humaine. Diverses cartes, publiées principalement par les Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales, montrent qu'un nombre grandissant de communes distribuent des eaux de consommation dont les teneurs en nitrates sont supérieures au seuil de tolérance européen de 50 mg (NO₃) par litre. Certaines d'entre elles ont même déjà dépassé une teneur de 100 mg/l.

En Bretagne, cette pollution des eaux, tant superficielles que profondes, est principalement liée aux activités agricoles qui mettent en jeu la plus grande partie de l'azote circulant dans cette région :

— La recherche de hauts niveaux de production des cultures a entraîné une forte augmentation de la fertilisation azotée : en moyenne (1982), 84 kg d'azote minéral sont épandus par hectare chaque année. Certaines parcelles, portant des graminées fourragères ou des cultures légumières peuvent recevoir plus de 300 kg N/ha/an.

MOTS CLÉS

Azote, culture dérobée, lessivage, monoculture maïs, ray-grass d'Italie.

KEY-WORDS

Catch-crop, italian rye-grass, leaching, maize monoculture, nitrogen.

AUTEURS

I.N.R.A., Station d'Agronomie de Quimper, 4 rue de Stang Vihan F 29, Quimper.

— Du fait de l'intensification de l'élevage, pour l'ensemble de la région Bretagne, les quantités d'azote entrant sous forme d'aliment du bétail (170 000 tonnes) sont équivalentes à celles entrant sous forme d'engrais minéraux (162 000 tonnes). On estime à 343 500 t l'azote présent dans les déjections animales, soit 179 kg/ha de S.A.U. bretonne. Ainsi, ce sont 263 kg N (84 + 179) qui sont potentiellement épandus par hectare et par an. COPPENET (1981) estimait déjà ce chiffre à 260 kg.

On conçoit donc l'importance de la maîtrise de la fertilisation azotée en vue de diminuer non seulement la pollution nitrique mais aussi les frais de production (l'azote lessivé étant aussi une perte économique).

Cet article apporte un certain nombre d'éléments de réponse sur le lessivage de l'azote dans un système de culture largement utilisé en Bretagne : la monoculture de maïs ensilage, avec ou sans culture dérobée de ray-grass d'Italie, pour des niveaux de fertilisation azotée élevés, voisins de ceux pratiqués dans les exploitations agricoles intensives, soit de 120 à 240 kg N/ha/an.

Matériel et méthode

1. Description de l'installation lysimétrique

L'installation lysimétrique de Quimper comprend 8 cases de 2 mètres carrés de surface. A leur mise en service (1953), elles ont été remplies d'un sol granitique, par couches de 10 centimètres d'épaisseur, sur une hauteur de 90 centimètres. Les caractéristiques de ce sol sont décrites en détail dans une publication antérieure (COPPENET, 1969).

Les eaux de drainage sont recueillies dans des récipients couverts, placés dans des fosses de réception contigües aux cases. La mesure de la quantité d'eau drainée et le prélèvement d'eau pour analyse chimique (le dixième de la quantité recueillie) sont effectués quotidiennement pour chaque case, tout au long de la période de drainage.

2. Protocoles expérimentaux

Pour le thème étudié ici (thème faisant partie d'un ensemble expérimental plus complexe), trois protocoles expérimentaux se distinguant par le mode de conduite des cases (cultures, niveaux de fertilisation) se sont succédés de 1969 à 1988, sur deux périodes distinctes :

● Première période (1969-1981)

Trois cases concernent le thème étudié : elles portent les numéros 1, 3 et 4. Elles sont couvertes simultanément par les mêmes cultures. Leurs principales caractéristiques sont présentées tableau 1.

Période	Monoculture de Maïs			Maïs + RGI dérobé		
	1969-1972	1983-1988		1973-1981	1983-1988	
N° des cases	1/3/4	2 / 3		1/3/4	1 / 6	
Apport N (kg/ha/an)						
. Maïs	115	120	180	120	120	120
. RGI automne				60	60	0
. printemps				60	60	60
Apport P₂O₅ (kg/ha/an)	60	75	75	60 à 75	75	75
Apport K₂O (kg/ha/an)	150	250	250	300 à 350	400	400

TABLEAU 1 : Principales caractéristiques des cases lysimétriques au cours des 2 périodes (1969-1981 et 1983-1988 ; RGI : ray-grass d'Italie).

TABLE 1 : Main characteristics of lysimeters during the two periods (1969-1981 and 1983-1988 ; RGI : italian rye-grass).

De 1969 à 1972 les cases sont cultivées en monoculture de maïs et de 1973 à 1981 en maïs avec une culture dérobée de ray-grass d'Italie. Cette dernière permet une couverture du sol pendant l'hiver entre deux maïs successifs. Le ray-grass est semé du 25 septembre au 1^{er} octobre, peu après la récolte du maïs ; une première coupe est effectuée début mars et une deuxième vers le 20 avril avant le semis du maïs suivant. Le maïs est semé entre le 20 et le 25 avril.

Les engrais apportés le sont respectivement sous forme de nitrate d'ammonium, de superphosphate et de chlorure de potassium. L'azote est épandu au semis pour le maïs (120 kg/ha), au semis et après la première coupe pour le ray-grass (60 et 60 kg/ha).

● Deuxième période (1983-1988)

Les numéros des cases correspondantes sont : 1, 2, 3 et 6. Elles ne portent plus simultanément les mêmes cultures, et les quantités et la répartition de l'azote sont différentes, comme le précise le tableau 1.

Deux c ases (2 et 3) sont en monoculture de maïs. Elles diff erent par le niveau de fertilisation zot ee : 120 et 180 kg N/ha/an. Deux cases (1 et 6) sont en maïs suivi d'un ray-grass d'Italie d erob e. Elles diff erent par un apport ou non d'azote à l'automne, au semis du ray-grass.

3. Analyse chimique des eaux de lessivage

On effectue le dosage de l'azote nitrique par distillation de l'azote ammoniacal après réduction des nitrates par l'alliage Devarda.

Au cours de la première p eriod (1969-1981), les dosages ont été faits sur l'échantillon moyen de chaque trimestre, ce qui ne permet qu'une approche très globale des pertes d'azote par lessivage sur l'année.

Au cours de la seconde p eriod (1983-1988), les analyses ont été effectuées sur l'échantillon moyen de chaque quinzaine, ce qui permet une approche de la cinétique hivernale des pertes d'azote par drainage.

Résultats

1. Quantités d'eau drainées

Les quantités d'eau drainées dans les cases lysimétriques de Quimper sont importantes et reflètent bien le caractère océanique du climat local : en moyenne le drainage est de 570 mm/an pour une pluviométrie de 1 040 mm. Le coefficient de drainage (mm drain es/mm précipitations) est  lev e : 55 % en moyenne (tableau 2).

N�o des cases	1969-1972		1973-1981		1983-1988	
	D(mm)	C(%)	D(mm)	C(%)	D(mm)	C(%)
1	441	44,6	539	50,4	641	58,7
2					731	66,3
3	462	46,7	586	54,8	728	65,9
4	452	45,7	560	52,2	683	61,5
6					674	61,6

TABLEAU 2 : Drainages moyens annuels (D en mm) et coefficients de drainage (C en %) correspondants, pour les différentes périodes d'étude.

TABLE 2 : Water drained off (D in mm) and corresponding drainage coefficients (C in %) for various periods.

A titre de comparaison, les drainages et les coefficients de drainage sont respectivement de :

— 150 mm et 23-26 % à Versailles (BASTISSE, 1953 ; BONIFACE et al., 1986),

— 75 mm et 13 % à Clermont-Ferrand (COLLIER, 1964),

— 400 mm et 50 % à Theix (TRIBOÏ, 1981) en situation également bien arrosée (800 mm/an), et sous sols granitiques.

Comme l'ont montré BELAN et COPPENET (1980 a), les quantités drainées par case sont étroitement corrélées aux précipitations reçues et à la biomasse végétale produite.

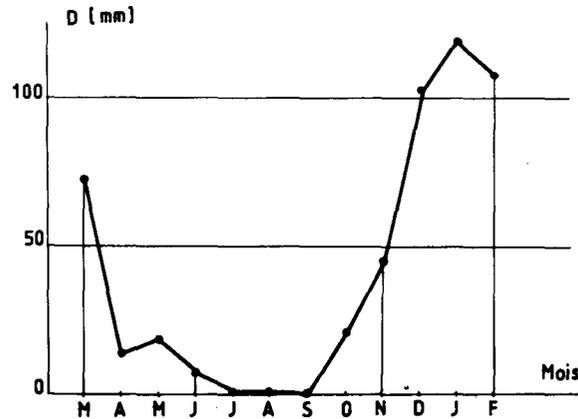


FIGURE 1 : Evolution au cours de l'année des quantités mensuelles d'eau drainée (mm).

FIGURE 1 : Seasonal evolution of the monthly volumes of water drained off (mm)

A Quimper (figure 1), le drainage commence généralement en octobre-novembre, dès que les précipitations automnales cumulées dépassent 100 à 120 mm. Il est maximum de décembre à janvier, où il dépasse 100 mm en moyenne par mois. Il ralentit ensuite en avril pour se prolonger parfois jusqu'en juin. Le drainage est nul pendant les 3 mois d'été.

2. Pertes annuelles d'azote par lessivage

Les pertes moyennes annuelles d'azote par lessivage sont présentées dans le tableau 3.

Période	Monoculture de Maïs			Maïs + RGI dérobé		
	1969-1972	1983-1988		1973-1981	1983-1988	
N apporté (kg/ha/an)	115	120	180	240	180	240
N lessivé (kg/ha/an)	1	59		88		94
	2		96			
	Cases 3	65	167	97		
	4	68		95		
	6				45	

TABLEAU 3 : Quantités moyennes annuelles d'azote lessivées sous monoculture de maïs, avec ou sans culture dérobée (kg / ha / an).

TABLE 3 : Nitrogen leaching averages under a maize monoculture, with or without catch crop (kg / ha / year).

En monoculture de maïs, les pertes moyennes d'azote par lessivage sont de l'ordre de 60 à 100 kg N/ha/an, pour un niveau de fertilisation azotée correspondant aux exportations moyennes de la culture (120 kg N/ha/an). On remarquera que les pertes sont moins élevées sur la période 1969-1972 (longtemps après le chaulage de 1953) que sur la période 1983-1988 (immédiatement après le chaulage de 1982) ; on peut penser que l'activation de la minéralisation du sol par le chaulage pourrait être à l'origine de cette différence.

Si le niveau de fertilisation dépasse les besoins de la culture (180 kg/ha/an), les pertes d'azote par lessivage augmentent. La quantité supplémentaire d'azote lessivé (71 kg) est voisine du surplus d'azote épandu (60 kg).

Une intensification de la monoculture de maïs, par l'introduction d'un ray-grass d'Italie dérobé, se traduit généralement par une augmentation de 60 à 120 kg/ha/an de la quantité d'azote épandue globalement sur l'année. Par rapport à la monoculture de maïs recevant 120 kg N/ha/an, on observe les phénomènes suivants sur la même période (1983-1988) :

— Un apport d'azote de 60 kg sur le ray-grass, après la première exploitation de printemps (mars), sans apport d'automne, soit au total 180 kg N/ha/an (cf. case n° 6, tableau 1), réduit le lessivage d'azote moyen annuel de 50 kg (45 kg au lieu de 96 sous maïs nu l'hiver).

— Un épandage de 120 kg d'azote sur le ray-grass, réparti en 2 apports, 60 kg au semis du ray-grass, fin septembre, et 60 kg après la première coupe au printemps, soit au total 240 kg d'azote/ha/an sur la succession maïs ray-grass d'Italie (cf. cases n° 1, 3 et 4, tableau 1), conduit à un lessivage du même ordre de

grandeur (95 kg/ha/an), soit 50 kg de plus que pour le cas précédent. Cette quantité supplémentaire d'azote retrouvée dans les eaux de lessivage est voisine de celle épandue à l'automne sous forme d'engrais. La contribution à la pollution nitrique des épandages d'azote à l'automne apparaît ici clairement.

3. Bilans globaux de l'azote : estimation de la minéralisation apparente

Nous avons appelé minéralisation « apparente », la quantité d'azote définie par :

$$N \text{ (minéralisation apparente)} = N \text{ (exporté)} + N \text{ (lessivé)} - N \text{ (engrais)}$$

L'estimation de ce terme est assez grossière car tous les éléments du bilan ne sont pas pris en compte (par exemple l'azote volatilisé ou l'azote immobilisé dans certains organes comme les racines). Les résultats de ces calculs sont présentés tableau 4.

Période	Monoculture de Maïs					Maïs + RGI dérobé				
	1969-1972		1983-1988			1973-1981		1983-1988		
	1	3	4	2	3	1	3	4	1	6
N engrais	115	115	115	120	180	240	240	240	240	180
N exporté	147	137	152	110	120	188	178	188	190	190
N lessivé	59	65	68	96	167	88	97	95	94	45
N minéralisé	91	87	105	86	107	36	35	43	44	55
Moyenne	92					40				

TABLEAU 4 : Estimation de la minéralisation apparente pour les deux successions culturales (kg d'azote / ha / an).

TABLE 4 : Estimation of « apparent » soil mineralization for the two rotations of crops (kg / ha / year).

Ce tableau met en évidence une minéralisation apparente plus importante sous monoculture de maïs (100 kg/ha/an) que sous maïs suivi d'un ray-grass d'Italie dérobé (40 kg/ha/an). Il ne faut pas en conclure pour autant que la minéralisation est plus faible dans le deuxième cas. Il s'agit probablement d'une immobilisation de l'azote dans les racines du ray-grass, que l'on peut estimer voisine de 40 à 50 kg. Cette quantité correspond assez bien à la différence d'azote lessivé. La création de ce « puits » supplémentaire expliquerait le rôle dépolluant du ray-grass d'Italie. En l'absence de ce puits, le lessivage augmente.

4. Lessivage d'azote et production végétale

Les bilans présentés ci-dessus sont des bilans globaux cumulés à partir des moyennes observées sur chaque période. Ils ne prennent pas en compte la variabilité inter-annuelle des différents termes qui les composent.

Ils mettent en évidence, pour une case donnée, une corrélation négative entre les quantités annuelles d'azote lessivé et la production de biomasse végétale récoltable, sous réserve que la variabilité de production soit assez large. C'est par exemple le cas pour la rotation « maïs + ray-grass d'Italie dérobé », où les productions obtenues s'échelonnent de 8 à 21 t M.S./ha entre 1973 et 1981 (figure 2).

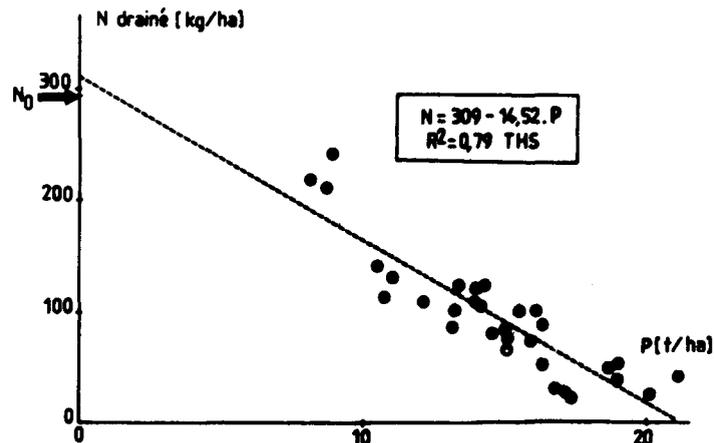


FIGURE 2 : Relation entre le lessivage d'azote et la production annuelle de matière sèche (N en kg / ha ; P-en t / ha).

FIGURE 2 : Relationship between nitrogen leaching and annual dry matter production (N, kg / ha ; P, t / ha).

Cette figure met en évidence que le lessivage d'azote est d'autant moins important que la quantité de biomasse végétale produite est élevée. Un calcul d'ajustement permet de déterminer la quantité d'azote perdue en l'absence de production et la pente de la droite. Pour une production nulle, la quantité extrapolée d'azote lessivé serait de 309 kg, valeur qu'il est intéressant de comparer à celle mesurée sous case nue (N_0) au cours de la même période : 283 kg. On peut déduire de cette première approximation que, pour chaque tonne de matière sèche produite, la quantité d'azote lessivée diminue de 14,5 kg.

En monoculture de maïs une relation du même type a également été établie (tableau 5).

Rotation	Niveau N (kg)	Ajustement linéaire	R	Niveau de Signification
Maïs	120	N = 205 - 12,1.MS	0,69	0,050
Maïs + RGI	240	N = 309 - 14,5.MS	0,89	0,001

TABLEAU 5 : Relation entre la biomasse produite et la quantité d'azote lessivée (exprimées en t MS / ha et kg N / ha / an).

TABLE 5 : Relationship between dry matter production and leached nitrogen level (MS, t / ha ; N, kg / ha / year).

La faible variabilité des productions de la monoculture de maïs sur la période d'étude conduit à une corrélation moins étroite avec l'azote lessivé. L'ordonnée à l'origine est ici de 205 kg d'azote, quantité voisine de celle perdue sous case nue recevant la même fumure azotée : 187 kg. De la même façon, on peut calculer que la quantité d'azote drainé diminue de 12,1 kg par tonne de MS produite.

Il est remarquable de constater que la pente de chaque droite correspond assez bien soit à la teneur en azote du maïs (1,25 %), soit à une teneur moyenne (pondérée par les productions) du maïs et du ray-grass d'Italie (1,45 %).

5. Cinétique du lessivage de l'azote

Quatre exemples de cinétiques correspondant à quatre cas distincts sont présentés sur les figures 3 et 4 :

● En monoculture de maïs

Dans l'exemple choisi, la monoculture de maïs reçoit 120 kg d'azote au semis (figure 3a). Le drainage commence en novembre, et présente un pic accusé dans les deux mois suivants. Il ralentit ensuite fin janvier, pour présenter un nouveau pic tardivement en avril. Les concentrations en azote des eaux lessivées sont maximales au moment du premier pic de drainage, puis elles diminuent, pour se stabiliser autour d'une valeur faible, quelle que soit l'importance du drainage ultérieur. On remarque que, en quantités d'azote cumulées, la plus grande partie de l'azote est lessivée au moment du premier pic (70 kg jusqu'à fin décembre), puis le lessivage demeure régulier mais faible (25 kg pour le reste de l'hiver). Ce dernier correspond probablement à l'azote minéralisé pendant l'hiver.

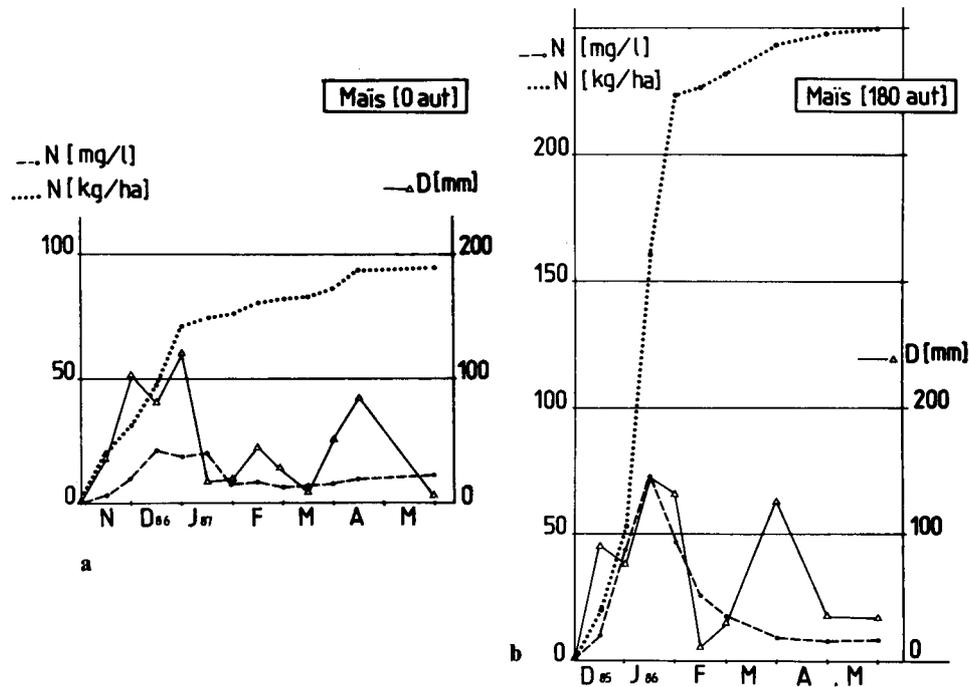


FIGURE 3 : Cinétique du lessivage de l'azote en monoculture de maïs :

- Quantités bimensuelles d'eau drainée (D en mm),
- Concentration en N nitrique des eaux drainées (N en mg / l),
- Lessivage cumulé d'azote (N en kg / ha).

a - Maïs recevant 120 kg N / ha / an

b - Maïs recevant 120 kg / ha au semis et 180 kg / ha sur sol nu en période hivernale (simulation d'un apport de lisier).

FIGURE 3 : Kinetics of nitrogen leaching under a maize monoculture :

- Fortnight volumes of water drained (D, mm),
- NO_3-N concentration of leachates (N, mg / l),
- Cumulated nitrogen losses in drained water (N, kg / ha).

a - With a nitrogen fertilization of 120 kg / ha / year

b - With a nitrogen fertilization of 120 kg / ha at seeding and 180 kg / ha on bare soil in Winter (simulated slurry application).

● En monoculture de maïs recevant un apport de lisier sur sol nu en période hivernale

Nous avons effectué un apport supplémentaire d'azote de 180 kg N/ha, à l'automne, sur sol nu, pour simuler les incidences d'un apport massif de lisier en cette période (soit l'équivalent de 60 m³ de lisier à 0,5 % d'azote, dont 60 % sous forme ammoniacale).

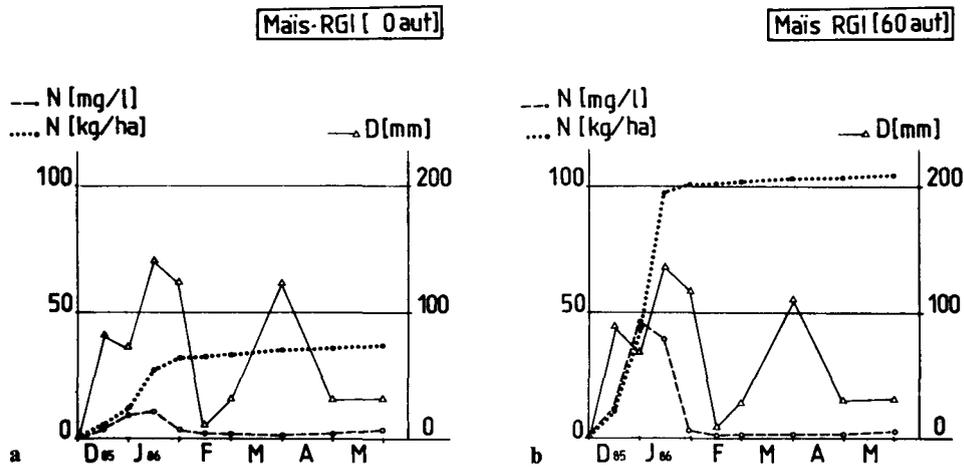


FIGURE 4 : Cinétique du lessivage de l'azote en monoculture de maïs avec ray-grass d'Italie dérobé (cf. figure 3) :

- a - Sans apport d'azote à l'automne
- b - Avec 60 kg N / ha à l'automne

FIGURE 4 : Kinetics of nitrogen leaching under a maize monoculture with an Italian rye-grass catch-crop (cf. figure 3) :

- a - With no nitrogen applied in Autumn
- b - With an Autumn application of nitrogen (60 kg / ha).

On observe sur la figure 3b une certaine analogie avec le cas précédent : premier pic de drainage en janvier, maximum de concentration lors de ce pic, plus grande partie de l'azote lessivée à ce moment (225 kg), poursuite d'un lessivage faible mais régulier au delà (25 kg pour le reste de l'hiver). Le lessivage total d'azote est ici de 250 kg au cours de l'hiver, au lieu de 95 dans le cas précédent, soit un surplus de 155 kg, quantité voisine de celle épandue à l'automne.

Cet exemple montre les risques de pollution nitrique entraînés par des apports d'azote en période hivernale, sur sol nu.

● En maïs, avec culture dérobée de ray-grass d'Italie sans apport d'azote à l'automne

Le maïs reçoit 120 kg d'azote au semis et le ray-grass 60 kg au printemps après la première coupe.

La courbe de drainage (figure 4a) est très voisine de celle présentée figure 3, pour la même période. Le pic de concentration est très atténué ; au-delà, les

valeurs tendent vers 0. Dans ce cas, tout l'azote est lessivé lors du premier pic de drainage, les pertes d'azote ultérieures étant très faibles. La courbe d'azote drainé cumulé tend en effet vers une limite, contrairement à ce qui est observé sous maïs nu l'hiver. Ceci peut s'expliquer par une valorisation par le jeune ray-grass de l'azote minéralisé au cours de l'hiver.

● **En maïs, avec culture dérobée de ray-grass d'Italie recevant un apport d'azote à l'automne**

Si l'on apporte de l'azote à l'automne au jeune ray-grass, on observe une dynamique voisine du cas précédent mais avec un pic de concentration plus accusé (figure 4b). La quantité d'azote lessivée lors du premier pic de drainage est de ce fait plus importante. Au delà, on remarque le même arrêt du lessivage, mais pour une limite plus élevée : 100 kg au lieu de 40. La différence correspond exactement à l'apport d'azote d'automne.

Cet exemple montre l'inutilité des apports d'automne sur un jeune semis qui ne peut les valoriser.

Discussions et conclusions

Ces divers résultats, obtenus rappelons-le pour un sol granitique riche en matière organique et sous climat océanique humide et doux, montrent et précisent l'importance du lessivage d'azote dans le cas d'une monoculture de maïs pour laquelle le sol reste nu en hiver. Pour une fertilisation azotée de 120 kg/ha/an, dose correspondant aux besoins moyens d'une culture produisant 12 t MS/ha/an, les pertes moyennes s'élèvent à 60-95 kg/ha/an selon les conditions. Une fertilisation excessive, ou des apports d'azote sur sol nu entre deux cultures se traduisent par une augmentation proportionnelle du lessivage : des apports de 180 kg/ha/an conduisent à une perte des 60 kg supplémentaires ; un apport d'automne sur sol nu entraîne la perte d'une quantité d'azote voisine de celle apportée.

On s'attachera donc à calculer la fertilisation azotée en fonction de l'objectif de production végétale pour éviter les apports superflus. Ainsi, pour des apports d'azote identiques, plus l'écart avec l'objectif de production est important, plus les pertes d'azote par lessivage sont élevées l'hiver suivant (BELAN et COPPENET, 1980 b). GUIRAUD et BONIFACE (1987) ont fait des observations semblables à Versailles, dans le cas d'une limitation sévère de la production par un déficit hydrique important.

Le concept de minéralisation « apparente » ne permet qu'une approche très grossière des quantités d'azote produites par minéralisation : environ 90 kg/ha/an.

Il est difficile de tenir compte de cette fourniture d'azote par le sol, car on ne connaît pas encore la ou les périodes où elle s'effectue. Sous le climat doux et humide de Quimper, il semblerait que la minéralisation se poursuive tout au long de la période hivernale.

L'implantation d'une culture dérobée de ray-grass d'Italie réduit très nettement les pertes d'azote. En l'absence de fertilisation automnale, ces dernières sont ramenées en moyenne à 45 kg, soit une réduction de plus de 45 % des pertes. Un apport d'azote sur les jeunes semis à l'automne est à proscrire, l'intégralité de cet azote étant retrouvé au cours de la période automnale-hivernale pendant laquelle la croissance végétative est faible.

Ces divers résultats, obtenus à Quimper, sont en bon accord avec ceux observés à Theix, en conditions pédo-climatiques voisines (sol granitique et précipitations élevées). Dans cette zone humide du Massif Central, on montre en effet que ce sont les périodes où le sol reste nu qui prédisposent les rotations à base de cultures annuelles à enrichir les solutions du sol en nitrates (GACHON et TRIBOÏ, 1977 et 1985). Des observations analogues ont été faites à Versailles, sous un sol de limon où les quantités hivernales d'eau drainées sont nettement plus faibles (BONIFACE, 1981 ; BONIFACE et al., 1986). Les cultures d'hiver, blé, orge, colza..., et les cultures dérobées permettent de limiter efficacement la charge en azote des eaux lessivées.

Tant en Bretagne qu'en Auvergne (sites de Quimper et Theix), la minéralisation de la matière organique du sol représente une fourniture d'azote importante : 60 kg à Theix (TRIBOÏ et GACHON, 1985) et environ 90 kg à Quimper. L'azote fourni par la minéralisation n'est valorisé que partiellement par les cultures annuelles, la minéralisation se poursuivant pendant les périodes interculturelles. De ce fait, pour les systèmes basés sur de telles cultures, les pertes d'azote sont inévitables, même en l'absence de fertilisation azotée. A Quimper, au cours d'une expérimentation antérieure (COPPENET, 1964), on a mesuré des pertes moyennes de 50 kg/ha/an d'azote par lessivage pour une succession à dominante de cultures annuelles *conduites sans fertilisation azotée* (pomme de terre, blé de printemps, betterave...). La même observation a été faite en Auvergne, à Theix (TRIBOÏ et GACHON, 1977 et 1985). Comme le souligne BONIFACE (1981), la minéralisation de la matière organique, difficilement maîtrisable, est une source inévitable de nitrates dans le sol.

Compte tenu des quantités moyennes d'azote apportées calculées pour la Bretagne (environ 260 kg d'azote/ha SAU/an, cf. introduction), ces résultats prennent toute leur importance :

— Ils mettent en évidence l'intérêt des cultures dérobées et plus généralement l'intérêt de la présence d'un couvert végétal en hiver.

— Ils confortent les règles généralement proposées pour limiter la pollution nitrique : limiter les apports d'azote à un niveau compatible avec les exportations par les cultures, raisonner le calendrier des apports en fonction des besoins de celles-ci, ne pas oublier la fourniture d'azote par la minéralisation, ne pas épandre de lisiers ou d'azote minéral en période de végétation ralentie (automne-hiver).

— Il apparaît illusoire de rechercher des solutions agronomiques pour limiter les pertes d'azote par lessivage quand les apports d'azote sont excessifs, en particulier dans le cas d'apports massifs de lisier.

Accepté pour publication le 19 juillet 1988

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BASTISSE E-M. (1953) : « Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie : Bilan de l'eau », *Ann. Agron.*, 19, 53-76.
- BELAN J. et COPPENET M. (1980 a) : « Essai d'étude de la dynamique de l'azote à l'aide de la lysimétrie (Quimper 1966-1978) : Evaluation à l'aide d'une équation simple de la quantité drainée en année particulière », *C. R. Acad. Agric.*, 1079-1087.
- BELAN et COPPENET M. (1980 b) : « Essai d'étude de la dynamique de l'azote à l'aide de la lysimétrie (Quimper 1966-1978) : Evaluation à l'aide d'équations simples de la quantité de nitrates lessivés en année particulière », *C.R. Acad. Agric.*, 1097-1105.
- BONIFACE R. (1981) : « Le lessivage des nitrates en zone agricole », *L'eau, la recherche et l'environnement*, (4^{èmes} journées techniques et scientifiques), n° 17, 89-114.
- BONNIFACE R., GUIRAUD G. et MARIOTTI A. (1986) : *Engrais azotés, alimentation des plantes et pollution*, rapport de fin de contrat - Ministère de l'Environnement, n° 3262 & 4186, 44 p.
- COLLIER D. (1964) : « Evolution et dynamique de l'azote minéral dans les sols argilo-calcaire de Limagne », *C. R. Acad. Agric.*, 50, 1231-1251.
- COPPENET M. (1969) « Résultats de 12 années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965) », *Ann. Agron.*, 20 (2), 111-143.
- COPPENET M. (1981) : Communication personnelle.
- GACHON L. et TRIBOÏ E. (1977) : « Influence du système cultural sur la charge en nitrates des eaux d'infiltration », *Colloque des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine*. Orléans, 1-2 mars 1977, 143-159.
- GUIRAUD G. et BONIFACE R. (1987) : « Utilisation de l'azote 15 pour les études de transfert d'azote dans le système sol-plante », *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 73, n° 3, 23-28.
- TRIBOÏ E. (1981) : « Bilans hydriques et minéraux en relation avec le système cultural », *Probleme de agrofitechnie teoretica si aplicata*, Institut de Cercetari Pentru Cereale si plante tehnice Fundulea, (Roumanie) vol. III, n° 3, 229-258.
- TRIBOÏ et GACHON L. (1985) : « Transfert des nitrates dans le sol en relation avec le système de culture. Devenir de l'azote minéral apporté comme engrais », *Nitrates dans les eaux*, Paris, 22-24 oct. 1985, 15 p.