

Les flux d'azote au pâturage.

II- Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage

F. Vertès¹, J.C. Simon²,
L. Le Corre¹, M.L. Decau²

En élevage, la prévision des risques de lessivage passe par la compréhension du devenir des flux d'azote dans le système complexe qu'est la parcelle prairiale pâturée. L'analyse de l'impact local des pissats et de leur interaction avec la végétation, notamment le trèfle blanc, apporte d'utiles éléments de réflexion.

RÉSUMÉ

Un dispositif de 22 lysimètres enterrés dans deux parcelles pâturées (ray-grass anglais pur recevant 250 kg N/ha/an et association ray-grass - trèfle blanc sans azote) a permis d'étudier en conditions réelles la variabilité des déjections animales, l'influence du couvert végétal et de la saison sur les pissats émis, et le devenir des pissats après leur impact au sol. Les risques de lixiviation de l'azote apporté sont précisés en fonction des quantités mises en jeu et des périodes de pâturage. Enfin, des marquages avec ¹⁵N ont permis d'étudier la compartimentation entre les plantes, l'immobilisation dans le sol et le lessivage, selon la source d'azote apportée (engrais et/ou pissat). Le pouvoir tampon des deux peuplements végétaux est discuté.

MOTS CLÉS

Association végétale, azote, fertilisation azotée, fixation symbiotique de l'azote, gestion des prairies, lessivage, nutrition de la plante, pâturage, prairie, ray-grass anglais, restitutions, trèfle blanc, variations saisonnières.

KEY-WORDS

Excreta returns, grazing, leaching, nitrogen, nitrogen fertilization, pasture, pasture management, perennial ryegrass, plant association, plant nutrition, seasonal variations, symbiotic nitrogen fixation, white clover.

AUTEURS

1 : Unité d'Agronomie I.N.R.A., 4, rue Stang Vihan, F-29000 Quimper.

2 : Laboratoire Associé I.N.R.A. de Physiologie et Biochimie Végétale, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen cedex.

La variabilité des flux d'azote qui s'exprime pleinement au niveau d'approche parcellaire montre les difficultés que l'on rencontre pour prédire les pertes d'azote par lessivage (article précédent, SIMON *et al.*). Il importe donc de préciser la nature et le rôle des différents facteurs à l'origine de cette variabilité afin de mieux comprendre et prévoir le phénomène de lessivage au pâturage. L'analyse en est ici développée à la lumière des derniers résultats expérimentaux. L'ensemble des résultats est issu des dispositifs lysimétriques de Quimper, décrits par SIMON et LE CORRE (1996).

La prairie fauchée : une situation simple

De nombreux travaux ont été consacrés aux prairies fauchées. L'analyse des phénomènes est relativement simple dans la mesure où la production prairiale est récoltée et où les sorties d'azote de la parcelle via la plante sont aisément mesurables. Trois facteurs jouent un rôle déterminant sur la lixiviation d'azote : le niveau global annuel de fertilisation azotée, la répartition saisonnière des apports et le type de peuplement végétal concerné.

La relation entre **niveau de fertilisation azotée** et lessivage d'azote nitrique est présentée figure 1 (SIMON *et al.*, 1997). Cette figure met nettement en évidence que les quantités d'azote lessivées sont faibles (inférieures à 20 kg N/ha/an) pour des apports d'azote infé-

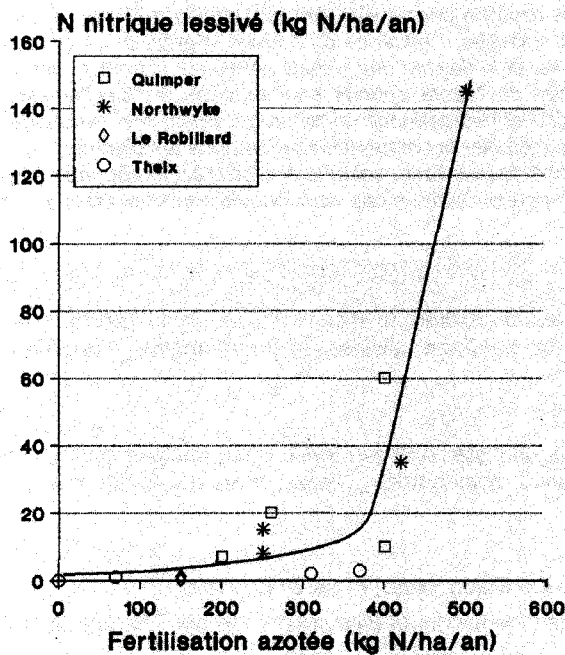


FIGURE 1 : Lessivage d'azote nitrique en fonction du niveau de fertilisation azotée pour des prairies fauchées de ray-grass anglais (synthèse des principaux résultats lysimétriques).

FIGURE 1 : Relationship between nitrogen fertilization and nitrate losses by leaching from a cut ryegrass sward (synthesis of lysimetric experiments).

TABLEAU 1 : Lessivage d'azote nitrique (en kg N/ha/an, moyenne de 5 ans) sous ray-grass anglais fauché : influence du niveau de fertilisation azotée et de la répartition des apports sur l'année.

Niveau de fertilisation N (kg N/ha/an)	Période des apports d'azote	
	de février à juillet	de février à octobre
* 200 - 250	7	20
* 400	10	58

TABLE 1 : Nitrate leaching (kg N/ha/year, mean of 5 years) under a cut ryegrass sward : incidences of N fertilization level and yearly distribution of N applications.

rieurs à 400 kg N/ha/an, c'est-à-dire tant que les apports sont compatibles avec les capacités d'exportation de la prairie. Au delà, le lessivage augmente rapidement.

La répartition sur l'année des différents apports de fertilisants azotés modifie notablement les pertes d'azote par lessivage (tableau 1). Pour une même quantité globale annuelle, le lessivage est nettement plus faible pour des épandages centrés sur la période printemps - été que pour des épandages répartis sur toute l'année. Cette différence est faible pour une fertilisation azotée modérée, mais plus conséquente pour un niveau élevé.

La nature des espèces constituant le peuplement végétal prairial module également les pertes d'azote par lessivage (tableau 2). Si le lessivage d'azote est faible sous une association fauchée de ray-grass anglais - trèfle blanc (lessivage voisin de celui mesuré sous un couvert de ray-grass pur fertilisé), il n'en est pas de même sous un couvert de trèfle pur où le lessivage est élevé. Ce résultat rejoint ceux d'autres auteurs qui observent un lessivage d'azote nitrique plus important sous associations présentant des taux très élevés de trèfle blanc.

Si les principaux paramètres modulant le pourcentage de trèfle sont aujourd'hui bien connus (HAYNES, 1980 ; FRAME et NEWBOULD, 1986, VERTÈS et ANNEZO, 1989 ; SIMON, 1993), le maintien d'un équilibre dynamique entre les deux composantes de l'association est encore souvent difficile. Les facteurs climatiques, le mode de gestion et les choix variétaux (LECONTE, 1993 ; LE MEUR, 1995 ; SIMON *et al.*, 1997) ont une incidence importante sur la croissance relative des deux espèces. Tant pour éviter les risques de météorisation au pâturage que pour limiter les pertes de nitrate par lixiviation, l'emploi de variétés très agressives de trèfle associées à des ray-grass peu compétitifs, qui engendrent des taux de trèfle de 60 à 80% dans l'association, n'est pas recommandé. En revanche, il est inévitable d'assister à des évolutions cycliques de la composition botanique des associations, évolutions qui reflètent la richesse en azote du sol (SCHWIMMING et PARSONS, 1996) : grâce à la fixation symbiotique, la légumineuse a un rôle clé sur ce paramètre qui va réguler son abondance.

TABLEAU 2 : Lessivage d'azote nitrique (en kg N/ha/an) sous prairie fauchée : influence du couvert végétal.

	Engrais (kgN/ha/an)	Taux de trèfle blanc* (%)	Lessivage (kgN/ha/an)
Ray-grass anglais* pur	240	0	20
Association*	0	10-20	17
Trèfle blanc* pur	0	100	77

* Ray-grass anglais Vigor et trèfle blanc Huia (INRA Agronomie, Quimper). Les taux de trèfle blanc sont des moyennes pondérales sur l'ensemble des années d'observation

TABLE 2 : Nitrate leaching (kg N/ha/year) under a cut sward : influence of sward type.

La prairie pâturée : une situation complexe

La prairie pâturée se caractérise par la multiplicité des facteurs qui agissent sur le cycle de l'azote et, par voie de conséquence, sur la lixiviation de l'azote nitrique (SIMON et VERTÈS, 1996). Les **différents résultats obtenus sur le dispositif lysimétrique pâturé de Kerbernez près de Quimper** (VERTÈS *et al.*, 1995 ; SIMON et LE CORRE, 1996) permettent de préciser le rôle et l'impact de quelques facteurs importants. Ce dispositif est constitué de 2 parcelles de 380 m² comprenant chacune 11 lysimètres pâturés et 2 lysimètres témoins fauchés, soit un total de 26 lysimètres. Chaque lysimètre présente une surface de 0,358 m² et une profondeur de 0,9 m. L'ensemble des lysimètres est rempli d'un sol granitique reconstitué. L'une des parcelles porte un ray-grass anglais pur recevant 250 kg N/ha/an en 5 apports de février à juillet, l'autre une association de ray-grass anglais et de trèfle blanc ne recevant pas d'azote. Cet ensemble est pâturé 6 fois par an, de mars à octobre, par des génisses (en gestation) frisonnes Pie Noire de 400 à 500 kg.

1. Caractérisation des pissats

Une présence constante des observateurs sur le terrain durant le séjour des animaux a permis d'étudier de façon détaillée les caractéristiques des déjections animales au pâturage (bouses et pissats) pour lesquelles les références étaient peu nombreuses et rapportaient essentiellement des chiffres moyens (DOAK, 1952 ; MACLUSKY, 1960 ; RICHARDS et WOLTON, 1976 ; LANÇON, 1978a et b ; BRISTOW *et al.*, 1992). Après des mesures partielles effectuées en 1991 et 1992, les pissats et bouses émis par les 7 génisses durant leurs séjours sur les parcelles expérimentales ont été mesurés de façon exhaustive en 1993 et 1994, afin de préciser les principales caractéristiques des déjections et d'en connaître la variabilité et la répartition au pâturage. Les volumes émis ainsi que leur composition (%MS, teneurs en N et minéraux) ont été

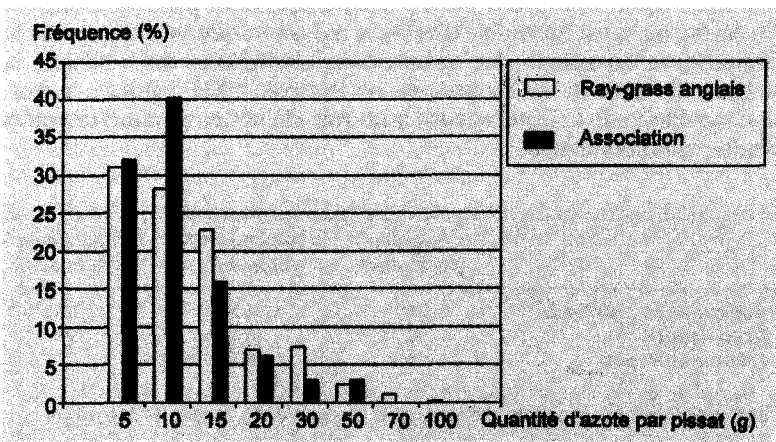


FIGURE 2 : Variabilité des quantités d'azote contenues dans des pissats de génisses pâturant du ray-grass anglais pur et une association ray-grass - trèfle blanc (INRA Agronomie, Quimper, 1993-1994).

FIGURE 2 : Variability of nitrogen in urine patches from heifers grazing a pure ryegrass stand and a clover/grass mixture (INRA Agronomie, Quimper, 1993-1994).

analysés grâce au prélèvement de plus de 1 500 échantillons en 1993 et 1994.

Diverses publications rassemblent les premiers résultats (VERTÈS et SIMON, 1992 ; FARRUGGIA et SIMON, 1994 ; SIMON et VERTÈS, 1996). Les pissats, qui représentent la plus grande part de l'azote excrété par l'animal (environ les 2/3), se caractérisent par **une grande variabilité des volumes individuels, des concentrations en azote et des quantités d'azote en jeu** (figure 2). Cet azote, qui se trouve essentiellement sous forme uréique (70 à 80% de l'azote total urinaire), peut se minéraliser très rapidement. Les résultats présentés ci-dessous mettent en évidence la variabilité des quantités émises, la relation entre la composition de l'herbe pâturée et de l'urine, et l'évolution saisonnière des teneurs en azote.

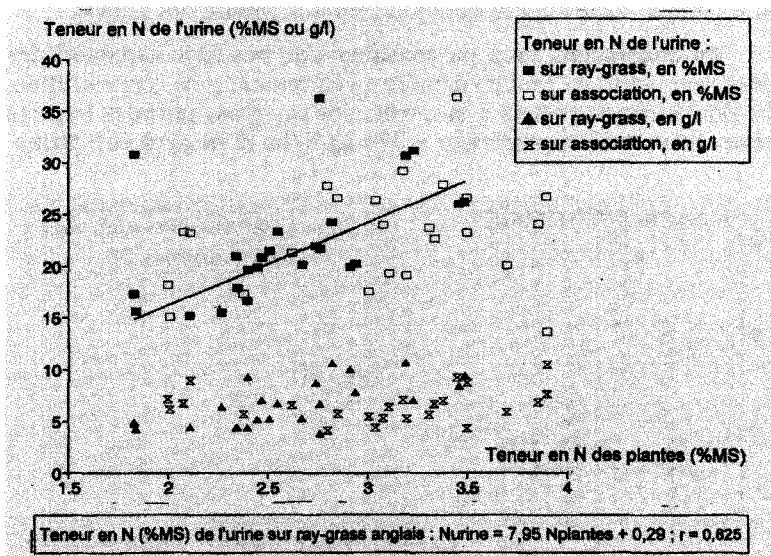
■ Variabilité des quantités d'azote contenues dans les pissats

La figure 2 regroupe l'ensemble des analyses réalisées entre 1991 et 1995. Si l'on considère que la surface d'impact d'un pissat est voisine de 0,4 m² sur les sols très filtrants (soit la surface du lysimètre), les apports d'azote varient localement entre 10 et plus de 1 000 kg/ha. **Pour les génisses considérées, 90% des pissats apportent localement entre 30 et 500 kg N/ha.**

Les jeunes bovins ou les bovins à viande émettent assez peu de pissats contenant de très fortes quantités d'azote. En revanche, dans les prairies pâturées par des vaches laitières en pleine production, ces dernières émettent de façon répétitive d'importants volumes de pissats concentrés en urée. Le risque de rencontrer ces zones de forte concentration en azote augmente dans le cas d'une alimentation azotée très excédentaire par rapport aux besoins, ce qui est fréquent pour des animaux nourris à l'herbe (PEYRAUD *et al.*, 1995).

FIGURE 3 : Relation entre les teneurs en azote des plantes ingérées et de l'urine pour deux couverts prairiaux : le ray-grass anglais pur et l'association ray-grass - trèfle blanc (INRA Agronomie, Quimper, 1991-1994).

FIGURE 3 : Relationship between plant N content and urine N content in a pure ryegrass stand and a clover/grass mixture (INRA Agronomie, Quimper, 1993-1994).



■ Teneur en azote de l'herbe pâturée et teneur en azote des urines

La ration alimentaire des génisses de l'expérimentation étant exclusivement constituée d'herbe pâturée, il est possible d'étudier la relation entre les teneurs en azote du fourrage ingéré et celles des urines émises durant chaque période de pâturage. La figure 3 montre la relation qui existe entre la teneur en azote de l'herbe (ray-grass pur ou association) et celle de l'urine, cette dernière étant exprimée de deux façons : en concentration (g/l) et en part de l'azote dans la matière sèche de l'urine (N %MS). **Une seule corrélation significative est mise en évidence, à forte valeur prédictive, entre les teneurs en azote du ray-grass pur et de la matière sèche de l'urine.** Il n'apparaît pas de liaison significative pour l'azote entre teneur de l'herbe et concentration de l'urine en g/l, ni entre teneur de l'association prise dans son ensemble et celle de l'urine. Ce résultat s'explique en partie par la variabilité de la teneur en eau de l'urine, liée à celle des végétaux consommés, à leur état hydrique et au climat lors du pâturage, autant de facteurs qui modulent la consommation d'eau des animaux.

■ Variation saisonnière des teneurs en azote des urines

La figure 4 montre l'évolution de la teneur moyenne en azote des urines émises au cours des cycles de pâturage successifs. Chaque point est la moyenne de 60 à 130 analyses sur les 3 années 1992-1994, années présentant des conditions climatiques variables.

Dans nos conditions expérimentales, **les teneurs en azote les plus élevées sont observées au printemps sur association, en été sur graminées pures** (période où les teneurs en matière sèche de l'herbe sont élevées et où les teneurs en matière sèche de l'urine sont maximales) **et en automne sur graminées pures**, riches en azote à cette période (forte minéralisation du sol à la reprise des pluies).

En conclusion, on a pu constater une très forte variabilité des pissats au pâturage, tant en nombre qu'en volume et en concentration. Un tiers (sur association) à la moitié (sur ray-grass pur) des impacts locaux de pissats est supérieur à 375 kg N/ha et ne peut être pleine-

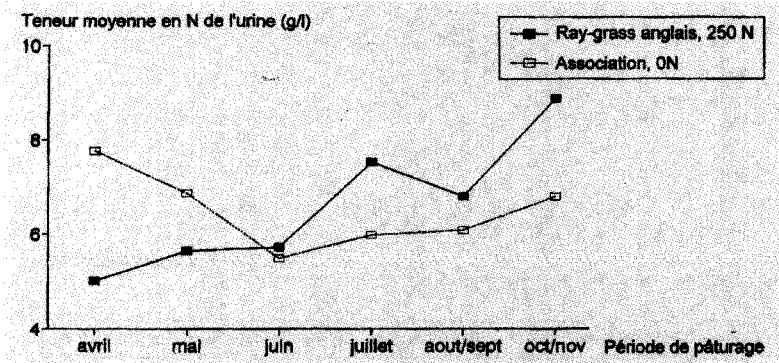


FIGURE 4 : Evolution saisonnière des teneurs moyennes en azote des urines de génisses pâturant du ray-grass anglais pur et une association ray-grass - trèfle blanc (1 500 analyses, INRA Agronomie, Quimper, 1992-1994).

FIGURE 4 : Seasonal changes in mean N content of the urine of heifers grazing a pure ryegrass stand and a clover/grass mixture (1 500 analyses, INRA Agronomie, Quimper, 1992-1994).

ment utilisé par les plantes. L'utilisation des pissats par les plantes va être présentée ci-dessous. Lorsqu'on reviendra à l'échelle de la parcelle, on peut s'attendre à une meilleure valorisation et/ou régulation par l'association : des pissats plus nombreux et moins concentrés permettent une meilleure répartition, point clé du recyclage possible de l'azote rejeté par les animaux. La situation idéale serait l'épandage régulier sur toute la surface de la parcelle de faibles quantités locales. Les risques de brûlures locales sont également réduits pour les impacts moins concentrés.

La quantité très variable d'azote apportée localement par le pissat va se compartimenter entre la plante, le sol, l'atmosphère et les eaux.

2. Devenir de l'azote des pissats

Une première approche du devenir de l'azote des pissats a été entreprise en 1994 sur le **dispositif lysimétrique grâce à un protocole analytique utilisant les marquages à l'isotope stable ^{15}N** . Au cours des 3 premières années de suivi (1991-1993), les impacts des pissats sur les lysimètres ont été le seul fruit du hasard, l'animal étant en quelque sorte « maître d'oeuvre ». L'objectif était alors d'estimer la lixiviation globale d'azote sur la parcelle pour chaque type de couvert et de caractériser les déjections animales. Les résultats obtenus nous ont incité à préciser les incidences de ces taches d'urine sur la plante (croissance, fixation), l'eau (lixiviation) et le peuplement mixte (pérennité du trèfle blanc). Aussi, en 1994, les apports de pissats ont-ils été contrôlés en modulant deux facteurs : la quantité apportée (350 kg N/ha), ce qui correspond à la valorisation maximale par la plante dans nos conditions, et la date d'apport : en pleine période de croissance (mai) et en fin de saison (septembre). Pour chaque lysimètre, une seule des trois sources (urine, engrais ou sol) était marquée avec de l'azote ^{15}N , afin de préciser le devenir des différentes sources et leurs éventuelles interactions. Les apports de ^{15}N correspondent à 500 mg $^{15}\text{N}/\text{m}^2$. Les modalités précises sont décrites par VERÈS *et al.* (1995). Dans cet article, les résultats sont exposés de façon synthétique.

■ Valorisation des pissats par les plantes

L'assimilation de l'azote d'un pissat par le couvert prairial dépend des capacités de croissance de la plante au cours de la période suivant

TABLEAU 3 : Incidence d'un pissat sur la biomasse produite et sur l'azote prélevé par la plante (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

TABLE 3 : Effect of a urine patch (350 N) on dry matter production and on N exportations by plants (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

	Ray-grass pur (250 N)		Association (0N)	
	Biomasse (t MS/ha/an)	N prélevé (kg N/ha/an)	Biomasse (t MS/ha/an)	N prélevé (kg N/ha/an)
Zones pâturées sans pissat	9,5	307	8,7	318
Zones sous pissats :				
- restitués en mai	11,1	400	11,0	438
- restitués en septembre	10,1	335	9,0	328

l'impact du pissat. On peut imaginer que divers facteurs vont moduler cette capacité du couvert végétal à valoriser l'azote urinaire : état du couvert végétal, niveau de fertilisation azotée, quantité d'azote apportée par le pissat, date d'émission et conditions climatiques, état hydrique du sol, date de début de drainage, intensité du drainage hivernal...

Le tableau 3 présente les différences de biomasse produite et d'azote exporté au niveau des zones d'impact de pissats moyens (350 kg N/ha) pour deux dates de restitution (mai et septembre) et pour deux types de couverts prairiaux : ray-grass anglais (250 N) et association ray-grass - trèfle blanc (0 N). Chaque point est la moyenne de 3 (ray-grass pur, apport de mai) à 4 lysimètres (ray-grass pur, apport de septembre ; association : apports en mai et en septembre).

Les zones recevant un pissat en période printanière présentent une croissance nettement plus élevée que les zones témoins pâturées : + 1,6 t MS/ha (+ 17%) pour le ray-grass et + 2,3 t MS/ha (+ 26%) pour l'association. Cette croissance supérieure se traduit par une exportation d'azote plus élevée d'environ 100 kg/ha (+ 33%). La quantité totale d'azote exportée est comprise entre 400 et 440 kg N/ha. En regroupant la totalité des observations réalisées depuis 1991, il est intéressant de souligner qu'en cas d'apports d'azote élevés (supérieurs à 250 kg N urine/ha, soit des apports totaux > 500 kg N/ha/an sur le ray-grass pur), **la quantité d'azote exportée par les parties aériennes plafonne vers 420 - 440 kg N/ha/an**, capacité d'exportation d'un couvert prairial dans les conditions pédoclimatiques locales.

Les zones recevant un pissat en fin d'été différent beaucoup moins de celles qui n'ont rien reçu : les niveaux de production augmentent légèrement (+ 0,6 et + 0,3 t MS/ha respectivement pour le ray-grass pur et l'association), tout comme les quantités d'azote exportées (+ 28 et + 10 kg N/ha). Malgré une très belle arrière-saison en 1994, cette faible augmentation de l'azote prélevé pourrait s'expliquer par l'abondance de l'azote minéralisé à cette période et disponible pour toutes les plantes. Cette hypothèse sera discutée ultérieurement.

L'examen des Coefficients Réels d'Utilisation (C.R.U.) de l'azote (tableau 4) **permet de tester les hypothèses émises**. Seul le cas du ray-grass pur est présenté ici. Lors de cette expérimentation, **environ la moitié de l'azote urinaire est valorisée pour le pissat apporté en mai** : le C.R.U. est de 47% pour le ray-grass pur pour la période mai-

Coefficients d'Utilisation de l'azote	C.A.U.* (%)	C.R.U.* (%)
Zones sans pissat (engrais : ¹⁵N)		
- fauchée	83	12
- pâturée	112	12
Zones sous pissats (pissat : ¹⁵N)		
- restitution en mai	87	47
- restitution en septembre	56	12

* C.A.U. = N prélevé / N apporté (LOISEAU, 1995)
C.R.U. = N prélevé issu de la source étudiée / N apporté par la source étudiée

TABLEAU 4 : Coefficients apparents (C.A.U.) et réels (C.R.U.) d'utilisation de l'azote des engrais ou pissats apportés sur un ray-grass anglais pur (250 N), (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

TABLE 4 : Apparent (C.A.U.) and actual (C.R.U.) coefficients of N utilization by a pure ryegrass stand (250 N) for fertilizer N and for urine patch N (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

octobre. Ce coefficient, plus élevé que celui observé par CUTTLE et BOURNE (1993) pour des apports de même niveau, se situe dans le tiers supérieur des valeurs relevées dans la bibliographie (cf. DECAU *et al.*, même numéro). Le C.R.U. de l'engrais marqué apporté à la même date est beaucoup plus faible : 12%. Ce coefficient reste le même, que l'engrais marqué ait été ou non accompagné d'un pissat (résultats non présentés). Ceci est vraisemblablement dû à la très forte pluviométrie (200 mm) durant les 3 semaines ayant suivi les apports. L'effet est particulièrement sensible avec l'engrais (ammonitrate), la forme nitrate ayant probablement été diluée sur presque toute la profondeur des lysimètres concernés. En ce qui concerne l'urine, l'azote apporté sous forme d'urée se transforme d'abord en ammonium, peu mobile (DOAK, 1952). **Ces différences de formes d'azote expliqueraient les forts écarts d'utilisation.** Néanmoins, il n'y a pas eu de ^{15}N retrouvé dans l'eau de drainage en mai-juin 1994. On peut supposer qu'il y a eu une rapide organisation par la biomasse microbienne du sol : la part de ^{15}N immobilisée dans la fraction organique du sol sera quantifiée lors du retournement de la prairie (travaux en cours).

Le C.R.U. de l'urine apportée en septembre est de 12% pour la repousse de septembre-octobre, malgré des conditions climatiques très favorables à la croissance de l'herbe. Trois raisons peuvent être invoquées : 1/ une grande disponibilité d'azote minéralisé dans le sol, qui induit une dilution du marqueur, 2/ une très forte activité immobilisatrice d'azote, qui permet la substitution entre l'azote apporté (marqué) et l'azote du sol (non marqué), ou enfin 3/ une faible demande par les plantes.

Ainsi, plus l'apport d'azote (engrais + pissat) est disproportionné par rapport aux capacités d'assimilation ultérieures de la plante, moins sa valorisation sera bonne. Un tel déséquilibre peut avoir diverses origines : non seulement la date de restitution, mais aussi la quantité d'azote en jeu dans le pissat, l'interaction avec la fertilisation azotée, l'état du couvert et, bien sûr, les conditions climatiques. Par exemple, WHITEHEAD et BRISTOW (1990) citent des coefficients réels d'utilisation de l'azote urinaire assez faibles, autour de 20% pour des apports locaux d'azote de 740 kg N/ha/an. Une synthèse bibliographique (GARWOOD *et al.*, 1986 ; MACDUFF *et al.*, 1989 ; DECAU *et al.*, même numéro) montre que, pour des conditions expérimentales très variées tant en termes de pédoclimat que de quantités d'azote urinaire apportées, les coefficients réels d'utilisation varient entre 10 et 50%. Une expérimentation lysimétrique est actuellement en cours sur le site du Robillard (Basse-Normandie) pour analyser de façon plus approfondie ces différentes sources de variation.

■ Effets locaux des pissats sur le lessivage

L'azote de l'urine émise est pour partie volatilisé. De nombreux auteurs s'accordent pour estimer ces pertes à 15% de l'azote urinaire. Le reste est utilisé par les plantes ou rejoint le pool minéral du sol. Cette dernière fraction se compartimente entre dénitrification, immobilisation par la biomasse microbienne et azote minéral du sol dont une partie peut être lixiviée (DECAU *et al.*, même numéro).

	Ray-grass anglais		Association	
	1994-1995*	1991-1995**	1994-1995*	1991-1995**
Lysimètres pâturés sans pissat				
N lessivé (kg N/ha/an)	19	7	25	10
Lysimètres avec pissats :				
- restitués en mai				
N lessivé (kg N/ha/an)	57 (350N)	48 (300N)	42 (350N)	14 (220N)
C. A. Lessivage*** (%)	11	14	5	2
- restitués en septembre				
N lessivé (kg N/ha/an)	185 (350N)	127 (290N)	174 (350N)	101 (300N)
C. A. Lessivage*** (%)	47	41	43	30

* Apports de pissats (de 350N) marqués par ¹⁵N en mai et septembre 1994
** Moyenne sur 4 saisons de drainage des cases ayant reçu des pissats en avril/mai ou en août/septembre. Le chiffre entre () indique la quantité moyenne d'azote des pissats considérés
*** Coefficient Apparent de Lessivage

Peu de travaux permettent de préciser l'importance et la variabilité du lessivage d'azote sous les zones d'impact des pissats. RYDEN *et al.* (1984) avancent le chiffre de 900 kg N/ha/an. Les résultats présentés plus haut laissent penser que son importance doit être très variable, en fonction en particulier de la fraction valorisée (ou non) par la plante.

L'expérimentation menée à Quimper apporte ainsi de nouveaux éléments de réponse (tableau 5). **Sous les zones pâturées sans pissat, le lessivage d'azote nitrique est très faible** : en moyenne 7 à 10 kg N/ha/an, que ce soit sous ray-grass ou sous association, dont le taux de trèfle blanc (en pleine période de croissance du trèfle) varie de 10 à 40% pour la parcelle et de 0 à 65% pour les lysimètres selon les années. **L'apport d'un pissat au printemps augmente sensiblement le lessivage** : de + 17 (association) à + 38 kg N/ha/an (ray-grass) pour l'hiver 1994-1995, de + 4 (association) à + 41 (ray-grass) pour la moyenne des autres années. **Sous pissat de fin d'été, l'augmentation du lessivage est beaucoup plus importante** : en moyenne, 127 kg N/ha/an sous ray-grass et 101 sous association. Pour des quantités identiques d'azote apportées par les pissats, l'augmentation du lessivage est plus forte sous ray-grass que sous association. La différence plus nette observée sur la période 1991-1995 pour les pissats de printemps est en partie due à de moindres apports sur les lysimètres de l'association (220 au lieu de 300 kg N/ha). L'ensemble de ces différences sera analysé plus loin.

Le calcul d'un Coefficient Apparent de Lessivage met nettement en évidence les différences entre dates d'apport des pissats. Ce coefficient (C.A.L., en %) est défini comme le rapport entre l'azote lessivé (kg N/ha/an) sous la zone d'impact du pissat et la quantité d'azote apportée par le pissat (kg N/ha/an) :

$$\text{C.A.L.} = 100 \times (\text{N lessivé avec pissat} - \text{N lessivé sans pissat}) / \text{N pissat}$$

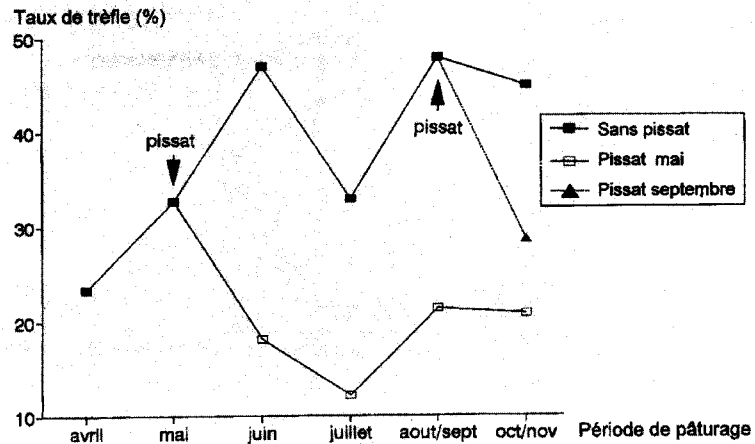
Plus la date d'apport du pissat est tardive, plus le coefficient apparent de lessivage est élevé (tableau 5) : 2 à 14% pour le pissat de printemps contre 30 à 47% pour le pissat de fin d'été. Les ordres de

TABLEAU 5 : Incidence d'un pissat moyen (350 N ou moyenne des pissats) sur le lessivage d'azote nitrique et le Coefficient Apparent de Lessivage, selon la date d'apport du pissat et le type de couvert prairial (INRA Agronomie, Quimper, 1991-1995).

TABLE 5 : Effect of an average urine patch (350 N or mean of patches) on N leaching and apparent leaching rate (C.A.L.) according to the emission date of urine and to the sward type (INRA Agronomie, Quimper, 1991-1995).

FIGURE 5 : Variation du taux de trèfle blanc au cours d'une saison de pâturage, sous témoin sans pissat et sous les zones d'impact de pissats restitués en mai et en septembre (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

FIGURE 5 : *Seasonal changes in the proportion of white clover in controls (without urine) and in urine patches created in May and in September (INRA Agronomie, Quimper, 1994).*



grandeur des C.A.L. de l'hiver 1994-1995 sont analogues à la moyenne des 5 ans suivis. Ces coefficients apparaissent un peu plus élevés sous ray-grass que sous association. Cette différence peut s'expliquer par les régulations observées sous association présentées ci-après.

■ Impact des pissats sur la végétation

Nous avons vu précédemment le fort impact des pissats **sur la production de biomasse et les prélèvements d'azote des couverts** de graminée pure et d'association (tableau 3). Pour le peuplement mixte, un apport d'azote urinaire peut faire varier deux autres paramètres : **l'abondance du trèfle et ses capacités fixatrices**.

- Impact sur la pérennité du trèfle blanc

En association graminée - trèfle blanc, cet apport d'azote urinaire se traduit par une forte diminution du taux de légumineuse dans les zones d'impact (figure 5).

En absence de pissat, **le taux moyen de trèfle blanc** au cours de la saison de pâturage 1994 est voisin de 35%. Sur les zones d'impact de pissats restitués en mai, ce taux chute brutalement de plus de moitié (21% en moyenne sur l'année). Un effet analogue est observé pour un pissat de fin d'été : forte chute du taux de trèfle blanc lors de la repousse suivante mais, globalement sur l'année, la différence est moins accusée puisque le taux moyen ne diminue que de 3% (32 contre 35).

Après un pissat restitué en mai, la chute du taux de trèfle s'accompagne d'une diminution absolue de biomasse qui s'aggrave dans le temps (- 38 à - 50% de juin à octobre) : dans les zones ayant reçu un fort apport d'azote par les pissats, le trèfle soumis de façon prolongée à une forte compétition pour la lumière avec le ray-grass régresse durablement, voire disparaît de la case l'année suivante (observé dans 2 des 3 cases concernées).

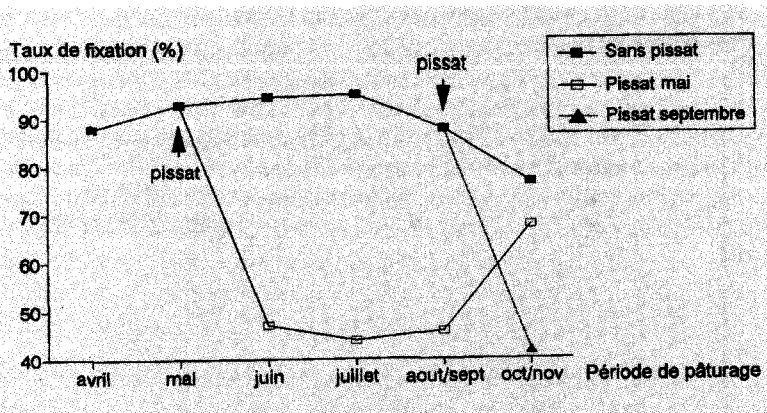


FIGURE 6 : Impact d'un pissat sur le taux de fixation du trèfle blanc : effet de la date de restitution (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

FIGURE 6 : Incidence of a urine patch on the N fixation rate of clover : effect of date of restitution (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

Après un pissat d'automne suivi d'une longue période favorable à la croissance végétale (températures entre 10 et 17°C), la forte chute du taux de trèfle s'accompagne en revanche d'une légère augmentation de la biomasse de trèfle par rapport aux cases sans pissat : la capacité de croissance du ray-grass, réduite en fin de saison (par rapport au printemps), conduit à une moindre compétition pour la lumière. Au cours de l'hiver suivant, les conditions locales très pluvieuses entraînent le lessivage de l'azote excédentaire du sol. Suite au rapide appauvrissement du sol en azote minéral, le trèfle peut recoloniser la zone dès la sortie de l'hiver. Des observations analogues ont été faites sur la variabilité des effets du piétinement par les animaux selon la saison (VERTÈS, 1989). Cela confirme encore l'importance de la gestion du pâturage des associations au printemps si l'on veut éviter des chutes difficilement réversibles de la légumineuse : éviter le sur et le sous-pâturage, ainsi que les chargements animaux non adaptés à l'état de portance du sol, et les apports d'azote...

- Impact sur le taux de fixation du trèfle blanc

Le pissat a également un fort impact sur le taux de fixation (défini par le pourcentage d'azote provenant de la fixation dans l'azote exporté par le trèfle) et mesuré selon les techniques décrites dans VERTÈS et al. (1995). En l'absence de pissat (figure 6), ce taux est voisin de 90% dans nos conditions expérimentales. Suite à un apport de pissat en mai, ce taux chute de 90 à 45% au cours de la pousse suivante et se maintient à un niveau bas jusqu'à la fin de l'été. Il ne remonte sensiblement qu'en automne pour se rapprocher du témoin. Globalement sur l'année, le pissat apporté au printemps a réduit la fixation de plus de 20% (69% contre 91). Les effets conjoints de la diminution de la biomasse de trèfle et de son activité fixatrice réduisent l'entrée d'azote sur les zones touchées de 30%. L'impact à court terme sur l'ensemble de la parcelle est bien moindre, en raison de la faible surface touchée par les pissats : un calcul très simplifié montre que, pour 10% de surface concernée par des pissats de printemps, une production de 7 t MS/ha et un taux de trèfle de 40%, la fixation passe de 90 à 85 kg/ha pour la période printemps - été. Le pissat restitué en septembre a le même impact sur le taux de fixation

lors de la pousse suivante (chute de 90 à 40%) **mais, globalement sur l'année, l'incidence est faible**, la fixation ne diminuant que de 5%.

Ainsi, contrairement à ce qui se passe sur prairie de graminée pure fertilisée où l'azote des engrais minéraux s'ajoute à celui des déjections au niveau des zones d'impact des pissats, **des phénomènes de régulation sont observés en association** : diminution du taux de trèfle blanc et de la fixation symbiotique. Ces incidences ne sont pas négligeables à moyen terme quand on sait qu'elles concernent chaque année 15 à 20% de la surface pâturée.

Un autre effet de régulation provient de **la graminée associée qui est sous-alimentée en azote comme le montre l'évolution saisonnière de l'indice de nutrition azotée** (INN, LEMAIRE, 1997) présenté figure 7. L'INN est obtenu en considérant la teneur en azote du ray-grass associé rapportée à la biomasse de l'association. Suite à un apport d'urine, le niveau de nutrition de ce ray-grass augmente largement au dessus de la référence "azote non limitant" lors de la repousse suivant l'apport (que ce soit au printemps ou en automne). Sous réserve que le peuplement soit en bon état (nombre de talles élevé, bon enracinement et bon état sanitaire), **l'aptitude à utiliser l'azote disponible dans le sol est élevée pour la graminée associée** dont le niveau moyen de nutrition est très dépendant du recyclage de l'azote fixé via les animaux et le sol.

L'ensemble de ces effets régulateurs est vraisemblablement à l'origine des phénomènes observés sur le lessivage (première partie de l'article). **L'indice de nutrition azotée du ray-grass** (pur ou associé) **en automne après pissat** traduit la saturation des capacités d'accumulation d'azote par la plante. Il **peut de ce fait être un indicateur de risque de lessivage**. La lixiviation d'azote est effectivement observée dans les cas où l'INN est supérieur à 1.

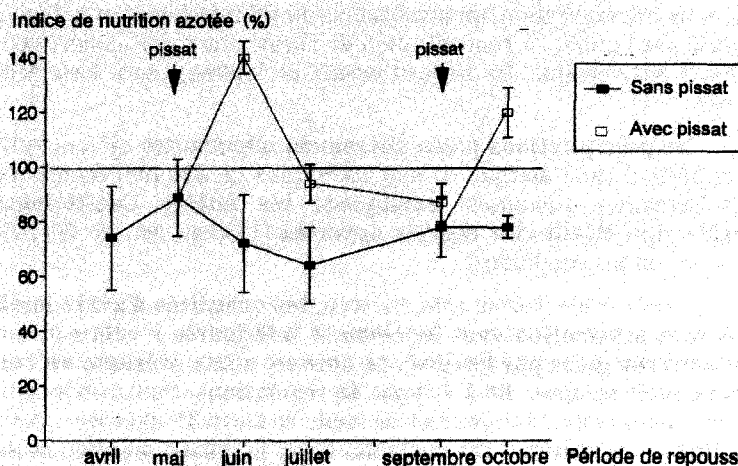


FIGURE 7 : Impact d'un pissat sur le degré de nutrition du ray-grass (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

FIGURE 7 : Incidence of a urine patch on the N nutrition degree of ryegrass (INRA Agronomie, Quimper, 1994).

Conclusion

Dans la plupart des dispositifs expérimentaux comparant production et exportation d'azote par les plantes prairiales fauchées ou pâturées, on constate, à fertilisation égale, pour les prairies pâturées, une augmentation de ces deux paramètres pouvant atteindre 20%. Ceci est en partie attribuable au recyclage de 70 à 90% de l'azote prélevé par les plantes via la consommation animale, les déjections étant restituées sur les parcelles au *pro rata* du temps de séjour des animaux. Le décalage entre la quantité d'azote restitué et l'augmentation modérée de la production est lié aux possibilités d'utilisation de cet azote par les plantes. Différents paramètres peuvent moduler cette valorisation : les quantités disponibles, les surfaces concernées, l'état du couvert, les conditions climatiques après l'impact, la saison... L'azote non prélevé par les plantes ou immobilisé par les micro-organismes du sol étant susceptible d'être entraîné en profondeur dans les eaux de percolation, il est important de caractériser les possibilités de valorisation.

Les résultats exposés dans cet article mettent en relief les éléments suivants :

- **les déjections bovines au pâturage présentent une grande variabilité tant en volume qu'en concentration** ; les quantités mises en jeu localement représentent de 10 à plus de 1 000 kg N/ha pour des génisses gestantes. Ces chiffres sont tout aussi variables mais un peu plus élevés pour des vaches laitières à haut niveau de production ;

- **dans les conditions pédoclimatiques rencontrées, les plantes sont capables de prélever au maximum 400 à 450 kg N/ha.** Si le pissat est reçu au printemps, la valorisation de l'azote urinaire est bonne : la moitié de l'azote exporté provient directement de l'urine. **Lorsque le pissat est restitué en été-automne, la valorisation est beaucoup plus faible** : d'une part, le potentiel de croissance des plantes est réduit par l'alimentation en eau limitante ou par le raccourcissement des jours et les températures plus basses, et par le nombre de repousses postérieur à l'impact ; d'autre part, les phénomènes de minéralisation/immobilisation du sol interfèrent avec l'azote apporté par l'urine. La concentration de l'urine étant particulièrement élevée à cette époque, les risques locaux de lessivage sont fortement accrus ;

- **les précipitations particulièrement abondantes** qui ont suivi les apports d'azote marqué en mai 1994 (plus de 200 mm durant les trois semaines suivantes) **expliquent les faibles Coefficients d'Utilisation Réelle des engrais apportés** (12% au lieu de 60-70% dans de bonnes conditions) ;

- à dose égale d'azote urinaire reçu, **les quantités d'azote lessivées sous association sont légèrement inférieures à celles mesurées sous ray-grass pur fertilisé. Le couvert mixte présente un certain pouvoir tampon, lié à 4 types de régulations.** Deux concernent les entrées d'azote : la quantité de trèfle et l'activité fixatrice ; deux concernent les sorties : l'assimilation de la graminée associée et du trèfle et celle de la biomasse microbienne du sol (apports organiques

de ray-grass associés à C/N élevé). Une chute rapide du taux de trèfle est observée après tous les impacts de pissats importants (supérieurs à 50 kg N/ha), accompagnée ou non d'une diminution de la biomasse absolue de la légumineuse. Dans la plupart des cas, le trèfle régresse durablement dans la zone concernée. La recolonisation se fait ultérieurement lorsque le niveau de fertilité azotée a baissé (prélèvements de la graminée, lessivage). Ces effets cycliques de l'azote disponible du sol et de l'évolution de la légumineuse ont été caractérisés par SCHWIMMING et PARSONS (1996). De même, le taux de fixation chute après un impact de pissat, l'inhibition à très court terme étant suivie d'un lent recouvrement de l'activité des bactéries symbiotes (MARRIOTT *et al.*, 1987 ; VERTÈS et SIMON, 1992). Ces deux mécanismes peuvent réduire les entrées d'azote dans le système de façon sensible à moyen terme lorsque le trèfle est éliminé d'une partie de la surface pâturée. La troisième régulation permet de sortir ou d'immobiliser plus d'azote : la graminée associée est le plus souvent sous-alimentée en azote (indice de nutrition azotée rarement supérieur à 0,8) et présente une forte capacité de réponse à tout apport d'azote assimilable (dont les pissats), sous réserve que le peuplement soit bien développé (talles abondantes, bon enracinement). Une croissance accrue, accompagnée d'une teneur en azote supérieure à celle des témoins, engendre une forte augmentation des prélèvements d'azote qui n'est plus susceptible de lessiver à court terme. D'autre part, ces tissus relativement pauvres en azote, et donc à C/N supérieur à ceux du ray-grass pur fertilisé, pourraient augmenter l'immobilisation microbienne lors de leur retour au sol après sénescence. L'ensemble de ces mécanismes permet de réduire légèrement les pertes d'azote par lessivage, de - 10 à - 20% dans nos expérimentations ;

- les pertes d'azote par lessivage sous association sont également influencées par le peuplement de trèfle : si ce dernier est très abondant et atteint en permanence des taux supérieurs à 60% (c'est alors le ray-grass qui se maintient difficilement), la dégradation des tissus riches en azote engendre de forts risques de lessivage, comme cela a été observé dans les cases de trèfle pur (tableau 2), dans les lysimètres à très fort taux de trèfle (résultats non présentés) ou dans d'autres dispositifs expérimentaux (CASTILLON *et al.*, 1996). Aussi, **si les associations constituent une alternative intéressante pour diminuer simultanément coûts de production et atteintes à l'environnement, il est souhaitable de trouver la bonne combinaison entre choix variétaux, modes d'utilisation** (dont le chargement et le type d'animaux, cf. l'article précédent de SIMON *et al.*) **et pédoclimat afin que les mécanismes tampons liés aux oscillations du taux de trèfle régulent, dans des conditions optimales, production de la prairie et risques de lessivage.**

Accepté pour publication, le 10 novembre 1997.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRISTOW A.W., WHITEHEAD D.C., COCKBURN J.E. (1992) : "Nitrogenous constituents in the urine of cattle, sheep and goats", *J. Sci. Food Agric.*, 59, 387-394.
- CASTILLON P., LAURENT F., CAZES J.P. (1996) : *Influence de la fertilisation azotée de la prairie pâturée sur la production d'herbe et la lixiviation du nitrate, Kerlaviac 1991-1995*, ACTA.
- CUTTLE S.C., BOURNE P.C. (1993) : "Uptake and leaching of nitrogen from artificial urine applied to grassland on different dates during grazing season", *Plant and Soil*, 150, 77-88
- DOAK B.W. (1952) : "Some chemical changes in the nitrogenous constituents of urine when voided on pasture", *J. Agric. Sci. Camb.*, 42, 162-171.
- FARRUGIA A., SIMON J.C. (1994) : "Déjections et fertilisation organique au pâturage", *Fourrages*, 139, 231-253.
- FRAME J., NEWBOULD P. (1986) : "Agronomy of white clover", *Advances in Agronomy*, 40, 1-88.
- GARWOOD E.A., RYDEN J.C., TYSON K.C. (1986) : "Nitrogen losses from drained grassland", *20th Occ. Symp.*, Brit. Grassl. Soc., *Grassland manuring*, 70-74.
- HAYNES R.J. (1980) : "Competitive aspects of the grass/legumes association", *Advances in Agronomy*, 33, 227-260.
- LANÇON J. (1978a) : "Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets (I)", *Fourrages*, 75, 55-88.
- LANÇON J. (1978b) : "Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets (II)", *Fourrages*, 76, 91-122.
- LECONTE D. (1993) : "Choisir la variété de trèfle blanc adaptée à des besoins particuliers", *Fourrages*, 135, 363-368.
- LE MEUR (1995) : "Equilibre de l'association ray-grass - trèfle blanc. Variétés : éviter les combinaisons extrêmes", *A la pointe de l'élevage*, juillet 1995, 7-9.
- LEMAIRE G., GASTAL F., PLENET D., LE BOT J. (1997) : "La nutrition azotée des cultures et la qualité des produits", *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Reims, INRA éd., *Les Colloques n°83*, 121-140.
- LOISEAU P., DECAU M.L. (1995) : "Minéralisation et organisation de l'azote dans les sols prairiaux estimées à partir des données de marquage ¹⁵N des parties aériennes à la récolte", *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, INRA éd., *Les colloques, n°70*, 299-314.
- MACDUFF J.H., JARVIS S.C., ROBERTS D.H. (1989) : "Nitrate leaching under grazed grassland : measurements using ceramic cup samplers", *Fertilization and the environment*, Eds Merckx R., Vereecken H. & Vlassak K., Leuven University Press, Leuven, 72-78.
- MACLUSKY D.S. (1960) : "Some estimates of the areas of pasture fouled by the excreta of dairy cows", *J. Br. Grassl. Soc.*, 15(2), 181-189.
- MARRIOTT C.A., SMITH M.A., BAIRD M.A. (1987) : "The effect of sheep urine on clover performance in a grazed upland pasture", *J. Agr. Sc. Cambridge*, 109, 177-185.

- PEYRAUD J.L., VÉRITÉ R., DELABY L. (1995) : "Rejets azotés chez la vache laitière: Effets du type d'alimentation et du niveau de production des animaux", *Fourrages*, 142, 131-144.
- RICHARDS I.R., WOLTON K.M. (1976) : "The spacial distribution of excreta under intensive cattle grazing", *J. Br. Grassld Soc.*, 31, 89-92.
- RYDEN J.C., BALL P.R., GARWOOD E.A. (1984) : "Nitrate leaching from grassland", *Nature*, vol. 311, n°5981, 50-53.
- SCHWIMMING S., PARSONS A.J. (1996) : "Interactions between grasses and legumes : understanding variability in species composition", *Legumes in sustainable farming systems*, BGS Occ. Symp. n°30, 153-163.
- SIMON J.C. (1993) : "Conduite des associations : maîtrise du taux de trèfle blanc et des risques de pollution nitrique", *Fourrages*, 135, 481-497.
- SIMON J.C, LE CORRE L. (1996) : "Les cases lysimétriques de Quimper (Kerbernez)", *Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)*, collection INRA "un point sur", publication COMIFER-INRA, coordinateur J.C. Muller, 195-203.
- SIMON J.C., VERTÈS F. (1996) : "Prairie et qualité de l'eau", *Proc. du colloque "Progetto Finalizzato Forraggiocultura prativa", Lodi (22-24 mai 1996)*, sous presse.
- SIMON J.C., PEYRAUD J.L., DECAU M.L., DELABY L., VERTÈS F., DELAGARDE R. (1997) : "Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux de longue durée", *Colloque "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", Reims (19-20 novembre 1996)*, sous presse.
- VERTÈS F. (1989) : "Effet du piétinement des bovins sur le trèfle blanc pur ou en association", *XV^e Congr. Int. des Herbages, Nice (4-11 octobre)*, 1067-1068.
- VERTÈS F., ANNEZO J.F. (1989) : "Pérennité des associations ray-grass anglais - trèfle blanc en Bretagne", *XV^e Cong. Int. des Herbages, Nice*, 1425-1426.
- VERTÈS F., SIMON J.C. (1992) : "Nitrate leaching in grazed pastures : a lysimeter experiment using ¹⁵N enrichment as a means of determining nitrogen fixation and animal returns", *BGS, Third Research Conference, Greenmount College of Agriculture and Horticulture, Antrim (Irlande du Nord, 2-4 septembre)*, Session VII, 161-162.
- VERTÈS F., SOUSSANA J.F., F. LOUAULT (1995) : "Utilisation de marquages ¹⁵N pour la quantification de flux d'azote en prairies pâturées", *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, Ed. INRA, Paris, *Les Colloques*; n°70, 265-275
- WHITEHEAD D.C, BRISTOW A.W. (1990) : "Transformations of nitrogen following the application of ¹⁵N-labelled cattle urine to an established grass sward", *J. of Applied Ecology*, 27, 667-678.

SUMMARY

Nitrogen flows in grazed pastures. II- Flows and their effects on leaching

The prediction of nitrate leaching risks implies the comprehension of nitrogen flows in grazed pastures. An experiment with lysimeters buried in 2 plots (one with pure ryegrass with 250 kg N/ha/year, the other with a grass/clover mixture and no nitrogen) grazed by pregnant heifers was set up to study under real conditions the effects of sward type and season on the characteristics and variability of animal returns, and on the fate of urine nitrogen after emission. The risks of nitrate leaching in relation to the amounts of nitrogen involved in the grazing cycles are specified. Lastly, by using of ^{15}N techniques, it was possible to investigate the fate of nitrogen in plants, soil and water, according to its origin (fertiliser and/or urine). The buffering capacity of the two sward types was discussed.