

Effets de la conduite de la prairie pâturée sur la lixiviation du nitrate. Propositions pour une maîtrise du risque à la parcelle

F. Laurent¹, F. Vertès², A. Farruggia³, P. Kerveillant⁴

La maîtrise des pertes d'azote dans les systèmes de culture et d'élevage est un impératif dicté par des contraintes d'environnement. Etudier et référencer les effets de la conduite de la prairie sur les pertes d'azote par lixiviation nécessite la connaissance des flux d'azote à la pâture. Ainsi, des propositions d'optimisation de la conduite des pâtures peuvent être avancées.

RESUME

Les recherches convergent pour monter le rôle déterminant des restitutions animales (essentiellement les pissats) sur les pertes d'azote par lixiviation. Ce retour d'azote à la parcelle est la clef d'interprétation de l'impact des modes de gestion de la prairie : fertilisation azotée, chargement, espèce prairiale... Ainsi, l'effet de la fertilisation azotée ne peut être abordé sous le seul angle de la quantité d'azote minéral apporté : l'impact de la date d'apport (répartition de la dose totale sur les différents cycles d'exploitation) est déterminante car le recyclage de l'azote restitué par les animaux est plus faible en été. De même, le rôle de l'association graminée - légumineuse ou de la fauche sont discutés à la lumière de résultats récents. Quelques conseils d'optimisation de la conduite des pâtures sont discutés.

MOTS CLES

Association végétale, azote, eau du sol, environnement, fertilisation azotée, gestion des prairies, lessivage, nitrate, pâturage, prairie, restitutions.

KEY-WORDS

Environment, excreta returns, grassland, grazing, leaching, nitrate, nitrogen, nitrogen fertilization, pasture management, plant association, soil water.

AUTEURS

1 : I.T.C.F., Station expérimentale, F-91720 Boigneville ; mél : f.laurent@itcf.fr

2 : I.N.R.A., 4, rue de Stang Vihan, F-29000 Quimper ; mél : vertes@lerheu.rennes.inra.fr.

3 : Institut de l'Élevage, INRA, F-63122 Saint-Genès-Champanelle ; mél : anne.farruggia@inst-elevage.asso.fr

4 : EDE - Chambre d'agriculture du Finistère, Ferme expérimentale de Kerlavic, F-29000 Quimper.

Au même titre que les systèmes de cultures annuelles, la conduite optimale des prairies impose la maîtrise du lessivage de l'azote. La complexité du système pâturé liée à la multiplicité des flux (intrants azotés d'origine minérale, organique ou fixation symbiotique), au recyclage interne élevé en relation avec la faible valorisation par l'herbivore de l'azote ingéré, et à l'importance des flux bruts de minéralisation et d'organisation de l'azote du sol (Simon et Le Corre, 1996 ; Recous *et al.*, 1996), se traduit généralement par l'absence d'une liaison simple de cause à effet entre une technique culturale (par exemple la fertilisation) et le lessivage de l'azote. L'effet des modes de conduite de la prairie (fertilisation azotée, modes d'exploitation, nature des espèces) sur les transferts d'azote en profondeur (lixiviation) est analysé au travers des flux azotés liés à la restitution animale, en se basant sur des résultats expérimentaux acquis récemment dans des dispositifs de l'ouest de la France et des éléments bibliographiques.

1. L'azote restitué au pâturage par les animaux : clefs d'interprétation de l'impact des modes de conduite sur le lessivage de l'azote

*** Efficience de l'azote ingéré par l'animal au pâturage**

Le bilan de l'azote établi au niveau de l'animal par Delaby *et al.* (1997) permet de dresser le tableau des entrées et sorties d'azote :

- L'azote ingéré est issu de l'herbe pâturée, des fourrages complémentaires et des concentrés.
- Les sorties sont constituées des exportations animales (lait et viande) et des restitutions au pâturage. Ces dernières se répartissent entre les fèces et les urines :
 - l'azote rejeté dans les fèces est directement lié à la quantité de matière sèche ingérée et est donc peu variable. Par exemple, un essai mené à l'INRA du Pin-au-Haras sur des prairies permanentes pâturées par des vaches laitières montre que 50, 59 et 74 kg N/ha/an sont restitués par cette voie pour des fertilisations respectives de 0, 100 et 320 kg N/ha/an ;
 - l'azote urinaire constitue la variable d'ajustement du bilan ($N \text{ urine} = N \text{ ingéré} - N \text{ lait et/ou viande} - N \text{ Fèces}$). Il est donc très dépendant de la teneur en azote du régime alimentaire et est également lié au niveau d'intensification de la prairie : 90, 129 et 221 kg N/ha/an sont ainsi restitués par l'urine pour les mêmes niveaux de fertilisation que ceux précédemment évoqués.

80% de l'azote ingéré au pâturage est alors restitué sur la parcelle, très majoritairement sous forme urinaire (64 à 75%). Cette restitution, localisée sur une faible surface, génère de fortes concentrations d'azote minéral, largement supérieures aux capacités instantanées d'absorption du couvert végétal et d'organisation par voie microbienne, exposant ainsi l'excès d'azote minéral aux pertes de natures diverses (Delaby *et al.*, 1997).

*** Devenir de l'azote restitué au pâturage**

A partir d'une analyse bibliographique, Decau *et al.* (1997) proposent des coefficients de répartition pour l'azote contenu dans les déjections restituées au pâturage (tableau 1). Ces valeurs témoignent du devenir très différent de l'azote contenu dans les bouses et les pissats :

- L'azote restitué par les urines est mieux valorisé par le végétal que celui présent dans les fèces car principalement sous forme uréique rapidement hydrolysée (Thomas *et al.*, 1988) puis nitrifiée. Néanmoins, cette absorption dépend de nombreuses conditions comme la capacité de croissance du couvert ou la quantité d'azote restituée par l'urine. Ainsi le coefficient réel d'utilisation (CRU) de l'azote d'un pissat émis au printemps est bien supérieur à celui observé pour un pissat émis en été. Vertès *et al.* (1997) observent des CRU de 47% et 12% respectivement pour ces deux périodes. Cuttle et Bourne (1993) montrent aussi que, plus la date de restitution est tardive, plus le coefficient apparent d'utilisation de l'azote urinaire par la prairie diminue et, de façon concomitante, plus l'azote minéral présent dans le sol au début de l'hiver augmente.
- La volatilisation d'azote se fait aux dépens de l'azote ammoniacal des déjections et représente donc un flux plus important dans le cas de l'azote des urines. Des mesures récentes (Barré, thèse en cours) indiquent des quantités volatilisées faibles (de l'ordre de 3 à 5%).
- Enfin, la fraction organique représente plus des 2/3 de l'azote des bouses et se comporte comme la matière organique stable du sol.

Tableau 1 : Devenir de l'azote contenu dans les urines ou les fèces de bovins (en % du contenu en N total de la déjection ; Decau et al., 1997).

Table 1 : Fate of nitrogen contained in the urine and faeces of cattle (% of total N in the excreta ; Decau et al., 1997).

	N-Fèces	N-Urine
N organique du sol	69	31
Absorption par la plante	9	29
Volatilisation	3	16
Dénitrification	2	2
Lixiviation	17	22
Total	100	100

Ainsi, compte tenu de la plus grande quantité d'azote présente dans les urines, les pertes d'azote par lixiviation leur sont principalement imputables. Ce risque ne s'exprimera qu'en fonction de paramètres propres au milieu concerné, comme :

- les conditions pédoclimatiques locales rencontrées lors de la restitution qui fixent le niveau des pertes par volatilisation ou dénitrification (température, vent, pH et humidité du sol) ainsi que le niveau d'absorption par le végétal, notamment en été ;

- le drainage de l'eau dans le sol, moteur de l'entraînement du nitrate vers les horizons profonds non exploités par les racines. L'excès pluviométrique par rapport à la capacité de rétention en eau du sol ainsi que la profondeur d'enracinement sont les principaux éléments de variation du risque de lixiviation de l'azote ;

- le statut organique du sol et son régime thermique, avant et pendant les phases de drainage hivernal, expliquent par ailleurs le rythme de minéralisation des matières organiques, autre source de nitrate potentiellement lessivable.

L'effet des modes de conduite de la prairie vis-à-vis du lessivage du nitrate ne peut donc s'analyser qu'à la lumière des éléments constitutifs des flux d'azote dans le sol. Nous détaillerons dans la suite l'impact de la dose d'azote et de sa date d'apport, du mode d'exploitation (fauche ou pâture) et de la nature des espèces prairiales (graminée pure fertilisée ou association ray-grass anglais trèfle blanc non fertilisée).

2. Effet de la fertilisation azotée : doses et dates d'apport

* Dose d'azote et lessivage

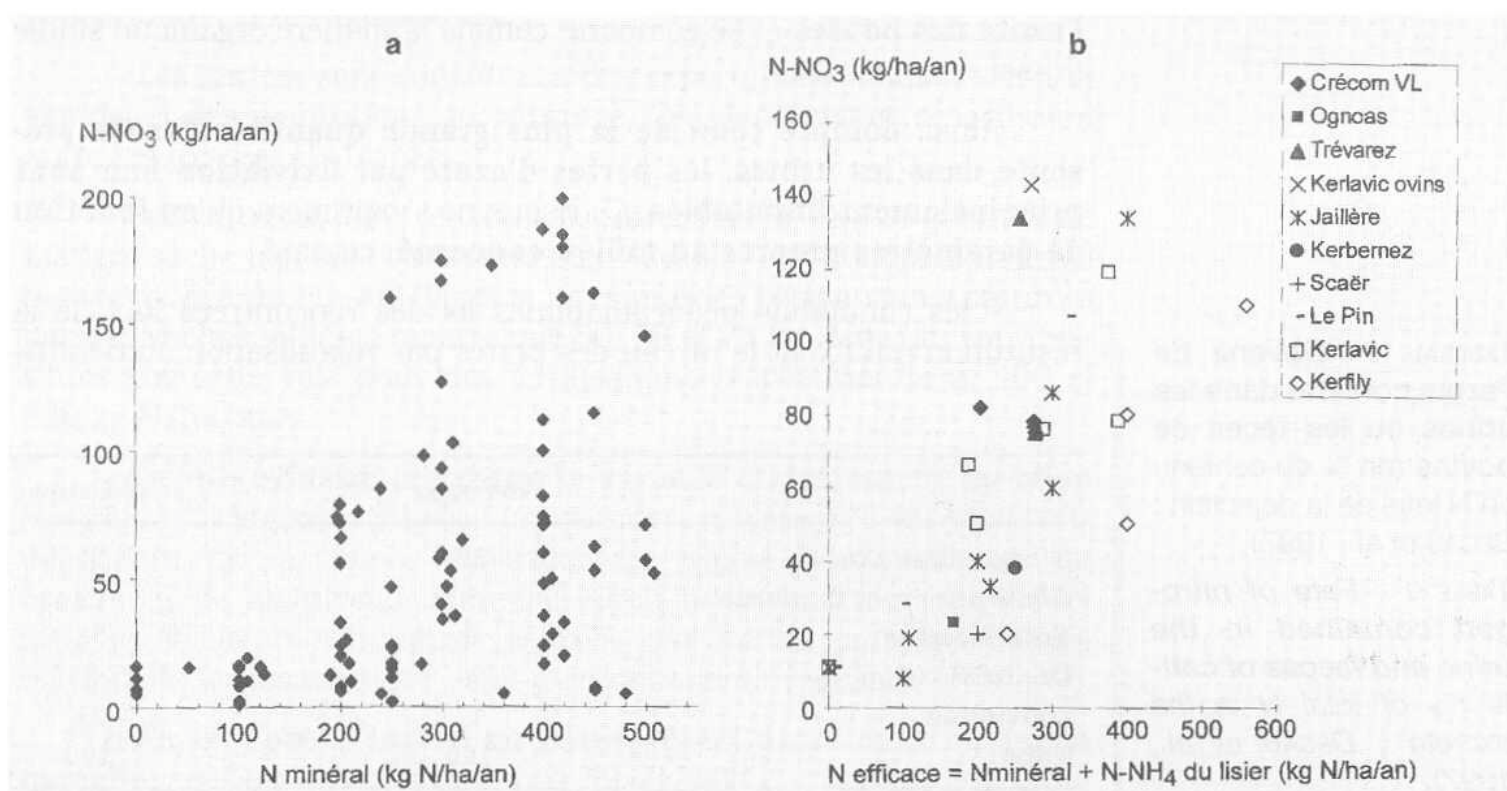
L'effet de la fertilisation azotée sur les pertes d'azote par lessivage a été analysé sur de nombreux dispositifs, d'abord en conditions de fauche, puis en condition de pâturage (Ryden *et al.*, 1984 ; Laurent *et al.*, 1995 ; Simon et Le Corre, 1996 ; Institut de l'Élevage, 1998). La fauche génère des pertes inférieures à la pâture, démontrant ainsi l'effet déterminant des restitutions animales, phénomène que nous allons détailler.

La figure 1a présente les résultats observés en Europe de l'ouest sur des prairies pâturées. Un même niveau d'apport azoté minéral correspond à des quantités d'azote lessivées très variables. La prévision du lessivage à partir du seul indicateur du niveau de fertilisation azoté est donc très difficile sur une large gamme de prairies et de conditions pédoclimatiques. Lorsqu'on exprime la moyenne pluri-annuelle des quantités d'azote lixivié en fonction des apports d'azote (en gommant ainsi une partie de la variabilité climatique interannuelle), une relation significative apparaît entre fertilisation et lixiviation (figure 1b, comportant les résultats obtenus sur les dispositifs expérimentaux de l'Ouest de la France).

Ces derniers résultats (figure 1b) montrent par contre une tendance plus nette à l'augmentation du lessivage de nitrate avec la fertilisation azotée efficace apportée, sans doute en raison de conditions pédoclimatiques plus homogènes.

Figure 1 : Effet de la fertilisation azotée sur les pertes d'azote par lessivage observées sous prairies pâturées : a) effet de la dose d'azote minéral (synthèse bibliographique d'essais d'Europe de l'ouest : France (INRA, IE, ITCF), Royaume-Uni, Irlande, Pays-Bas, Allemagne, 1980 à 1998 ; Le Gall, communication personnelle), b) effet de la dose d'azote efficace sur les dispositifs de l'ouest de la France (INRA, IE, ITCF, EDE29, CA22).

Figure 1 : Effect of N fertilization on nitrogen losses by leaching observed under grazed pastures : a) effect of the amount of mineral nitrogen (synthesis of literature on trials in Western Europe : France (INRA, IE, ITCF), United Kingdom, Ireland, The Netherlands, Germany, 1980 - 1998 , Le Gall, personal communication), b) effect of efficient amount of nitrogen in trial designs in Western France (INRA, IE, ITCF, EDE29, CA22).



L'analyse de l'effet de doses croissantes d'azote au sein d'un même site révèle également des différences sensibles de comportement (figure 2) : net accroissement du lessivage avec le niveau de fertilisation azotée sur les sites de La Jaillière et Hill, contre un "plafonnement" des pertes observé à Kerlavic et Hillsborough. L'effet des restitutions animales va être analysé ci-dessous ; deux autres facteurs essentiels peuvent expliquer la variabilité entre sites : l'importance de la dénitrification (sols hydromorphes de Hillsborough), ou une mauvaise nitrification (sols acides et/ou hydromorphes), l'azote ammoniacal non lessivable pouvant être abondant dans le sol (Rubin, 2001).

Pour rendre compte de la variabilité des phénomènes de lixiviation du nitrate, il est nécessaire de revenir sur les mécanismes impliqués dans la lixiviation du nitrate, notamment sous l'effet des restitutions animales.

L'accroissement de la fertilisation azotée a en effet une double conséquence sur les flux d'azote au pâturage (Delaby *et al.*, 1997) :

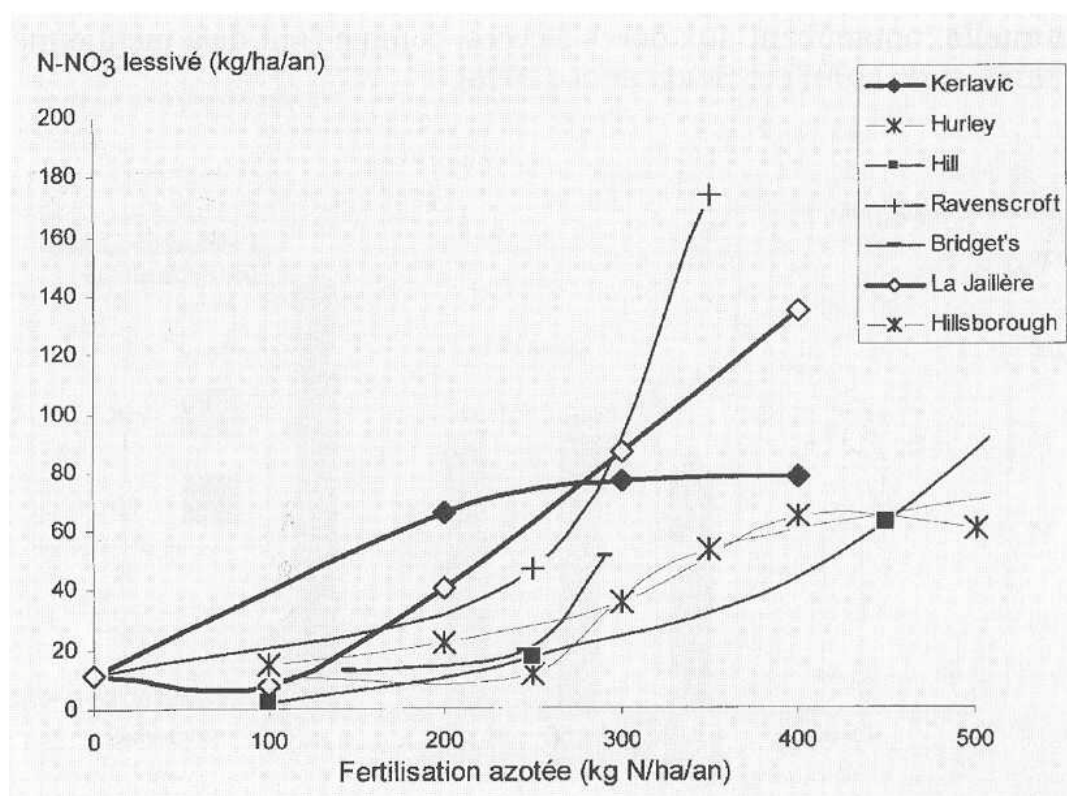
- augmentation de la teneur en azote de l'herbe et donc de la quantité d'azote ingéré par animal,
- augmentation de la croissance de l'herbe et donc du nombre de jours de pâturage.

En conséquence, sous l'effet de la fertilisation azotée, les restitutions urinaires augmentent par le jeu des deux facteurs : nombre de pissats dus à un nombre de jours de pâturage supérieur, et déséquilibre azoté de la ration plus accentué.

L'illustration de l'impact, à notre sens majeur, des restitutions animales sur les fuites d'azote peut être mis en évidence par l'analyse de l'effet de la répartition de la dose d'azote minéral au cours de la saison de pâturage (impact de la date d'apport).

Figure 2 : Courbes de réponse du lessivage à la dose d'azote apportée sur prairies pâturées sur des essais européens (Le Gall, communication personnelle).

Figure 2 : Response curves of leaching to amounts of N applied to grazed pastures in European trials (Le Gall, personal communication).



* Effets de la date d'apport de l'azote

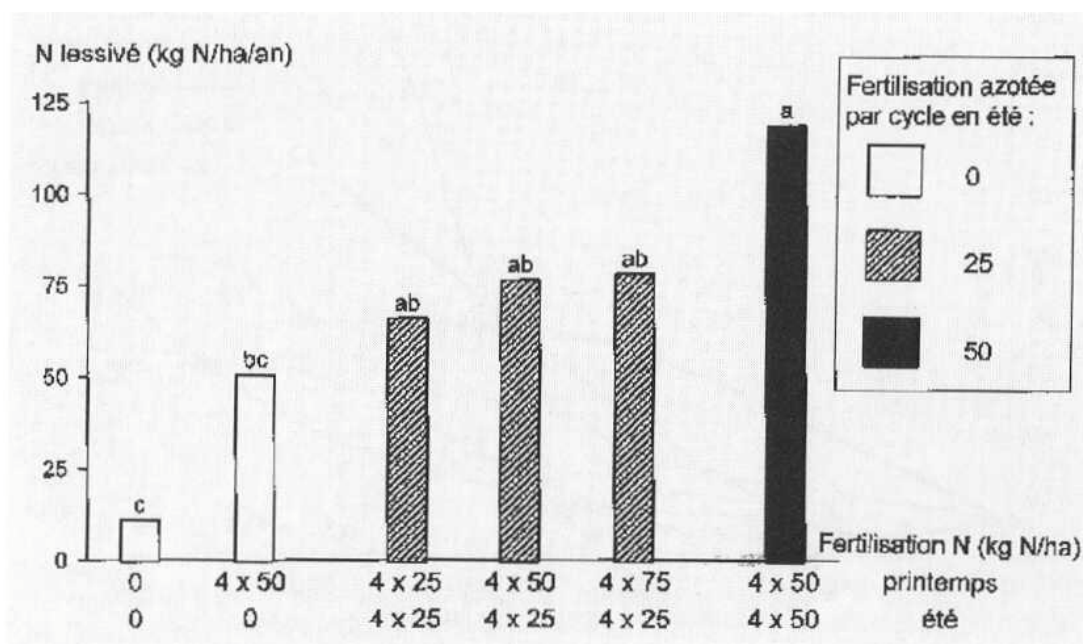
L'effet de la répartition de la dose d'azote au cours de la saison de pâturage a été étudié sur les deux dispositifs de longue durée de Kerlavic (Finistère) et La Jaillière (Loire-Atlantique) :

– Sur le site de Kerlavic (figure 3) on note un accroissement de la quantité de nitrate lixiviée lorsque la dose d'azote augmente, mais surtout un effet important de la répartition de cette dose au cours de l'année. La diminution de la fertilisation azotée estivale a un impact plus favorable que celui de la réduction de la fertilisation annuelle, notamment aux doses élevées, comme l'ont déjà mentionné Vertès *et al.* (1997) et Simon *et al.* (1996).

Les résultats lysimétriques de Kerlilly (INRA Quimper, fauche au rythme de la pâture) confirment cet effet : pour une fertilisation azotée de 400 kg N/ha/an concentrée sur la période février - juillet, le lessivage moyen est de 10 kg N/ha/an sans restitutions animales et 50 avec, alors que la même dose d'azote répartie sur la période février - octobre génère des flux respectifs de 52 et 105 kg N/ha/an (Simon et Le Corre, 1996).

Figure 3 : Effet de la dose d'apport d'azote minéral et de son mode de répartition sur la quantité d'azote lessivée sous une prairie pâturée (essai Kerlavic 1, ITCF, EDE29, CA Bretagne ; moyenne 1992-1997 ; c, bc, ab, a : groupes homogènes Newman-Keuls, seuil $\alpha = 5\%$).

Figure 3 : Effect of the amount of mineral N and of its distribution on the leaching of nitrogen under a grazed pasture (trial Kerlavic 1, average 1992-1997 ; c, bc, ab, a : homogeneous Newman-Keuls groups, threshold $\alpha = 5\%$).



- A La Jaillièrre (figure 4), seul l'effet de la fertilisation printanière peut être analysé compte tenu de l'absence de toute fertilisation estivale. On y observe également les mêmes effets des doses d'azote et de leur répartition qu'à Kerlavic (mais il s'agit cette fois de répartition de la dose sur le printemps). En effet, 300 kg N/ha/an conduisent à des pertes de 86 kg N/ha lorsque cette dose est répartie en 4 apports de 75 kg N/ha et à des pertes de 60 kg N/ha lorsqu'elle est répartie à raison de 100 kg N/ha pour les premiers cycles et 50 kg N/ha pour les deux suivants.

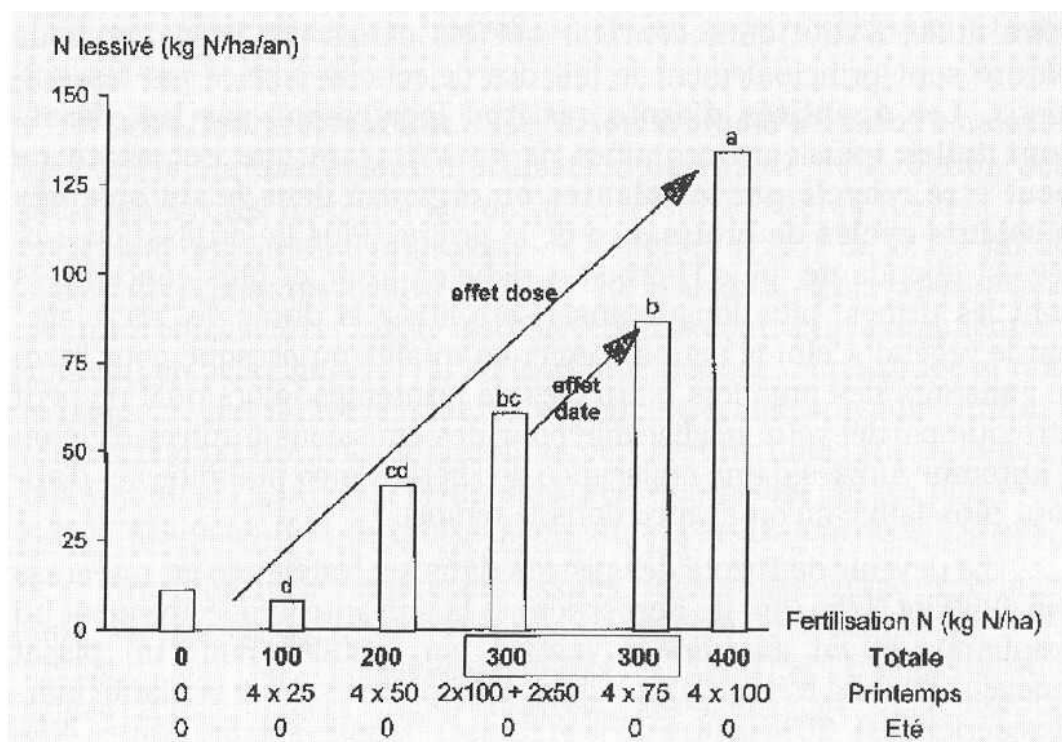
L'effet de la répartition de la fertilisation azotée sur la quantité d'azote lixivé peut être expliqué par le rôle prépondérant de l'azote urinaire restitué au pâturage, notamment pendant l'été, et de façon générale par les possibilités d'utilisation par le couvert végétal (ou d'organisation par les micro-organismes) de l'azote arrivant au sol (engrais ou pissat). Sachant que la surface d'impact d'un pissat de bovin est environ 0,4 m², Vertès *et al.* (1997) évaluent la quantité d'azote sous cette surface à l'équivalent de 300 à 500 kg N/ha. La valorisation de cet azote est très dépendante des conditions de croissance du couvert mais aussi du nombre de cycles de croissance postérieurs à l'émission, aptes à absorber l'azote minéral issu des pissats. Elle peut être très réduite si le facteur limitant principal est l'eau, comme cela se rencontre plus particulièrement en été.

On observe ainsi que le lessivage cumulé sur les 6 années d'essai à Kerlavic est plus étroitement lié à la quantité totale d'azote restituée par les urines pendant les cycles d'exploitation estivaux (figure 5b, $r^2 = 0,70$) que printaniers (figure 5a, $r^2 = 0,63$).

Ces résultats rejoignent les observations de Cuttle et Bourne (1993) qui constatent que le reliquat d'azote minéral issu d'un pissat, et mesuré dans le sol à la fin de la saison de pâturage, est d'autant plus élevé que ce pissat est émis tardivement (figure 6).

Figure 4 : Effet de la dose d'apport d'azote minéral et de son mode de répartition sur la quantité d'azote lessivé sous une prairie pâturée (essai ITCF La Jaillière 1 ; moyenne 1993-1998 ; d, cd, bc, b, a : groupes homogènes Newman-Keuls seuil $\alpha = 5\%$).

Figure 4 : Effect of the amount of mineral N and of its distribution on the leaching of nitrogen under a grazed pasture (trial ITCF La Jaillière 1, average 1993-1998 ; d, cd, bc, b, a : homogeneous Newman-Keuls groups, threshold $\alpha = 5\%$).



Vertès *et al.* (1997) mesurent de même un lessivage d'azote après émission d'un pissat au mois de mai de 48 kg N/ha contre 127 kg N/ha pour le même pissat émis en septembre (moyennes sur la période d'étude 1991-1995).

Sachant que sous prairie fauchée la lixiviation est très faible, voire nulle, il faut donc convenir que les pertes par lixiviation sous pâture sont principalement le fait des déjections émises par les animaux. Les quantités d'azote restitué localement par les pissats sont telles (plusieurs centaines de kg N/ha/an) que cet azote ne peut être recyclé par les plantes ou organisé dans le sol qu'après plusieurs cycles de croissance de la prairie. Plus la fertilisation azotée est abondante, plus l'herbe est riche en azote et plus concentrées sont les urines, plus longue aussi sera aussi la durée de "recyclage" par le végétal. Celui-ci peut s'exercer en totalité ou presque pour l'azote émis lors des premiers pâturages de printemps, alors qu'il ne peut être que partiel voire négligeable pour des émissions tardives d'été ou d'automne suivies d'une croissance de l'herbe souvent limitée (et d'autant plus faible qu'on avance dans le temps).

Le devenir de l'azote des pissats dans les lysimètres en ray-grass pur (250 kg N/ha/an) de Kerbernez est la suivante (respectivement au printemps et en automne ; Vertès, non publié) : pour un pissat " moyen " (350 kg/ha) : 47% contre 12% prélevés dans la plante (parties aériennes), 26% contre 15% organisés dans le sol, 5% contre 43% lixiviés durant l'hiver suivant les apports. Le défaut de bilan s'établit à 22% pour les pissats de printemps et 30% pour ceux d'automne, de façon analogue aux résultats de Clough *et al.* (1998). Il est possible que les pertes gazeuses (en particulier par dénitrification, non mesurées) ne soient pas négligeables en cas de pluviométrie élevée (en l'occurrence 370 mm drainés entre octobre et décembre pour un total de 950 mm drainé durant l'hiver 1994-1995). Une part importante de l'azote non retrouvé est probablement organisée dans la rhizosphère, non prélevée l'année de l'apport (Barré, non publié).

Figure 5 : Effet de la quantité d'azote urinaire restituée pendant les cycles de printemps (a) ou d'été (b) sur le lessivage de l'azote nitrique (essai de Kerlavic 1 ; ITCF, EDE29, CA de Bretagne ; cumul sur la période 1991-1996).

Figure 5 : Effect of the amount of urine-N returned during the spring (a) or summer (b) grazing cycles on nitrate leaching (trial Kerlavic 1 ; ITCF, EDE29, CA of Brittany ; cumulated over the years 1991-1996).

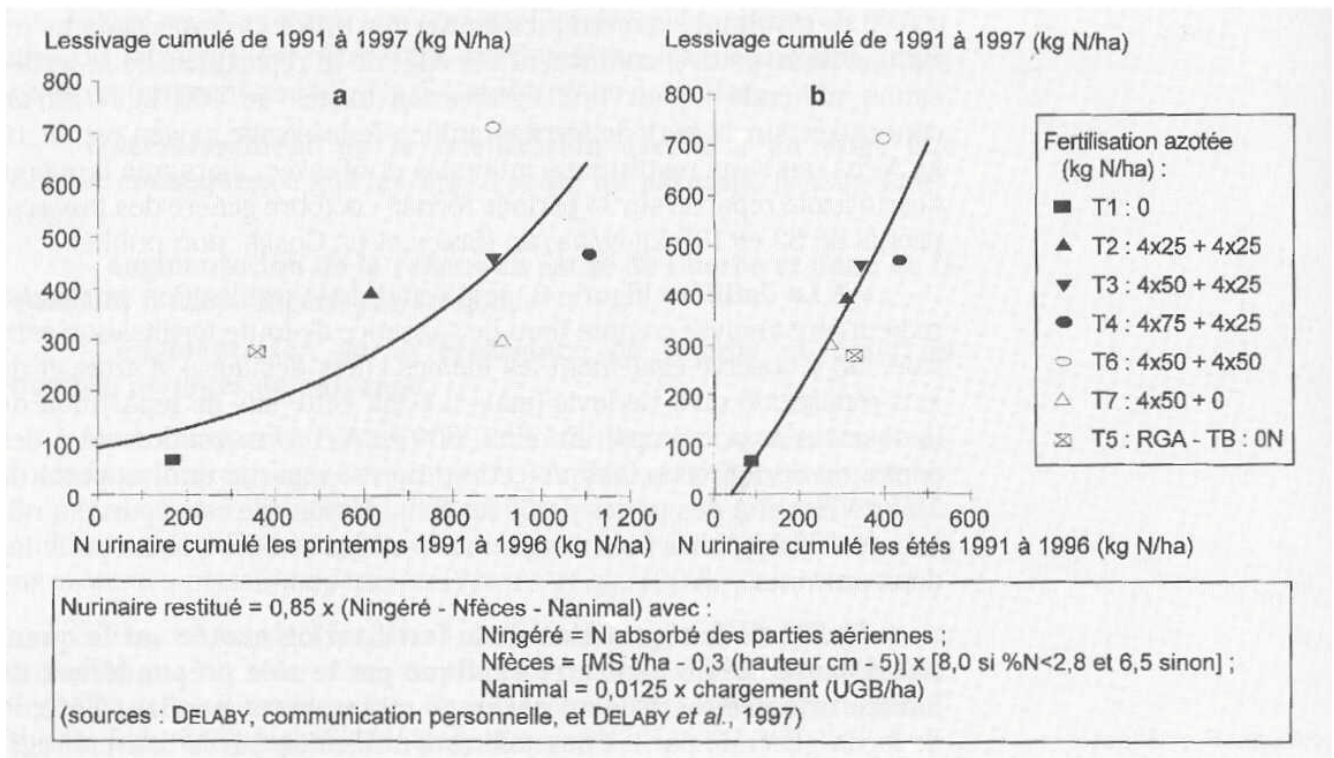
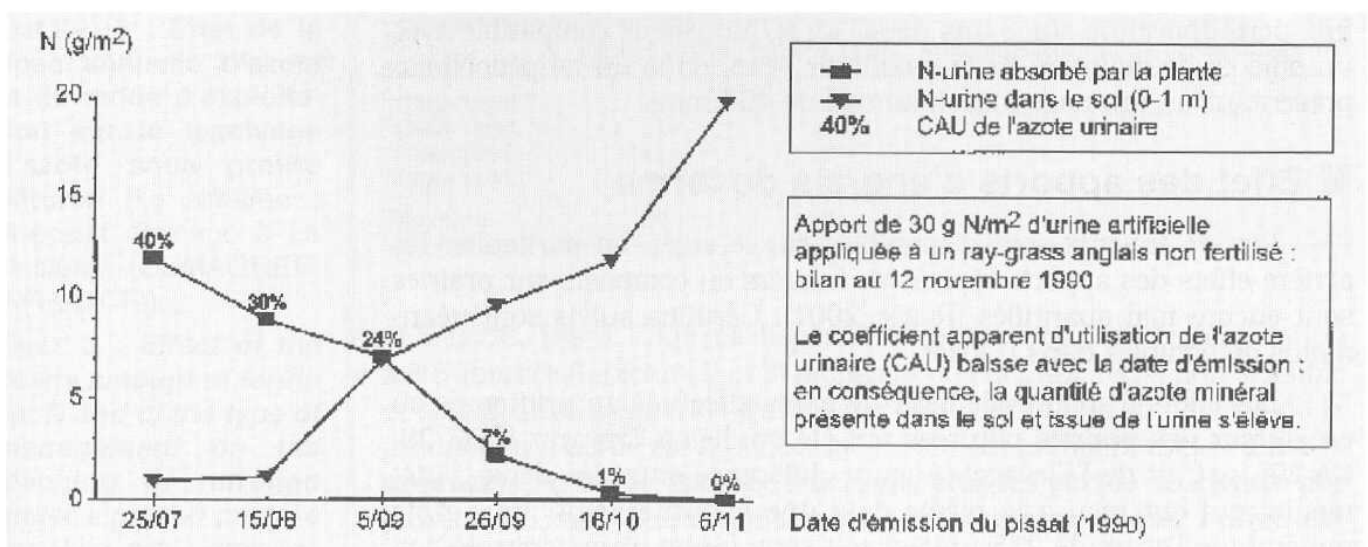


Figure 6 : Effet de la date d'émission d'un pissat sur le devenir de l'azote restitué (d'après Cuttle et Bourne, 1993).

Figure 6 : Effect of the date of a urine discharge on the fate of returned nitrogen (after Cuttle and Bourne, 1993).



Ce mécanisme nous permet d'expliquer les différences de comportement enregistrées sur les essais de Kerlavic et La Jaillière. La plus forte sensibilité du lessivage à l'accroissement de la dose d'azote observée à La Jaillière s'explique par la moindre croissance de la prairie en été sur ce site à cause d'une plus grande sécheresse estivale : 0,7 à 1,5 t MS/ha en moyenne selon les doses d'azote appliquées (soit 18% de la production annuelle), contre 3,1 à 4,1 t MS/ha à Kerlavic (soit 40% de la production annuelle). Les quantités importantes d'azote restituées par les animaux au printemps à La Jaillière y sont ainsi peu "recyclées" en été et par conséquent disponibles pour le lessivage.

Cet effet de la date de restitution animale s'ajoute à celui lié au plus faible coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais pendant les cycles d'été. Ainsi, on observe sur le site de Kerlavic 1 un coefficient apparent d'utilisation de l'engrais (CAU) de 0,75 sur les cycles de printemps contre 0,25 en été (Laurent *et al.*, 1998). Cette moindre efficacité de l'azote issu de l'engrais contribue à augmenter le contenu en azote minéral du sol en fin de période de pâturage et donc le risque de lixiviation pendant la période hivernale suivante. Enfin, la réhumectation des sols en automne permet une minéralisation active qui s'ajoute à l'azote déjà disponible, peu valorisable par les plantes en raison des potentiels de croissance réduits par les journées courtes.

En utilisant les références issues de ces dispositifs expérimentaux, la mise en œuvre d'une conduite adaptée de la prairie pâturée à Kerlavic (dose totale annuelle de 250 kg N/ha incluant une fertilisation azotée des seuls deux premiers cycles d'été de 25 kg N/ha) conduit à une perte moyenne sur 3 ans de 43 kg N/ha, valeur compatible avec un objectif de maintien de la qualité de l'eau (dans un tel pédoclimat présentant un drainage moyen annuel de 450 mm).

* Effet des apports d'engrais de ferme

Peu de travaux sont disponibles sur le sujet, et en particulier les arrière-effets des apports répétés de fumiers ou composts sur prairies sont encore mal quantifiés (Rubin, 2001). Certains suivis sont néanmoins disponibles dans l'Ouest. Les effets d'apports de lisier de porcs effectués au printemps ou en été sur des prairies pâturées ont été étudiés à Trévarez (EDE 29, CA 29, Institut de l'Élevage). Aucune différence entre les deux traitements qui ont reçu à la même date une quantité identique d'azote minéral (de l'ordre de 275 unités) soit sous forme d'ammonitrate soit sous forme d'azote ammoniacal du lisier n'a pu être mise en évidence durant les 5 hivers de suivi, et cela pour des productions ainsi que des nombres de jours de pâturage équivalents dans les deux traitements. Les quantités d'azote lessivé ont été respectivement de 75 et 78 kg N-NO₃/ha pour le traitement ammonitrate et le traitement lisier.

Les effets des apports d'automne et d'hiver de lisier et de fumier de bovins ont été mesurés par Froment *et al.* (1992) sur des prairies pâturées. Ces auteurs montrent ainsi que les apports de lisier d'octobre et de novembre sont les plus risqués : respectivement 32 et 43% de l'azote total apporté est lessivé contre seulement 17, 8 et 10% pour des apports effectués en septembre (absorption d'une partie de l'azote ammoniacal par le couvert), décembre et janvier (moindre drainage). Par ailleurs, l'ajout d'un inhibiteur de nitrification dans l'apport de novembre a un effet positif en soustrayant au lessivage une partie de l'azote ammoniacal. Enfin, on peut noter que l'apport de fumier en octobre entraîne la lixiviation d'une faible quantité d'azote correspondant à la fraction d'azote minéral du fumier.

3. Effet de l'introduction de la fauche dans la saison de pâturage

La limitation de la restitution d'azote au pâturage ne peut que diminuer le risque de transfert en profondeur de l'azote nitrifié (Decau et Salette, 1994). Tous les dispositifs expérimentaux où cette question a été abordée (tableaux 2 et 3) montrent en effet une réduction sensible et significative des pertes d'azote par lessivage quand une partie de la production d'herbe est fauchée, même sur les premiers cycles. Plus la production d'herbe fauchée s'accroît, plus les pertes de nitrate par lixiviation sont faibles, mais on peut remarquer que l'effet est notable dès l'introduction d'une fauche.

Il est évident que l'introduction de la fauche dans le mode d'exploitation de la prairie relève également de considérations économiques. Les références présentées au Erreur! Source du renvoi introuvable. constituent néanmoins une base d'adaptation des modes d'exploitation de la prairie, et ceci à double titre (Laurent *et al.*, 1998) :

– à l'échelle de bassins versants pour le diagnostic d'exploitations où on observe toujours qu'une part de l'excédent d'herbe est fauché, y compris dans des systèmes maximisant la part de la pâture ;

– dans le cadre d'opérations visant la protection de ressources en eau (captages) où il y a lieu de définir la part de fauche à respecter pour assurer un risque de fuite compatible avec les objectifs de maintien ou de restauration de la qualité de l'eau.

Tableau 2 : Effet de la fauche sur le lessivage de l'azote (kg N/ha/an) : 1 ou 2 fauches suivies de pâtures pratiquées sur un ray-grass anglais pur (RGA) dans 2 essais.

Table 2 : Effect of mowing on nitrogen leaching (kg N/ha/an) : 1 or 2 mowings followed by grazings of a pure Perennial Ryegrass sward (RGA) in 2 trials.

Mode d'exploitation	Essai Kerlavic 2* (RGA pur, 250 kg N/ha)			Essai Crecom** (RGA pur, 200 kg N efficace/ha)	
	Pâtture (0 fauche)	Pâtture-Fauche-Pâtture (1 fauche)	Fauche-Fauche-Pâtture (2 fauches)	Pâtture et (nb JP)	Fauche-Pâtture et (nb JP)
1995	28	12	16	93 (675)	53 (398)
1996	49	33	7	77 (747)	28 (386)
1997	54	51	23	75 (673)	52 (444)
Moyenne	43 (ab)	32 (b)	16 (b)	82 (698)	44 (409)

* Essai Kerlavic 2 (ITCF, EDE29, CA de Bretagne), a, ab, b : groupes homogènes Newman-Keuls, seuil $\alpha = 5\%$

** Essai Crécom (CA 22, Institut de l'Élevage) : essai mené en parcelle agricole sur l'ensemble des parcelles fauchées et pâturées de la station expérimentale ; fertilisation : 200 kg N efficace/ha ; (nb JP) : le nombre de jours de pâturage de 24 h.

Tableau 3 : Effet de la dose annuelle d'azote et du mode d'exploitation sur le lessivage d'azote sous prairie pâturée (kg N/ha/an ; dispositif drainage à La Jaillière (CEMAGREF-INRA-ITCF)).

Table 3 : Effect of the yearly amount of fertilizer N and of the type of management on the leaching of nitrogen under a grazed pasture (kg N/ha/year ; drainage design at La Jaillière (CEMAGREF-INRA-ITCF)).

	Pâtture 200N	Pâtture 100N	Fauche-Pâtture 200N	Fauche 200N
1992-1993	25	13	9	2
1993-1994	23	15	12	1
1994-1995	53	28	25	4
1995-1996	14	7	8	7
Moyenne	29	16	14	3

4. Effets de l'introduction de trèfle blanc dans la prairie

Au pâturage, les observations menées dans l'ouest de la France montrent que l'association graminée - trèfle blanc présente approximativement la même teneur en matières azotées que les prairies de ray-grass anglais conduites avec de l'azote minéral (tableau 4). En effet, l'association est généralement conduite à un rythme plus lent que la graminée pure et la forte teneur en protéines du trèfle blanc compense alors la moindre valeur azotée de la graminée. La teneur en MAT de l'association peut cependant varier en fonction du rythme de pâturage et du taux de trèfle blanc.

Lorsque la production fourragère est identique et le nombre de journées de présence au pâturage proche, on devrait observer des restitutions d'azote au pâturage relativement similaires entre les deux types de prairies, sauf si le taux de trèfle blanc est très élevé (supérieur à 60% en été). Cependant, comme la production fourragère des associations est légèrement décalée vers l'été, il est possible d'obtenir davantage d'azote restitué en été et automne.

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, valorisation de l'azote disponible par la graminée associée, celle-ci étant généralement en nutrition azotée limitante (Vertès *et al.*,

1997). Ces différents éléments laissent paraître qu'à même niveau de production fourragère, les flux d'azote devraient être peu différents entre les deux types de prairie.

Tableau 4 : Teneurs en MAT (Matières Azotées Totales) mesurées sur les prairies de ray-grass anglais pur et les associations graminées - trèfle blanc.

Table 4 : Total crude protein (MAT) contents measured on pure Perennial Ryegrass swards and on mixed grass - White Clover swards.

Lieu	Organismes	Années	RGA pur		RGA + Trèfle blanc	
			N min/ha	% MAT	% TB pondéré	% MAT
Trévarez	EDE 29 - IE	1982-1985	350	19,6	42	19,6
Kerbernez	INRA	1991-1995	250	18,4	30-35	18,4
Kerlavic 1	EDE 29 -ITCF	1992-1997	200	22,1	45	22,4
Kerlavic 2	EDE 29 -ITCF	1995-1997	250	20,5	55	23,2
Crécom	CA 22 -IE	1993-1996	110	16,8	50	19,9
La Jaillière	ITCF	1992-1997	100	16,7	20	20,7

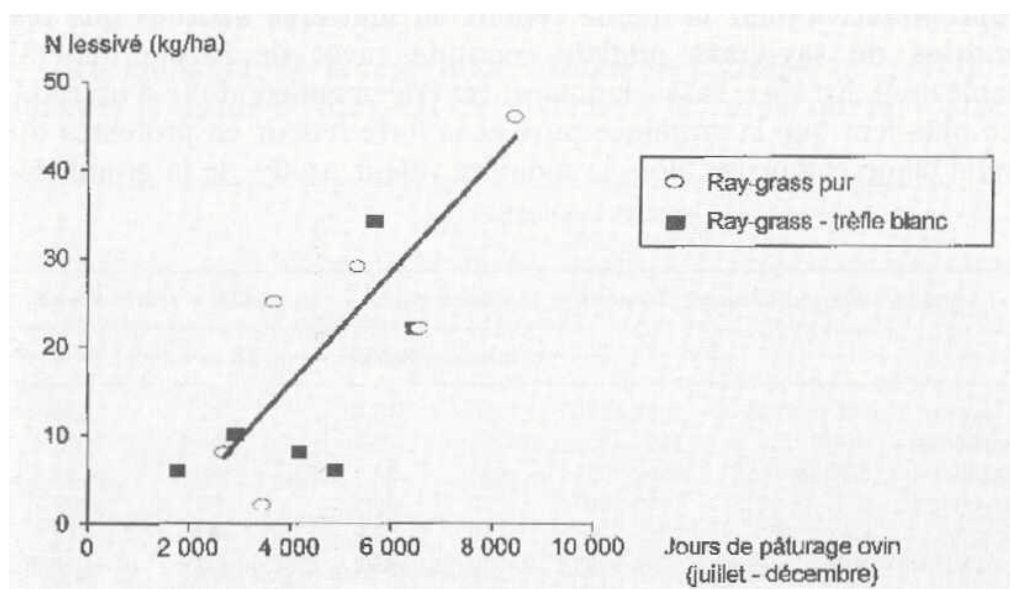
Tableau 5 : Pertes d'azote nitrique sur prairies de ray-grass anglais (RGA) fertilisé à l'azote minéral et associations ray-grass anglais - trèfle blanc (17 comparaisons avec dénombrement des journées de pâturage).

Table 5 : Nitrate losses from Perennial Ryegrass swards (RGA) fertilized with mineral nitrogen and from mixed Ryegrass - White Clover swards (17 comparisons with numbered grazing days).

	RGA	RGA + Trèfle blanc	Ecart (%)
N minéral (kg N/ha)	221	19	
Taux de trèfle blanc (%)	0	33	
Journées de pâturage (UGB/ha)	580	522	- 10
Azote lessivé (kg N-NO ₃ /ha)	54	42	- 15

Figure 7 : Effet du chargement animal estival et automnal sur la quantité d'azote lixivié sous ray-grass pur fertilisé ou sous association ray-grass - trèfle blanc, pâturés par des ovins (Cuttle et al., 1998).

Figure 7 : Effect of summer and autumn stocking rate on the amount of leached nitrogen, with sheep grazing a fertilized pure Perennial Ryegrass sward or a mixed Perennial Ryegrass - White Clover sward (Cuttle et al., 1998).



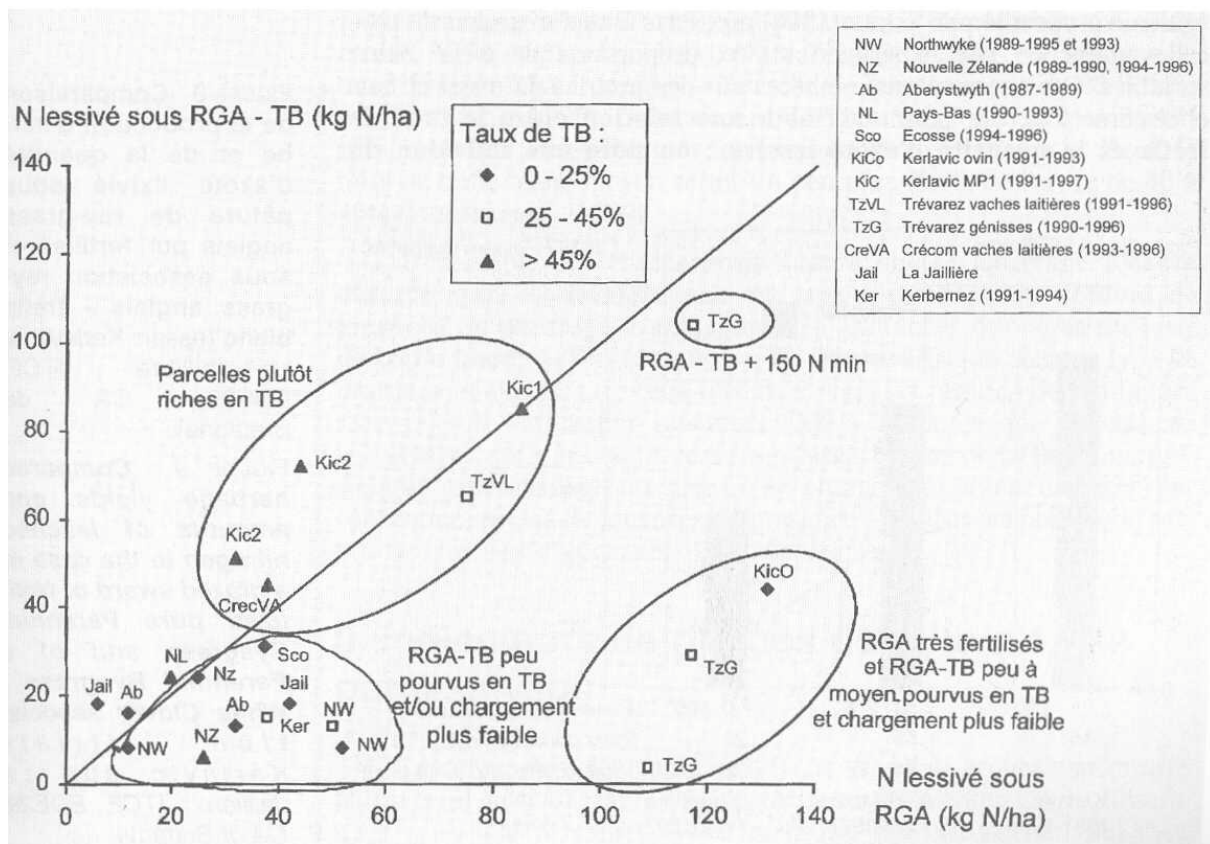
Afin de mieux cerner les pertes d'azote nitrique sous les associations graminée - trèfle blanc, comparativement aux prairies de graminées conduites à l'azote minéral, dix-neuf études en conditions de pâturage ont pu être recensées dans la bibliographie. Huit d'entre elles ont été menées dans l'Ouest : Kerbernez, Kerlavic, Trévarez dans le Finistère, Crécom dans les Côtes-d'Armor et La Jaillièrre en Loire-Atlantique. Les autres études ont été réalisées en Grande-Bretagne (Mac Duff *et al.*, 1989 ; Cuttle, 1992 ; Watson *et al.*, 1992 ; Pain *et al.*, 1993 ; Tyson *et al.*, 1997 ; Cuttle *et al.*, 1998 ; Hooda *et al.*, 1998), Pays-Bas (Schils, 1994), Nouvelle-Zélande (Ruz-Jerez *et al.*, 1995 ; Sprosen *et al.*, 1997).

L'analyse de ces résultats montre qu'en moyenne sur 24 comparaisons, les pertes d'azote nitrique observées sous les prairies de graminées pures recevant 250 kg N/ha sont de 50 kg N/ha alors que celles observées sous les associations ray-grass anglais - trèfle blanc (30%) sont de 36 kg N/ha.

Lorsque l'on retient les essais où le nombre de journées de présence au pâturage est disponible (tableau 5), les pertes d'azote nitrique des deux types de prairies apparaissent relativement proches quand le chargement au pâturage est très voisin. Cuttle *et al.* (1998) ont également montré que les pertes d'azote nitrique observées sous les deux types de prairies étaient proches et dépendaient principalement du chargement et particulièrement du pâturage d'été - automne (figure 7). Cette conclusion rejoint celle de Scholefield et Tyson cités par Titchen et Philipps (1996).

Figure 8 : Comparaison du lessivage d'azote nitrique mesuré sous ray-grass anglais pur (RGA) et sous association ray-grass - trèfle blanc (RGA - TB ; synthèse de résultats français, britanniques et néo-zélandais ; Le Gall, communication personnelle).

Figure 8 : Compared nitrate leachings measured under a pure Perennial Ryegrass (RGA) sward and under a mixed Ryegrass - White Clover sward (RGA - TB ; synthesis of French, British and New-Zealand results ; Le Gall, personal communication).



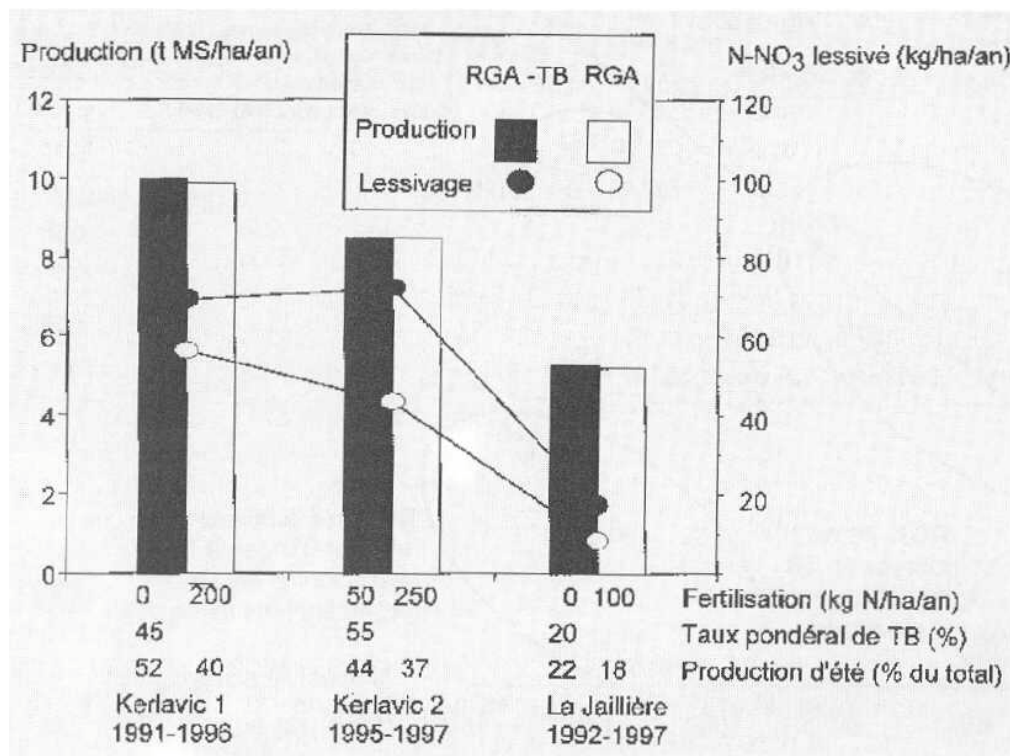
De cet ensemble de résultats, on peut distinguer deux situations principales (figure 8) :

– Lorsque le taux annuel pondéré de trèfle blanc est faible (environ 25% de la biomasse de la prairie) et le chargement inférieur à celui observé sur les graminées pures, les pertes d'azote nitrique sont nettement inférieures sous les associations, et cela d'autant plus que la fertilisation azotée pratiquée sur les graminées pures est importante et étalée sur la saison. Certains auteurs reconnaissent d'ailleurs que le niveau de fertilisation azotée pratiqué sur le ray-grass anglais pur servant de comparaison était parfois excessif (Parsons *et al.*, 1991 ; Cuttle *et al.*, 1992).

– Lorsque le taux de trèfle blanc est élevé (plus de 45-50% en moyenne annuelle) et le niveau de production de fourragère proche, les pertes d'azote nitrique observées sous les associations apparaissent légèrement supérieures à celles mesurées sous graminées pures. Un taux de trèfle compris entre 30 et 45% est donc un bon compromis entre la productivité de la prairie et le risque de lixiviation de nitrate.

Figure 9 : Comparaison de la production d'herbe et de la quantité d'azote lixivié sous pâture de ray-grass anglais pur fertilisé et sous association ray-grass anglais - trèfle blanc (essais Kerlavic et La Jaillièrre ; ITCF, EDE29, CA de Bretagne).

Figure 9 : Compared herbage yields and amounts of leached nitrogen in the case of a grazed sward of fertilized pure Perennial Ryegrass and of a Perennial Ryegrass - White Clover association (trials Kerlavic and La Jaillièrre ; ITCF, EDE29, CA of Brittany).



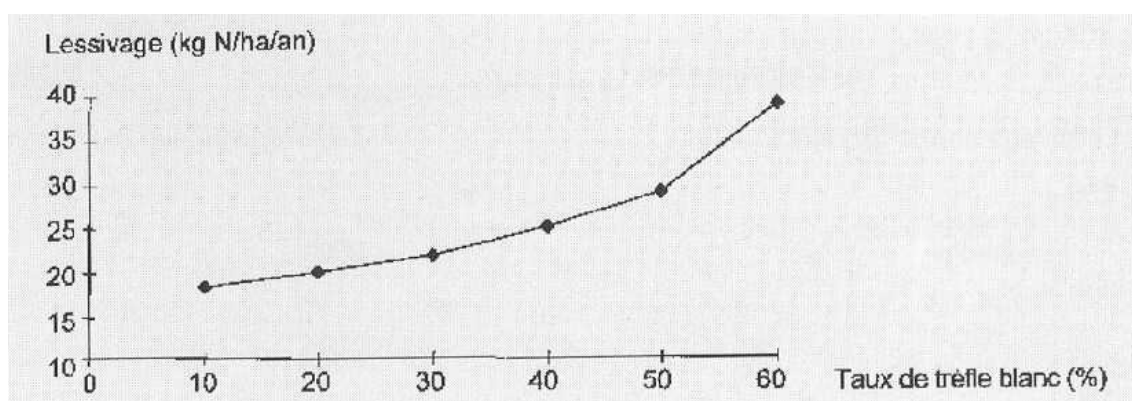
La figure 9 présente les résultats observés sur 3 dispositifs expérimentaux de l'ouest de la France qui permettent de comparer l'association avec un ray-grass fertilisé produisant la même quantité d'herbe en moyenne (sur 3 à 6 ans selon les cas).

Dans ces deux dispositifs, pour une même production d'herbe (5,5 à 10,0 t MS/ha/an en moyenne) et un même chargement, le lessivage d'azote sous prairie d'association est légèrement supérieur. Ces différences peuvent être imputées en partie au taux de trèfle observé (particulièrement à Kerlavic avec une proportion moyenne de 50%) ainsi qu'au décalage des restitutions d'azote urinaire au pâturage en liaison avec la production fourragère plus importante en été. En réalité, quelle que soit la nature de la prairie, les pertes de nitrate par lixiviation en hiver sont le fait des restitutions animales à la pâture et de la date à laquelle elles s'opèrent.

L'effet du taux de trèfle blanc sur les pertes d'azote nitrique est également observé par Schils (1994) aux Pays-Bas sur un jeu de parcelles dans un site expérimental aux proportions de trèfle blanc variables. Ces observations, réalisées sur des prairies pâturées et fauchées une fois, ont permis d'établir une relation entre le taux de trèfle et la quantité d'azote lessivé : on note une inflexion du risque de lessivage d'azote au-delà de 50% de trèfle blanc observé à l'automne (figure 10). De même, Benke et Kornher (1992) mesurent un lessivage sous association comprenant 30% de trèfle blanc (en masse) équivalent à celui observé sous ray-grass anglais pur recevant 120 kg N/ha/an, alors qu'une proportion de 50% de trèfle provoque un lessivage identique à celui observé sous une graminée recevant 240 kg N/ha/an.

Figure 10 : Lessivage d'azote en fonction du taux de trèfle blanc à l'automne (Schils, 1994).

Figure 10 : Effect of the White Clover content of the sward in autumn on nitrate leaching (Schils, 1994).



Ces différents résultats montrant l'incidence du taux de trèfle blanc sur les pertes d'azote nitrique soulèvent la question de la maîtrise de ce taux (Simon *et al.*, 1997b) : trop faible, la production d'herbe chute ; trop élevé, le risque de fuite d'azote par lessivage peut s'accroître. Ce contrôle repose aussi sur le choix variétal (Le Gall *et al.*, 1999). A ce titre, l'emploi de variétés de trèfle très agressives (type Aran), en alternative aux variétés à petites feuilles (type Huia), est depuis quelques temps remis en cause par le développement. Il convient cependant de relativiser ce risque. En effet dans une exploitation, toutes les associations n'atteignent pas un taux de trèfle blanc de 60% en été. Par exemple, dans les réseaux d'élevage étudiés en Bretagne, le taux de trèfle blanc pondéré à l'échelle de l'année serait de 35 à 40% (Le Gall *et al.*, 1998). Dans un autre réseau sur les systèmes herbagers, dans les Côtes-d'Armor (programme Système Terre et Eau), le taux de trèfle blanc moyen serait un peu plus élevé, de l'ordre de 40 à 45% (Vertès *et al.*, 1999).

L'ensemble des études nous montre que le lessivage d'azote observé sous les associations est très dépendant du nombre de journées de pâturage (comme pour les graminées pures) et du taux de trèfle blanc. Les risques de pertes d'azote nitrique sous ce type de prairie sont proches de ceux observés pour les prairies de graminées recevant une fertilisation raisonnée (200 à 250 kg N/ha). Cependant, les élevages qui s'orientent vers les prairies à base de trèfle blanc présentent généralement un niveau de chargement inférieur, avec par conséquent moins de journées de présence au pâturage par hectare de prairie (Journet et Richard, 1996 ; Grasset *et al.*, 1997).

5. Indicateurs de risques de fuite d'azote par lessivage

Le calcul des éléments constitutifs du bilan azoté de la prairie pâturée est possible dans les dispositifs expérimentaux, en utilisant les propositions d'estimations exposées par Farruggia *et al.* (1997).

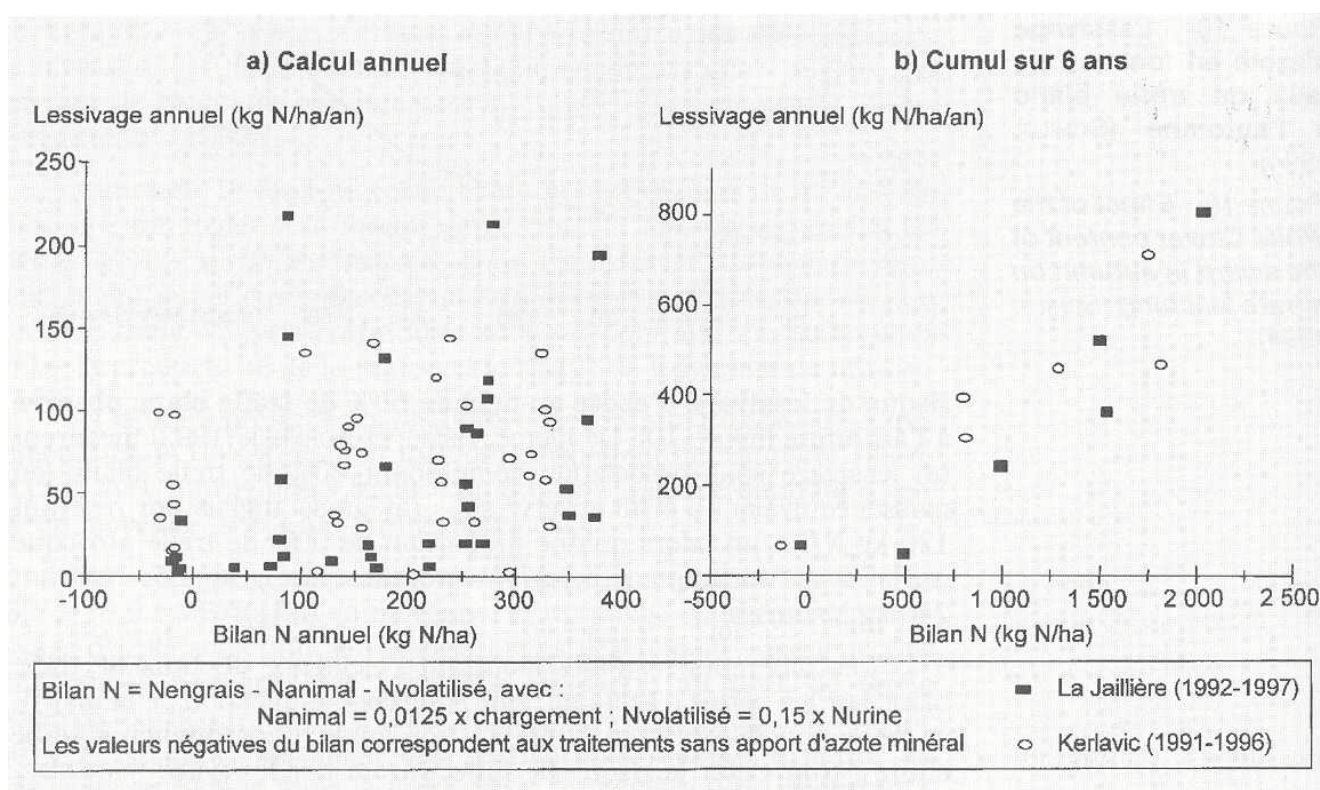
La figure 11 montre la relation entre le bilan azoté et le lessivage de l'azote nitrique observé pendant la saison de drainage suivante. Deux échelles de temps de calcul ont été retenues : d'une part l'année, et d'autre part la durée totale des essais (soit 6 ans). La liaison est faible, voire inexistante, à l'échelle de l'année (figure 11a), y compris au niveau de chaque site. Ce constat de la variabilité interannuelle et entre lieux du lessivage, mal pris en charge par la variable explicative "bilan azoté", rejoint celui formulé par Farruggia *et al.* (1997).

En revanche, comme pour la relation entre Nlixivié et fertilisation apportée (figure 1b), le calcul global pluriannuel est un meilleur prédicteur du lessivage cumulé sur la même période (figure 11b) : 34% de l'excès de solde du bilan est lessivé en moyenne sur les deux sites de La Jaillière et Kerlavic ($r^2 = 0,80$).

Pour expliquer la variabilité des quantités d'azote lixivié sous prairie pâturée, Simon *et al.* (1997a) proposent la variable "nombre de jours de pâturage dans l'année" (figure 12) qui correspond au nombre de journées de présence d'un UGB ramené à des journées de 24 heures (JP). Ainsi, une journée de pâture d'une vache laitière comprenant une traite de 4 heures équivaut à 1 UGB x 20/24 h = 0,83 JP. Cet indicateur est intéressant car il intègre l'intensité du pâturage, l'importance de la fauche, la fertilisation azotée, voire la contribution du trèfle blanc, et permet de comparer le pâturage de types d'animaux différents.

Figure 11 : Relation entre le bilan azoté et la quantité d'azote lessivé sous ray-grass anglais pur fertilisé (essais de Kerlavic et La Jaillière ; ITCF, EDE29, CA de Bretagne).

Figure 11 : Relationship between the nitrogen balance and the amount of nitrogen leached under a fertilized pure Perennial Ryegrass sward (trials Kerlavic and La Jaillière ; ITCF, EDE29, CA of Brittany).



Bien entendu, ce critère annuel ne peut rendre compte de l'effet du climat de l'année, du type de sol ni du mode de répartition des déjections au cours de l'année. Il ne permet que de dégager des tendances lourdes (Farruggia *et al.*, 1998). Ainsi, la figure 13 montre que la sensibilité du lessivage aux jours de pâturage est beaucoup plus forte à La Jaillière qu'à Kerlavic. Cette différence provient, on l'a déjà mentionné, d'un faible "recyclage" des restitutions de printemps du fait d'une faible production d'herbe en été. Un même nombre de jours de pâturage à Kerlavic correspond à une répartition un peu différente de la production avec toujours des pâturages d'été qui, certes, se traduisent par des déjections tardives mais qui témoignent de l'existence d'une production d'herbe apte à recycler de l'azote restitué au printemps. Enfin, les drainages moyens observés sur la période d'étude sont de 216 mm à La Jaillière et 571 mm à Kerlavic, ce qui entraîne une concentration variable de la solution du sol pour une même quantité d'azote nitrique présente dans le sol. Ceci souligne l'importance de la prise en compte du milieu pédoclimatique si l'on veut diagnostiquer des pratiques à l'aide de ce type d'indicateur.

Figure 12 : Concentration moyenne du nitrate de la solution du sol (a) et quantité d'azote lixiviée (b) observée sur divers dispositifs expérimentaux, en fonction du nombre de jours de pâturage (Simon et al., 1997).

Figure 12 : Mean nitrate concentration in the soil solution (a) and amount of nitrogen leached (b) observed in various experimental designs, according to number of grazing days (Simon et al., 1997).

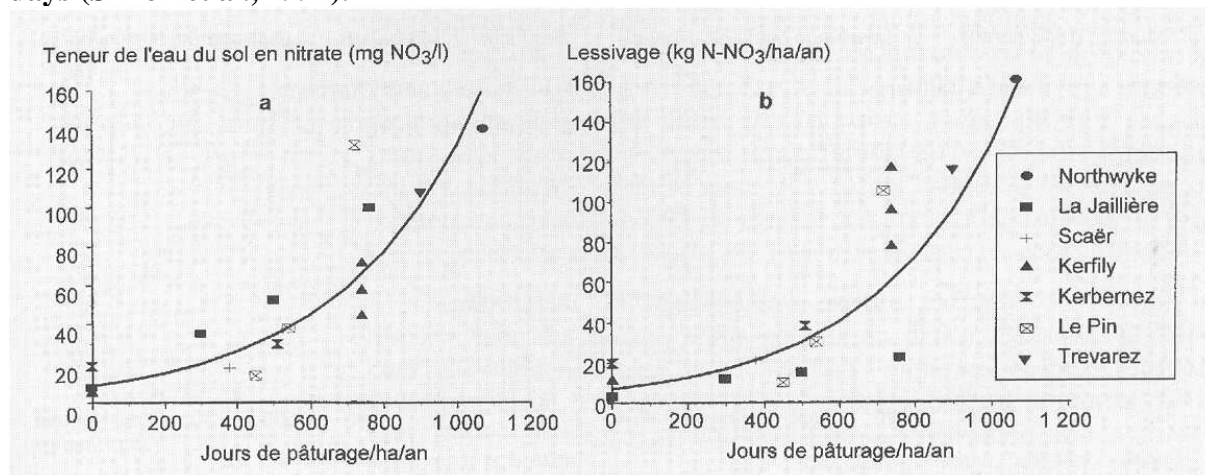
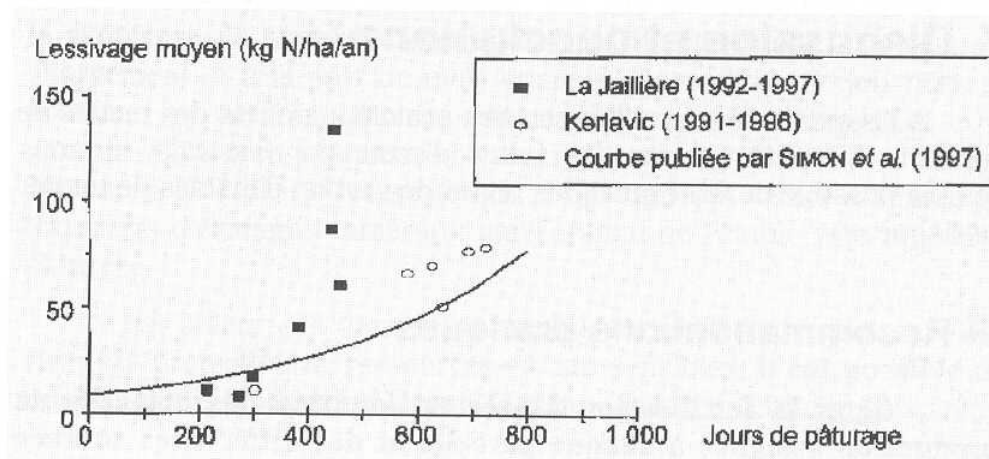


Figure 13 : Variabilité de la quantité d'azote lixiviée en fonction du nombre de jours de pâturage (moyennes annuelles ; essais de Kerlavec et La Jaillière ; ITCF, EDE29, CA de Bretagne).

Figure 13 : Variability of the amount of nitrogen leached according to number of grazing days (annual averages ; trials Kerlavec and La Jaillière ; ITCF, EDE29, CA of Brittany).

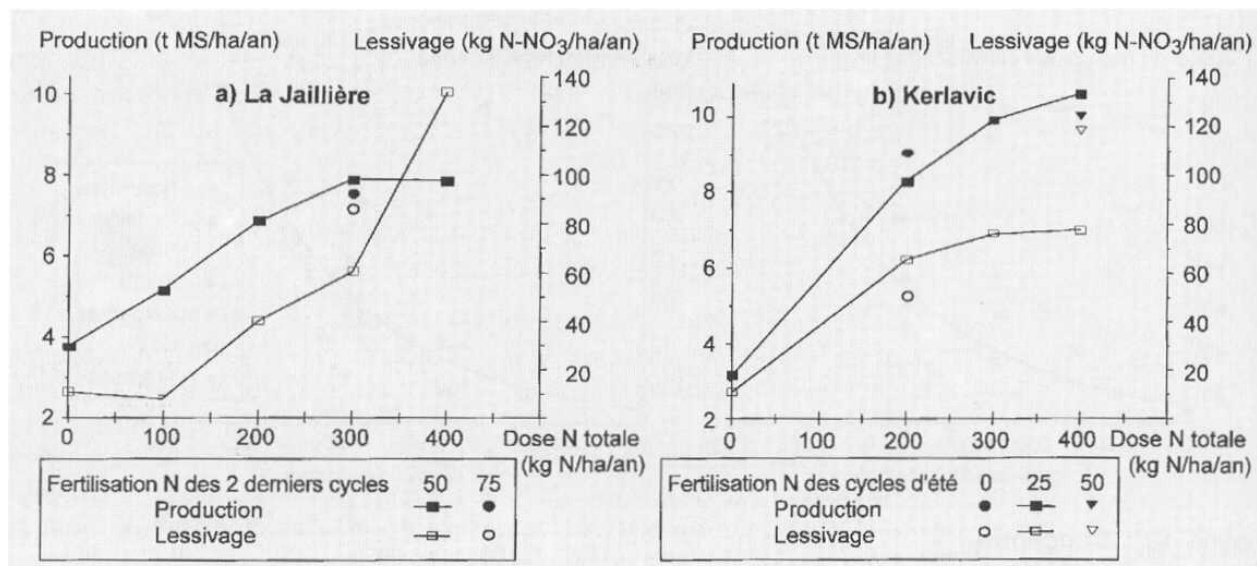


6. Production et lessivage : optimiser la fertilisation azotée

La confrontation de la production de matière sèche des prairies pâturées et du lessivage du nitrate, induit par les différents niveaux de fumure azotée, permet de dégager une plage "optimale" de fertilisation azotée permettant de concilier un niveau de production satisfaisant et des pertes d'azote compatibles avec le maintien de la qualité des eaux réceptrices. La figure 14 expose les résultats observés sur les sites de La Jaillière et Kerlavec.

Figure 14 : Production d'herbe et quantité d'azote lessivé en fonction de la dose totale d'azote (essais de La Jaillière et Kerlavic ; ITCF, EDE29, CA de Bretagne).

Figure 14 : Herbage yield and amount of nitrogen leached according to total amount of nitrogen (trials Kerlavic and La Jaillière ; ITCF, EDE29, CA of Brittany).



Si l'on se réfère aux valeurs observées avec une fertilisation azotée moyenne de 400 kg N/ha/an, la production relative permise par 200 kg N/ha/an s'établit respectivement sur les deux sites à 88 et 85%, alors que les pertes d'azote par lessivage sont de 30 et 65% de cette même référence.

La même approche effectuée sur la totalité des essais présentés à la figure 2 montre que le lessivage moyen observé avec la fertilisation azotée annuelle de 200 kg N/ha/an est de 26% de celui observé avec 400 kg N/ha/an.

Ainsi, il nous semble qu'une fertilisation totale annuelle comprise entre 150 et 250 kg N/ha/an représente un compromis satisfaisant ; l'ampleur de la fourchette se justifie par la nature du contexte pédoclimatique : les situations estivales séchantes se satisferont d'une fertilisation inférieure à celle justifiable dans les zones plus arrosées en été.

7. Discussion et conclusions

A l'issue de ce tour d'horizon des principaux effets des modes de conduite du pâturage sur les fuites d'azote par lessivage, il nous semble possible de fixer quelques règles de gestion capables de limiter ce risque.

* Recommandations pratiques

– Gérer la fertilisation azotée en fonction des objectifs de production assignés à chaque parcelle et des différentes sources de fourniture d'azote (sol, restitutions au pâturage, engrais de ferme...). C'est l'objet de la démarche de raisonnement proposée par Farruggia *et al.* (cet ouvrage). Sur la base de l'ensemble des résultats disponibles, il apparaît aussi que les pertes d'azote nitrique sous les prairies pâturées deviennent importantes au delà d'un apport de 250 kg N/ha/an. D'autre part, les essais menés à Kerlavic et La Jaillière montrent l'intérêt de centrer les apports d'azote sur le printemps, période où l'azote est bien valorisé (Castillon *et al.*, 1999).

– Maîtriser la fertilisation azotée estivale en évitant les apports pour les cycles tardifs soumis au déficit hydrique. En effet, ceux-ci valorisent moins bien les apports minéraux et les restitutions urinaires. Dans les régions à déficit hydrique estival prononcé, on ne note généralement pas d'effet positif de la fertilisation azotée au-delà du début juin. A l'opposé, les zones bénéficiant d'une pluviométrie plus abondante en été peuvent valoriser des fertilisations estivales jusque fin juin - début août, très rarement au-delà.

La mise en oeuvre de ces deux premières stratégies peut déjà dégager des marges de progrès significatives par rapport à la situation existante comme l'illustrent les résultats de l'essai Kerlavic 2 (tableau 2) : la mise en oeuvre d'une dose totale d'azote de 250 kg N/ha/an dont seulement 50 en été s'est traduite par un lessivage moyen de 43 kg N/ha/an contre 125 avec les pratiques antérieures de 400 kg N/ha/an. La production fourragère a baissé de 12% (ce sont principalement les excédents de printemps qui sont affectés).

- L'intérêt de l'association ray-grass - trèfle blanc du point de vue technique (souplesse d'exploitation, équilibre de la production sur le printemps et l'été) et économique (baisse des intrants azotés) ne doit pas être transposé en l'état sur le plan environnemental : pour une même production fourragère permettant le même chargement, les fuites d'azote par lessivage sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées sous ray-grass pur fertilisé. Il est nécessaire de maîtriser le taux de trèfle blanc dans les associations graminées - légumineuses afin d'éviter les contributions trop importantes en été : la maîtrise de l'équilibre doit passer par le choix variétal et la conduite du pâturage (Le Gall *et al.*, 1999).

- Il semble plus difficile d'intervenir sur le nombre de journées de présence au pâturage sans remettre en cause certains choix de systèmes de production, car cet indicateur est très lié à la structure du système fourrager et particulièrement au niveau de chargement et à la part de maïs ensilage. Le nombre de journées de présence au pâturage devient important lorsque le chargement et la part de maïs sont respectivement supérieurs à 1,8 UGB/ha SFP et 50% de la SFP. Dans ces systèmes, il faut surtout veiller à limiter les transferts d'éléments minéraux par l'animal de l'étable vers la prairie pâturée.

- Par ailleurs, et dans le cadre plus restrictif d'opérations ciblées visant la protection de ressources en eau sensibles, il est possible de raisonner l'introduction d'une fauche dans le calendrier d'exploitation.

* Des références à compléter

Les études menées dans l'Ouest et les régions océaniques de l'Europe du nord-ouest ont permis de cerner l'effet de la fertilisation azotée, du taux de trèfle blanc, de la fauche et du nombre de journées de présence au pâturage sur les pertes d'azote par lessivage. Il reste encore à mieux cerner l'effet du pâturage hivernal mais les essais et observations mis en place à Kerlavic et à Crécom dans le cadre d'un programme concerté devraient permettre de le préciser, ainsi que de nouvelles recherches menées par l'INRA.

De même, l'impact de différentes dates d'apports de lisier de porcs sur pâture est abordé dans un dispositif récent de Kerlavic et permettra d'analyser ces effets dans le contexte breton.

De façon générale, on observe une certaine variabilité dans les réponses, qu'il convient de mieux cerner. Des travaux complémentaires restent à mener sur le devenir des restitutions au pâturage (urine et fèces), de l'azote apporté par les engrais minéraux et organiques et plus généralement sur le fonctionnement du couple carbone - azote en système prairial afin de mieux comprendre les phénomènes puis de les modéliser.

Dans cette perspective, il faut s'intéresser à la dynamique de l'azote dans la durée, et cela à l'échelle de la rotation, pour des systèmes d'élevage où les flux de matières organiques sont abondants. Les travaux menés actuellement à Kerlavic, Kerbernez, La Jaillière, par l'ITCF, l'EDE du Finistère, la Chambre d'Agriculture de Bretagne et l'INRA visent à mieux comprendre les mécanismes qui agissent sur la minéralisation d'azote et à déterminer les principaux facteurs de variation. Ces études tendent à montrer l'effet prépondérant du retournement du couvert avant l'arrière-effet des modes de conduite antérieurs (doses d'azote notamment). Par un choix de la période de destruction et de la gestion des successions de culture et des périodes d'interculture, il semble alors possible de maîtriser les fuites d'azote par lessivage.

* Intégrer ces références à l'échelle de l'exploitation et du bassin versant

Les résultats présentés portent sur les pertes d'azote par lessivage à l'échelle de la prairie pâturée et l'adaptation de leur conduite aux contraintes environnementales. Néanmoins, l'adaptation de la conduite de la pâture aux contraintes environnementales ne doit pas occulter le nécessaire raisonnement sur l'ensemble du système de production, et non pas de façon segmentée sur les prairies d'une part et la sole de cultures annuelles de l'autre. En particulier, la conduite des intercultures sur la sole cultivée doit être analysée pour hiérarchiser et ainsi établir une priorité pour les actions à conduire au niveau de l'exploitation.

A titre d'exemple, l'essai Kerlavic 2 montre qu'en moyenne sur 3 ans (hivers 1996 à 1998) le lessivage sous pâture de ray-grass fertilisé avec 250 kg N/ha atteint 43 kg N/ha/an (tableau 2) contre 77 dans une rotation maïs - (sol nu) - blé. L'implantation d'une culture intermédiaire (ray-grass d'Italie entre blé et maïs permet de réduire le lessivage moyen à 29 kg N/ha/an pour l'ensemble de la rotation sur cette même période.

Ces constats rejoignent ceux de Simon et Le Corre (1988) et Benoît (1994) qui ont observé que les pertes d'azote nitrique sous cultures de maïs ensilage pouvaient être importantes notamment dans le cadre d'une surfertilisation, supérieures alors à celles observées sous prairies. Cependant, lorsque la conduite du maïs ensilage est optimisée (fertilisation raisonnée, implantation d'une culture intermédiaire), les pertes d'azote nitrique deviennent modérées (Simon et Le Corre, 1988 ; Vertès *et al.*, 1998) et sont alors proches de celles observées sous prairies pâturées intensives.

D'autres travaux menés en France et en Europe sur des systèmes fourragers complets, intégrant les flux de déjections animales dans les systèmes étudiés, ont également permis de préciser à quel niveau se situent les pertes d'azote nitrique observées sous prairies. Ainsi, dans l'expérimentation menée à Crécom (Chambre d'Agriculture, EDE de Bretagne, Institut de l'Élevage) comparant deux systèmes fourragers (25 et 50% de maïs ensilage), le lessivage d'azote observé sous les prairies est différent selon le système. En effet, dans le système le plus herbager, les fuites d'azote sous prairies sont inférieures à celles obtenues sous les prairies du système "50% maïs" (respectivement 51 et 62 kg N/ha/an) car la part de fauche y est plus importante et le nombre de journées de pâturage plus faible (581 et 733 jours/ha). En revanche, les pertes d'azote sous les parcelles de maïs du système "25% maïs" sont supérieures à celles du système "50% maïs", en raison de l'effet du retournement de prairies (respectivement 86 et 62 kg N/ha/an). Au final, le lessivage d'azote observé dans les deux systèmes est identique, compris entre 60 et 65 kg N/ha/an.

Après l'exploitation, l'autre échelle d'intégration doit être le bassin versant, niveau où se juge la potabilité de l'eau. En effet, entre la sortie de la parcelle moyenne de l'exploitation et l'exutoire du bassin versant, on peut observer un abattement de la concentration du nitrate. Cet abattement s'explique par la dilution permise par les espaces non agricoles (bois, talus, haies...), la dénitrification dans les zones humides. Il faut souligner, notamment, la fonction des prairies humides dans cet ensemble de phénomènes.

Accepté pour publication, le 8 janvier 2001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Benke M., Kornher A. (1992) : "The influence of nitrogen fertilization and white clover content on the nitrate leaching from cut and grazed grassland", *Nitrogen cycling and leaching in cool and wet regions of Europe*, COST workshop, october 22-23, Gembloux, Belgium.

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

Castillon P., Kerveillant P., Besnard A., Legall A. (1999) : "Fertilisation azotée des prairies pâturées", *Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest*, Recueil des communications, Rennes, 25/02/1999, 41-59.

Clough T.J., Ledgard S.F., Sposen M.S., Kear M.J. (1998) : " Fate of 15N labelled urine on 4 soil types ", *Plant and Soil*, 199, 195-203.

Cuttle S.P. (1992) : "Prospects for reducing leaching by the use of clover in grasslands systems", *Aspects of applied biology*, 30, 239-243.

Cuttle S.P., Bourne P.C. (1993) : "Uptake and leaching of nitrogen from artificial urine applied to grassland on different dates during the growing season", *Plant and soil*, 150, 77-86.

Cuttle S.P., Hallard M., Daniel G., Scurlock R.V. (1992) : "Nitrate leaching from sheep-grazed grass/clover and fertilized grass pastures", *Journal of Agric. Sci.*, Cambridge, 119, 335-343.

Cuttle S.P., Scurlock R.V., Davies M.S. (1998) : "A 6-year comparison of nitrate leaching from grass/clover N-fertilized grass pastures grazed by sheep", *Journal of Agric. Sci.*, Cambridge, 131, 39-50.

Decau M.L., Salette J. (1994) : " Reducing nitrate leaching from grassland by manipulating grazing/cutting regimes and rate of N fertilizer ", *Proc. 15th EGF Meet.*, Wageningen, 213-217.

Decau M.L., Delaby L., Roche B. (1997) : "AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée. II - Les flux du système sol - plante", *Fourrages*, 151, 131-330.

Delaby L., Decau M.L., Peyraud J.L., Accarie P. (1997) : "AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée. I - Les flux associés à l'animal", *Fourrages*, 151, 297-311.

Farruggia A., Decau M.L., Vertès F., Delaby L. (1997) : "En prairie, la balance azotée à l'échelle de la parcelle", *Fourrages*, 151, 281-296.

Farruggia A., Le Gall A., Cabaret M.M., Le Meur D., Legarto J. (1998) : "Risques de lessivage de nitrate sous prairies pâturées", *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 224.

Froment M.A., Chalmers A.G., Smith K.A. (1992) : "Nitrate leaching from autumn and winter application of animal manures to grassland", *Nitrate and farming systems, Aspects of applied biology*, 30, 153-156.

Grasset M., Roger P., Dequin A., Follet D., Thébault M., Berkani M.E., Le Gall A. (1997) : "Etude des systèmes fourragers laitiers maximisant le pâturage en Bretagne : synthèse des résultats 95 et 96, analyse du fonctionnement et mise au point d'indicateurs", *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 9-14.

Hooda P.S., Moynagh M., Svoboda I.F., Anderson H.A. (1998) : "A comparative study of nitrate leaching from intensively managed monoculture grass and grass-clover pastures", *J. Agric. Sci., Cambridge*, 131, 267-275.

Institut de l'Élevage (1998) : *Prairies et risques de lessivage. Essais suivis par l'Institut de l'élevage*, Doc. interne, 18 pp.

Journet M., Richard F. (1996) : "Systèmes laitiers peu intensifiés de type herbager en Centre-Bretagne : analyse technique et environnementale", *3e Renc. Rech. Ruminants*, 81-84.

Laurent F., Kerveillant P., Vertès F., Cazes J.P. (1995) : "Pertes en azote sous prairie : impact des modes de gestion", *Gestion de l'azote dans les systèmes d'élevage, Colloque APEX*, le Robillard, 7 avril 1995, 14 pp.

Laurent F., Kerveillant P., Castillon P. (1998) : "Stratégies de fertilisation des prairies pâturées adaptées aux objectifs de production et aux contraintes d'environnement", *Concilier efficacité agronomique et environnement, Journée régionale Futur Azote*, Loudéac, 3 février 1998, 25-27.

Le Gall A., Tranvoiz M., Cabaret M.M., Grasset M., Le Lan B. (1998) : *Bilans des minéraux dans les exploitations laitières de Bretagne. Excédents et facteurs de variation*, Compte-rendu EDE-CA de Bretagne-Institut de l'élevage, 6p.

Le Gall A., Le Meur D., Grasset M., Fougère M. (1999) : "Le trèfle blanc : un moyen d'assurer la nutrition azotée des prairies", *Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest*, Recueil des communications, Rennes, 25/02/1999, 61-73.

Macduff J.H., Jarvis S.C., Roberts D.H. (1989) : "Nitrate leaching under grazed grassland : measurements using ceramic cup soil solution samplers", *Fertilization and the environment, 1st Int. Symp.*, August 1989, Leuven (B), 72-78.

Pain B., Jarvis S.C., Laws J. (1993) : *Reducing nitrogen losses from grassland production systems*, IGER report 1993, 84 p.

Parsons A.J., Orr R.J., Penning P.D., Lockyer D.R. (1991) : "Uptake, cycling and fate of nitrogen in grass-clover swards continuously grazed by sheep", *J. of Agric. Sci., Cambridge*, 116, 46-61.

Recous S., Loiseau P., Machet J.M., Mary B. (1996) : "Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies", *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Reims, 19-20 novembre 1996, *Les colloques de l'INRA*, n°83, 105-120.

Rubin B. (2001) : *Délocalisation des apports d'engrais de ferme du maïs vers la prairie : effets sur la lixiviation du nitrate et le fonctionnement de l'exploitation*, mémoire ITIA, CNAM, 66 p. + annexes.

Ruz-Jerez B.E., White R.E., Ball P.R. (1995) : "A comparison of nitrate leaching under clover-based pastures and nitrogen-fertilized grass grazed by sheep", *J. Agric. Sci., Cambridge*, 125, 361-369.

Ryden J.C., Ball P.R., Garwood E.A. (1984) : "Nitrate leaching from grasslands", *Nature*, 311, 5981, 50-53.

Schils R.L.M. (1994) : "Nitrate losses from grazed grass and grass/clover pastures on clay soil", *Meststoffen 1994*, 78-94.

Simon J.C., Le Corre L. (1988) : "Lessivage d'azote en monoculture de maïs, en sol granitique du Finistère", *Fourrages*, 114, 193-207.

Simon J.C., Le Corre L. (1996) : "Recueil des données, site de Kerfily", *Un point sur ... 30 ans de lysimétrie en France*, C. Müller ed., INRA Editions, Comifer, 205-228.

Simon J.C., Peyraud J.L., Decau M.L., Delaby L., Delagarde R. (1996) : "Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux pâturés permanents ou de longue durée", *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Reims, 19-20 novembre 1996, *Les colloques de l'INRA*, n°83, 201-216.

Simon J.C., Decau M.L., Vertès F. (1997a) : "Chargement animal et pollution nitrique sous prairie", *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 30, 29-34.

Simon J.C., Leconte D., Vertès F., Le Meur D. (1997b) : "Maîtrise de la pérennité du trèfle blanc dans les associations", *Fourrages*, 152, 483-498.

Sprosen M.S., Ledgard S.F., Thom E.R. (1997) : "Nitrate leaching is similar in N₂-fixing grass-clover and N-fertilised grass-only pasture at similar N inputs", *Proc. of the New Zealand Grassl. Ass.*, 59, 125-128.

Thomas R.J., Logan K.A.B., Ironside A.D., Bolton G.R. (1988) : "Transformations and fate of sheep urine-N applied to an upland U.K pasture at different times during the growing season", *Plant and soil*, 107, 173-181.

Titchen N.M., Philipps L. (1996) : "Environmental effects of legume based grasslands systems", *In Legumes in sustainable farming systems*, BGS Occasional Symp., n°30, 257-258.

Tyson K.C., Scholefield D., Jarvis S.C., Stone A.C. (1997) : "A comparison of animal output and nitrogen leaching losses recorded from drained fertilized grass and grass/clover pasture", *J. Agric. Sci., Cambridge*, 129, 315-323.

Vertès F., Simon J.C., Le Corre L., Decau M.L. (1997) : "Les flux d'azote au pâturage. II - Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage", *Fourrages*, 151, 263-280.

Vertès F., Grall J., Kerveillant P., Laurent F. (1998) : "Quelle fertilisation azotée après retournement de prairies ?", *Elevage rentabilité*, 345, 9-10.

Vertès F., Journet, M., Etesse A. (1999) : "Effets des modes de conduite des prairies de ray-grass anglais - trèfle blanc sur les risques de pertes d'azote", *Colloque programme Système Terre et Eau (1994-1999)*, 29-30/04/1999, Saint-Brieuc, 128-139.

Watson C.J., Jordan C., Taggart P.J., Laidlaw M.K., Garrett M.K., Steen R.W. (1992) : "The leaky N-cycle on grazed grassland", *Aspects of applied biology*, 30, 215-222.

SUMMARY

Effects of grazing management on nitrate leaching. Proposals for the control of risks at the plot level

The control of nitrate losses in crop and animal husbandry is a necessity dictated by the environmental constraints. The study of the effects of pasture management on nitrate leaching and the setting up of references has to be based on the knowledge of nitrogen flows under grazing. All investigations on this topic have tended to show that the part played by animal returns (especially urine patches) on nitrate losses by leaching is determining. This nitrogen return is the key to the interpretation of how the management of pastures influences nitrogen flows : fertilization, stocking rate, forage species, etc.

The effect of a nitrogen fertilizer dressing therefore cannot be studied solely from the point of view of the nutrient amount : the influence of the date of application (distribution of the total amount over several cycles of utilization) is decisive, considering that in summer the pasture's potential of re-cycling nitrogen from animal excreta is lower. The role of mixed swards (grass-legume associations) and that of mowing are discussed in the light of recent experimental results. Lastly, proposals are put forward and discussed for an optimal management of pastures, involving mineral fertilization, the place of forage associations, grazing pressure, etc.