

Conduite alimentaire et rejets azotés chez la vache laitière. Interrelations avec les performances

R. VERITE, L. DELABY

INRA, Station de recherches sur la Vache laitière. 35590 St Gilles. France

RESUME – Réduire la quantité d'azote excrétée par les vaches est un moyen parmi d'autres qui contribue à faciliter la gestion des déjections du troupeau laitier dans leurs incidences sur le cycle de l'azote. L'objectif de cette synthèse est d'abord de quantifier l'effet de la nature et de la conduite 1/du système fourrager et 2/de l'alimentation azotée sur les rejets N et leurs relations avec les performances puis 3/d'examiner ces problèmes dans le cas particulier du pâturage.

L'azote des déjections dépend d'abord des quantités de N ingérées et varie de 90 à 150 kg/vache/an (ou de 12 à 20 kg/tonne de lait produit) avec la nature du fourrage, l'intensité de son exploitation (fertilisation, stade) et la supplémentation azotée. Une méthode simple est proposée pour estimer les rejets N annuels en fonction des séquences alimentaires du troupeau.

Les effets du niveau d'apports azotés ont été examinés au cours de 5 essais dans des situations nutritionnelles variées et pour une large gamme de teneurs en PDIE/UFL des rations (80 à 125 g). Entre les niveaux extrêmes, les écarts de réponses sont importants, mais sans aucune rémanence ultérieure, non seulement pour le lait (+ 15 à 30 %) et les rejets N mais aussi sur le taux protéique (+ 2 g/kg) et l'efficacité alimentaire (+ 10 %). Les différences d'ingestion (1 à 3 kg MS) induites par le niveau d'apports PDI sont la cause de la moitié de ces écarts de production et expliquent pourquoi le bilan énergétique est peu modifié par la variations des apports PDI (sauf déficit important) même en début de lactation. Avec l'augmentation des apports, ces paramètres suivent pour la plupart des lois de rendements marginaux décroissants précisées dans le texte. A l'opposé, les pertes relatives d'azote dans les déjections rapportées par kg de lait produit diminuent de façon curvilinéaire avec la teneur en PDIE de la ration pour atteindre un seuil bas incompressible. La teneur de 100 g PDIE/UF serait bien une valeur clé commune à ces 2 phénomènes : au dessus le gain de performances est minime en regard de l'accroissement des pertes N alors que c'est l'inverse au dessous.

Au pâturage, la fertilisation azotée, de par son effet important sur les quantités d'azote exportées par la plante, est un facteur déterminant des performances et restitutions d'azote par hectare. Les conditions de valorisation de la prairie telles que le chargement jouent ensuite un rôle modulateur tandis que l'effet de la complémentation dépend de la teneur en MAT du concentré. Le nombre de jours de pâturage réalisé par hectare, (JP/ha) qui caractérise à la fois la production d'herbe et sa valorisation par le troupeau, représente le critère de synthèse qui intègre bien ces facteurs de variation. Globalement, pour 100 JP/ha en plus grâce à la fertilisation, l'azote exportée par le lait s'accroît de 10 à 15 kg selon le potentiel des animaux tandis que les rejets totaux augmentent d'environ 70 à 80 kg N par hectare.

Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows

R. VERITE, L. DELABY

INRA, Station de recherches sur la Vache laitière. 35590 St Gilles. France

SUMMARY – Reducing N excretion from individual cows is one way among others to better cope with the problem of the negative contribution of the dairy herd to the « Nitrogen cycle » on the farm. The objectives of this paper is first to quantify the effects of the main forage systems and of protein feeding level on the amount of N excreted in relationships with their simultaneous effects on animal performances and efficiencies and then to examine the particularities of the grazing situation.

N excretion depends primarily on the level of N intake i.e. on forage species, fertilisation, growth stage and on protein supplementation and therefore varies between the main usual forage systems from 90 to 150 kg N/cow/year (i.e. 12 to 20 kg N/ton of milk). A simple method is proposed to calculate the load of excreta N from a dairy herd according the specific pattern of feeding practices over the year.

The effects of the level of metabolic protein supply over a wide range of dietary concentration (80-125 g PDI/UFL) were analysed from a set of 5 feeding trials. Through that range, excreta N were largely increased and productive responses were also important (but without any residual effect), not only for milk yield (+ 15 to + 30 %) but also for milk protein concentration (+ 2 g/kg) and feed efficiency (+ 10 %). The simultaneous increase observed in feed intake (+ 1 to + 3 kg DM) accounted for half of the productive responses and could explain why the nutritive balance was hardly affected by protein levels, even in early lactation. Most of the productive parameters responded to increasing PDI levels according laws of decreasing return that are given in the text. On the other way, the relative N losses (excreta N/milk N) decreased curvilinearly with decreasing PDI levels to reach a minimal plateau. The concentration of 100 g PDI/UFL appears as a common key value for both phenomena : higher PDI level results only in small increases in productive performances whereas N losses increase sharply, and the reverse occurs with lower PDI level.

At grazing, the level of N fertilisation, through the increase in sward yield and N content, is the main determinant of productive performances and losses of excreta N per ha. The other factors of sward valorisation such as stocking rate have a only a moderate effect whereas the effect of concentrate supply could be low or high according protein content. Total grazing days per ha is an integrative parameter that accounts quite well for all these factors as it reflects both sward yield and herd valorisation conditions. Roughly, each extra 100 grazing days induced by higher fertilisation increases N flows by 10-15 kg/ha as milk and by 70-80 kg/ha as excreta.

INTRODUCTION

La nutrition azotée des ruminants constitue de longue date une préoccupation majeure des zootechniciens. Le système PDI, qui raisonne la nutrition azotée à la fois au niveau du rumen et de l'animal, permet de mieux prendre en compte les spécificités du ruminant et également de mieux ajuster les apports azotés en fonction des rendements marginaux décrits autour de la notion de besoin de l'animal. A l'inverse, les travaux concernant les restitutions d'azote dans les déjections, leurs facteurs de variation en lien avec l'alimentation et leurs conséquences sont beaucoup plus récents. Ces nouvelles préoccupations sont à associer d'une part au rôle important et reconnu que joue les excès d'azote dans certaines atteintes à l'environnement et d'autre part aux nouvelles réglementations européennes qui rendent plus contraignante la gestion de l'azote dans les exploitations agricoles. Dans les bassins de production intensifs, l'élevage, de par le développement du hors sol et la concentration locale d'effectifs importants d'animaux, génère des masses d'azote considérables qui interviennent dans le cycle global de cet élément et son déséquilibre. Les ruminants, bien qu'associés aux surfaces agricoles où les nourrissent, apportent leur contribution à ce vaste problème des excédents d'azote.

Si la réduction des flux d'azote associés aux déjections animales constitue aujourd'hui une volonté unanime, les conséquences de ce choix doivent être analysées et intégrées aussi bien au niveau de l'animal et de ses performances qu'à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole. Après un bref rappel concernant les flux d'azote chez la vache laitière et leurs principaux facteurs de variation, l'objectif de cette synthèse est d'analyser les relations entre performances et rejets azotés sous l'effet de la nutrition azotée pour promouvoir des solutions équilibrées. Dans le cas particulier du pâturage, le rôle de l'azote sous ses différentes formes d'intrants est ensuite examiné à l'échelle de la parcelle et du troupeau.

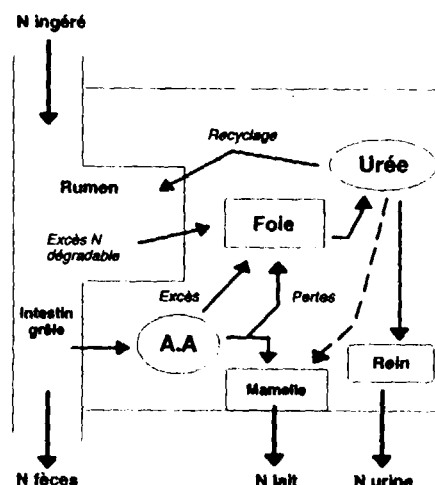
Les ruminants et leur élevage s'intègrent en général dans un système de production associant surfaces et cultures fourragères. Les déjections animales constituent alors une source d'éléments fertilisants intéressante et largement utilisée. Ainsi cette synthèse limitée aux restitutions d'azote associées à l'animal est complétée par l'analyse de leur devenir agronomique (Simon et al, 1998, cet ouvrage) et de leurs conséquences sur l'ensemble de l'exploitation laitière (Le Gall et al, 1998, cet ouvrage), notamment au travers de la répartition entre surfaces en herbe et en maïs.

1. QUANTIFICATION DES REJETS AZOTÉS CHEZ LA VACHE LAITIÈRE - PRINCIPAUX FACTEURS DE VARIATION

Chez la vache laitière, les quantités d'azote restituées dans les déjections (Ndéj) peuvent se calculer à partir du bilan entre l'azote ingéré (Ning) d'une part et l'azote exportée dans le lait (Nlait) d'autre part : $Ndéj (g/j) = Ning - Nlait$. Ces restitutions sont émises sous 2 formes distinctes, de composition et devenir très différents dans les fèces et l'urine. La quantité d'azote excrétée dans les fèces (Nfèces en g/j), peu variable selon la composition des régimes, est directement reliée aux quantités totales de MS ingérées (7,2 N/kg MSing). L'azote contenu dans les bouses est essentiellement sous forme organique, issu de l'azote alimentaire ou microbien non digéré et de l'azote endogène. L'azote urinaire, qui varie essentiellement avec l'excès ou le déséquilibre en azote de la ration ingérée, est estimable par différence entre l'azote total excrété et l'azote fécal : $Nurine (en g/j) = Ning - Nlait - Nfèces$. Chez le ruminant, cet excès d'azote de la ration peut se produire au niveau du rumen en terme d'azote dégradable en regard des besoins des microbes et/ou au niveau intestinal en terme d'acides aminés en regard des besoins de l'organisme. Dans les 2 cas, cet excès ou déséquilibre est catabolisé et abouti à la production d'urée qui diffuse dans l'organisme et constitue la fraction la plus variable, de 10 à 80 %, de l'azote urinaire (Peyraud et al, 1995 - Figure 1). Le système PDI permet de juger de cet état d'excès d'azote à la fois par le « bilan rumen » (apports PDIN - apports PDIE) et par le « bilan animal » (apports PDIE -

besoins PDI). La teneur en urée du lait est un critère d'estimation intéressant de la quantité journalière d'azote rejeté dans l'urine ou l'ensemble des déjections (Faverdin et Vérité, 1998, cet ouvrage).

Figure 1. Représentation schématique du métabolisme de l'azote chez le ruminant



La méthode de calcul et les principaux facteurs de variations des rejets azotés chez la vache laitière ont été décrits par Delaby et al (1995) lors des 2^{es} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants. Avec un régime à base d'ensilage de maïs dûment complété en UFL et PDI selon le logiciel INRation (1994), une vache laitière (7 500 kg de lait) ingère annuellement 131 kg d'azote dont 50 % proviennent du concentré. Dans ces conditions, 40 kg d'azote sont exportés dans le lait et pratiquement 70 % de l'azote ingéré est restitué dans les déjections, soit respectivement 42 kg et 49 kg dans les fèces et l'urine. Les rejets azotés s'élèvent alors à 12,1 kg par tonne de lait produite. Avec ce type de régime équilibré au mieux, l'accroissement du niveau de production laitière de 1000 kg par lactation entraîne un accroissement de la quantité annuelle de rejets azotés (+ 3,3 kg d'N fécal et + 4,0 kg d'N urinaire) mais une diminution des rejets azotés par tonne de lait produite du fait d'une dilution des besoins d'entretien. Avec une alimentation aux recommandations, ils varient ainsi de 13,3 à 11,2 kg par tonne de lait entre 6 000 et 9 000 kg de lait.

Les rejets azotés sont surtout très dépendants de la teneur en azote de la ration et donc de celle de ces 2 composants : fourrages et concentrés. A l'échelle de l'année, ces 2 composants évoluent selon le système fourrager et son degré d'intensification d'une part et la stratégie de complémentation d'autre part. A titre d'exemple, un régime annuel à base d'ensilage d'herbe (15 % MAT) pour une production de 7 500 kg de lait correspond à 153 kg d'azote ingérés dont 38 et 75 kg sont excrétés dans les fèces et l'urine.

Les simulations présentées par Delaby et al (1995) qui intègrent les grands types de régimes utilisés par les vaches laitières en France et optimisés en terme de complémentation ont permis de calculer les rejets azotés moyens mensuels émis en stabulation ou au pâturage (Tableau 1).

Selon la durée de chaque période alimentaire, les rejets azotés émis en stabulation ou directement sur les prairies ont été calculés en associant les 3 fourrages ci-dessus. Les résultats annuels sont présentés au tableau 2. L'accroissement de la part d'ensilage de maïs au détriment de l'herbe conservée plus riche en MAT réduit les rejets totaux en stabulation. L'introduction du pâturage entraîne un accroissement des rejets azotés totaux mais une réduction sensible de ceux émis en stabulation.

Tableau 1 : Rejets azotés moyens d'une vache laitière (6 000 kg de lait) selon le régime alimentaire

Site de restitution	MAT du fourrage (g/kg MS)	Rejets / tonne de lait (2)	Stabulation	Parcelle
Régime				
Ens. de maïs	80	13,3	6,7	
Ens. d'herbe	120	15,0	7,5	
	150	18,2	9,1	
Pâturage (1)	140	16,2	1,2	6,9
	180	22,4	1,7	9,5
	220	29,2	2,2	12,4

(1) En admettant 15 % des restitutions durant le séjour en bâtiment (traite,...) - (2) en kg N

Tableau 2 : Effet du système fourrager et de son utilisation sur les rejets azotés annuels (kg) d'une vache laitière (6 000 kg de lait)

Site de restitution	Stabulation					Parcelle
E.Maïs (mois) (1)	0	3	6	9	12	
Pâturage (18 % MAT)						
0 (mois)	109	102	95	88	80	0
3	87	80	73	65		29
6	65	58	50			57
9	43	35				86

(1) Le complément à 12 mois est constitué par la ration à base d'herbe conservée (15 % MAT).

Par combinaison linéaire, il est ainsi possible de quantifier les restitutions totales annuelles d'un troupeau au prorata du temps selon les différentes séquences alimentaires mensuelles de l'année et la combinaison des différents fourrages utilisés. L'effet du niveau de production du troupeau peut être pris en compte en admettant une variation des rejets de 5 % par tranche de 1 000 kg de lait. De même, en cas de période utilisant une ration mixte avec pâturage, la répartition des déjections entre stabulation et parcelle peut être fixée à 85/15 tant que les fourrages conservés représentent moins de 50 % de la ration puis devient 65/35 au delà de 50 %, compte tenu du temps de séjour en stabulation.

Outre la nature des fourrages dépendant du système fourrager, les pratiques de fertilisation azotée vont influencer la teneur en MAT du fourrage, les quantités d'azote ingérées et en conséquence les rejets azotés journaliers. Avec l'herbe pâturée, une augmentation de la teneur en MAT de 18 à 22 % entraîne un accroissement des rejets azotés journaliers de 30 % dont l'essentiel est éliminé par voie urinaire. Un excès d'apport d'azote dégradé (PDIN > PDIE) de 200 g/j entraîne un accroissement des rejets annuels d'environ 18 kg tandis qu'un excès d'apport d'acides aminés de 10 % (PDIE > besoins) augmentent les rejets de 13 kg/an (Peyraud et al, 1995), compte tenu d'une réponse modérée en protéines du lait (Vérité et Peyraud, 1988).

2. MAÎTRISE DE LA NUTRITION AZOTÉE : RELATIONS ENTRE PERFORMANCES ET REJETS AZOTÉS

Les rejets azotés sont donc directement et principalement reliés au niveau des apports azotés des rations que l'on peut maîtriser à travers le fourrage utilisé (nature et intensité d'exploitation i.e. fertilisation, stade) et par la complémentarité azotée. Ce dernier aspect est le plus facile à maîtriser techni-

quement. C'est aussi celui sur lequel on agit le plus volontiers, mais le plus souvent à la hausse, pour des raisons visant d'abord à améliorer les performances de production et d'élevage ainsi que l'efficacité alimentaire. Une raison plus subjective est également de se garantir contre tout risque de déficit en se justifiant par des arguments de sécurité nutritionnelle au plan digestif et métabolique dont les incidences concrètes sont très difficilement quantifiables.

En matière d'alimentation azotée, pour développer une stratégie de « juste milieu » entre les effets favorables sur les performances et l'efficacité alimentaire et les effets défavorables sur les rejets N, il est important de mieux connaître les relations quantitatives entre l'apport azoté et ces différents effets. Il est donc utile d'enrichir la notion de besoins et de recommandations azotées par leurs lois de réponse marginale et d'élargir cette approche aux rejets et à leurs relations avec les performances.

Il convient d'abord de souligner que de façon quasi générale (sauf déficit PDIN excessif; Vérité et Peyraud, 1988), un apport supplémentaire d'azote dégradé n'améliore pas les performances mais se retrouve en totalité dans l'urine. Nos essais récents ont confirmé qu'un déficit PDIN de 8 % reste tout à fait tolérable même avec des vaches au pic de production ayant pourtant un taux d'urée du lait assez faible. En effet, les performances ne sont pas modifiées par la correction de ce déficit en PDIN. Par ailleurs, les notions de qualité de l'azote dégradé (urée vs protéines dégradables), de synchronisation des cinétiques de disponibilité de l'énergie et de l'azote dégradables et d'activation microbienne par des facteurs variés ont souvent été soulevées à partir de considérations analytiques sur les phénomènes ruminiaux étudiés *in vitro* ou en situation extrême. Cependant, elles ne paraissent pas avoir une importance pratique sensible avec les rations laitières françaises usuelles à proportion de concentré moyenne.

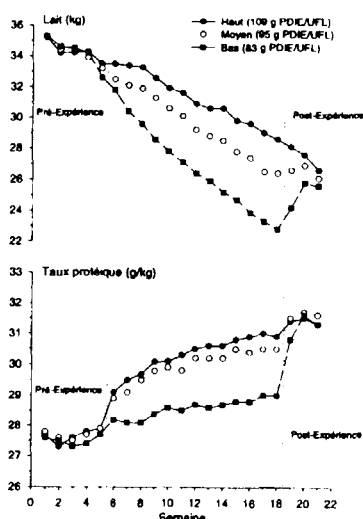
Par contre, le niveau des apports PDIE a des effets importants sur la production surtout si les apports sont en dessous des recommandations. Il a déjà été bien montré (Vérité et al, 1983; Vérité et al, 1987) que le niveau de production laitière s'accroît avec les apports PDIE selon la loi des rendements décroissants : en situation iso-énergétique, le rendement marginal de 100 g de PDIE est en moyenne de + 0,5 kg de lait aux alentours des recommandations, il est le double si l'apport PDIE initial est déficitaire de 15 % mais il est pratiquement nul en cas d'excédent de 15 %.

Pour élargir ces lois de réponse aux principaux paramètres de production et les adapter à différentes situations nutritionnelles (différents potentiels et stade de lactation, alimentation à volonté en rationnement classique ou en ration complète) un ensemble de 5 essais incluant plus de 30 traitements a été conduit à l'INRA-SRVL sur un total 250 vaches produisant 35 kg de lait et recevant à volonté une ration d'ensilage de maïs/concentré (environ 75/25 en moyenne). Une large gamme d'apport a été explorée de part et d'autre des recommandations : depuis - 300 g jusqu'à + 500 g PDI (soit de 80 à 125 g PDI/UFL) avec des animaux nourris à volonté, aussi bien en début de lactation avec des rations complètes qu'après le pic de production avec un rationnement classique. La synthèse des résultats en milieu de lactation présentés ci-après permettent d'illustrer les lois de réponse. Les phénomènes sont globalement similaires en début de lactation et sont présentés lors de ces rencontres par Faverdin et al (1998). Au pâturage, les mêmes lois ont été obtenues mais les effets d'une complémentarité protéique ne sont vraiment importants que pour des herbes à faible teneur en MAT (Delaby et al, 1996).

Dans tous ces essais, les augmentations d'apport entre les niveaux extrêmes de PDIE/UFL ont provoqué des écarts souvent importants non seulement de la production laitière (+ 4 à + 7 kg) mais également de la teneur (+ 1,5 à + 2,2 g/kg) et la quantité (+ 15 à + 30 %) de protéines vraies du lait, alors que la sécrétion de matières grasses augmente proportionnellement moins car le taux butyrique tend à diminuer (0 à - 4 g/kg). Il existe aussi un effet positif important sur l'ingestion (+ 1,0 à + 3,0 kg MS) dont le rôle est tout à fait central pour interpréter les autres réponses. L'efficacité alimentaire globale (kg

lait/kg MS) résultante est améliorée (8 à 12 %). Par contre le bilan énergétique n'est pratiquement pas modifié (ni positivement, ni négativement), ni le poids réel (sauf avec le niveau PDI le plus bas). La teneur en cellules du lait n'a pas été altérée. Bien entendu, les rejets azotés journaliers par animal sont accrus dans les fèces (+ 6 à 15 %) et surtout dans l'urine (+ 60 à 85 %) mais les pertes azotées par kg de lait produit n'augmentent sensiblement qu'au dessus des recommandations. De plus au cours des 3 mois d'expériences, les effets négatifs du niveau azoté bas ont eu tendance à s'accroître régulièrement avec le temps surtout pour la production laitière (figure 2) et l'ingestion, alors que classiquement en alimentation iso-énergétique ils se stabilisent après 2 à 4 semaines (Vérité et Journet, 1977). Ce phénomène cumulatif aurait pour origine l'évolution soutenue de l'ingestion probablement dictée par l'équilibre azote/énergie (N/E) de la ration et qui ne serait pas enrayerée par la baisse de la production et du besoin. Cependant, malgré l'importance des écarts finaux (de + 4 à + 12 kg de lait) il est remarquable de constater l'absence totale d'effets rémanents : les performances redeviennent absolument identiques dès la 3^e semaine après le retour à une alimentation commune.

Figure 2 : Evolution hebdomadaire des performances selon la teneur en PDIE/UFL de la ration (moyenne de 3 expériences - 159 vaches)



Les lois de réponse aux variations de teneur de la ration en PDIE/UFL sont présentées en détail à la figure 3 et les effets marginaux au tableau 3. Les sécrétions de lait, de matières grasses et de protéines suivent la loi des rendements décroissants de même que la teneur en protéines du lait et l'ingestion totale de MS. Aux alentours des recommandations (100 g PDIE/UFL) les rendements marginaux pour une variation de 5 g de la teneur en PDIE (soit environ + 100 g PDIE/vache/jour) sont de : + 0,6 kg de lait, + 0,2 point de taux pro-

téique, + 15 g de protéines pour + 0,25 kg de MS. Ces valeurs ne sont certes pas négligeables mais restent modérées et voisines de celles notées auparavant dans un contexte différent (ration iso-énergétique et animaux à moindre potentiel). Au-delà des recommandations les effets deviennent assez faibles. En revanche si l'on veut alimenter les vaches en dessous des recommandations pour réduire les rejets N, alors les effets négatifs prennent rapidement de l'ampleur pour la plupart de ces paramètres : le rendement marginal des PDI est déjà doublé pour un déficit de 10 % et triplé à 15 % (tableau 3). Curieusement, les réponses de la production et de l'ingestion à un même déficit d'apport PDI ne varient pas significativement avec le potentiel laitier des animaux (la baisse est seulement un peu plus importante chez les fortes productrices en cas de fort déficit), ni avec leur capacité d'ingestion intrinsèque. Par contre à même potentiel laitier, elles seraient plus prononcées avec des régimes plus riches en concentré (40 %) mais la relation de cause à effet reste à valider (Faverdin et al, 1998, cet ouvrage).

Les réponses des différents paramètres sous l'action du niveau d'apport PDIE ne sont pas indépendantes. Les réponses des quantités sécrétées (lait, MG, protéines) et du taux protéique sont liées de façon linéaire et positive (R² compris entre 0,6 et 0,8) entre elles ainsi qu'avec les réponses d'ingestion ; seul le TB varie en sens inverse des autres paramètres. A une variation d'ingestion de 1 kg MS induite spécifiquement par une variation de la concentration en PDIE du régime correspond une variation de même sens de 1,0 kg de lait, 45 g de MG, 41 g de protéines et 0,4 g de taux protéique. L'accroissement d'énergie ingérée provoquée par l'apport PDI explique environ la moitié de la réponse des paramètres de production ; l'autre moitié est directement attribuable à l'effet intrinsèque de la nutrition azotée.

L'efficacité alimentaire globale, exprimée en kg de lait produit par kg MS (ou par UFL), augmente de façon linéaire avec la teneur en PDIE de la ration jusqu'aux apports de 100-105 g PDIE/UFL mais elle n'augmente plus ensuite pour des apports supérieurs. L'amélioration provient de la dilution du besoin d'entretien sur une production accrue puisque l'efficacité des UFL « de production » n'est pas modifiée.

L'efficacité d'utilisation de l'azote apporté en supplément sous forme de PDIE (N lait supplémentaire/N ingéré supplémentaire) a été de 30 à 60 % pour les niveaux faibles de PDIE, de 15 à 25 % autour des recommandations mais pratiquement nulle au-delà de 105-110 g PDI/UF ; celle des suppléments de PDIN a toujours été pratiquement nulle. Néanmoins, l'excrétion journalière d'azote urinaire (g N/j) suit une loi pratiquement linéaire dans la gamme de PDI explorée avec une augmentation de 30 g N urinaire/vache/jour pour un accroissement de 10 g de la teneur en PDI/UFL. En comparaison, l'excrétion d'azote fécal varie assez peu puisqu'elle est directement proportionnelle à l'ingestion.

Les relations entre les réponses des rejets azotés et celles des performances de production sont curvilinéaires (Figure 3)

Tableau 3 : Réponses marginales à une augmentation de 5 g de la teneur en PDIE/UFL de la ration (Emais/Conc 75/25 - 3 mois)

	Moyenne													
PDIE/UFL	100	85	→	90	→	95	→	100	→	105	→	110	→	120
PDIE/MS	94	81	→	85	→	89	→	94	→	99	→	103	→	107
Ration totale (kg MS)	21,9	0,6		0,4		0,3		0,2		0,1		0,0		
Lait (kg)	30,2	1,45		1,00		0,70		0,50		0,35		0,20		
TP (g/kg)	30,2	0,50		0,35		0,25		0,20		0,10		0,00		
Protéines (g)	909	66		46		20		11		6		3		
N urinaire (g)	170	15		15		15		15		15		15		
Efficacité globale (kg lait/kg MS)	1,43	0,030		0,020		0,015		0,010		0,009		0,008		
N urine / N lait (g)	1,15	0,02		0,03		0,05		0,07		0,08		0,10		
N rejets / N lait (g)	2,22	-		-		0,04		0,06		0,09		0,12		

comme l'indiquent l'évolution des rejets azotés rapportés au lait produit (par kg lait ou par g de N du lait). Ainsi le « coefficient de perte urinaire » (N_{urine}/N_{lait}) est en moyenne de 1,30 avec une ration correspondant aux recommandations (100 g PDIE/UFL sans déséquilibre PDIN). Ce coefficient de perte urinaire est seulement légèrement plus faible (1,15) après une réduction de 15 % des apports PDIE alors qu'il est plus fortement accru (1,60) par un excès d'apport de 15 %. Bien entendu ce coefficient de perte dépend aussi du niveau de production laitière et du déséquilibre PDIN éventuel : il augmente de 0,1 point quand la production baisse de 5 kg ou quand le « bilan rumen » ($PDIN-PDIE/UFL$) augmente de 3 g.

Si l'on considère les rejets azotés totaux il est encore plus clair que la réduction des apports PDIE depuis une situation excédentaire permet dans un premier temps de réduire les pertes relatives (N_{rejets}/N_{lait}), mais qu'à partir de 100 g PDIE/UFL et en dessous ces pertes relatives atteignent une limite inférieure incompressible (2,3 dans nos conditions).

Le niveau des apports PDIE est bien un levier important qui permet de maîtriser non seulement la production et la composition du lait mais également l'ingestion et l'efficacité alimentaire. Il permet de moduler l'évolution de la lactation de façon souple et réversible c'est-à-dire sans effet rémanent. Par contre cette modulation par la baisse de la teneur en azote de la ration ne permet pas de résoudre les problèmes du déficit énergétique du début de lactation, au contraire puisque l'ingestion est réduite en proportion. La valeur moyenne de 100 g PDIE/UFL (soit 94 g PDIE/kg MS) issue des recommandations de 1988 représente bien un seuil critique. Ce seuil pourrait sans doute encore être affiné en particulier pour des rations plus extrêmes. Réduire les apports azotés en dessous de ce seuil conduit assez rapidement à des chutes de performances sensibles alors que les pertes azotées relatives (i.e. rapportées à la production) ne diminuent pratiquement plus. En revanche des excès d'apport PDIE conduisent assez rapidement à un surplus d'excrétion N que ne justifie pas les faibles réponses de production. Sur une lactation, l'écart de production atteindrait par extrapolation environ 400 kg de lait pour une augmentation des apports de 95 à 105 g PDIE/UFL.

3. RESTITUTIONS D'AZOTE AU PÂTURAGE - RELATIONS ENTRE LE TROUPEAU ET LA SURFACE PÂTURÉE

Au pâturage, les déjections sont pour l'essentiel émises directement sur la parcelle, séparément entre bouses et pissats, sur un couvert végétal actif. Leur répartition spatiale est très hété-

rogène, ce qui crée localement des apports d'azote très élevés au m^2 . La valorisation de cet azote par le couvert végétal est fonction du potentiel de croissance de la plante mais aussi de la dynamique temporelle de restitutions en regard des conditions climatiques (saison).

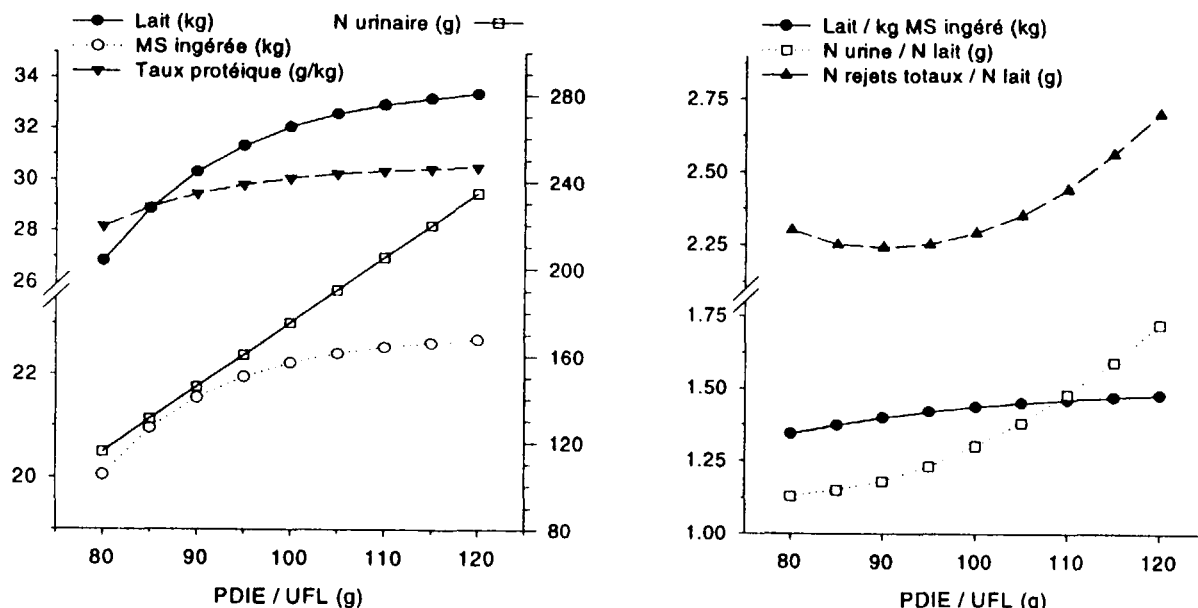
Au cours d'une saison de pâturage, les quantités d'azote qui retournent ainsi directement sur la prairie résultent du produit de 2 paramètres : le nombre de journées de pâturage réalisé par hectare (JPha) et la quantité d'azote émise par vache et par jour. Les principaux facteurs qui contribuent au second paramètre sont identiques à ceux évoqués précédemment : niveau de production laitière, quantités et teneur en azote de l'herbe consommée et pratiques de complémentation (quantité, nature). Le 1^{er} paramètre est sous la dépendance des conditions pédo-climatiques (minéralisation, pluviométrie), des facteurs de production (fertilisation, présence de légumineuse) et des conditions d'utilisation de la biomasse produite (charge, récolte, complémentation). Parmi ces facteurs, la fertilisation azotée intervient à la fois sur la production et la teneur en MAT de l'herbe. Cet intrant azoté, qui agit donc à 2 niveaux indépendants, joue un rôle considérable sur les performances animales et sur les quantités d'azote restituées par le troupeau au pâturage.

Au cours des années 90, de nombreuses expériences ont permis de décrire l'effet de la fertilisation azotée sur les performances laitières individuelles et par hectare (Delaby et Peyraud, 1998). Malheureusement, rares sont les auteurs qui se sont intéressés simultanément aux restitutions d'azote par le troupeau. A l'échelle de la parcelle et de la saison de pâturage, la quantification précise des rejets azotés reste très difficile puisque à la fois les quantités et la teneur en azote de l'herbe ingérée sont des données non disponibles. Néanmoins, la méthode d'estimation retenue par Delaby et al (1997) qui intègre les performances animales annuelles et la composition chimique de l'herbe offerte permet de décrire l'effet de facteurs de production tel que la fertilisation.

Par son effet d'ampleur variable mais positive sur la productivité primaire des prairies de graminées, la fertilisation azotée entraîne systématiquement une augmentation de la production de lait par hectare (Figure 4) grâce à un accroissement linéaire du nombre de jours de pâturage réalisé (+ 0,8 à + 0,9 jour/kg N, Delaby et Peyraud, 1998).

En effet, pour maintenir les performances individuelles et valoriser l'herbe produite en plus ou en moins selon le niveau de fertilisation appliqué, il s'avère impératif de réguler les quantités d'herbe offertes au troupeau.

Figure 3 : Lois de réponse aux variations de la teneur en PDIE/UFL de la ration



vache et par jour. Dans ces conditions, l'amplitude de la réponse de production laitière par hectare sous l'influence de la fertilisation azotée dépendra également du potentiel de production du troupeau concerné. Lors de l'expérience réalisée au Pin au Haras durant 5 années consécutives et comparant 3 niveaux de fertilisation azotée, la productivité laitière des prairies permanentes a varié respectivement de 10 700, 12 600 et 16 050 kg de lait 4 % pour 0, 120 et 300 kg N/ha/an et en conséquence 456, 550 et 689 jours de pâturage par hectare. L'effet de la fertilisation azotée sur les restitutions totales des vaches laitières au pâturage a été quantifié à partir des travaux de Deenen (1994) et Bussink (1994) au Pays-Bas et de nos travaux conduits en Normandie (Delaby et al, 1997). Pour tous ces auteurs, les rejets azotés par hectare augmentent avec le niveau de fertilisation azotée annuel des prairies (Figure 5). En référence au niveau de fertilisation le plus bas de chaque expérience, cet accroissement atteint en moyenne + 58 kg d'azote pour 100 kg d'azote minéral épandu dont 87 % sont associé à l'azote urinaire. Exprimé en rendement marginal, cette augmentation des rejets semble diminuer avec le niveau de fertilisation azotée notamment dans une expérience de Deenen (1994). Ceci traduit en fait la moindre efficacité de l'azote sur la biomasse produite pour les très hauts niveaux de fertilisation. A même fertilisation azotée, il existe néanmoins des variations non négligeables entre sites expérimentaux ou entre années. Ces variations sont associées aux différences de productivités des prairies en relation avec le pédo-climat.

Figure 4 : Effet de la fertilisation azotée annuelle sur la production laitière par hectare (d'après Delaby et Peyraud, 1998)

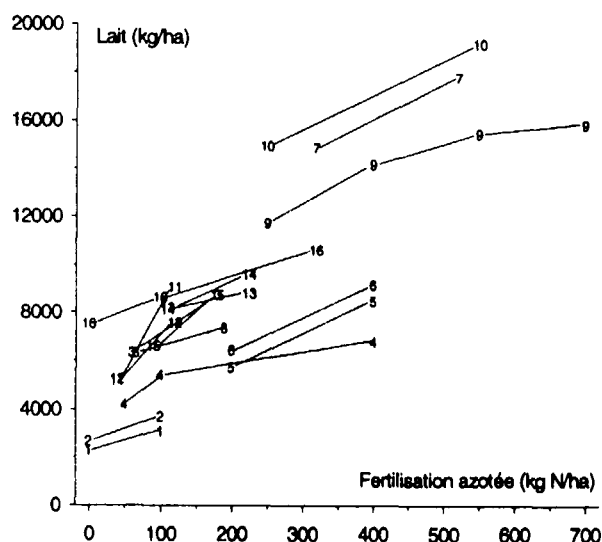
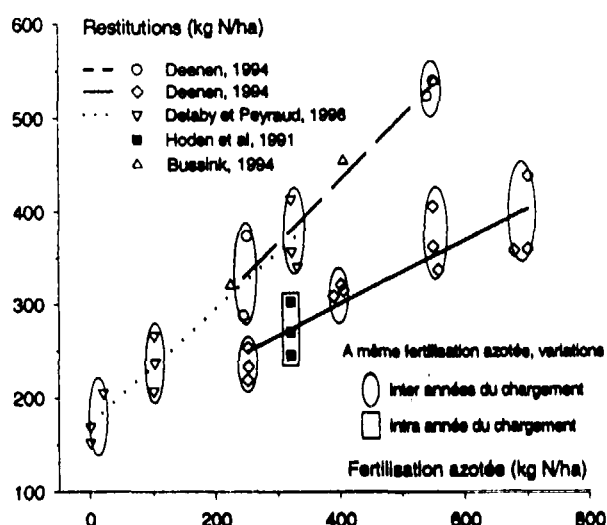


Figure 5 : Effet du niveau de fertilisation azotée ou du nombre de jours de pâturage réalisé sur les restitutions d'azote



En fait, lorsqu'au pâturage, le chargement s'accroît sous l'effet de la fertilisation azotée et que les performances individuelles donc le niveau d'ingestion journalier sont maintenus, le nombre de jours de pâturage est un critère synthétique qui intègre l'essentiel de ces variations et devient alors un excellent prédicteur des restitutions d'azote par les vaches laitières (Figure 5).

En d'autres termes, tout accroissement de la productivité laitière des prairies obtenu grâce à la fertilisation azotée entraîne inévitablement une augmentation linéaire des rejets azotés annuels par hectare (+ 33 kg N/1000 kg de lait en plus par ha). Rapporté au nombre de jours de pâturage (entre 400 et 1 000 jp/ha) obtenus grâce à l'augmentation de la fertilisation azotée, les rejets azotés totaux tant urinaires que fécaux s'alignent sur une droite d'équation :

$$N \text{ urine (kg/ha)} = -136 + 0,585 \times JPha$$

$$(n = 28 - Syx = 31,5 - R^2 = 0,88)$$

$$N \text{ fèces (kg/ha)} = 5,4 + 0,116 \times JPha$$

$$(n = 28 - Syx = 6,7 - R^2 = 0,87)$$

Dans ces conditions, les rejets azotés urinaires augmente 5 fois plus vite que ceux d'origine fécal. Cet accroissement plus rapide est la conséquence directe de l'évolution de la teneur en MAT de l'herbe offerte avec le niveau de fertilisation. L'excès d'azote dégradable (PDIN > PDIE), de plus en plus important, est alors éliminé par voie urinaire.

Pour un niveau de fertilisation azotée donné, les conditions de valorisation (chargement, complémentation) mises en œuvre par l'éleveur constituent une autre famille de facteurs qui modifie les performances par hectare et les restitutions d'azote par le troupeau. L'influence du chargement sur la production laitière par hectare a été bien décrite dans la littérature, notamment dans le cas de fertilisation élevée. Avec l'augmentation du chargement, les performances individuelles diminuent peu tandis que les performances par hectare sont généralement accrues (Hoden et al, 1991). A partir d'une synthèse bibliographique récente, Delaby et Peyraud (non publié) ont montré que la production par hectare s'accroît d'environ 1 500 kg de lait lorsque le chargement s'accroît d'une vache par hectare. Mais cette réponse moyenne est d'autant plus faible que le niveau de chargement témoin appliqué lors des expériences est élevé. Les restitutions d'azote vont également varier avec le chargement et seront directement associées au nombre de jours de pâturage réalisé en plus. Mais l'amplitude des variations est alors moins importante que celle décrite précédemment lorsque le chargement est régulé par la fertilisation. Les résultats complets publiés par Hoden et al (1991) permettent de calculer ces restitutions selon les 3 niveaux de chargement appliqués (Tableau 4).

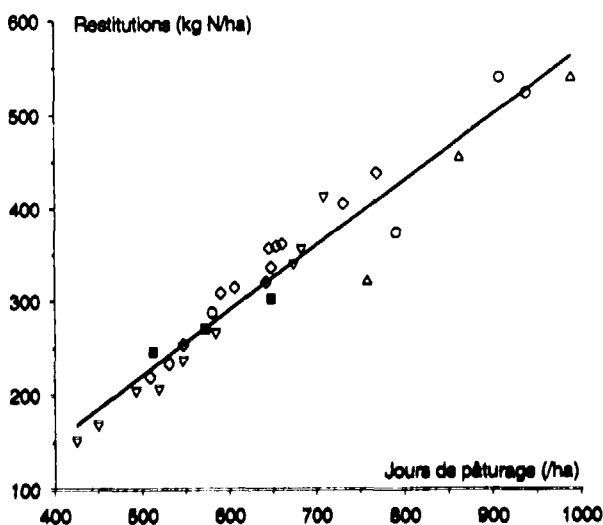


Tableau 4 : Effet du niveau de chargement annuel sur les restitutions d'azote au pâturage (d'après Hoden et al, 1991)

Chargement (vl/ha)	4,7	5,3	6,0
Jours de pâturage (/ha)	512	572	648
Nfèces (kg N/ha)	67	74	82
Nurine (kg N/ha)	178	196	220
Balance (kg N/ha)	+ 232	+ 225	+ 216

Pour 100 jours de pâturage réalisés en plus, les rejets d'azote urinaire et fécaux ont augmenté respectivement de + 30 et + 10 kg/ha. Cette augmentation résulte directement de l'effet du chargement sans interférence avec la teneur en MAT de l'herbe offerte similaire entre traitements conduits à même niveau de fertilisation azotée (300 kg N/ha/an). Avec l'augmentation du chargement *sensu stricto*, donc une meilleure valorisation de l'herbe produite, la balance azotée (Farruggia et al, 1997) ne varie pas ou s'améliore un peu. En effet, les exportations d'azote dans le lait et les déjections hors parcelle sont plus importantes rapportées à l'hectare tandis que les intrants en plus sont faibles puisqu'ils ne dépendent que de l'azote des aliments complémentaires consommés. Par contre, les flux internes sont accrus puisque les quantités d'herbe ingérées et restitutions par hectare augmentent avec le chargement.

Finalement, dans un contexte pédo-climatique donné, le niveau de fertilisation azotée détermine la biomasse produite et la quantité d'azote exportée par la plante qui constituent le déterminant principal du nombre de jours de pâturage possible et des rejets azotés par hectare. Les conditions de valorisation de cette production primaire à travers le chargement jouent ensuite un rôle modulateur. Avec une réduction de la fertilisation azotée associée à une réduction du chargement plus importante que celle induite par la moindre productivité des prairies, Delaby et al (1998, cet ouvrage) ont montré que les rejets azotés totaux par hectare peuvent être réduits de moitié (141 vs 287 kg N/ha). Grâce à une hauteur de l'herbe en sortie de parcelle plus élevée, les prairies peu fertilisées ont permis de produire plus de lait par vache et par jour (+ 1,0 kg) au détriment des performances par hectare (11 300 vs 17 250 kg de lait).

L'apport d'aliments complémentaires (fourrages ou concentrés) et leur nature (% MAT) vont modifier le nombre de journées de pâturage, les performances et les restitutions par hectare. Les quantités de concentré distribuées au pâturage sont généralement modérées et leurs conséquences sont minimales sur les bilans azotés par hectare. Avec une efficacité du concentré de 0,8 kg de lait et un taux de substitution de 0,5 kg de MS, l'utilisation d'un concentré à base de céréales donc pauvre en MAT (120 g/kg MS) n'a aucune conséquence sur les restitutions d'azote journalières. Si l'ingestion totale s'accroît sous l'influence de la complémentation alors, malgré une efficacité élevée (+ 1,2 kg lait/kg de concentré), les rejets azotés augmentent par vache mais ne varient pas par kg de lait produit (Peyraud et al, 1998, cet ouvrage). Finalement seul un accroissement substantiel du nombre de jours de pâturage permis par l'apport de concentré pourrait modifier sensiblement les restitutions par hectare.

A l'inverse, l'utilisation d'un concentré riche en protéines va accroître les quantités totales d'azote ingérées par le troupeau et par hectare. Inévitablement, à même nombre de jours de pâturage, les rejets azotés sont alors accrus par cet apport de concentré comme l'ont montré Soegaard et Aaes (1996). Ces auteurs ont observé durant une saison complète de pâturage (165 j) un accroissement des restitutions de 145 kg d'azote par hectare en modifiant la teneur en MAT du concentré de 143 à 315 g/kg MS (Tableau 5). De même selon Delaby et al (1996), l'utilisation de tourteaux tannés en comparaison avec un concentré à base de céréales accroît les rejets azotés de respectivement + 27 et + 46 kg d'azote sur prairies de graminées

fertilisées à raison de 20 ou 60 kg N par hectare et par cycle au printemps (63 jours). L'importance de cette augmentation dépend peu du rendement marginal en terme de protéines du lait, même si sur prairies peu fertilisées la réponse zootechnique a été meilleure. L'essentiel de l'écart est dû à la différence de chargement induite par la fertilisation azotée (respectivement 206 et 312 journées de pâturage/ha) qui modifie par hectare les entrées d'azote associées au concentré.

Tableau 5 : Effet de la nature du concentré sur les flux annuels d'azote au pâturage (d'après Soegaard et Aaes, 1996)

Type de prairie	RGA (300 kg N/ha)		RGA-TB (0 kg N/ha)	
Concentré (kg N/ha)	117	250	117	250
Jours de pâturage (/ha)	833	816	777	794
Nlait (kg/ha)	117	121	111	116
Nfèces (kg/ha)	100	99	92	95
Nurine (kg/ha)	199	354	231	366

L'utilisation de l'ensilage de maïs en complément de l'herbe pâturée est une voie efficace et souvent évoquée aux Pays-Bas (Van Vuuren et Meijs, 1987) pour réduire les rejets azotés par jour. Les quantités totales d'azote ingérées et donc restituées dans les déjections par les vaches complémentées sont toujours plus faibles que celles des vaches alimentées avec l'herbe seule (Valk, 1994), surtout si les quantités d'herbe offertes sont limitées. L'écart entre les 2 régimes dépend surtout de la proportion d'ensilage de maïs introduite dans la ration. Mais les enjeux concernant les restitutions par hectare de prairies pâturées sont beaucoup moins évidents. Au pâturage, l'utilisation d'ensilage de maïs se traduit en fait par un transfert d'azote entre les surfaces fourragères (maïs et herbe) via les déjections animales. En effet, pour valoriser l'herbe produite, l'apport de fourrages complémentaires rend nécessaire l'application d'un chargement plus élevé ou permet un allongement de la saison de pâturage. En conséquence, le nombre de jours de pâturage réalisé par hectare s'accroît et l'effet favorable de l'ensilage de maïs sur les restitutions par hectare pâturé est ainsi fortement amputé. Selon les résultats de Valk (1994) et de Van Vuuren et Meijs (1987), qui rapportent une diminution des rejets quotidiens de respectivement 219 g d'azote (594 g vs 375 g) et 143 g (519 vs 376 g) avec 50 % d'ensilage de maïs, il s'avère que l'intérêt des rations mixtes est nul si le nombre de jours de pâturage s'accroît de + 58 et + 38 %. Cette différence importante entre auteurs est due pour l'essentiel aux écarts d'azote ingéré par les vaches alimentées à l'herbe seule (100 g/j).

Au pâturage, les performances tout comme les rejets d'azote par hectare vont surtout varier avec le nombre de JPha, eux même sous l'influence essentielle de la fertilisation azotée mais aussi de la présence de légumineuses. Les conditions de valorisation de l'herbe produite à travers le chargement ou la complémentation énergétique, qui modulent également le nombre de jours de pâturage réalisé par hectare, ont des conséquences plus limitées sur les restitutions d'azote.

CONCLUSION

Les quantités d'azote ingérées par les vaches laitières influent simultanément sur les performances et les restitutions d'azote dans les déjections. Mais l'importance des variations observées et intégrées sous forme de lois de réponse dépend de l'état de nutrition azotée de l'animal et de son rumen. De part et d'autre de la valeur critique de 100 g de PDIE/UFL, les conséquences zootechniques évoluent différemment. A l'inverse, tout excès d'apport PDIN par rapport aux PDIE augmentent systématiquement les rejets sans modifier les performances. Au pâturage, l'azote est avant tout un élément nécessaire à la production d'herbe qui modifie le nombre de jours de pâturage possible et ses conséquences. L'enrichissement important de la plante en azote est alors subi et les excès de PDIN sont très

fréquents pour ne pas dire permanents. Une réduction significative des restitutions d'azote au pâturage dépend surtout des niveaux d'intrants azotés utilisés tant par la fertilisation, les légumineuses que la complémentation.

Mais finalement, si la maîtrise de la nutrition azotée permet d'éviter les situations excès qui sont biologiquement inefficaces et peuvent être dommageables pour l'environnement, l'analyse du devenir de ces masses d'azote associés à l'élevage laitier lors de leur utilisation agronomique est nécessaire pour quantifier les risques réels de pollution par volatilisation ou lixiviation.

Bussink D.W., 1994. Fertilizer Research, 38, 111-121.

Deenen P.J.A.G., 1994. Nitrogen use efficiency in intensive grassland farming. Thèse, Department of Agronomy, Wageningen, Pays-Bas.

Delaby L., Peyraud J.L., Vérité R., 1995. Renc. Rech. Ruminants, 2, 349-353.

Delaby L., Peyraud J.L., Vérité R., Marquis B., 1996. Ann. Zootech., 45, 327-341.

Delaby L., Decau M.L., Peyraud J.L., Accarie P., 1997. Fourrages, 151, 297-311.

Delaby L., Peyraud J.L., 1998. Ann. Zootech., 47, 17-39.

Delaby L., Peyraud J.L., Bouttier A., Peccatte J.R., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Faverdin P., Delaby L., Vérité R., Marquis B., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Faverdin P., Vérité R., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Farruggia A., Decau M.L., Vertès F., Delaby L., 1997. Fourrages, 151, 281-296.

Hoden A., Muller A., Peyraud J.L., Delaby L., Faverdin P., 1991. INRA, Prod. Anim., 4 (3), 229-239.

INRA tion, 1994. Logiciel d'aide au rationnement. Travail collectif coordonné par J. AGABRIEL. Ed ENESAD-CNERTA 21000 Dijon, France.

Le Gall A., Legarto J., Cabaret M.M., Farruggia A., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Peyraud J.L., Vérité R., Delaby L., 1995. Fourrages, 142, 131-144.

Peyraud J.L., Delaby L., Delagarde R., Marquis B., 1999. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Simon J.C., Decau M.L., Morvan T., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, cet ouvrage.

Soegaard K., Aaes O., 1996. In PARENTE G. et al (Eds), Grasslands and land use systems. ERSa, Gorizia, Italia, 621-624.

Valk H., 1994. Livestock Production Science, 40, 241-250.

Van Vuuren A.M., Meijs J.A.C., 1987. In VAN DER MEER H.G. et al (Eds), Animal Manure on Grassland and Fodder Crops. Martinus Nijhoff, Dordrecht, Netherlands, 17-25.

Vérité R., Journet M., 1977. Ann. Zootech, 26, 183-205.

Vérité R., Dulphy J.P., Journet M., 1983. Bull. Tech. CRZV de Theix, 52, 43-51.

Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Bull. Tech. CRZV de Theix, 70, 19-34.

Vérité R., Peyraud J.L., 1988. In JARRIGE R. (Ed), Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA Paris, France, 75-93.