

# **AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée par les vaches laitières. I- Les flux associés à l'animal**

L. Delaby<sup>1</sup>, M.L. Decau<sup>2</sup>,  
J.L. Peyraud<sup>1</sup>, P. Accarie<sup>1</sup>

**La gestion de l'azote devient une préoccupation majeure des éleveurs laitiers. Les prairies constituent un réel potentiel de valorisation de l'azote mais les restitutions animales au pâturage modifient les enjeux. Evaluer ces restitutions est une étape indispensable pour pouvoir analyser le cycle de l'azote en prairie pâturée.**

## *RÉSUMÉ*

*La description des flux d'azote sous prairies pâturées nécessite de quantifier les flux inhérents à la présence de l'animal. Les connaissances acquises en alimentation des ruminants et quelques observations permettent de calculer les flux d'azote fécal et urinaire restitués à la parcelle pâturée par les vaches laitières. Il est ainsi possible de calculer l'ingestion d'azote par le troupeau et de répartir cet azote ingéré entre 3 fractions (lait, urine, fèces). Le rôle important du couple fertilisation - chargement sur les flux d'azote par hectare liés à l'animal est souligné par les auteurs. Cette démarche s'intègre dans une analyse complète (dénommée AzoPât) du système sol - plante - animal dans le cas du pâturage.*

## **MOTS CLÉS**

Azote, bilan d'azote, chargement animal, fertilisation azotée, modélisation, pâturage, prairie, restitutions, vache laitière.

## **KEY-WORDS**

Dairy cow, excreta returns, grazing, nitrogen, nitrogen balance, nitrogen fertilization, pasture, setting-up of models, stocking rate.

## **AUTEURS**

1 : I.N.R.A., Station de Recherches sur la Vache Laitière, F-35590 Saint-Gilles.

2 : I.N.R.A.-I.R.B.A., Université de Caen, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen cedex.

**L**es élevages laitiers doivent aujourd'hui intégrer dans la gestion de l'azote de nouvelles contraintes environnementales imposées par les réglementations européennes et justifiées par l'augmentation continue des teneurs en nitrate des eaux de surface et des nappes phréatiques. L'utilisation optimale de l'azote dans les systèmes de production devient une préoccupation majeure afin de limiter les pertes par lessivage ou volatilisation.

Parmi les principales ressources alimentaires des ruminants, la prairie se caractérise par un potentiel de valorisation de l'azote très important. En effet, sur les prairies, l'accroissement des intrants azotés (fertilisation, fixation symbiotique) se traduit par une augmentation simultanée de la biomasse produite et de la teneur en azote de cette biomasse, qui aboutit généralement à des coefficients apparents d'utilisation de l'azote élevés (WHITEHEAD, 1995). Ce potentiel constitue un atout non négligeable dans le contexte environnemental d'aujourd'hui. Malgré cela, des risques de volatilisation et surtout de lessivage existent, notamment dans le cas des prairies pâturées (RYDEN, 1984).

**Au pâturage, l'animal contribue directement au cycle de l'azote par ses fonctions d'ingestion et de transformation de l'azote en produits animaux et en déjections** directement restituées à la parcelle (SIMON *et al.*, 1997). Les principaux facteurs de variation de ces restitutions d'azote urinaire et fécal ont été étudiés (KEMP *et al.*, 1979 ; VAN VUUREN et MEIJS, 1987 ; DELABY *et al.*, 1995). L'effet des déjections au pâturage sur la production, la composition chimique de l'herbe et la fertilité des prairies a été abondamment décrit (LANÇON, 1978 ; LANTINGA *et al.*, 1987 ; HAYNES et WILLIAMS, 1993). Enfin, depuis les années 90, de nombreuses expérimentations destinées aux mesures de lessivage ou de volatilisation d'azote à l'échelle de la parcelle pâturée ont été entreprises dans différents pays de l'Europe de l'Ouest (JARVIS *et al.*, 1989 ; BARRACLOUGH *et al.*, 1992 ; DECAU et SALETTE, 1994). L'intégration de l'ensemble de ces éléments épars dans une description quantifiée des flux d'azote en prairie pâturée est devenue une nécessité afin de hiérarchiser à la fois les risques et les facteurs de risques en matière de pertes de nitrate vers les nappes aquifères ou de pertes d'ammoniac vers l'atmosphère. Cette approche de modélisation à l'échelle de l'année et de la parcelle a d'ailleurs déjà été développée (SCHOLEFIELD *et al.*, 1991 ; VAN DE VEN, 1992 ; THOMAS, 1992).

A partir de quelques éléments chiffrés caractérisant la saison de pâturage écoulée, **l'objectif de ces deux articles est de permettre le calcul des différents postes d'un bilan annuel d'azote pour une parcelle pâturée**. Le premier article propose une méthode de calcul des quantités annuelles d'azote ingérées par les vaches laitières et restituées dans les déjections au pâturage. Cette méthode, appliquée aux résultats zootechniques d'une expérience réalisée au Pin-au-Haras (DELABY et PEYRAUD, 1998), permettra d'insister sur l'importance du couple fertilisation - chargement dans les restitutions d'azote au pâturage. Dans un second article, DECAU *et al.* (1997, même ouvrage) décriront le devenir des différentes sources d'azote mises à disposition de la prairie afin d'aboutir à la simulation des flux d'azote au pâturage (AzoPât) au sein du système sol - plante - animal.

## Présentation simplifiée du cycle de l'azote au pâturage

Bien que représenté différemment selon les auteurs, le cycle de l'azote en prairie pâturée se résume systématiquement à **un ensemble de flux entre les 3 pools du système : le sol, la plante et l'animal** (SIMON *et al.*, 1989 ; HAYNES et WILLIAMS, 1993 ; HUTCHINGS et KRISTENSEN, 1995). La parcelle pâturée, qui englobe ces 3 pools, se caractérise alors par des entrées et des sorties d'azote (figure 1).

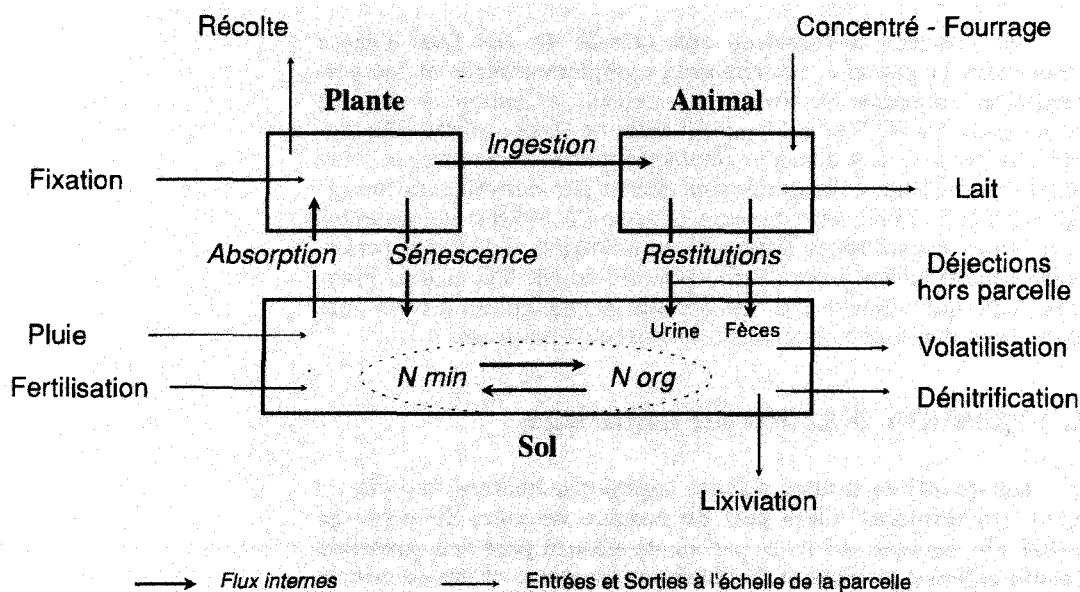
L'azote minéral du sol a 3 origines distinctes : 1/ la minéralisation de l'azote organique du sol ou d'une partie de la plante sénescente, 2/ les apports exogènes d'azote minéral (fertilisation, pluie) et 3/ au pâturage, la minéralisation de l'azote de l'urine et des fèces. En regard de la demande en azote par la plante, les excès momentanés d'azote minéral peuvent être transformés en azote organique ou vont se traduire par des pertes d'azote (dénitrification, volatilisation, lixiviation) si les circonstances agroclimatiques le permettent.

La plante assimile pour sa croissance de l'azote minéral prélevé dans le sol et/ou de l'azote atmosphérique dans le cas des légumineuses. Durant l'année, l'essentiel de cet azote est valorisé par l'animal ou exporté lors des récoltes par fauche. Le reste retourne au sol sous forme organique par sénescence de la plante.

La vache laitière intervient sur les flux d'azote par l'ingestion d'azote issu de l'herbe pâturée ou des aliments complémentaires distribués, par les exportations de lait ou de déjections hors parcelle (sur les chemins ou en stabulation durant la traite biquotidienne) et enfin par les restitutions hétérogènes et localisées d'azote sous 2 formes très différentes : l'urine et les fèces.

FIGURE 1 : Représentation schématique du cycle de l'azote au pâturage.

FIGURE 1 : Schematic diagram of the cycle of nitrogen on a grazed pasture.



A l'échelle de la parcelle, les entrées d'azote sont donc constituées de la fertilisation, de la pluie, de la fixation symbiotique et des aliments complémentaires distribués aux animaux. Les sorties d'azote comprennent celles exportées sous forme de récolte ou de lait, les déjections émises hors parcelle et les pertes sous forme gazeuse (dénitrification, volatilisation) et par lixiviation. Selon le principe du bilan de masse, le solde annuel qui résulte de ces entrées et sorties correspond à un enrichissement ou à un appauvrissement de la parcelle en azote sous forme organique.

## Quantification annuelle de l'ingestion, des exportations et des restitutions d'azote par les vaches laitières au pâturage

### 1. Hypothèses et données nécessaires

Les transferts annuels d'azote associés au module "Animal" sont donc constitués d'entrées (ingestion d'herbe et d'aliments complémentaires) et de sorties d'azote (lait, déjections). **AzoPât estime a posteriori l'ingestion d'herbe à partir des performances laitières** observées sur la parcelle. Les quantités d'herbe ingérées dépendent des besoins énergétiques annuels du troupeau au pâturage, après déduction des apports d'aliments complémentaires. **Les restitutions d'azote dans les déjections correspondent alors à la différence entre l'azote ingéré et l'azote du lait.**

**Les données nécessaires aux calculs de ces flux d'azote concernent la parcelle, les aliments complémentaires et les performances animales.** Au niveau de la parcelle, le nombre de jours de pâturage réalisés (JP) et la teneur en azote de l'herbe offerte (Nh) doivent être connus. Les aliments complémentaires (concentrés et fourrages) éventuellement distribués sont décrits par leurs valeurs énergétiques (UFLc et UFLf), leurs teneurs en azote (Nc et Nf) et les quantités journalières consommées (MSing(C) et MSing(F)). Enfin, les performances individuelles journalières, quantité de lait (PL) et taux butyreux (TB), qui influent sur les besoins énergétiques, doivent être connues en moyenne pondérée sur la saison de pâturage.

### 2. Ingestion d'azote au pâturage

**Les quantités totales d'azote ingéré par hectare ( $N_{ing}(T)$ , en kg/ha/an) résultent d'une part du nombre de jours de pâturage réalisé (JP, exprimé par ha et par an) et d'autre part des quantités d'azote ingérées provenant de l'herbe consommée et des éventuels**

**aliments complémentaires** (concentré, fourrages) distribués aux animaux pendant leur séjour sur la parcelle.

Le nombre de JP est calculé facilement à partir du temps de séjour sur la parcelle, de l'effectif quotidien du troupeau et de la surface de la parcelle considérée. Ces éléments sont issus de l'enregistrement du calendrier de pâturage.

Les quantités de matière sèche ingérées sous forme de concentré (MSing(C), en kg/jour) et de fourrages complémentaires (MSing(F), en kg/jour), ainsi que leur teneur en azote (Nc et Nf, en g/kg MS), permettent de calculer les entrées d'azote Ning(C) et Ning(F), en kg/ha, à partir des aliments ingérés extérieurs à la parcelle :

$$\text{Ning(C)} = (\text{MSing(C)} \times \text{Nc}/1000) \times \text{JP} \quad (1)$$

$$\text{Ning(F)} = (\text{MSing(F)} \times \text{Nf}/1000) \times \text{JP} \quad (2)$$

La teneur en azote de l'herbe offerte (Nh, en g/kg MS), très variable selon la saison, la fertilisation azotée et la présence de légumineuses, correspond à la moyenne des teneurs en azote de l'herbe offerte mesurées à chaque cycle, moyenne pondérée par la biomasse présente à l'entrée des animaux sur la parcelle.

A l'échelle de la saison complète de pâturage, le calcul des quantités d'herbe ingérées par le troupeau repose sur l'hypothèse d'un bilan énergétique global équilibré entre besoins et apports.

Les besoins énergétiques individuels moyens journaliers (BesUFL, en UFL/jour/vache) dépendent (INRA, 1988) des besoins d'entretien (5 UFL/jour), de production laitière (0,44 UFL/kg de lait 4%), de reprise de poids et de croissance (1 UFL/jour) et des dépenses liées à l'activité de pâturage (1 UFL/jour). La production laitière moyenne (PL, en kg/jour/vache), pondérée du nombre de JP à chaque passage sur la parcelle, ainsi que le taux butyreux (TB, en g/kg) sont des données issues des bordereaux de livraisons à la laiterie ou des contrôles individuels.

$$\text{BesUFL} = 7 + 0,44 \times \text{PL}4\%$$

$$\text{avec PL}4\% = \text{PL} \times (0,4 + 0,015 \times \text{TB})$$

Au pâturage, l'énergie ingérée sous forme d'aliments complémentaires est fonction des quantités de matière sèche ingérée sous forme de concentré et de fourrage (MSing(C) et MSing(F)) et de la valeur énergétique (UFLc et UFLf par kg MS) de chaque composant de la ration complémentaire. En admettant une valeur énergétique moyenne de l'herbe ingérée (UFLh par kg MS) sur la saison de pâturage de 0,90 UFL/kg MS, les quantités d'herbe ingérées moyennes journalières (MSing(H), en kg MS/jour/vache) se calculent selon la formule :

$$\text{MSing(H)} = (\text{BesUFL} - \text{MSing(C)} \times \text{UFLc} - \text{MSing(F)} \times \text{UFLf}) / 0,90$$

Finalement, l'azote ingéré par le troupeau provenant de l'herbe produite sur la parcelle (Ning(H), en kg/ha) correspond à :

$$\text{Ning(H)} = (\text{MSing(H)} \times \text{Nh}/1000) \times \text{JP} \quad (3)$$

et l'azote total ingéré par le troupeau au pâturage (Ning(T), en kg/ha) devient :

$$\text{Ning(T)} = \text{Ning(H)} + \text{Ning(C)} + \text{Ning(F)}$$

### 3. Exportations et restitutions d'azote au pâturage

Comme pour l'alimentation hivernale (DELABY *et al.*, 1995), **l'azote ingéré par la vache laitière au pâturage se répartit en totalité dans le lait, les fèces et l'urine**. La fixation d'azote sous forme de protéines corporelles est en effet très limitée chez la vache laitière et sa prise en compte dans les bilans reste très difficile.

**L'azote exporté dans le lait** dépend du niveau de production laitière moyen journalier (PL), du taux protéique (TP, en g/kg) et de la teneur en azote non protéique du lait (1,6 g/kg en moyenne), soit  $PL \times (TP + 1,6) / 6,38$ . En moyenne, nous considérerons que chaque kg de lait produit contient 5,1 g d'azote. Ainsi, les quantités d'azote exportées par hectare dans le lait (N<sub>lait</sub>, en kg/ha) sont calculées selon la formule :

$$N_{\text{lait}} = (PL \times 0,0051) \times JP \quad (4)$$

**Les quantités d'azote excrétées par jour dans les fèces** sont essentiellement fonction des quantités de matières sèches totales ingérées (MSing(T), en kg/jour) qui correspondent à la somme des composantes de la ration (MSing(H), MSing(C) et MSing(F)). La quantité totale d'azote restitué par hectare dans les fèces (N<sub>fèces(T)</sub>, en kg/ha) est calculée par l'équation :

$$N_{\text{fèces(T)}} = (MSing(T) \times 0,0072) \times JP$$

Finalement, **l'excrétion totale d'azote urinaire par hectare** (N<sub>urine(T)</sub>, en kg/ha) **se déduit** de l'égalité suivante :

$$N_{\text{urine(T)}} = N_{\text{ing(T)}} - N_{\text{lait}} - N_{\text{fèces(T)}}$$

Durant la période de pâturage, les vaches laitières rentrent le plus souvent 2 fois par jour en stabulation pour la traite et la consommation éventuelle de concentrés et de fourrages. Durant ces périodes, les déjections émises ne retournent pas directement à la parcelle. Elles sont exportées sur les chemins, en salle de traite ou en stabulation. La bibliographie donne peu d'informations sur la répartition des mictions au cours de la journée. En admettant une répartition moyenne uniforme des déjections durant la journée, les quantités d'azote restituées directement à la parcelle sont calculées au prorata du temps passé sur la parcelle. En l'absence d'apports de fourrages complémentaires en quantité importante nécessitant un séjour prolongé en stabulation, le coefficient retenu est de 80%. **Les quantités d'azote fécal et urinaire émises par hectare sur la parcelle** (N<sub>fèces(Parc)</sub> et N<sub>urine(Parc)</sub>, en kg/ha) correspondent respectivement à :

$$N_{\text{fèces(Parc)}} = 0,8 \times N_{\text{fèces(T)}} \quad (5)$$

$$N_{\text{urine(Parc)}} = 0,8 \times N_{\text{urine(T)}} \quad (6)$$

Les déjections extérieures à la parcelle (N<sub>déj(Ext)</sub>, en kg/ha) représentent alors 20% de l'azote total des déjections émises :

$$N_{\text{déj(Ext)}} = 0,2 \times (N_{\text{fèces(T)}} + N_{\text{urine(T)}}$$

## Effet combiné de la fertilisation et du chargement sur les flux d'azote liés à l'animal au pâturage

Durant l'expérience réalisée en Normandie, au Pin-au-Haras (Orne), l'effet de **3 combinaisons de fertilisation azotée et de chargement sur les performances zootechniques** a été étudié pendant 5 années consécutives. Afin de valoriser l'herbe à même âge de repousses et d'offrir aux animaux une quantité d'herbe identique dans les 3 traitements, **la réduction de la fertilisation azotée s'est accompagnée d'une réduction simultanée et proportionnelle du chargement. Les 3 traitements, dénommés Haut (H), Moyen (M) et Bas (B)**, ont correspondu à des apports annuels de fertilisation azotée de respectivement 320, 100 et 0 kg N/ha/an. Les chargements correspondants ont été, en moyenne, au printemps (et en automne sur la surface totale) de 5,0 (2,5), 3,8 (2,0) et 3,1 (1,7) vaches/ha. La synthèse des résultats zootechniques de cette expérience pluriannuelle a été rapportée par DELABY et PEYRAUD (1998). Globalement, **les performances individuelles journalières** (production et composition du lait) **n'ont pas différé entre traitements**. En conséquence, **la réduction des performances par hectare a été directement proportionnelle à la réduction du nombre de jours de pâturage réalisés par hectare, réduction induite par la limitation des intrants azotés.**

Les données nécessaires au calcul des flux d'azote liés à l'animal sont rapportées au tableau 1 et correspondent aux résultats moyens enregistrés lors des 3 dernières années (1992-1994) sur prairies permanentes. Ces surfaces ont été pâturées durant 5 cycles, sans aucune récolte par fauche.

TABLEAU 1 : Données utilisées pour le calcul de l'ingestion, des exportations et des restitutions d'azote au pâturage selon le niveau de fertilisation et de chargement (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, prairies permanentes uniquement pâturées).

TABLE 1 : Data utilized for the determination of the amounts of nitrogen ingested, exported, and returned in grazing systems, according to the level of fertilization and the stocking rate (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, permanent pastures grazed only).

### 1. Ingestion et restitutions d'azote par vache et par jour

Traitement (fertilisation - chargement)	Bas	Moyen	Haut
Jours de pâturage, JP (/ha/an)	456	550	689
Production laitière, PL (kg/j)	24,2	23,6	23,7
Taux butyreux, TB (g/kg)	39,0	38,5	38,3
<b>Aliments complémentaires ingérés (kg MS/j)</b>			
- Concentrés, MSing(C)	2,3	2,2	2,3
- Fourrages, MSing(F)	1,3	1,2	1,2
<b>Teneur en N des aliments (g/kg MS)</b>			
- Herbe, Nh	25,1	28,4	35,4
- Concentrés, Nc	45,1	45,1	45,1
- Fourrages, Nf	13,6	13,6	13,6
<b>Valeur UFL des aliments (UFL/kg MS)</b>			
- Concentrés, UFLc	1,10	1,10	1,10
- Fourrages, UFLf	0,85	0,85	0,85

Traitement (fertilisation - chargement)	Bas	Moyen	Haut
<b>Flux d'azote :</b>			
- Ingré (a)	506	549	655
(g N/vache/jour) - Lait (b)	123	120	120
- Fèces	137	134	134
- Urine	246	295	401
<b>Rendement N lait (b/a, %)</b>	<b>24,3</b>	<b>21,9</b>	<b>18,3</b>

En l'absence de variation significative des performances individuelles journalières, **les quantités d'azote exportées dans le lait (121 g/jour/vache) et excrétées dans les fèces (135 g/jour/vache) n'ont pas varié avec les traitements** appliqués (tableau 2). **Les quantités totales d'azote ingérées et excrétées dans l'urine ont augmenté linéairement avec la fertilisation azotée annuelle** (en moyenne respectivement +48 et +50 g/jour/vache pour 100 kg N/ha en plus).

A même niveau d'intrants azotés issus des aliments complémentaires (119 g/jour), ces augmentations de l'azote ingéré et urinaire sont la conséquence directe de l'accroissement des quantités d'azote ingérées provenant de l'herbe. Dans la mesure où la fertilisation azotée n'a pas entraîné de modifications importantes de la valeur UFL de l'herbe (DELABY et PEYRAUD, 1998) et d'ingestion d'herbe selon les hypothèses d'AzoPât, les variations d'excrétion moyenne journalière d'azote urinaire peuvent être attribuées essentiellement aux **variations de teneur en azote de l'herbe** consécutives à l'augmentation de fertilisation azotée. Ces teneurs ont évolué en moyenne annuelle pondérée de respectivement 25,1 ; 28,4 et 35,4 g N/kg MS pour les traitements Bas, Moyen et Haut (tableau 1).

## 2. Ingestion, exportations et restitutions d'azote par hectare et par an

Au cours de cette expérience, quel que soit le traitement considéré, **les quantités d'azote exportées par hectare dans le lait ont été du même ordre de grandeur que celles introduites sur la parcelle à partir des aliments complémentaires** distribués aux animaux. Entre traitements, ces quantités d'azote ont varié **proportionnellement au nombre de jours de pâturage** (tableau 3).

**Les quantités d'azote ingéré issues de l'herbe ont évolué selon une loi curvilinéaire croissante avec le niveau de fertilisation.** Elles ont augmenté de 66 kg N/ha pour 100 JP entre les traitements B et M et de 94 kg N/ha pour 100 JP entre les traitements M et H.

Les quantités totales (fèces et urine) d'azote excrétées par hectare par les vaches laitières, y compris celles en dehors de la parcelle pâturée, se sont accrues avec le nombre de JP réalisé et donc avec le niveau de fertilisation azotée. Elles ont été respectivement de 369, 235 et 175 kg N pour les traitements Haut, Moyen et Bas.

TABLEAU 2 : Effet du niveau de fertilisation et de chargement sur les flux d'azote journaliers par animal (g N/vache/jour) et le rendement en lait de l'azote ingéré (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, prairies permanentes uniquement pâturées).

TABLE 2 : Effect of level of fertilization and stocking rate on the daily nitrogen flows by animal (g N/cow/day) and on the efficiency on milk yield of the ingested N (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, permanent pastures grazed only).



TABLEAU 3 : Effet du niveau de fertilisation et de chargement sur les flux d'azote par hectare (en kg N/ha/an) du module "Animal".

TABLE 3 : Effect of level of fertilization and of stocking rate on the N flows per hectare (kg N/ha/year) in the "Animal" module.

	Entrées	Flux internes	Sorties	
<b>Traitement Bas</b> (fertilisation : 0 kg N/ha/an, 456 Jours de Pâturage)				
Herbe ingérée		176	56	Lait
Concentré ing.	47		35	Déjections hors parcelle
Fourrages ing.	8	50		Fèces
		90		Urine
<b>Traitement Moyen</b> (100 kg N/ha/an, 550 JP)				
Herbe ingérée		238	66	Lait
Concentré ing.	55		47	Déjections hors parcelle
Fourrages ing.	9	59		Fèces
		129		Urine
<b>Traitement : Haut</b> (320 kg N/ha/an, 689 JP)				
Herbe ingérée		369	83	Lait
Concentré ing.	71		74	Déjections hors parcelle
Fourrages ing.	11	74		Fèces
		221		Urine

Les restitutions d'azote fécal par hectare à la parcelle ont été directement proportionnelles au nombre de JP (+ 10 kg N/100 JP). En revanche, les restitutions d'azote urinaire s'accroissent de façon curvilinéaire avec le chargement et la fertilisation. Entre les traitements B et M, cette augmentation a été de 41 kg/ha pour 100 JP en plus tandis qu'elle atteint 66 kg/ha pour 100 JP entre M et H.

## Discussion - conclusion

### 1. Calcul des rejets azotés au pâturage : limites méthodologiques

L'estimation précise des rejets azotés des vaches laitières au pâturage dépend pour l'essentiel de la quantification de l'azote ingéré. En effet, l'azote exporté dans le lait est une donnée bien connue en élevage. De plus, les protéines du lait ne représentent au pâturage que 15 à 25% de l'azote ingéré (tableau 2 ; DEENEN, 1994).

La méthode de répartition des rejets azotés en azote fécal et urinaire ne présente pas d'incertitudes spécifiques une fois connues les quantités totales de matière sèche ingérées. Le coefficient 0,0072 affecté aux rejets d'azote fécal correspond à une simplification de la relation linéaire entre la teneur en azote du régime ingéré et la quantité d'azote non digestible par kg de MSing(T) (DEMARQUILLY *et al.*, 1995 ; PEYRAUD, 1993). Nfèces (en g/kg MSing(T)) s'exprime selon la relation suivante, obtenue chez les vaches laitières :

$$Nfèces = 4,8 + 0,083 \times Nt, \quad (R^2 = 0,64, Syx = 0,62, n=42)$$

Nt (en g/kg MSing(T)) correspondant à la teneur moyenne en azote de la ration pondérée des différents constituants de la ration (PEYRAUD, résultats non publiés). L'utilisation d'un coefficient constant (0,0072), qui évite l'estimation de Nt, est sans conséquence pratique dans les conditions habituelles de pâturage des vaches laitières.

**Le calcul des quantités d'herbe ingérées moyennes** basé sur les besoins énergétiques des animaux **reste, à l'échelle de la saison de pâturage, une méthode suffisamment précise et bien adaptée à la notion de bilan annuel.** Elle présente le **défaut majeur de reposer sur les performances animales observées et donc de n'être disponible qu'a posteriori.** Une autre méthode de calcul des quantités moyennes annuelles d'herbe ingérée est possible à partir de la capacité d'ingestion de l'animal et la valeur d'encombrement de l'herbe offerte (INRA, 1988). Ce calcul, qui repose également sur la production de lait 4% observée, modifie très peu les résultats annuels en comparaison de ceux obtenus à partir des besoins énergétiques. De plus, il suppose que les conditions de pâturage permettent à l'animal de satisfaire sa capacité d'ingestion et nécessite une bonne connaissance du coefficient d'encombrement du concentré au pâturage.

Dans un objectif de description dynamique de l'ingestion et donc des restitutions au pâturage, il serait souhaitable de prédire les quantités ingérées journalières à partir non seulement des caractéristiques de l'animal mais aussi des caractéristiques du couvert végétal. Mais les modèles disponibles (PEYRAUD *et al.*, 1996) ne permettent pas actuellement d'intégrer les situations très variables rencontrées au pâturage telles que la quantité et la qualité de l'herbe offerte, la saison ou les pratiques de complémentation.

**Une limite certaine à l'utilisation d'AzoPât reste la nécessité de connaître la teneur en azote de l'herbe offerte (Nh) à chaque cycle et de la pondérer à l'échelle de l'année.** Par définition, celle-ci est mesurée à partir de prélèvements d'herbe qui permettent également de connaître la biomasse présente (DECAU *et al.*, 1997, même ouvrage). D'autres méthodes de prélèvements sont possibles telles que la récolte aux ciseaux ou par poignées (MEIJS *et al.*, 1982). Plus simples à mettre en oeuvre, ces méthodes ne renseignent pas sur la biomasse mais permettent de mieux prendre en compte la hauteur de pâturage des animaux. En l'absence de prélèvements, la teneur en azote de l'herbe doit pouvoir localement être prédite à partir des conditions de production et d'exploitation des prairies (fertilisation, espèces, âge de repousses, hauteur des refus, présence de légumineuse). Mais la multiplicité des situations rend délicate l'élaboration de modèle simples, construits à partir de variables disponibles.

Selon les hypothèses d'AzoPât, **la teneur en azote de l'herbe ingérée est la même que celle de l'herbe offerte aux animaux.** Bien que toujours admise par les différents auteurs (DEENEN, 1994 ; SOEGAARD et AAES, 1996), **cette hypothèse sous-estime sans doute la réalité,** ce qui influe sur le calcul des quantités d'azote restituées. Au pâturage, les animaux consomment préférentiellement les strates supérieures de la végétation, plus riches en azote, et la hauteur en sortie de parcelle est souvent supérieure à la hauteur de coupe de l'échantillon d'herbe offerte. Ainsi, DELAGARDE *et al.* (1997) ont montré, lors de

mesures sur talles étirées, que la teneur en azote de l'herbe ingérée pouvait être supérieure de 3 à 5 g/kg MS à celle de l'herbe offerte. Au Pin-au-Haras, sur le traitement Haut, si la teneur en azote de l'herbe consommée est majorée de 4 g/kg MS (+ 11%), les quantités totales d'azote urinaire (seules concernées par cette variation) s'accroissent de 41 kg/ha/an (+ 10%).

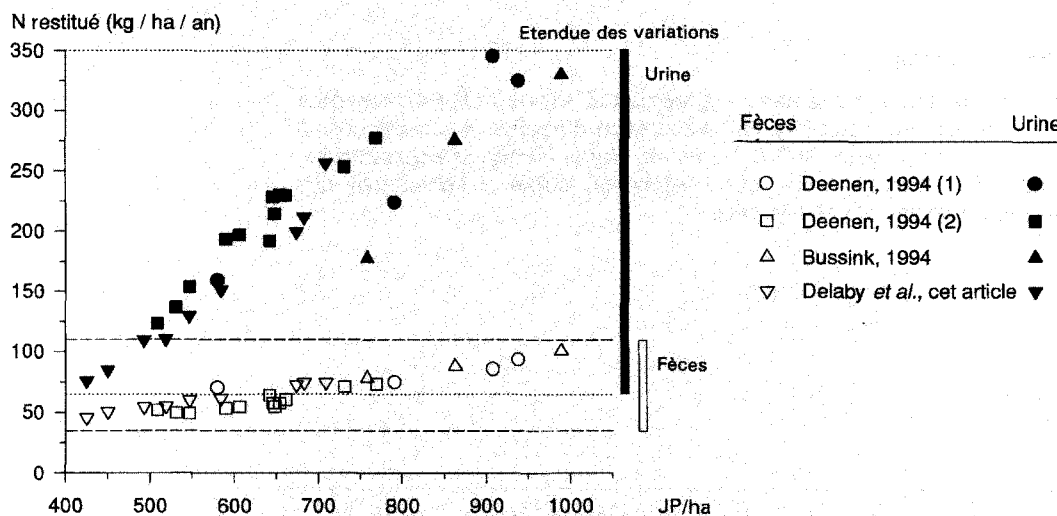
D'autre part, lors de temps de séjour longs sur la parcelle (pâturage libre ou tournant simplifié), les animaux bénéficient de la croissance de l'herbe, ce qui modifie la teneur en azote par rapport à l'offert. Enfin, les refus accumulés au cours de la saison de pâturage sont peu consommés et peuvent être de teneurs plus faibles en azote. Finalement, **les conditions de pâturage imposées par l'éleveur (quantité d'herbe offerte, hauteur sortie) vont conditionner la teneur en azote de l'herbe ingérée.** Tous ces éléments rendent **très délicate la prise en compte de la sélection opérée par l'animal à l'échelle du bilan annuel pour estimer avec précision la teneur en azote réelle de l'herbe ingérée.**

## 2. Facteurs de variation des rejets azotés au pâturage

FIGURE 2 : Effet du nombre de journées de pâturage réalisé par hectare sur les restitutions d'azote fécal et urinaire à la parcelle.

FIGURE 2 : Effect of the number of grazing days on the amounts of nitrogen returned in the faeces and the urine to a hectare of pasture.

A l'échelle de la saison de pâturage, **tous les facteurs de variation de la quantité d'azote ingéré** vont donc contribuer à modifier les quantités d'azote restituées à la parcelle. L'utilisation d'un concentré riche en protéines, qui peut dans certaines situations améliorer les performances zootechniques et accroître les quantités d'azote exportées dans le lait (DELABY *et al.*, 1996), entraîne inévitablement une augmentation des rejets urinaires par hectare de prairie (DELABY *et al.*, 1996 ; SOEGAARD *et al.*, 1996). L'excès de légumineuses dans la biomasse de la prairie va également entraîner un surcroît d'azote excrété dans les déjections.



**La fertilisation azotée quant à elle joue un rôle déterminant** dans le cycle de l'azote au pâturage. **Son utilisation accroît simultanément la teneur en azote de la plante et le nombre de journées de pâturage réalisé par hectare.** L'augmentation de la teneur en azote de la plante se traduit par un accroissement des restitutions quotidiennes d'azote urinaire du troupeau. Le nombre de journées de pâturage réalisées en plus grâce à la fertilisation azotée démultiplie l'effet de la teneur en azote de la plante. L'accroissement de la fertilisation azotée se traduit donc par un double effet multiplicatif sur les restitutions d'azote urinaire à la prairie. Au Pin-au-Haras, l'apport de 320 kg N/ha/an a accru les rejets azotés fécaux et urinaires restitués à la parcelle de respectivement 48% et 245% par rapport au traitement Bas (tableau 3). Lors d'expériences combinant différents niveaux de fertilisation azotée et de chargement, DEENEN (1994) et BUSSINK (1994) ont également mis en évidence cet effet multiplicatif (figure 2). A partir des données disponibles dans leurs publications, nous avons recalculé les rejets azotés fécaux et urinaires selon les hypothèses d'AzoPât (7,2 g Nfèces/kg MSing(T)) sans modifier le niveau d'ingestion d'herbe mesuré ou calculé par les auteurs. Selon ces relations, **les quantités d'azote urinaire restituées à la parcelle augmentent 5 fois plus vite par jour de pâturage que l'azote fécal** (+ 0,47 et + 0,09 kg N urinaire et fécal par jour de pâturage en plus par hectare).

Sur prairies pâturées, les flux d'azote liés à l'animal sont d'autant plus élevés que celui-ci consomme un régime riche en azote. Mais l'azote des déjections restituées à la parcelle provient pour l'essentiel d'un fourrage " vivant " dont l'une des caractéristiques essentielles est d'être capable d'absorber de grandes quantités d'azote durant la saison de pâturage. **L'azote des déjections ne constitue en fait qu'un pool circulant au sein du cycle de l'azote. Le devenir de cet azote mis à disposition du système sol - plante va conditionner les risques de pertes et donc de pollutions** atmosphériques ou aquatiques.

Accepté pour publication, le 18 août 1997.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier d'une part R. VÉRITÉ et P. FAVERDIN pour leurs conseils judicieux lors de l'élaboration d'AzoPât et d'autre part le personnel du domaine I.N.R.A. du Pin-au-Haras (Orne), et tout particulièrement A. BOUTTIER, pour leur contribution suivie à l'ensemble des mesures expérimentales réalisées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRACLOUGH D., JARVIS S.C., DAVIES G.P., WILLIAMS J. (1992) : "The relation between fertilizer nitrogen applications and nitrate leaching from grazed grassland", *Soil Use and Management*, 8(2), 51-56.
- BUSSINK D.W. (1994) : "Relationships between ammonia volatilization and nitrogen fertilizer application rate, intake and excretion of herbage nitrogen by cattle grazed swards", *Fertilizer Res.*, 38, 111-121.
- DECAU M.L., SALETTE J. (1994) : "Reducing nitrate leaching by manipulating the cutting/grazing and N fertilization level regimes", *Workshop Proc. 15<sup>th</sup> Gen. Meet. Europ. Grassl. Fed.*, 6 - 9 Juin, Wageningen, The Netherlands, 213-217.
- DEENEN P.J.A.G. (1994) : *Nitrogen use efficiency in intensive grassland farming*, doctoral thesis, Department of Agronomy, Wageningen, The Netherlands, 140 p.
- DELABY L., PEYRAUD J.L., VÉRITÉ R. (1995) : "Influence du niveau de production laitière et du système d'alimentation sur les rejets azotés du troupeau", *2<sup>e</sup> Renc. Rech. Ruminants*, 4 et 5 décembre, Paris-La Villette, 349-354.
- DELABY L., PEYRAUD J.L., VÉRITÉ R., MARQUIS B. (1996) : "Effect of protein content in the concentrate and level of nitrogen fertilization on the performance of dairy cows in pasture", *Ann. Zootech.*, 45, 327-341.
- DELABY L., PEYRAUD J.L. (1998) : "Effet d'une réduction simultanée de la fertilisation azotée et du chargement sur les performances des vaches laitières au pâturage", *Ann. Zootech.*, 47 (1).
- DELAGARDE R., PEYRAUD J.L., DELABY L. (1997) : "The effect of nitrogen fertilization level and protein supplementation on herbage intake, feeding behaviour and digestion in grazing dairy cows", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 66, 165-180.
- DEMARQUILLY C., CHENOST M., GIGER S. (1995) : "Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations", *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*, Eds Jarrige R. et al., INRA Publications, Paris, 601-647.
- HAYNES R.J., WILLIAMS P.H. (1993) : "Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem", *Advances in Agronomy*, 49, 119-199.
- HUTCHINGS N.J., KRISTENSEN I.S. (1995) : "Modelling mineral nitrogen accumulation in grazed pasture: will more nitrogen leach from fertilized grass than unfertilized grass/clover ?", *Grass and Forage Sci.*, 50, 300-313.
- INRA (1988) : *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, Ed Jarrige R., INRA Publications, Paris, 476 p.
- JARVIS S.C., HATCH D.J., ROBERTS D.H. (1989) : "The effects of grassland management on nitrogen losses from grazed swards through ammonia volatilization ; the relationship to excretal N returns from cattle", *J. Agric. Sci., Camb.*, 112, 205-216.
- KEMP A., HEMKES O.J., VAN STEENBERGEN T. (1979) : "The crude protein production of grassland and the utilization by milking cows", *Neth. J. Agric. Sci.*, 27, 36-47.
- LANÇON J. (1978) : "Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets", *Fourrages*, 75, 55-88 et 76, 91-122.

- LANTINGA E.A., KEUNING J.A., GROENWOLD J., DEENEN P.J.A.G. (1987) : "Distribution of excreted nitrogen by grazing cattle and its effect on sward quality, herbage production and utilization", *Animal Manure on Grassland and Fodder Crops. Fertilizer or Waste ?*, Eds Van der Meer H.G. et al., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 103-117.
- MEIJS J.A.C., WALTERS R.J.K., KEEN A. (1982) : "Swards methods", *Herbage Intake Handbook*, Ed Leaver J.D., British Grassland Society, Maidenhead, Berkshire, United Kingdom, 11-36.
- PEYRAUD J.L. (1993) : "Comparaison de la digestion du trèfle blanc et des graminées prairiales chez la vache laitière", *Fourrages*, 135, 465-473.
- PEYRAUD J.L., COMERON E.A., WADE M.H., LEMAIRE G. (1996) : "The effect of daily herbage allowance, herbage mass and animal factors upon herbage intake by grazing dairy cows", *Ann. Zootech.*, 45, 201-218.
- RYDEN J.C. (1984) : "The flow of nitrogen in grassland", *Proc. Fertilizer Soc. of London*, n°229, Peterborough, United Kingdom, 43 pages.
- SCHOLEFIELD D., LOCKYER D.R., WHITEHEAD D.C., TYSON K.C. (1991) : "A model to predict transformations and losses of nitrogen in UK pastures grazed by beef cattle", *Plant and Soil*, 132, 164-177.
- SIMON J.C., DE MONTARD F.X., LE CORRE L., PÉPIN D. (1989) : "Rôle agronomique de la prairie dans la gestion du drainage des nitrates vers la nappe phréatique", *Fourrages*, 119, 227-241.
- SIMON J.C., PEYRAUD J.L., DECAU M.L., DELABY L., VERTÈS F., DELAGARDE R. (1997) : "Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux pâturés", *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Colloque INRA, 19 et 20 Novembre 1996, Reims, France, 201-216.
- SOEGAARD K., AAES O. (1996) : "The effect of protein levels in feed supplements on herbage production and animal performance under continuous grazing with dairy cows", *Grassl. and Land Use Systems*, Eds Parente et al., ERSO, Gorizia, Italie, 621-624.
- THOMAS R.J., (1992) : "The role of the legume in the nitrogen cycle of productive and sustainable pastures", *Grass and Forage Sci.*, 47, 133-142.
- VAN DE VEN G.W.J. (1992) : *Grasmod, a grassland management model to calculate nitrogen losses from grassland*, Report n°158, CABO-DLO, Wageningen, The Netherlands, 109 p.
- VAN VUUREN A.M., MEIJS J.A.C. (1987) : "Effect of herbage composition and supplement feeding on the excretion of nitrogen in dung and urine by grazing dairy cows", *Animal Manure on Grassland and Fodder Crops. Fertilizer or Waste ?*, Eds Van der Meer H.G. et al., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 17-25.
- WHITEHEAD D.C. (1995) : *Grassland Nitrogen*, Ed CAB International, Wallingford, United Kingdom, 397 p.

SUMMARY

***A quantified description of yearly nitrogen flows on a pasture grazed by dairy cows. I- Flows linked to the animals***

Environmental constraints regarding nitrogen management are nowadays assigned to dairy farms. Pastures, which constitute the main feed resource of the herd, have a great aptitude for using nitrogen efficiently. The excreta of grazing stock are directly returned to the soil and constitute a large flow of nitrogen of variable nature (faeces, urine) and composition, which affect the nitrogen cycle. In order to analyse the risks of N losses by volatilization and leaching in grazing systems, the N flows linked to the presence of animals have to be quantified. This paper shows how the total amounts of N ingested are calculated from 1) the energy requirements of the herd, which depend on the performances observed, and 2) the N content of available herbage. The returns of faecal nitrogen depend mainly on the amount of dry matter ingested, while urine N corresponds to the difference between ingested N and N exported in the milk and the faeces. Nitrogen fertilization plays a key role in the determination of the amount of N returned to the soil by excreta. For each grazing day gained by the application of N fertilizer, there is an increase in urine N returns fivefold the amount of faecal N (0.47 and 0.09 g/ha respectively). This first paper on the quantification of nitrogen returns on grazed pastures is part of a complete analysis of the soil - plant - animal system called AzoPât, described in a second paper.