

AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée par les vaches laitières. II- Les flux du système sol - plante

M.L. Decau¹, L. Delaby², B. Roche¹

Dans l'étude du cycle de l'azote des systèmes prairiaux pâturés, la mesure du rôle de l'animal et de l'ensemble des pertes possibles est difficile. Le modèle AzoPât permet de quantifier *a posteriori* l'ensemble des flux à l'échelle de la parcelle et donne une simulation cohérente des pertes d'azote depuis ces systèmes.

RÉSUMÉ

Le modèle AzoPât établit un bilan d'azote dans l'agrosystème prairial Sol-Plante-Animal à l'échelle annuelle. Il calcule les pertes par volatilisation, dénitrification et lessivage ainsi que la variation annuelle du compartiment Norganique du sol par le bilan annuel de l'azote à la parcelle. Il est bien adapté aux peuplements mixtes (graminées - trèfle blanc) et aux divers modes d'exploitation (fauche, pâture). Bâti à partir d'une synthèse de références bibliographiques, il couvre une large gamme de conditions pédo-climatiques. Son utilisation dans le cas d'une prairie permanente pâturée souligne la cohérence des résultats obtenus et son acceptabilité pour prédire les pertes. Il est aussi utilisé pour simuler l'introduction d'une fauche.

MOTS CLÉS

Azote, bilan d'azote, fertilisation azotée, fixation symbiotique de l'azote, lessivage, modélisation, pâturage, prairie, restitutions, vache laitière.

KEY-WORDS

Dairy cow, excreta returns, grazing, leaching, nitrogen, nitrogen balance, nitrogen fertilization, pasture, setting-up of models, symbiotic nitrogen fixation.

AUTEURS

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

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

Depuis une dizaine d'années, l'étude de l'impact des agrosystèmes prairiaux sur l'environnement a fait l'objet d'un effort de recherche croissant, en particulier sur les aspects de lessivage de l'azote en conditions de prairies pâturées. En effet, au pâturage, des résultats déjà anciens (GARWOOD et RYDEN, 1986 ; SCHOLEFIELD *et al.*, 1991) ont montré que les quantités d'azote nitrique perdues par lessivage pouvaient atteindre des valeurs élevées (plus de 160 kg N/ha/an). D'autres travaux plus récents (DECAU et LE CORRE, 1994 ; DECAU et SALETTE, 1994) ont souligné que même de faibles quantités d'azote perdues pouvaient conduire à polluer les nappes aquifères du fait que la faible lame drainante présentait une concentration élevée en nitrate (jusqu'à 250 mg NO₃/l). Aujourd'hui, des travaux importants témoignent de l'intérêt croissant pour les pertes par voies gazeuses à partir de ces systèmes pâturés (JARVIS et HATCH, 1994 ; JARVIS *et al.*, 1995). Les difficultés techniques et le coût des méthodes à mettre en oeuvre pour mesurer directement ces phénomènes rendent difficile leur utilisation à grande échelle et dans les situations les plus diverses. Ceci conduit à **développer des systèmes de simulation qui donnent une estimation acceptable de ces différentes pertes et qui permettent de tester l'impact de modifications des pratiques culturales** afin de promouvoir celles qui minimisent les pertes.

L'objectif de cet article est de **proposer une méthode de calcul détaillée des flux annuels d'azote du système Sol - Plante - Animal des prairies pâturées (AzoPât)**. Les flux concernant l'animal ont été décrits dans l'article précédent (DELABY *et al.*, 1997, même ouvrage). Cette méthode reprend **deux principes de fonctionnement** les plus répandus : **un bilan de masse et une analyse des transferts à l'échelle de l'année**. Elle nécessite un nombre assez important de données d'entrée pour fonctionner afin de minimiser les écarts à la réalité dus à la multiplicité de sous-modèles complexes développés dans d'autres types de modèles. Elle présente également l'avantage d'être adaptée aux peuplements monospécifiques ou mixtes graminées - trèfle blanc et aux modes d'exploitation divers (fauche, pâture).

Description du système Sol - Plante utilisé pour AzoPât

■ Principes et approximations

Le cycle de l'azote en prairie pâturée se décrit classiquement à partir de trois pools d'azote qui interagissent dans le sol, la plante et l'animal. Les divers flux ont été rappelés de façon simplifiée dans le premier article (DELABY *et al.*, 1997, même ouvrage). Les données issues du module Animal (Ning(H), Nurine(Parc) et Nfèces(Parc)) sont utilisées dans le module Sol - Plante de AzoPât. La représentation des flux du système Sol - Plante adopté pour AzoPât est **une représentation théorique**, non strictement conforme à la réalité, **qui détermine le devenir des diverses sources d'azote** (Nurine(Parc), Nfèces(Parc) et

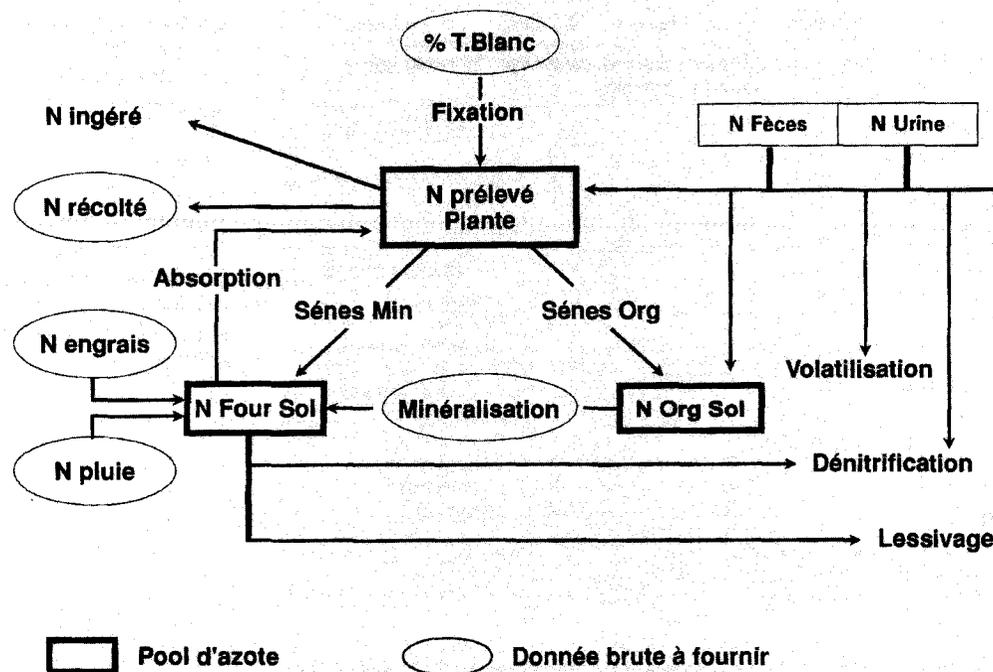


FIGURE 1 : Représentation graphique des relations du système Sol - Plante utilisées pour AzoPât.

FIGURE 1 : *Diagram of the relationships in the soil - plant system used in the AzoPât model.*

$N_{min}(Sol)$ indépendamment les unes des autres (figure 1). Cette indépendance entre les compartiments, qui n'est pas réelle, se justifie par deux raisons principales. D'une part, l'azote des déjections retourne à la parcelle avec une répartition spatiale très hétérogène, contrairement aux apports par la pluie ou les engrais. D'autre part, l'azote des déjections est surtout sous forme organique stable dans les fèces et sous forme uréique rapidement minéralisable dans l'urine. Enfin, l'analyse de très nombreuses expériences disponibles dans la bibliographie permet aisément la quantification des flux d'azote des déjections tels qu'ils sont décrits par AzoPât.

AzoPât permet, à partir de plusieurs données à fournir et de coefficients de répartition, la quantification à l'échelle annuelle des flux d'azote dans le système Sol - Plante - Animal. Ces flux peuvent être en relation avec l'extérieur du système (ils sont alors appelés variables d'entrée ou de sortie) ou internes au système. Les données à fournir et les données fournies par le module ne seront pas forcément des variables.

■ Présentation

Le tableau récapitulatif des résultats de AzoPât (tableau 1) est conforme à la réalité du cycle de l'azote ; il comprend quatre colonnes. Les deux colonnes extérieures (gauche et droite) représentent respectivement les entrées et les sorties du système Sol - Plante - Animal à

Postes d'entrée	Entrées parcelle	Flux internes		Sorties parcelle	Postes de sortie
		Entrées module	Sorties module		
Module Animal					
Ingestion herbe		X		D	Lait
Ingestion concentré	D			X	Déjections hors parcelle
Ingestion fourrage	D		X		Fèces
			X		Urine
Module Plante					
Fixation	X		X		Ingestion
Absorption		X		D	Récolte
			X		Sénescence totale
Module Sol					
Fertilisation	D		X		Absorption
Pluie	D		X		Organisation
Sénescence minérale		X		X	Volatilisation
Minéralisation		D		X	Dénitrification
Fèces		X		X	Lixiviation
Urine		X			
Solde Norg(Sol)			X		

TABLEAU 1 : Présentation synthétique par module des flux d'azote quantifiés par le modèle AzoPât (D: données à fournir ; X: données calculées).

TABLE 1 : *Synthesis per module of the quantified nitrogen flows given by the AzoPât model* (D : data to be supplied ; X : calculated values).

l'échelle de la parcelle telles quelles sont généralement identifiées. Les deux colonnes centrales représentent les flux internes au système Sol - Plante - Animal (entrées et sorties des trois modules). On y retrouve en particulier le lien entre les modules Plante et Animal par le biais de l'ingestion, le lien entre Animal et Sol par le retour des déjections, et le lien entre Plante et Sol par la sénescence et l'absorption. En ligne, les postes sont regroupés autour des trois modules (Animal, Plante, Sol) à partir desquels les flux entrent ou sortent. Le solde du bilan (Entrées - Sorties du système) représente la variation annuelle du stock d'azote organique du sol (variation interne du pool et non flux).

La plante assimile de l'azote minéral qui a trois origines : Nurine(Parc), Nfèces(Parc) et Nfour(Sol). Par ailleurs, en présence de légumineuses, le peuplement s'approvisionne depuis l'extérieur du système par fixation symbiotique (Nfix). L'azote prélevé par le peuplement (Nprélevé) est partiellement consommé par les animaux (Ning(H)) ou récolté (Nrécolté). La partie non consommée retourne au sol par sénescence sous forme organique et à l'échelle de l'année une fraction se minéralise (NsénesMin) ; le solde annuel, qui reste organique, est appelé NsénesOrg.

L'azote du sol se trouve sous forme minérale et organique (Norg(Sol)) ; des échanges entre ces deux compartiments résulte une minéralisation nette. On mesure la variation annuelle du compartiment Norg(Sol) par différence entre les entrées (sénescence, fèces, urine) et la sortie (minéralisation). Sous le terme **Nfour(Sol)**, nous définissons un compartiment minéral de taille nulle en début et en fin d'année. En cours d'année, il est alimenté par les postes suivants (en kg/ha) : la minéralisation, les apports atmosphériques, les engrais et NsénesMin :

$$Nfour(Sol) = \text{Minéralisation} + \text{Nengrais} + \text{Npluie} + \text{NsénesMin} \quad (7)$$

Auteurs	Conditions de l'essai*		Devenir de l'azote		
	Pédoclimat	Animal	Plante	Volatilisation	Norg(Sol)
BALL et KEENEY, 1981	Sol limoneux, drainé, pH=5,5	B	33		
BALL et RYDEN, 1984	Sol limoneux, drainé, pH=5,5	B	30	29	
BALL <i>et al.</i> , 1979	Sol limoneux, drainé, pH=5,5	B	23	15	
JARVIS <i>et al.</i> , 1989A	Sol limoneux, drainé	BV		7,1	
KIMURRA et KURASHIMA, 1991	Alluvions	O	36		27,3
LOCKYER et WHITEHEAD, 1990	Sol limoneux, drainé, pH=6,2	VL		13,3	
MONAGHAN <i>et al.</i> , 1989	Sol limoneux	O		14	
RYDEN, 1984	Sol argilo-limoneux mal drainé	NP	30		
SCHOLEFIELD <i>et al.</i> , 1991	NP	BV		15	
SIMPSON et STEELE, 1983	NP	O		13,5	
VAN DER MEER et WHITEHEAD, 1990	Sol argilo-limoneux mal drainé, pH=6,2	NP	52	13	
WHITEHEAD et BRISTOW, 1990	Sol argilo-limoneux mal drainé, pH=6,2	VL	16	18	26
WHITEHEAD, 1990	Sol limoneux	VL		15	
WHITEHEAD et RAISTRICK, 1992	Sol sablo-limoneux, pH=6,7	B		23	
CUTTLE et BOURNE, 1993	Sol limono argileux	B	19		
WILLIAMS et HAYNES, 1994	NP	O, B	19		34, 40
WHITEHEAD et RAISTRICK, 1993	NP	NP		26,4	
Moyenne (écart type)			29 (10,4)	16 (5,6)	31 (6)

* : NP : non précisé O : ovins, B : bovins, BV : bovins viande, VL : vaches laitières.

TABLEAU 2 : Devenir de l'azote de l'urine au pâturage (exprimé en % de l'apport).

TABLE 2 : Fate of urine N under grazing (% of input).

Quantification des flux du système Sol - Plante

1. Les hypothèses de conception

AzoPât repose sur **cinq hypothèses principales** de conception :

- Le bilan de masse annuel du système est équilibré.
- Le stock d'azote minéral du sol ne varie pas entre le début et la fin d'année.
- Il n'y a pas de pertes par volatilisation depuis le compartiment Nfour(Sol).
- La plante dispose de quatre sources d'azote. On considère un ordre de priorité entre ces sources : Nfix, Nféces(Parc) et Nurine(Parc), Nfour(Sol). Si l'azote prélevé par la plante est supérieur à l'azote provenant des trois premières origines (fixation, urine, fèces), alors seulement la plante prélèvera de l'azote depuis Nfour(Sol).
- Le mélange des diverses sources d'azote dans Nfour(Sol) est totalement homogène.

Le calcul des flux est réalisé soit par différence entre pools soit par multiplication d'un pool par un coefficient constant. Dans

Auteurs	Conditions de l'essai		Devenir de l'azote		
	Pédoclimat	Animal*	Plante	Volatilisation	Norg(Sol)
KIMURRA et KURASHIMA, 1991	Alluvions	O	11		68,5
SCHOLEFIELD <i>et al.</i> , 1991	Non précisé	BV		3	
van DER MEER et WHITEHEAD, 1990	Sol argilo-limoneux mal drainé, pH=6,2	NP	7,5	2	
WHITEHEAD, 1990	Sol limoneux	VL		3	
Moyenne (écart type)			9 (1,8)	3 (0,5)	69

* O : ovins, B : bovins, BV : bovins viande, VL : vaches laitières, NP : non précisé

le cas où l'on utilise un coefficient de répartition, **la valeur retenue s'appuie sur une synthèse bibliographique aussi large que possible pour des situations climatiques tempérées** (tableaux 2, 3 et 4). Les chiffres retenus représentent tous **une évaluation annuelle et moyenne pour une vaste gamme de prairies** ; c'est pourquoi la bibliographie couvre les saisons du printemps à l'automne, une gamme très large de niveaux de fertilisation azotée (de 0 à 900 kg N/ha/an) et une relative diversité de peuplements prairiaux (monospécifiques semés, associations, prairies permanentes).

2. Les données à fournir au module Sol - Plante

Le tableau 5 récapitule l'ensemble des données à fournir pour utiliser AzoPât, présentées selon le pool auquel elles se rattachent (Animal, Plante, Sol). L'utilisation des données relatives à l'animal fait l'objet du premier article (DELABY *et al.*, 1997). Pour le module Sol - Plante, il faut disposer de 8 données concernant ces 2 pools et de 3 résultats du module Animal qui sont des flux internes : l'azote ingéré par les animaux depuis l'herbe (Ning(H)) et l'azote des fèces et de l'urine retournant à la parcelle (Nfèces(Parc), Nurine(Parc)).

Auteurs	Conditions pédoclimatiques	Fertilisation (kg N/ha/an)	Dénitrification (%)
BARRACLOUGH et JARVIS, 1989	Sol sablo-limoneux	250	4
		500	6
		900	12
JORDAN, 1989	Sol argilo-limoneux, pH=5,7	100	3,4
		200	5
		300	5
RYDEN, 1983	Sol limoneux, pH=6,3	250	4
		500	9
ESTAVILLO <i>et al.</i> , 1994	Sol argilo-limoneux, pH=6,2	145	17
		120	15
		290	12,5
		240	9
de KLEIN et van LOGTESTIJN, 1994	Sol limoneux, pH=7	250	10
Moyenne (écart type)			8,5 (4,5)

TABLEAU 3 : Devenir de l'azote des fèces au pâturage (exprimé en % de l'apport).

TABLE 3 : Fate of faecal N under grazing (% of input).

TABLEAU 4 : Dénitrification de l'azote minéral apporté au sol sous prairie (exprimée en % de l'azote appliqué).

TABLE 4 : Denitrification of mineral N applied to pasture soil (% of applied N).

TABLEAU 5 : Récapitulatif des données à fournir au modèle AzoPât.

TABLE 5 : Summary of data to be supplied to AzoPât model.

Animal	Jours de pâturage/ha/an Lait (kg/j) Taux Butyreux (g/kg) N herbe offerte (g/kg MS) N (g/kg MS) et UFL concentré N (g/kg MS) et UFL fourrage Quantité concentré (kg MS/j) Quantité fourrage (kg MS/j)	Plante	Production annuelle (kg MS/ha) Production récoltée (kg MS/ha) N production (g/kg MS) % Trèfle Blanc
		Sol	N Fertilisation (kg/ha/an) N Pluie (kg/ha/an) Minéralisation nette (kg/ha/an)

■ Plante

Les mesures de la production d'herbe et les analyses d'azote total effectuées au cours de l'année, avant l'entrée des animaux ou le passage de la machine de récolte, nous permettent de calculer la teneur moyenne en azote pondérée sur l'année : Production (en kg MS/ha), N_h (en g/kg MS) ainsi éventuellement que N_{récolté} (en kg N/ha) en cas de fauche. Par ailleurs, la mesure régulière du taux de trèfle blanc permet d'obtenir une valeur moyenne annuelle du taux pondéral de trèfle afin de calculer la fixation d'azote atmosphérique.

■ Sol

Les apports extérieurs : La fertilisation minérale apportée est enregistrée en cours d'année. Les mesures et analyses de l'eau de pluie fournissent la valeur de ces apports annuels d'azote.

La minéralisation : Son estimation peut se faire de différentes manières laissées à l'appréciation de l'utilisateur. On peut utiliser le prélèvement d'un témoin fauché sans fertilisation minérale, ou encore des références locales moyennes pour un site, selon les références proposées par DE MONTARD *et al.* (1986) par exemple, ou encore réaliser des mesures directes pour l'évaluer.

3. Calculs des flux à l'échelle de l'année et bilan de masse

■ Devenir de l'azote des déjections

La bibliographie nous permet de définir des coefficients pour trois types de devenir : le prélèvement d'azote par la plante, la volatilisation et le stockage dans le compartiment organique du sol. Les données bibliographiques sont présentées pour l'urine au tableau 2 et pour les fèces au tableau 3. Le taux de dénitrification sera le même que pour l'azote minéral du sol soit 8,5% et s'applique aux quantités restantes seulement. Après déduction de ces quatre postes, le complément à 100 est assimilé au lessivage. La figure 2 résume l'ensemble des coefficients de répartition de l'azote urinaire et fécal obtenus après ces étapes.

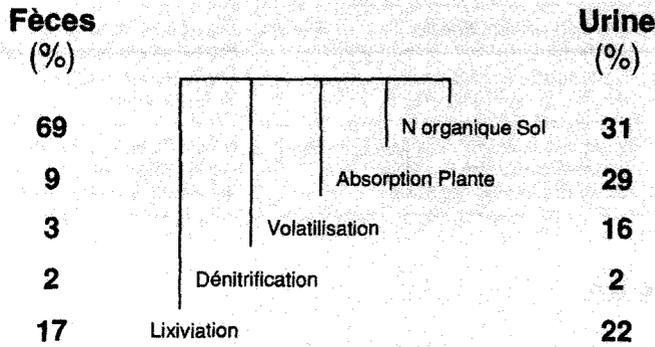


FIGURE 2 : Coefficients de répartition de l'azote de l'urine et des fèces retenus dans Azopât.

FIGURE 2 : Co-efficients of the distribution of urine N and faecal N used in Azopât.

Flux relatifs à la plante

L'ingestion et la récolte sont des flux connus. La fixation d'azote atmosphérique par le peuplement (Nfix, en kg/ha) se calcule à partir de la relation suivante issue d'une synthèse bibliographique (figure 3), relation qui fait intervenir la quantité de trèfle blanc (qTB, en kg MS/ha) évaluée à partir du taux de trèfle blanc (tTB, en %) :

$$N_{fix} = 0,0354 qTB - 0,35 \quad (8)$$

où $qTB = tTB \times \text{Biomasse totale produite}$

L'absorption d'azote par la plante (en kg N/ha) correspond à la quantité d'azote non fixé soit :

$$\text{Absorption} = (\text{Production} \times N_h) - N_{fix} \quad (9)$$

L'absorption est constituée d'azote provenant de l'urine, des fèces et du pool Nfour(Sol) :

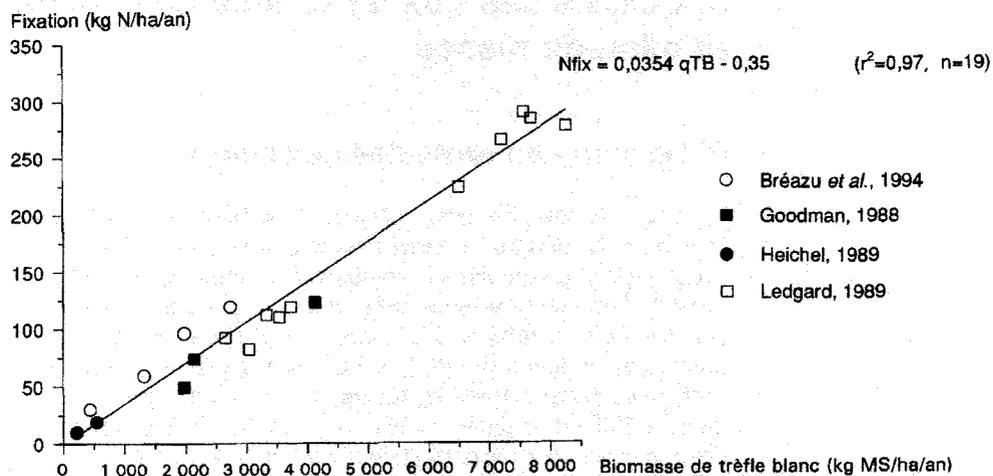
$$\text{Absorption} = 0,29 N_{urine}(\text{Parc}) + 0,09 N_{fèces}(\text{Parc}) + N_{prélevé}(\text{Sol})$$

$$\text{D'où l'on obtient } N_{prélevé}(\text{Sol}), \text{ en kg/ha :} \quad (10)$$

$$N_{prélevé}(\text{Sol}) = (\text{Production} \times N_h) - N_{fix} - 0,29 N_{urine}(\text{Parc}) - 0,09 N_{fèces}(\text{Parc})$$

FIGURE 3 : Quantité d'azote atmosphérique fixée annuellement en prairie en fonction de la biomasse récoltée de trèfle blanc.

FIGURE 3 : Amount of atmospheric nitrogen fixed annually by a pasture according to the biomass of white clover harvested.



La sénescence $N_{sènes}(\text{Total})$, en kg/ha, correspond à de l'herbe non récoltée ou non consommée par l'animal :

$$N_{sènes}(\text{Total}) = (\text{Production} \times N_h) - N_{ing(H)} - N_{récolté} \quad (11)$$

■ Flux concernant le pool Sol

La fertilisation, la pluie, la minéralisation et l'absorption sont déjà déterminées. **La sénescence** totale précédemment définie se subdivise en une fraction qui reste organique et une fraction qui reminéralise à l'échelle de l'année (flux interne de sénescence minérale). SCHOLEFIELD *et al.* (1991) ont proposé une équation qui permet de calculer la **fraction minéralisée** à l'échelle de l'année ($N_{sènesMin}$, en kg/ha) :

$$N_{sènesMin} = N_{sènes}(\text{Total}) \times (79,8 - [194,4 \times 0,4371^{(0,045 \times N_h)}]) \quad (12)$$

Le flux interne "**Organisation**" (en kg/ha) du tableau correspond au calcul suivant :

$$\text{Organisation} = (N_{sènes}(\text{Total}) - N_{sènesMin}) + 0,69 N_{fèces}(\text{Parc}) + 0,31 N_{urine}(\text{Parc}) \quad (13)$$

■ Calcul des pertes

Les pertes par volatilisation, $N_{vola}(\text{Total})$ en kg/ha, n'ont que deux origines : Nurine et Nfèces et sont strictement proportionnelles à ces dernières (respectivement 16 et 3%) :

$$N_{vola}(\text{Total}) = 0,16 N_{urine}(\text{Parc}) + 0,03 N_{fèces}(\text{Parc}) \quad (14)$$

Les pertes par dénitrification, $N_{dénit}(\text{Total})$ en kg/ha, ont trois origines : Nurine(Parc), Nfèces(Parc) et Nfour(Sol). Elles sont supposées strictement proportionnelles aux quantités mises en jeu (respectivement 2%, 2% et 8,5%) :

$$N_{dénit}(\text{Total}) = 0,02 (N_{urine}(\text{Parc}) + N_{fèces}(\text{Parc})) + 0,085 N_{four}(\text{Sol}) \quad (15)$$

Les pertes par lessivage, $N_{less}(\text{Total})$ en kg/ha, proviennent à la fois des déjections de façon proportionnelle aux quantités reçues et de l'azote minéral en excès dans le système ($N_{four}(\text{Sol}) >$ à l'azote absorbé par la plante provenant de $N_{four}(\text{Sol})$). La quantité d'azote de ce pool qui alimente la plante est obtenue à l'équation (10) ; la volatilisation est considérée nulle par convention et la dénitrification est de 8,5% comme mentionné au tableau 3. Par différence de tous ces postes, on estime la contribution (en kg/ha) de ce pool à l'azote lessivable par :

$$N_{less}(\text{Sol}) = N_{min}(\text{Sol}) - N_{prélevé}(\text{Sol}) - 0,085 N_{four}(\text{Sol}), \text{ d'où :}$$

$$N_{less}(\text{Total}) = 0,22 N_{urine}(\text{Parc}) + 0,17 N_{fèces}(\text{Parc}) + N_{less}(\text{Sol}) \quad (16)$$

Par définition, en conditions de pâturage, ce résultat conduit toujours à une quantité non nulle d'azote lessivé et reflète pour partie les phénomènes de concentration liés à la répartition spatiale hétérogène de ces déjections.

Le poste d'azote lessivé, $N_{less}(\text{Total})$, correspond à la totalité de l'azote en excès dans le système et qui se retrouve sous forme minéra-

Traitement	Bas	Moyen	Haut
Production d'herbe (kg MS/ha/an)	8 800	11 480	13 080
Contribution pondérale du trèfle blanc (%)	8,5	8,0	3,7
Fertilisation : N engrais (kg N/ha/an)	7	100	324
Pluie : N pluie (kg N/ha/an)	10	10	10
Minéralisation nette (kg N/ha/an)	160	160	160

le en fin de période d'exploitation, c'est-à-dire en automne. Par rapport au lessivage réel qui se produira depuis la parcelle considérée pendant l'hiver, ne sont pris en compte ni les aspects climatiques (occurrence ou non de drainage pour l'année considérée), ni les possibilités d'organisation hivernale.

Le bilan des variables d'entrée et de sortie du système donne la **variation du pool Norg(Sol)** que l'on peut obtenir par :

$$\Delta \text{Norg(Sol)} = \text{Organisation} - \text{Minéralisation} \quad (17)$$

et qui correspond au bilan des flux d'entrée et de sortie de ce pool.

Utilisation d'AzoPât : étude de l'effet de la fertilisation et du chargement sur les flux d'azote au pâturage

L'expérimentation de pâturage par des vaches laitières sur prairies permanentes réalisée au Pin-au-Haras (Orne) a été utilisée pour étudier la validité de AzoPât (DELABY et PEYRAUD, 1998). **AzoPât est appliqué à trois traitements correspondant à des niveaux de fertilisation azotée et de chargement différents** (Bas, Moyen et Haut, avec respectivement 0, 120 et 300 kg N/ha/an). Les données nécessaires au module Sol - Plante (tableau 6) et les résultats de la simulation (tableau 7) sont présentés sous forme de moyenne de 3 années (1992 - 1994) pour les trois traitements.

Lors de cette expérimentation, nous ne disposions pas de témoin fauché non fertilisé pour estimer la minéralisation. Nous l'avons estimée, à partir de résultats antérieurs sur le site, à 160 kg N ha/an ce qui correspond à un milieu naturellement très productif. Cette estimation moyenne ne prend en compte ni la variabilité interannuelle ni d'éventuels effets cumulatifs des traitements mais est cohérente avec le niveau moyen de production obtenu sans fertilisation azotée.

1. Relation entre Ndisponible et Nprélevé

Ndisponible peut se définir par le cumul des trois sources d'azote : Nurine(Parc), Nfèces(Parc) et Nfour(Sol). Cette valeur s'établit en

TABLEAU 6 : Données nécessaires aux calculs des flux d'azote du module Sol - Plante (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, prairies permanentes uniquement pâturées).

TABLE 6 : Data necessary for the calculation of nitrogen flows in the soil - plant module (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, permanent pastures grazed only by dairy cows).

moyenne à 319, 469 et 815 kg N ha/an pour les traitements Bas, Moyen et Haut. Pour les deux premiers traitements, la plante prélève hors fixation 70% seulement de N disponible. Sur les 30% d'azote excédentaires, 15% constituent des pertes inévitables et 15% restent dans le système sous forme organique dans le pool Norg(Sol). Pour le traite-

	Entrées	Flux internes	Sorties	
Traitement Bas				
Animal				Animal
Ingestion herbe		176	56	Lait
Ingestion concentré	47		35	Déjections hors parcelle
Ingestion fourrage	8			Fèces
			50	Urine
			90	
Plante				Plante
Fixation	26		176	Ingestion
Absorption		195	0	Récolte
			45	Sénescence totale
Sol				Sol
Fertilisation	7		195	Absorption
Pluie	10		106	Organisation
Sénescence minérale		2		Volatilisation
Minéralisation		160		Dénitrification
Fèces		50		Lixiviation
Urine		90		
Solde N(org)Sol				- 54
Traitement Moyen				
Animal				Animal
Ingestion herbe		238	66	Lait
Ingestion concentré	55		47	Déjections hors parcelle
Ingestion fourrage	9			Fèces
			59	Urine
			129	
Plante				Plante
Fixation	32		238	Ingestion
Absorption		294	0	Récolte
			88	Sénescence totale
Sol				Sol
Fertilisation	100		294	Absorption
Pluie	10		158	Organisation
Sénescence minérale		11		Volatilisation
Minéralisation		160		Dénitrification
Fèces		59		Lixiviation
Urine		129		
Solde N(org)Sol				- 2
Traitement Haut				
Animal				Animal
Ingestion herbe		369	83	Lait
Ingestion concentré	71		74	Déjections hors parcelle
Ingestion fourrage	11			Fèces
			74	Urine
			221	
Plante				Plante
Fixation	17		369	Ingestion
Absorption		446	0	Récolte
			94	Sénescence totale
Sol				Sol
Fertilisation	324		446	Absorption
Pluie	10		187	Organisation
Sénescence minérale		26		Volatilisation
Minéralisation		160		Dénitrification
Fèces		74		Lixiviation
Urine		221		
Solde N(org)Sol				+ 27

TABLEAU 7 : Effet du niveau de fertilisation et du chargement sur les flux d'azote par hectare calculés par Azopât (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, prairies permanentes uniquement pâturées par des vaches laitières).

TABLE 7 : Effect of level of fertilization and of stocking rate on nitrogen per hectare as calculated by Azopât (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, permanent pastures grazed only by dairy cows).

ment Haut, la plante ne prélève que 55% de l'offre ; l'excédent se répartit en 17% de pertes et 28% en retour à Norg(Sol). Dans ces conditions, **les pertes augmentent non seulement parce que les quantités mises en jeu augmentent mais aussi parce qu'une proportion plus importante de ces quantités est concernée.**

2. Les flux prépondérants et les pertes

Pour le **traitement Bas**, le modèle prévoit des pertes provenant principalement des déjections. Seule la dénitrification affecte le compartiment Nfour(Sol) et représente 24% des pertes totales.

Dans le **traitement Moyen**, l'augmentation de production de la prairie permet d'accroître le chargement avec pour conséquence une augmentation des quantités d'azote des déjections restituées. Elle conduit à des valeurs plus élevées du pool Nfour(Sol) (par l'apport de fertilisation) accroissant de ce fait la dénitrification. Les pertes plus importantes proviennent de ces deux facteurs et sont inévitables selon le fonctionnement de AzoPât. La valorisation par la plante du pool Nfour(Sol) est maximale (près de 90%) ; **les pertes par lessivage qui reflètent la mauvaise adéquation entre azote fourni et azote prélevé sont donc minimisées** (seulement 2% à partir de Nfour(Sol)).

Pour le **traitement Haut**, le niveau de fertilisation accroît considérablement les quantités de Nfour(Sol) et le peuplement valorise moins bien ce pool compte tenu d'une réponse à l'apport moins que proportionnelle. **Les excédents augmentent principalement les pertes et plus particulièrement le lessivage** (20% de Nfour(Sol)). Tous les postes de pertes augmentent aussi en proportion du retour plus important de déjections. Il apparaît un seuil de valorisation par la plante de l'azote disponible, seuil au delà duquel les pertes par lessivage augmentent significativement.

Référence	N fertilisation	N lessivé	N volatilisé	N dénitrifié
JARVIS et CUTTLE, 1987	400	160		
WATSON <i>et al.</i> , 1992a	108	10-19		
	307	23-47		
DECAU et LE CORRE, 1994	125	13-14		
RYDEN <i>et al.</i> , 1984	420	162		
WATSON <i>et al.</i> , 1992b	100	16-19		
	300	36-47		
SCHOLEFIELD <i>et al.</i> , 1988	400	187		
JARVIS <i>et al.</i> , 1989b	210		9-10	
	420		16-27	
RYDEN et GARWOOD, 1986	200		70	53-85
	400		85	78-114
	400			58-79
PAIN et JARVIS, 1992	250		8	
	550		41	
SCHOLEFIELD <i>et al.</i> , 1991	0		8-15	0-2
	400		45-51	71-130

TABLEAU 8 : Quelques exemples de pertes d'azote mesurées en prairie pâturée par des bovins (kg N/ha/an).

TABLE 8 : A few examples of nitrogen losses measured in pastures grazed by cattle (kg N/ha/year).

Les valeurs moyennes sur trois ans des pertes par volatilisation, dénitrification et lessivage sont présentées dans le tableau 7.

Ces résultats sont en accord avec ceux décrits dans la littérature pour des situations comparables (tableau 8), c'est-à-dire des situations de prairies de graminées ou de prairies permanentes à dominante de graminées avec une fertilisation exclusivement minérale et pâturées toute l'année par des bovins. Les références correspondantes sont peu nombreuses et regroupent des bovins en croissance et des vaches laitières.

La volatilisation s'avère globalement bien estimée. La dénitrification semble légèrement sous-évaluée pour les traitements fertilisés. Ceci peut provenir de différences pédoclimatiques entre les situations anglo-saxonnes et les nôtres.

En ce qui concerne le lessivage, les valeurs calculées sont dans l'ensemble plus élevées que les mesures observées en situations comparables. Cet écart résulte en partie de la sous-estimation de la dénitrification mais aussi de la conception des calculs qui assimile $N_{\text{less}}(\text{Total})$ à l'accumulation en fin de saison de pâturage des fractions $N_{\text{four}}(\text{Sol})$ en excès. **$N_{\text{less}}(\text{Total})$ calculé par Azopât peut donc être, selon les conditions climatiques de l'hiver, soit lessivé, soit organisé, ou encore se maintenir sous forme minérale. Il est aujourd'hui difficile de pronostiquer son devenir exact.**

Utilisation de Azopât pour simuler des modifications dans l'utilisation des prairies

A partir de l'exploitation du Pin-au-Haras, Azopât a été utilisé pour simuler l'abandon de l'exploitation de la parcelle et son exploitation mixte ensilage - pâturage.

1. Prairie non exploitée

La première pratique testée est le maintien non récolté du traitement sans fertilisation. Dans cette hypothèse, en conservant la valeur moyenne de minéralisation de l'année considérée, on obtient un système où l'intégralité de la production devient sénescente. Il n'y aurait donc **que des pertes par dénitrification** depuis le pool $N_{\text{four}}(\text{Sol})$ qui restent équivalentes à celles que l'on obtient au pâturage (en moyenne 15 kg N ha/an). Les autres pertes sont nulles et la variation de $N_{\text{org}}(\text{Sol})$ est de + 17 kg N ha/an.

2. Introduction d'une récolte d'ensilage

Ce scénario correspond à une pratique courante. Il a été développé en supposant la production et le prélèvement d'azote uniformé-

ment répartis au cours de l'année. Avec l'hypothèse de 5 exploitations égales, l'introduction d'un ensilage correspond au cumul de deux exploitations soit 40% de Ning(H), il reste 3 cycles au pâturage soit 60% de Ning(H). La combinaison ensilage - pâturage donne donc les valeurs suivantes :

Nrécolté simulé = 0,4 Ning(H) et Ning(H) simulé = 0,6Ning(H),

Nurine(Parc) simulé = 0,6Nurine(Parc) et

Nfèces(Parc) simulé = 0,6Nfèces(Parc)

Les résultats de AzoPât pour le traitement Moyen sont présentés au tableau 9. Cette pratique a surtout pour conséquence de **diminuer les restitutions** Nurine(Parc), Nfèces(Parc) et dans une faible mesure NsènesMin et donc Nfour(Sol). Il en résulte **une diminution proportionnelle de la volatilisation (- 40%), une constance de la dénitrification et une réduction variable du lessivage selon le niveau de fertilisation** : 30%, 48% et 32% pour les traitements Bas, Moyen et Haut.

Discussion - conclusion

Le modèle AzoPât permet tout d'abord d'établir des bilans d'azote à l'échelle de la parcelle. Il est aussi utilisable pour simuler des modifications de gestion des parcelles.

Les résultats obtenus à partir de AzoPât sur un cas concret soulignent **la cohérence avec les résultats de la bibliographie.** Ce modèle permet de prévoir l'impact d'un changement de pratiques sur la limitation des pertes et de mettre en relief les situations où il y a inadéquation entre le niveau de fertilisation azotée et la réponse possible du peuplement pour un site donné. En effet, dans notre exemple, il peut y avoir des pertes par lessivage dans le traitement Haut (320 kg N/ha/an) même en pratiquant une fauche intégrale car le sol fournit une contribution importante.

	Entrées	Flux internes	Sorties	
Animal				Animal
Ingestion herbe		143	40	Lait
Ingestion concentré	33		28	Déjections hors parcelle
Ingestion fourrage	5			Fèces
			77	Urine
Plante				Plante
Fixation	31		143	Ingestion
Absorption		281	95	Récolte
			74	Sénescence totale
Sol				Sol
Fertilisation	100		281	Absorption
Pluie	10		113	Organisation
Sénescence minérale		9	13	Volatilisation
Minéralisation		160	26	Dénitrification
Fèces		35	23	Lixiviation
Urine		77		
Solde N(org)Sol		- 46		

TABLEAU 9 : Résultats de la simulation par AzoPât d'une fauche d'ensilage suivie de 3 cycles de pâturage (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, prairies permanentes, traitement Moyen).

TABLE 9 : Results of a simulation by AzoPât of a silage cut followed by 3 grazings (INRA, Le Pin-au-Haras, 1992-1994, permanent pastures grazed only by dairy cows, "Medium" treatment).

AzoPât présente en revanche quelques limites. La première est **le caractère non prédictif du modèle** qui ne peut fonctionner qu'une fois recueillies les informations de l'année écoulée. Les autres sont pour partie inhérentes à **la rigidité des constantes** qui ne représentent que des moyennes de situations et des moyennes annuelles. Ainsi, il serait intéressant d'introduire des lois de variation du devenir de l'azote de l'urine et des fèces selon leurs caractéristiques ou la saison de pâturage ou encore l'interaction avec le niveau de fertilisation azotée. Le sous-modèle de fixation par le trèfle blanc pourrait progresser pour être mieux représentatif des situations pâturées, c'est-à-dire intégrer les situations où le taux de fixation peut être influencé par le retour de déjections animales. Le nombre de données à fournir est important et certaines d'entre elles difficiles à mesurer en routine (taux de trèfle blanc par exemple). Le devenir de l'excédent minéral, lequel est assimilé à du lessivage, pourrait être amélioré par une meilleure connaissance des transformations hivernales de l'azote en prairie. De plus, deux variables importantes sont difficiles à acquérir de façon fiable : la production d'herbe et la minéralisation nette. Les erreurs sur ces postes ont des répercussions immédiates sur les pertes. Ce constat a le mérite de mettre en relief le besoin de progresser dans la connaissance des phénomènes de minéralisation et d'organisation dans les sols de prairie et de développer des outils de diagnostic ou des référentiels de la minéralisation pour une grande diversité de situations.

AzoPât se distingue nettement de modèles tels que celui de SCHOLEFIELD *et al.*(1991). Ce dernier prévoit la pondération des coefficients de répartition selon trois critères (zone géographique, âge du peuplement et conditions d'infiltration de l'eau) ; cette pondération est intéressante mais sommaire. A partir de ces éléments, tous les termes de la production sont calculés (production d'herbe, exportation par les animaux, etc.), ce qui ne rend pas du tout compte de la variabilité interannuelle. AzoPât en revanche met l'accent sur cet aspect en privilégiant les mesures de ces termes qui sont le reflet d'un fonctionnement annuel. Si les coefficients de répartition sont rigides et moyens, l'introduction des variables mesurées annuellement permet de jouer chaque année sur les quantités affectées par ces coefficients. C'est un autre type d'outil pédagogique plus destiné aux techniciens qu'aux décideurs.

La validation et le calibrage du modèle doivent passer par des tests sur une plus grande diversité de conditions pédoclimatiques et d'exploitation. L'avancée des connaissances fondamentales sur certains aspects du devenir de l'azote pourront dans une prochaine étape lui permettre d'évoluer vers un fonctionnement plus dynamique, à l'échelle du cycle par exemple.

Accepté pour publication, le 18 août 1997.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble du personnel du domaine I.N.R.A. du Pin-au-Haras, et plus particulièrement A. BOUTTIER, pour sa contribution à l'expérimentation ainsi que R. VÉRITÉ pour ses remarques fructueuses dans la présentation d'AzoPât et enfin J.C. SIMON pour sa relecture attentive.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALL P.R., KEENEY D.R. (1981) : "Nitrogen losses from urine affected areas of a New-Zealand pasture, under contrasting seasonal conditions", *Proc. XIVth Int. Grassl. Congr.*, Lexington, USA, 342-344.
- BALL P.R., RYDEN J.C. (1984) : "Nitrogen relationships in intensively managed temperate grasslands", *Plant and Soil*, 76, 23-33.
- BALL P.R., KEENEY D.R., THEOBALD P.W., NES P. (1979) : "Nitrogen balance in urine-affected areas of a New-Zealand pasture", *Agronomy J.*, 71 (2), 309-314.
- BARRACLOUGH D., JARVIS S.C. (1989) : "The responsible management of nitrogen in grassland", *Environmentally responsible grassland management, BGS Winter Meeting*, London, United Kingdom.
- BREAZU I., OPREA G., CHIPER C., PANGA G.H. (1994) : "Contribution to the N supply in grassland of ten white clover varieties", *Proc. 15th Gen. Meet. Europ. Grassl. Fed.*, 6 - 9 Juin, Wageningen, The Netherlands, 65-68.
- CUTTLE S.C., 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.
- DECAU M.L., LE CORRE L. (1994) : "A drained plot study of the impact of cutting and/or grazing management and N fertilization on nitrate leaching under grassland", *Proc. 15th Gen. Meet. Europ. Grassl. Fed.*, 6 - 9 Juin, Wageningen, The Netherlands, 213-217.
- DECAU M.L., SALETTE J. (1994) : "Reducing nitrate leaching by manipulating the cutting/grazing and N fertilization level regimes", *Proc. 15th Gen. Meet. Europ. Grassl. Fed.*, 6 - 9 Juin, Wageningen, The Netherlands, 213-217.
- 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).
- ESTAVILLO J.M., RODRIGUEZ M., DOMINGO M., MUÑOZ-RUEDA A., GONZALEZ-MURUAC C. (1994) : "Denitrification losses from a natural grassland in the Basque Country under organic and inorganic fertilization", *Plant and Soil*, 162, 19-29.
- GARWOOD E.A., RYDEN J.C. (1986) : "Nitrate loss through leaching and surface runoff from grassland : effects of water supply, soil type and management", *Nitrogen fluxes in intensive grassland systems*, Ed. Martinus Nijhoff, The Netherlands, 99-113.
- GOODMAN P.J. (1988) : "Nitrogen fixation, transfert and turnover in lowland grass-clover swards, using ¹⁵N isotope dilution", *Plant and Soil*, 112, 247-254.
- HEICHEL G.H. (1989) : "Dinitrogen fixation and nitrogen transfer in temperate legume-grass communities", *Proc. XVth Int. Grassl. Congr.*, 4 - 11 Octobre, Nice, France. 131-132.
- JARVIS S., CUTTLE S. (1987) : "Manipulating the fate of nitrogen in grazed swards", *Science and better use of grassland*, Ed. J.E.Y. Hardcastle, London Agriculture and food research council, 20-21.
- JARVIS S.C., HATCH D.J., ROBERTS D H. (1989a) : "The effect of grassland management on nitrogen losses from swards through ammonia volatilization; the relationship to excretal returns from cattle", *J. Agric. Sci. Camb.*, 112, 205-216.

- JARVIS S.C., HATCH D.J., LOCKYER D.R. (1989 b) : "Ammonia fluxes from grazed grassland: annual losses from cattle production systems and their relation to nitrogen inputs", *J. Agric. Sci. Camb.*, 113, 99-108.
- JARVIS S.C., HATCH D.J. (1994) : "Potential for denitrification at depth below long-term grass swards", *Soil Biol. Biochem.*, 26, 12, 1629-1636.
- JARVIS S.C., SCHOLEFIELD D., PAIN B. (1995) : "Nitrogen cycling in grazing systems", *Nitrogen fertilization in the environment*, P.E. Bacon Ed., M. Dekker Inc., 381-419.
- JORDAN C. (1989) : "The effect of fertilizer type and application rate on denitrification losses from cut grassland in Northern Ireland", *Fertilizer Research*, 19, 45-55.
- KIMURA T., KURASHIMA K. (1991) : "Quantitative estimates of the budgets of nitrogen applied as fertilizer, urine and feces in a soil-grass system", *Japan Agricultural Research Quarterly*, 25, 101-107.
- KLEIN C.A.M. DE, LOGTESTIJN R.S.P. VAN (1994) : "Denitrification in the top soil of managed grasslands in the Netherlands in relation to soil type and fertilizer level", *Plant and Soil*, 163, 33-44.
- LEDGARD S.F. (1989) : "Nitrogen fixation and transfer to associated grasses by white clover cultivars under dairy cows grazing", *Proc. XVIth Int. Grassl. Congr.*, 4 - 11 Octobre, Nice, France, 169-170.
- LOCKYER D.R., WHITEHEAD D.C. (1990) : "Volatilization of ammonia from cattle urine applied to grassland", *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (8), 1137-1142.
- MONAGHAN R.M., CAMERON K.C., MACLAY C.D.A. (1989) : "Leaching losses of nitrogen from sheep urine patches", *New Zealand J. Agricult. Res.*, 32, 237-244.
- MONTARD DE F.X., ANGLADE F., MONTEILHET P., THOULY J.C. (1986) : " Mise au point d'une méthode pratique pour le calcul de la fertilisation des prairies dans le Massif Central humide- I. La fertilisation azotée", *Fourrages*, 108, 39-78.
- PAIN B.F., JARVIS S.C. (1992) : "Ammonia emissions from grassland systems : slurry applications and grazing", *CEC Air Pollution Research Report*, n°39, 365-372.
- RYDEN J.C. (1983) : "Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate", *J. Soil Science*, 34, 355-365.
- RYDEN J.C. (1984) : "The flow of nitrogen in grassland", *Proc. Fertiliser Society of London*, n°229, Peterborough, United Kingdom, 43 pages.
- RYDEN J.C., BALL P.R., GARWOOD E.A. (1984) : "Nitrate leaching from grassland", *Nature*, 311(6), 50-53.
- SCHOLEFIELD D., GARWOOD E.A., TITCHEN N.M. (1988) : "The potential management practices for reducing losses of nitrogen from grazed pastures", *N Efficiency in agricultural soils*, D.S. Jenkinson 1 K.A. Smith eds, Elsevier Applied Science, 220-229.
- 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, 165-177.
- SIMPSON J.R., STEELE K.W. (1983) : "Gaseous nitrogen exchanges in grazed pastures", *Gaseous loss of N from plant-soil systems*, Eds. Freney J.R. & Simpson J.R., The Hague, 215-236.

- VAN DER MEER H.G., WHITEHEAD D.C. (1990) : "The fate of nitrogen in animal excreta applied to grassland", *Proc. 13th Gen. Meet. Europ. Grassl. Fed.*, 25 - 29 Juin, Banska Bystrica, Czechoslovakia.
- WATSON C.J., JORDAN C., LAIDLAW A.S., STEEN R.W.J. (1992a) : "Annual N balances for grazed grassland", *Proc. EC COST 814 Meeting*, 22 - 23 Octobre, Gembloux, 35-36.
- WATSON C.J., JORDAN C., TAGGART P.J., LAIDLAW A.S. GARRETT M.K., STEEN R.W.J. (1992b) : "The leaky N-cycle on grazed grassland", In "Nitrate and farming systems", *Aspects of Applied Biology*, (30), Archer Ed., 215-222.
- WHITEHEAD D.C. (1990) : "Atmospheric ammonia in relation to grassland agriculture and livestock production", *Soil Use Management*, 6(2), 63-65.
- WHITEHEAD D.C., BRISTOW A.W. (1990) : "Transformations of nitrogen following the application of 15N-labelled cattle urine to an established grass sward", *J. applied ecology*, 27, 667-678.
- WHITEHEAD D.C., RAISTRICK N. (1992) : "Effects of plant material on ammonia volatilization from simulated livestock urine applied to soil", *Biol. Fertil. Soils*, 13, 92-95.
- WHITEHEAD D.C., RAISTRICK N. (1993) : "The volatilization of ammonia from dairy cattle urine applied to soils as influenced by soil properties", *Plant and Soil*, 148, 43-51.
- WILLIAMS P.H., HAYNES R.J. (1994) : "Comparison of initial wetting pattern, nutrient concentrations in soil solution and the of 15N labelled urine in sheep and cattle urine patch areas of pasture soil", *Plant and Soil*, 162, 49-59.

SUMMARY

A quantified description of yearly nitrogen flows on a pasture grazed by dairy cows. II- Flows of the soil - plant system

AzoPât gives a simulated quantification of nitrogen flows in the soil-plant-animal system on an annual basis. It calculates the losses through volatilization, denitrification and leaching as well as the annual variation in the organic nitrogen fraction in the soil, and shows the annual N balance at the plot scale. Fifteen data are necessary for the calculation. Being built on the basis of very numerous references from literature, it is suitable for a large diversity of situations relative to pedo-climate, grassland species (pure grasses, grass - legume swards) or grassland utilization (grazing, mowing). Hypotheses and equations used for the calculation are detailed.

The validation of AzoPât by actual experimental data confirms the consistency of its results for the prediction of losses by volatilization, denitrification and risk of leaching in a grazed system. Simulation of an alternative management by cutting + grazing are developed. Limits and intended improvements are presented.