

Proposition d'une méthode de calcul permettant de raisonner la fertilisation azotée des prairies

A. Farruggia¹, P. Castillon², A. Le Gall³, M.M. Cabaret⁴

Les travaux sur la fertilisation azotée des prairies sont relativement peu développés en France par rapport à ceux réalisés sur cultures annuelles. La méthode de calcul ici présentée évalue les différents postes de l'équation d'efficacité d'utilisation de l'azote et permet de raisonner la dose à apporter sur prairie, mais elle doit être paramétrée régionalement (voir l'article suivant).

RESUME

Après avoir rappelé les spécificités des flux d'azote sous prairies, la démarche de raisonnement de la fertilisation azotée retenue est explicitée. L'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais et son adaptation aux prairies est détaillée terme par terme. L'exemple des références utilisées pour l'Ouest de la France permet d'illustrer chacun de ces termes. Ainsi, le calcul de l'azote exporté, de la fourniture d'azote par le sol, les contributions des restitutions au pâturage et de la fixation symbiotique, l'effet direct des engrais de ferme et les valeurs du coefficient apparent d'utilisation de l'engrais sont développés. L'application de ce raisonnement sur une parcelle exclusivement pâturée de l'Ouest récapitule la démarche et permet de discuter l'intérêt et les limites de ce raisonnement.

MOTS CLES

Azote, fertilisation azotée, fertilisation raisonnée, fixation symbiotique de l'azote, méthode, pâturage, prairie, restitutions.

KEY-WORDS

Excreta returns, grassland, grazing, method, nitrogen, nitrogen fertilization, pasture, rational fertilization, symbiotic nitrogen fixation.

AUTEURS

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

2 : ITCF, 6, chemin de la Côte Vieille, F-31450 Bazièges ; mél : pcastillon@itcf.fr

3 : Institut de l'Elevage, Monvoisin, BP 67, F-35652 Le Rheu cedex ; mél : andre.le-gall@inst-elevage.asso.fr

4 : Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor, EDE, Maison de l'Agriculture, rue du Chalutier "Sans-Pitié", BP 540, F-22195 Plérin cedex ; mél : CABARET@cotes-d-armor.chambagri.fr

Quel est l'intérêt d'une méthode de calcul de la dose d'azote pour les prairies à l'échelle de la parcelle ? Plusieurs objectifs peuvent être déclinés (Meynard *et al.*, 1996) :

- L'objectif pratique : il s'agit de mettre au point des principes transparents de calcul de la dose d'azote qui permettent d'obtenir la production visée par l'éleveur pour satisfaire les besoins quantitatifs et qualitatifs de son troupeau avec des risques de lessivage limités. Un tel calcul répond également à la nécessité pour les organismes de développement de proposer, au delà des dires d'experts, un outil d'évaluation des apports correspondant à la notion réglementaire de "fertilisation raisonnée", présente aussi bien dans la directive *Nitrates* que dans les textes sur les *Installations Classées*.

- L'objectif pédagogique : ce calcul de la dose d'engrais met en évidence les différentes sources d'azote pour la prairie, et de surcroît leurs ordres de grandeur. Il relativise ainsi, pour les éleveurs comme pour les techniciens, la place des engrais minéraux dans l'alimentation azotée de la prairie et met en lumière celle de la fourniture par le sol, des engrais de ferme, de la fixation symbiotique et des restitutions au pâturage.

- L'objectif de recherche - développement : cette méthode simplifie et tente de quantifier de façon opérationnelle les flux d'azote qui concourent à l'alimentation azotée de la prairie. Adoptée par l'ensemble des organismes de recherche et de développement agricole, elle permet un langage commun qui organise les questionnements et structure les travaux de recherche et de développement.

L'objectif de cet article est de présenter l'état actuel des réflexions sur cette démarche de raisonnement et de l'illustrer en s'appuyant sur le paramétrage réalisé pour le Grand Ouest de la France. La mise en oeuvre de cette méthode chez les agriculteurs des Monts du Lyonnais et des Monts du Beaujolais fait ensuite l'objet d'un article indépendant (Farre et Bonnet, même ouvrage).

La démarche

1. Les particularités des systèmes prairiaux

La mise au point d'une telle démarche appliquée aux prairies n'est pas cependant sans poser des questions. En effet, les prairies présentent par rapport aux cultures annuelles de nombreuses particularités (Simon *et al.*, 1996) :

- L'intégration dans un système fourrager : contrairement aux cultures annuelles, les prairies sont intégrées dans un système de production où prime d'abord la satisfaction quantitative et qualitative des besoins alimentaires des troupeaux tout au long de l'année, et non la recherche d'une production maximale de fourrage.

- Des flux d'azote spécifiques :

- De faibles sorties d'azote sur les prairies pâturées : contrairement aux cultures annuelles ou aux prairies exclusivement fauchées qui exportent de grandes quantités d'azote, peu d'azote "sort" de la prairie pâturée, alors que la fertilisation peut être importante. L'azote apporté sur les prairies pâturées est en effet très rapidement recyclé sur la parcelle par le biais des déjections des animaux. Selon le chargement et la fertilisation, l'azote recyclé peut représenter jusqu'à 150 ou 300 kg N/ha/an.

- Les restitutions au pâturage et la fixation symbiotique : Les restitutions au pâturage sont réparties de façon hétérogène dans le temps et dans l'espace et sont sujettes à des pertes importantes par lessivage et voies gazeuses (Simon *et al.*, 1997). Il est donc délicat de prévoir leurs effets sur la prairie tant sur le court que sur le long terme. Par ailleurs, la présence de légumineuses dans certaines prairies introduit de l'azote d'origine symbiotique dont la contribution à l'alimentation azotée est également difficile à évaluer.

- Les spécificités liées à leur pérennité :

- Une valorisation de la minéralisation de l'azote organique au printemps et à l'automne : L'herbe croît tant que les températures et l'alimentation en eau le permettent. A la différence des cultures annuelles, la prairie est donc capable de valoriser l'azote produit par la minéralisation tout au long de l'année, et notamment à l'automne (Vertès et Decau, 1992).

- Des flux bruts de minéralisation et d'organisation de l'azote importants mais une minéralisation nette modérée : La vitesse de minéralisation nette moyenne est comparable à celle observée sous cultures annuelles mais ce flux net d'azote résulte d'un fonctionnement interne du cycle de l'azote dans le sol très différent (Recous *et al.*, 1996). L'organisation d'azote est en effet beaucoup plus importante sous prairie que

sous culture annuelle du fait des quantités importantes de carbone introduites dans le sol par le matériel sénéscent.

- Plusieurs cycles de production : Les prairies sont caractérisées par plusieurs cycles de croissance dans l'année délimités par des coupes ou des pâturages. Pour le pâturage, la croissance et l'exploitation sont parfois même réalisés en même temps. Dans ces conditions, la fertilisation azotée est généralement fractionnée pour ajuster la production d'herbe à son mode d'exploitation et aux besoins des animaux.

- Un stockage de l'azote dans les organes non récoltés : Les plantes prairiales stockent de l'azote dans le système racinaire ainsi que dans la base des gaines et des tiges. Elles sont capables de remobiliser cet azote après une exploitation par la fauche ou la pâture pour satisfaire les besoins des organes en croissance (Loiseau et Grignani, 1991).

2. La démarche de raisonnement retenue

Dès 1986, de Montard avait proposé pour les prairies du Massif Central une démarche de raisonnement qui s'apparentait à l'équation d'efficacité développée pour les cultures annuelles. Depuis, des travaux d'adaptation de cette démarche ont été réalisés (ITEB, 1991 ; Bonnet, 1992 ; Farruggia, 1994 ; Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire *et al.*, 1998). Plus récemment, les trois Chambres Régionales de Bretagne, de Normandie et des Pays-de-la-Loire et leurs partenaires ont proposé une application locale que nous développerons dans cet article (Farruggia *et al.*, 1999). Notons enfin que la Lorraine vient également de paramétrer cette démarche de raisonnement.

Toutes ces applications régionales ont retenu une même méthode de calcul basée sur l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais qui s'écrit de la façon suivante :

$$NR = NR0 + CAU (Nm + Nf)$$

NR correspond à la quantité d'azote récoltable ;

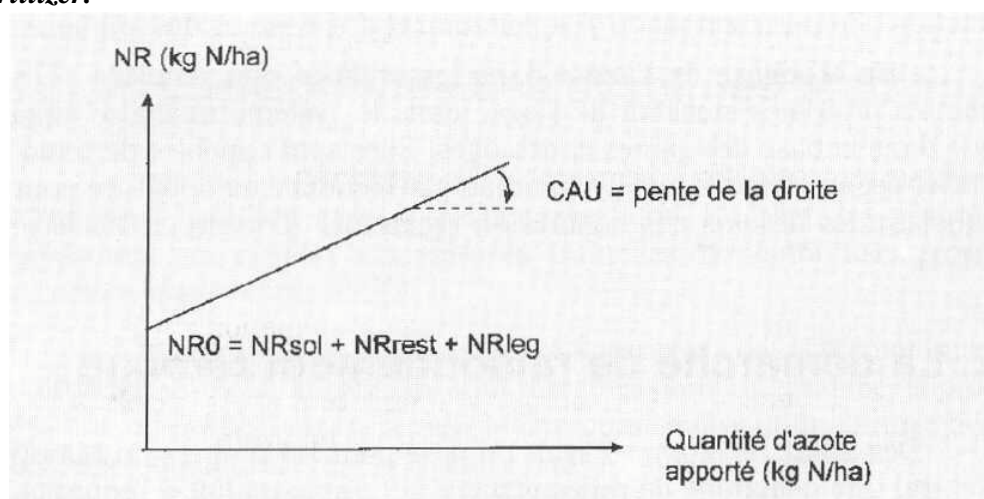
NR0 représente la quantité d'azote récoltable en l'absence d'engrais ;

CAU est le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais, soit la fraction de l'azote apporté retrouvée dans la production récoltable. La réponse de NR aux apports étant généralement linéaire, le CAU est égal à la pente de la droite. La quantité totale d'engrais azoté apporté est égale à $(Nm + Nf)$, Nm étant la quantité d'engrais minéral et Nf, la partie d'azote provenant des engrais de ferme, disponible pour le cycle de croissance concerné. Il s'agit donc de la partie minérale et minéralisée pendant la période de référence, évaluée à partir des coefficients d'équivalence engrais de la façon suivante : $Nf = Keq \times NTf$, Keq étant le coefficient d'équivalence engrais et NTf, l'azote total de l'engrais de ferme.

Notre formule suggère aussi que tout kilo d'apport minéral produit la même augmentation du N récoltable, quels que soient son origine et le niveau de départ (figure 1).

Figure 1 : Interprétation graphique des termes de l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais.

Figure 1 : Graphic interpretation of the terms of the equation of utilization efficiency of a fertilizer.



Pour une prairie pâturée avec des légumineuses, autrement dit une prairie qui reçoit de l'azote supplémentaire par le biais des restitutions au pâturage et de la fixation symbiotiques, NR0 est la somme des trois termes suivants :

$$NR0 = NR_{sol} + NR_{rest} + NR_{leg}$$

NRsol représente la quantité d'azote récoltable issue de la seule fourniture d'azote par le sol ;

NRrest et NRleg correspondent à la contribution respective des restitutions au pâturage de l'année et de la fixation symbiotique des légumineuses présentes, à la quantité d'azote récoltable.

Avec la relation précédente, nous obtenons alors l'équation suivante :

$$NR = NR_{sol} + NR_{rest} + NR_{leg} + CAU (Nm + Nf)$$

$$Nm + Nf = \frac{NR - (NR_{sol} + NR_{rest} + NR_{leg})}{CAU}$$

La dose d'azote minéral de l'engrais Nm à apporter est donc :

$$Nm = \frac{NR - (NR_{sol} + NR_{rest} + NR_{leg})}{CAU} - (K_{eq} \times NTF) , \text{ avec :}$$

On peut également ne pas utiliser les coefficients d'équivalence engrais et se référer à un effet direct de l'engrais de ferme. Dans ce cas, le CAU ne s'applique qu'à l'engrais minéral et l'équation prend la forme :

$$NR = NR_{sol} + NR_{rest} + NR_{leg} + NRf + CAU \times Nm$$

NRf est alors égal à la quantité d'engrais de ferme apporté multiplié par l'effet direct de ce dernier, obtenu à partir d'un témoin sans engrais de ferme.

Dans cet article, nous ne développerons que le raisonnement à l'échelle de l'année pour lequel les références actuellement disponibles sont les plus nombreuses. Il s'agit alors de calculer une dose annuelle que l'agriculteur va devoir répartir sur l'année en fonction de ses modalités d'exploitation. On fixe en quelque sorte le cadre technique, économique et environnemental dans lequel l'agriculteur va pouvoir évoluer (Violleau, comm. perso.).

Toutefois, cette équation peut s'appliquer également en toute rigueur au cycle et à la saison. Une application à l'échelle de la saison (le printemps, de la sortie d'hiver au 1^{er} ou 30 juin selon les régions, et l'été - automne) devrait être envisageable assez facilement dans une deuxième étape.

Précisons que la démarche sera illustrée au fur et à mesure par un exemple récapitulé *in fine* en figure 2.

3. Prévision de l'azote récoltable (ou besoin prévisionnel), NR

Selon la fonction de la parcelle dans le système fourrager, l'éleveur et le technicien devront se fixer pour l'année un objectif de production et de qualité afin d'estimer la quantité d'azote récoltable, NR, définie par (%N étant la teneur du fourrage en azote) :

$$NR = \text{Matière sèche totale} \times \%N$$

La richesse en azote de l'herbe varie : elle diminue au fur et à mesure que la biomasse produite augmente (Lemaire *et al.*, 1984) ; elle varie également en fonction du niveau d'azote disponible dans le sol. Les teneurs en azote retenues et présentées dans le tableau 1 constituent des teneurs souhaitables. Ce sont des compromis entre des niveaux de production et une qualité de l'herbe ingérée par les animaux. Précisons que ces teneurs en azote selon le mode d'exploitation sont communes à toutes les applications régionales évoquées.

Tableau 1 : Teneur en azote de l'herbe selon le mode d'exploitation.

Table 1 : Nitrogen content of herbage according to pasture management.

Mode d'exploitation	Teneur en azote (kg N/t MS)
Pâturage continu ou à rotation rapide	30
Pâturage à rotation lente	25
Ensilage	25
Foin précoce (fin mai) et foin de repousse	20
Foin tardif de 1 ^{er} cycle (fin juin)	15

Exemple présenté en figure 2 : Pour estimer le niveau de production d'une prairie pâturée, on peut se référer à des valeurs moyennes d'ingestion de matière sèche par animal, majorées de 10% pour intégrer les pertes aux pâturages et obtenir ainsi les quantités d'herbe à produire. Ainsi, si un éleveur prévoit de faire pâturer sur sa parcelle de 2,5 ha, 7 couples mère - veau par ha du 10 avril au 24 juillet, puis 5 couples du 25 juillet jusqu'au sevrage le 20 octobre, enfin 3 vaches seules à l'arrière-saison. La production à atteindre sera donc de :

- (7 couples x 106 j x 19 kg MS) / 2,5 = 5,6 t MS/ha du 10 avril au 24 juillet
- (5 couples x 88 j x 16) / 2,5 = 2,8 t MS/ha du 25 juillet au 20 octobre
- (3 vaches x 31 j x 12) / 2,5 = 0,45 t MS/ha

Soit 8,8 t MS/ha sur l'année pour 503 jours de pâturage d'UGB par hectare.

Les sources d'azote

1. La fourniture d'azote par le sol, NRsol

Ce terme de l'équation est mesuré par la quantité d'azote récolté dans les parties aériennes d'une prairie fauchée sans légumineuses qui n'a reçu aucune fertilisation azotée au cours de l'année. Cet azote provient :

- de la fourniture d'azote minéral par le sol issue de la minéralisation de l'azote organique,
- du reliquat d'azote minéral de l'année précédente,
- des retombées atmosphériques d'azote.

* Azote minéral disponible d'origine organique

L'azote organique qui s'accumule dans le sol provient :

– des apports de matière organique (engrais de ferme, restitutions au pâturage, tiges, feuilles et racines sénescentes),

– de l'azote minéral organisé, c'est-à-dire transformé en azote organique par les bactéries et champignons. Cette dernière fraction constitue le compartiment le plus actif de la matière organique et est qualifiée de "facilement minéralisable". Elle est d'autant plus importante que le sol a reçu des apports d'azote importants au cours de son histoire récente (Recous *et al.*, 1996). Ainsi, les prairies ayant reçu pendant longtemps des fertilisations azotées minérales ou organiques élevées, ainsi que les prairies à haut niveau de production essentiellement pâturées présentent des taux de minéralisation nette élevés. Inversement, les prairies peu fertilisées de longue date présentent une faible minéralisation nette liée à l'accumulation de litières racinaires. L'azote minéral disponible limite l'activité microbienne et la minéralisation brute, ce qui augmente en retour les besoins d'immobilisation d'azote.

* Les facteurs de variation de la minéralisation

La matière organique du sol contient environ 5% d'azote organique dont une partie est minéralisée sous l'action des enzymes produits par les micro-organismes du sol. Ainsi, plus la teneur en azote organique est élevée, plus la quantité d'azote minéralisé serait importante. Néanmoins, il existe des sols très riches en matière organique libre qui fournissent très peu d'azote. La qualité de la matière organique joue donc un rôle essentiel dans le pouvoir de fourniture en azote des sols.

La vitesse de minéralisation de l'azote organique dépend avant tout de la température et de l'humidité du sol. Par un effet sur l'aération ou le réchauffement plus rapide du sol, le drainage augmente ainsi la vitesse de minéralisation (Gill *et al.*, 1995).

Le taux de minéralisation dépend également de la texture et de la structure du sol. Il semble que le taux de minéralisation est d'autant plus élevé que la texture est grossière (Hassink, 1994). D'autre part, la minéralisation nette diminue dans les sols prairiaux très acides où l'activité microbienne est ralentie.

Par ailleurs, pour les prairies temporaires implantées après plusieurs années de cultures annuelles, il a été souvent observé une minéralisation nette apparente élevée l'année d'implantation de la prairie (A0) qui s'abaisse ensuite et se stabilise à partir de la 2^e ou 3^e année (A1 ou A2) (Loiseau *et al.*, 1992). Ce fait aurait

pour origine d'une part l'action du travail du sol sur la minéralisation de la matière organique (Balesdent, 1996) qui disparaît lorsque cessent les interventions culturales, et d'autre part l'accroissement du pouvoir organisateur lié à une restitution de carbone par les racines et parties aériennes sénescentes, plus importante lorsque la prairie est bien installée.

*** L'azote organique minéralisé sous prairie a par la suite plusieurs destinations**

Absorption par les plantes, organisation et pertes par voies gazeuses (N_2 , N_2O essentiellement) ou par lixiviation sont des processus concurrents dont l'importance respective dépend des conditions de sol, de climat et de l'état du peuplement végétal. Si la demande d'azote minéral par les plantes et par la biomasse microbienne est satisfaite, de l'azote minéral reste disponible dans le sol, et peut entraîner des pertes. *A contrario*, si la demande totale en azote n'est pas satisfaite, l'azote minéral disponible limite aussi bien l'activité de ces deux agents biologiques en réduisant à la fois l'immobilisation microbienne et l'absorption par la prairie. Cette situation est très commune dans les prairies et explique les très faibles teneurs en azote minéral dans le sol sous exploitation de fauche.

Les plantes ne prélèvent donc qu'une partie de la minéralisation de l'azote organique appelée minéralisation nette apparente. Celle-ci dépendra de la possibilité pour les plantes de prélever et de transférer l'azote minéralisé dans des organes récoltables. La minéralisation nette dépendra donc de la profondeur de sol exploitable par les racines, mais aussi des possibilités de croissance du couvert.

Le reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver est toujours très faible dans les prairies exploitées exclusivement en régime de fauche. En revanche, dans les prairies pâturées, après un hiver peu pluvieux, une partie de ce qui a été restitué l'année précédente se retrouve sous forme de reliquat d'azote minéral disponible pour le premier cycle de croissance.

*** Evaluation au champ de la fourniture d'azote minéral par le sol**

Elle est mesurée par la quantité d'azote contenu dans les récoltes successives d'une prairie de graminées pures ne recevant pas d'azote. Dans le cas des prairies naturelles pourvues de légumineuses, ce témoin intégrera éventuellement l'azote fourni par la fixation symbiotique, N_{leg} . La somme des quantités moyennes d'azote exporté par cycle sur plusieurs années dans un site est un bon estimateur de la fourniture moyenne d'azote par le sol.

On distingue deux types de témoins zéro :

- le témoin zéro tournant qui ne reçoit pas d'azote l'année de la mesure mais qui a été conduit par le passé comme le reste de la parcelle dans lequel il se situe. Ce témoin permet d'intégrer les effets dus à l'histoire récente de la parcelle : apports organiques, mode d'exploitation, fertilisation minérale et restitutions au pâturage.

- le témoin zéro fixe qui ne reçoit pas d'engrais azoté pendant plusieurs années et qui permet d'évaluer la minéralisation due à l'histoire ancienne.

La mise en place de ces deux types de témoins peut permettre de mettre en évidence l'existence des différents compartiments organiques du sol responsables de la fourniture en azote qui se distinguent par leur durée de vie.

*** Elaboration de tableaux de références**

Dans toutes les régions, les valeurs proposées reposent avant tout sur des données expérimentales obtenues à partir de témoins zéro fixes pour la plupart. Ces données donnent lieu ensuite à des extrapolations fondées sur la connaissance des mécanismes de la minéralisation et des facteurs précédemment cités qui en régissent l'importance. Ces références sont encore très insuffisantes et elles témoignent :

- d'une grande variabilité des fournitures du sol. Dans les prairies permanentes normandes du domaine du Pin de l'INRA sur sols colluviaux très riches en matière organique par exemple, la fourniture peut atteindre 190 kg N/ha/an, tandis qu'à Kerlavic dans le Finistère, sur des sols bruns acides également riches en matière organique (autour de 9%), elle n'est que de 50 à 70 kg/ha/an ;

- d'une variabilité interannuelle de cette fourniture sur une même parcelle.

Le tableau 2, élaboré pour le Grand Ouest constitue une illustration de paramétrage régional de ces fournitures du sol. Il prend en compte les facteurs qui ont semblé dans cette région les plus influents au vu de l'analyse des témoins zéro :

- la durée de la pousse annuelle et donc l'importance du déficit hydrique qui va jouer sur la possibilité pour les plantes de prélever et de transférer l'azote minéralisé dans des organes récoltables ;
- l'importance des apports d'azote minéral et organique antérieurs sur 10 ans et plus.

Dans les autres régions, notamment la Lorraine et les Monts du Lyonnais, le type de sol et sa profondeur ont semblé des facteurs discriminants. Ils ont donc été retenus pour bâtir les tableaux de références.

Tableau 2 : Hypothèses sur la fourniture d'azote par le sol (NRsol) pour les prairies du Grand Ouest (kg N/ha/an).

Table 2 : Hypotheses on the nitrogen supply by the soil (NRsol) in the pastures of Western France (kg N/ha/an).

Pousse estivale	Faible à nulle	Moyenne	Très bonne
Entretien azoté :			
Fort*	80	120	180
Intermédiaire	60	90	140
Faible**	40	60	100

* plus de 600 journées de présence au pâturage/ha et apports réguliers de fumier (30-40 t/ha) et/ou lisier (30-50 m³/ha) sur les cultures de la rotation depuis plus de 10 ans
 ** moins de 300 journées de présence au pâturage et pas d'apports d'engrais de ferme sur la rotation depuis plus de 10 ans

2. La contribution directe des restitutions au pâturage de l'année, NRrest

L'azote restitué par les animaux au pâturage et utile pour les plantes l'année du pâturage est encore appelé effet direct des restitutions au pâturage. Le peu de mesures disponibles et extrapolables sur ce sujet a conduit à proposer une méthode d'estimation bâtie à partir de synthèses bibliographiques. Les travaux de l'INRA de Rennes (Delaby *et al.*, 1999 et Delaby, comm. pers.) réalisés à partir d'une synthèse d'essais ont montré que la quantité d'azote restitué dans les déjections par hectare ainsi que l'azote restitué par jour de pâturage augmentent en fonction du nombre de journées de pâturage. Cette augmentation résulte pour l'essentiel de l'augmentation des quantités d'azote consommées par le troupeau provenant de l'herbe mais aussi des concentrés consommés en plus par hectare. Pour des nombres de journées de pâturage compris entre 0 et 1 000 jours, les rejets totaux en azote peuvent ainsi être calculés avec l'équation suivante (obtenue à partir de 27 données, R² de 0,94 et écart type résiduel de 27,7 kg N) :

$$\text{Rejets totaux (kg N/ha)} = 0,335 \times \text{JPha} + 0,00025 \times (\text{JPha})^2$$

avec JPha : le nombre de jours de pâturage par hectare, ramenés à 24 h de pâturage sur 24.

En prenant comme hypothèse d'une part une répartition de 2/3 de cet azote total dans l'urine et 1/3 dans les bouses et, d'autre, part une valorisation moyenne par les plantes de 29% pour l'azote urinaire et de 9% pour l'azote fécal (Decau, 1997), on aboutit pour le calcul des effets directs au pâturage à l'équation suivante :

$$\text{NRrest} = 0,0748 \times \text{JPha} + 5,58 \cdot 10^{-5} (\text{JPha})^2$$

Pour le Grand Ouest, les références de NRrest ont été exprimées en effet direct pour 100 jours de pâturage d'UGB en distinguant les journées de pâturage complètes correspondant à des vaches allaitantes ou des bovins en croissance, des journées de pâturage de 20 h correspondant aux vaches laitières. Ce calcul a été réalisé pour une situation moyenne de 600 journées de pâturage et a conduit aux valeurs d'effet direct présentées dans le tableau 3. Par ailleurs, comme la proportion d'azote de ces restitutions recyclé par les plantes dépend du contexte climatique, il a été également tenu compte de l'importance de la pousse estivale.

Exemple :

- 503 journées de pâturage d'UGB en journées complètes (vaches allaitantes avec leurs veaux) en zone arrosée contribuent pour $5,03 \times 10,5 = 53$ kg N/ha à l'alimentation azotée de la prairie pour l'année ;

- 630 journées de pâturage de vaches laitières par ha en zone séchante contribuent pour $6,3 \times 8 = 50$ kg N/ha à l'alimentation azotée de la prairie pour l'année ;

- 400 journées de pâturage de génisses de 1 à 2 ans en zone séchante contribuent pour $4 \times 0,6 \text{ UGB} \times 9,5 = 23$ kg N/ha à l'alimentation azotée de la prairie.

Pour les Monts du Lyonnais et du Beaujolais, un même type de tableau pratique a été retenu. Il prend également en compte le type de pâturage (tournant, continu) alors que pour la Lorraine, un tableau simplifié donnant directement les valeurs de NRrest a été proposé.

Tableau 3 : Effet direct annuel des restitutions au pâturage (NRrest, en kg N/ha pour 100 jours d'UGB au pâturage, JPha) pour les prairies du Grand Ouest .

Table 3 : Direct annual effect of recycling under grazing in pastures of Western France (Nrest = kg recycled N per ha for 100 L.U. grazing days (of 24 h) ; JPha = grazing days per ha).

Arrêt de la croissance de l'herbe	Journée de pâturage de 20 h	Journée complète de pâturage (24 h)
- moins de 1 mois l'été	9	10,5
- plus de 1 mois l'été	8	9,5

3. La contribution de la fixation symbiotique à l'alimentation azotée de la prairie, NRleg

Le trèfle blanc et de façon plus générale les légumineuses fixent l'azote atmosphérique grâce aux nodosités situées sur les racines. Le taux de fixation est mesuré sur la biomasse récoltée de la légumineuse et est défini par la part de l'azote qui provient de la fixation. Pouvant atteindre 90% dans les associations de ray-grass anglais - trèfle blanc (Vertès *et al.*, 1995), il varie de façon non négligeable en fonction de l'azote minéral disponible dans le sol et des conditions pédoclimatiques. Le reste de la nutrition azotée des parties aériennes du trèfle provient de l'azote minéral. L'azote fixé par le trèfle est ensuite transféré en partie à la graminée associée par l'intermédiaire de la décomposition des stolons, feuilles, racines, nodosités, par les exsudats racinaires ainsi que par le retour dans les urines et les fèces (Ledgard, 1991 ; Le Gall *et al.*, 1999a).

On a fait ici l'hypothèse simplificatrice que NRleg est égal à la quantité d'azote fixé dans la biomasse récoltée du trèfle. Pour le calculer, il faut donc estimer la biomasse annuelle produite par la prairie, le taux moyen de légumineuses pondéré sur l'année (%TB), la teneur en azote des légumineuses (NTB) et le taux de fixation (%fixation ; Vertès *et al.*, 1996) :

$$N_{\text{fixé}} = NR_{\text{leg}} = \text{Biomasse} \times \%TB \times NTB \times \%fixation$$

On a considéré que le trèfle blanc contient 3,5% d'azote et que le taux de fixation est de 90%, ce qui conduit à une quantité d'azote fixé de 31 kg d'azote par tonne de matière sèche de trèfle blanc : $N_{\text{fixé}} = \text{Biomasse} \times \%TB \times 3,5 \times 0,90$ (selon Vertès *et al.*, 1996).

Cette estimation n'est cependant pas tout à fait satisfaisante puisqu'en toute rigueur, il faudrait être capable d'évaluer aussi l'azote fixé des parties souterraines et des nodosités qui est transféré pour partie aux graminées. La sous-estimation induite par la méthode simplifiée retenue est cependant compensée par le taux de fixation important proposé (90%). Notons qu'une valeur plus élevée a été retenue pour les prairies des Monts du Lyonnais et du Beaujolais (Bonnet, 1992).

Les tableaux 4 et 5 élaborés pour les prairies du Grand Ouest proposent une estimation du taux de trèfle pondéré à l'échelle de la saison de pâturage ainsi que les quantités d'azote fixé dans la biomasse récoltée en fonction du taux annuel moyen pondéré et de la production totale de la prairie.

Exemple : 10% de trèfle blanc au printemps en situation climatique intermédiaire soit 20% de trèfle en été conduit à un pourcentage pondéré annuel de 15% (tableau 4). Si la production annuelle est estimée à 8,8 t MS/ha (soit environ 9 t MS/ha), l'estimation de la contribution du trèfle, dont le taux pondéré est de 15%, sera de 45 kg N.

Tableau 4 : Evaluation du taux de trèfle blanc pondéré annuel en fonction du taux au printemps et en été.

Table 4 : Estimation of the weighted yearly white clover content based on the spring and summer contents..

Au printemps	Taux de trèfle blanc (%)		Taux pondéré annuel (%)	
	En été		Situation à été arrosé ou intermédiaire	Situation à été sec
	Situation arrosée ou intermédiaire	Situation sèche		
10	20	15	15	10
15	25	20	20	15
20	35	25	25	20

Tableau 5 : Quantité d'azote fixé dans la biomasse récoltée (NRleg, kg N/ha/an) selon le taux de trèfle annuel pondéré et la production de la prairie.

Table 5 : Amount of nitrogen fixed in the harvested bio-mass (NRleg, kg N/ha/an) according to the yearly weighted clover content and the production of the pasture.

Taux de trèfle blanc pondéré annuel (%)	10	15	20	25
Production de la prairie (t MS/ha) :				
4	15	20	25	30
6	20	30	40	50
8	25	40	50	65
10	30	50	60	80

4. L'effet direct des engrais de ferme en équivalence engrais, Nf

Ce terme ne comprend pas les arrière - effets des engrais de ferme qui sont déjà intégrés, on l'a vu, dans la fourniture d'azote par le sol NRSol.

La valeur fertilisante Nf de l'azote total d'un engrais de ferme est estimée à partir des coefficients d'équivalence engrais azote, Keq. Ces coefficients permettent d'évaluer la quantité d'azote apporté sous forme d'ammonitrate ayant le même effet azote sur la prairie qu'1 kg d'azote total de l'engrais de ferme considéré. Le tableau 6 présente les coefficients actuellement retenus pour le Grand Ouest pour les principaux engrais de ferme sur prairies (Hacala *et al.*, 1999).

5. Le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais, CAU

Le CAU représente la fraction de l'azote apporté à la prairie qui est apparemment récolté. La part de l'azote fourni qui n'est pas récolté (1 – CAU) recouvre les pertes par voies gazeuses et par lessivage, l'organisation et l'immobilisation dans le sol, le stockage dans les organes de réserves ou encore la fraction qui reste dans le sol sous forme minérale (Meynard *et al.*, 1996). Pour des doses d'engrais inférieures aux doses optimales, le reliquat ou les pertes par lessivage sont très faibles, voire nuls.

Le CAU semble très étroitement lié à la vitesse de croissance du peuplement au moment de l'apport (Limaux, 1999). En effet, l'azote disponible dans le sol est absorbé par les plantes d'autant plus rapidement que leurs besoins sont importants. Ainsi, le CAU est plus élevé au printemps quand la vitesse de croissance est élevée, tandis qu'il est plus faible en été lorsque les conditions hydriques et les températures

excessives deviennent limitantes pour la croissance. A l'automne, température du sol, humidité et rayonnement sont, en général, autant sinon plus favorables qu'en mars, mais la sénescence est plus importante. L'organisation engendrée par les matériaux qui en sont issus a pour effet de diminuer le CAU. Cela explique des CAU plus faibles à l'automne qu'en février ou mars. Par ailleurs, le CAU semble indépendant de l'âge de la prairie (Loiseau *et al.*, 1992).

Dans les fermes expérimentales du Grand Ouest, les mesures réalisées ont montré une relative stabilité des CAU de printemps autour de 70%. Ainsi, pour calculer une dose globale annuelle appliquée avant la période estivale pour éviter les apports peu valorisés, la valeur de 70% a été retenue. Pour les autres régions déjà signalées, l'analyse des essais disponibles nous a amené à retenir un CAU annuel de 60%.

Tableau 6 : Coefficient d'équivalence engrais organique (Keq) sur prairie pour l'Ouest de la France.

Table 6 : Equivalence co-efficient of direct organic fertilizer effect (Keq) in a pasture of Western France.

	Période d'apport	Mode d'apport	Régions réguliè- rement arrosées	Régions à déficit estival marqué
Fumier de bovins	Automne-hiver	En surface	0,15	0,10
	Printemps	En surface	0,10	0,05
Compost de fumier de bovins	Automne-hiver	En surface	0,10	0,05
	Printemps	En surface	0,05	0
Fumier de porcs	Automne-hiver	En surface	0,40	0,40
	Printemps	En surface	0,40	0,40
Compost de fumier de porcs	Automne-hiver	En surface	0,25	0,20
	Printemps	En surface	0,20	0,20
Lisier de bovins	Printemps	En surface	0,50	0,40
	Printemps	Enfoui	0,60	0,50
Lisier de porcs	Printemps	En surface	0,60	0,50
	Printemps	enfoui	0,70	0,60

Applications et discussion

Un exemple d'application mis en oeuvre figure 2 sur une prairie bretonne uniquement pâturée permet d'illustrer et de récapituler l'ensemble de la démarche de raisonnement. L'objectif fixé à cette prairie est une production au champ de 8,8 t MS/ha. La fourniture du sol correspond à une prairie avec une pousse estivale moyenne et un entretien azoté antérieur intermédiaire. C'est une prairie avec un fond de trèfle blanc (10% au printemps) sur laquelle il y a en moyenne 503 journées de pâturage de vaches allaitantes avec leurs veaux. Le calcul aboutit à un apport nécessaire d'environ 110 unités d'azote dont 50 sont fournis par un épandage de lisier de porcs au printemps.

*** Limites de cette démarche de ce raisonnement**

Chaque terme de l'équation a nécessité des choix discutables. A titre d'exemple, le tableau 7 donne un aperçu de la variabilité à laquelle on peut s'attendre sur chacun des termes de la prairie bretonne. La teneur en azote a par exemple été fixée à 30 kg N/t MS mais on peut supposer qu'elle est susceptible de varier de 25 à 35 kg N/t MS au mieux. Les effets directs ont été fixés à 10,5 kg/100 JPha, mais ils sont peut-être plus ou moins importants (8,5 à 12,5 kg/100 JPha). Notons que la fourniture d'azote par le sol et le CAU sont sujets à de fortes variations interannuelles et qui influent le plus sur le résultat.

Néanmoins, en admettant que les ordres de grandeur des différents termes soient corrects, ces limites doivent être relativisées car :

- D'une part, même si ce calcul est réalisé pour une année climatique "moyenne", il existe pour les prairies des effets qui tamponnent de façon importante les variations interannuelles. En effet, quand par

exemple sur la prairie bretonne (tableau 8) l'année est favorable à la pousse de l'herbe, la production est bien meilleure que l'objectif fixé au départ mais, dans ce cas, la minéralisation est plus importante, le nombre de journées de pâturage et l'effet direct des restitutions sont plus importants. En revanche, le taux de fixation diminue lorsque la minéralisation du sol est accrue et la fixation azotée du trèfle est diminuée. Finalement, même si les quantités d'azote exporté sont plus élevées que celles prévues, les sources d'azote le sont aussi et la quantité d'azote à apporter après calcul est similaire. L'inverse est vrai aussi en année climatiquement défavorable à la pousse de l'herbe.

- D'autre part, l'éleveur a des possibilités d'ajustement des apports d'azote sur prairie selon le climat de l'année puisque l'azote est apporté en plusieurs fois. Enfin, l'animal a aussi un effet tampon, surtout en production de viande.

Figure 2 : Exemple d'application de la méthode sur une prairie pâturée en Bretagne. Calcul de la dose annuelle d'engrais minéral à apporter.

Figure 2 : Application of the method to a grazed pasture in Brittany. Determination of the yearly amount of mineral fertilizer to apply.

1- Objectif de production annuelle	8,8 t MS/ha	2- Besoins en N
répartis en :		
Pâturage à rotation rapide ou libre intensif	8,8 t MS/ha x 30 kg N/t MS	= 264 kg N/ha
Pâturage à rotation lente ou ensilage	t MS/ha x 25 kg N/t MS	=
Foin précoce (fin mai) ou foin de repousse	t MS/ha x 20 kg N/t MS	=
Foin tardif de 1er cycle	t MS/ha x 15 kg N/t MS	=
Exportations totales (NR)		= 264 kg N/ha
3- Fourniture par le sol (NRsol) (tableau 2)		90 kg N/ha
4- Contribution des restitutions au pâturage de l'année (NRrest) (tableau 3)	503 JP	53 kg N/ha
5- Contribution des légumineuses (NRleg) (tableaux 4 et 5)	10% TB pondéré sur l'année	45 kg N/ha
6- Total des sources d'azote hors apports (3+4+5)		= 188 kg N/ha
7- Reste à mettre à disposition des plantes (2-6)		76 kg N/ha
8- Azote à apporter compte tenu du CAU (7/CAU)		109 kg N/ha
9- Effet direct des fumiers et lisiers selon la période d'apport (Nf) (tableau 6)		
	Quantité épandue	kg N total
Fumier bovins automne	t/ha x	kg/t x
Fumier bovins printemps	t/ha x	kg/t x
Lisier bovins automne	m ³ /ha x	kg/m ³ x
Lisier bovins printemps	m ³ /ha x	kg/m ³ x
Lisier porcs printemps	40 m ³ /ha x	2 kg/m ³ x
		0,6
		= 48 kg/ha
Fournitures totales par effet direct		= 48 kg N/ha
10- Dose totale d'engrais minéral à apporter pour l'année (8-9)		61 kg N/ha

Tableau 7 : Estimation de la variabilité de la valeur des termes de l'équation à partir de l'exemple breton.

Table 7 : Estimation of the variability of the values of the equation's terms based on the Breton example.

Terme de l'équation	Valeur moyenne	Variabilité inter-annuelle probable	Fourchette des valeurs
Production (t MS)	8,8	± 2	7 - 11
Teneur N (kg N/t MS)	30	± 5	25 - 35
NRsol (kg N)	90	± 40	50 - 130
NRrest (kg N/100 j d'UGB)	10,5	± 2	8,5 - 12,5
NRleg (kg N/t MS TB)	31	± 10	21 - 41
CAU (%)	70	± 10	60 - 80

Tableau 8 : Simulation des apports d'azote à apporter en fonction des années climatiques.

Table 8 : Simulation of the nitrogen dressing requirements according to the climatic variation among years.

Terme de l'équation	Prévision	Année climatique défavorable	Année climatique favorable
Production (t MS/ha)	8,8	7	11
Teneur en N (kg N/t MS)	30	30	30
NR (kg N)	264	210	330
NRsol (kg N)	90	50	130
NRrest (kg N)	53 (pour 503 JPha à 10,5 kg N/100 j d'UGB)	40 (pour 470 JPha à 8,5 kg N/100 j d'UGB)	91 (pour 733 JPha à 12,5 kg N/100 j d'UGB)
NRleg (kg N)	45	55 (pour 20% pondéré de TB et 41 kg N/t MS TB)	25 (pour 10% pondéré de TB et 21 kg N/t MS TB)
N à mettre à disposition (kg N)	76	65	84
CAU (%)	70	60	80
N à apporter : Nm + Nf (kg N)	109	108	105

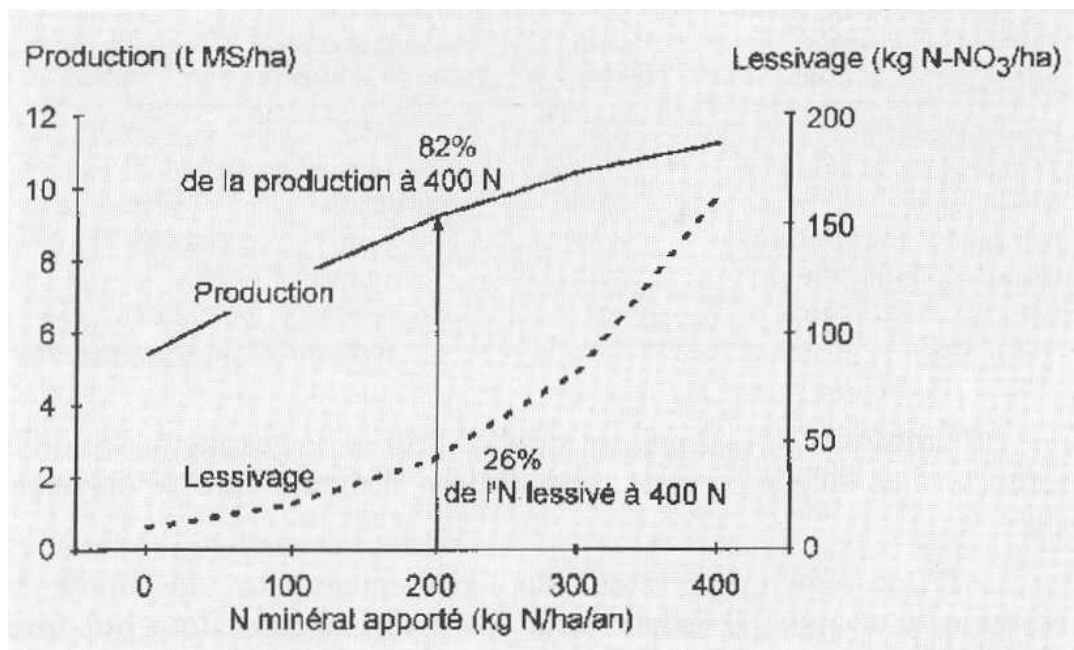
*** Type de prairie concerné**

Cette démarche s'adapte bien aux prairies conduites de façon relativement intensive qui reçoivent de l'azote minéral en quantités non négligeables. Elle permet en effet de mieux ajuster les doses d'azote aux besoins des prairies. Cependant, utiliser cette méthode de calcul n'est pas la garantie d'une absence de pertes, en particulier pour les prairies pâturées. En effet, même en optimisant les apports par rapport aux besoins des troupeaux, Le Gall *et al.* (1999b) montrent que le risque de lessivage sous prairies pâturées, lié pour une bonne partie à l'importance des journées de pâturage devient important au delà de 200 kg N/ha/an dans la plupart des situations (figure 3).

Pour toutes les autres situations de prairies, cette méthode est un excellent outil pédagogique pour identifier et mieux situer l'importance des sources d'azote, notamment pour les prairies conduites à base de trèfle ou ne recevant que des engrais de ferme.

Figure 3 : Incidence de la fertilisation azotée des prairies pâturées sur la production fourragère et les pertes d'azote nitrique (synthèse d'essais menés dans l'Ouest de la France et en Europe du Nord).

Figure 3 : Effect of the nitrogen fertilization of grazed pastures on forage production and nitrate losses (synthesis of trials carried out in Western France and Northern Europe).



Conclusion

Comme nous l'avons souligné au début de cet article, cette démarche constitue un premier pas vers une quantification des flux d'azote qui permet aux praticiens, aux éleveurs comme aux chercheurs d'avancer dans une même voie. Elle renvoie à des travaux de recherche plus fondamentaux et ouvre la porte à l'élaboration de références locales fondées sur des démarches diverses telles que les réseaux de parcelles témoin pour estimer les fournitures d'azote par le sol. Ces derniers constituent en outre des lieux d'échanges et de questionnements qui ne peuvent que faire avancer la connaissance. Elle reste néanmoins un outil complexe et peu pertinent à mettre en œuvre si il n'a pas été préalablement testé? régionalement.

Notons enfin que cette démarche pourrait être à l'avenir couplée avec une méthode de quantification des pertes d'azote (pertes gazeuses et pertes par lessivage) comme l'ont fait les chercheurs anglais (Scholefield *et al.*, 1991).

Accepté pour publication, le 7 octobre 2000.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Balesdent J. (1996) : "Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France", *Etude et Gestion des sols*, 3, n°4, 245-260.

Bonnet P. (1992) : *Références Rhône-Alpes, Fertilisation azotée des prairies*, Programme de Recherche Développement Massif Central.

Chambre Régionale des Pays-de-la-Loire (1998) : *Fertilisation des prairies : comprendre pour décider*, document édité par la Chambre.

Decau M.L. (1997) : *Flux d'azote en prairie pâturée par des bovins : de l'étude du compartiment minéral et de la lixiviation à la minéralisation de l'ensemble du système*, thèse de doctorat de l'université de Caen, décembre.

Delaby L. (1999) : "Effet de la fertilisation minérale azotée des prairies sur la valeur alimentaire de l'herbe et les performances des vaches laitières au pâturage", *Journée technique "Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest"*, Rennes, 25 février 1999.

Farruggia A. (1994) : "Fertilisation azotée des prairies", *Colloque bovins viande*, Chateauroux.

Farruggia A., Castillon P., Le Gall A., Cabaret M.M. (1999) : "Le raisonnement de la fertilisation azotée des prairies. Proposition d'une méthode de calcul de la dose d'azote à apporter pour les régions du Grand Ouest de la France", *Journée technique "Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest"*, Rennes, 25 février 1999.

Gill K., Jarvis S.C., Hatch D.J. (1995) : "Minéralisation of nitrogen in long-term pasture soils : effects of management", *Plant and Soil*, 172, 153-162.

Hacala S., Bodet J.M., Cabaret M.M., Mercier V., Van Hecke B. (1999) : "Utilisation des engrais de ferme pour la fertilisation azotée des prairies", *Journée technique "Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest"*, Rennes, 25 février 1999.

Hassink J. (1994) : "Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralisation", *Soil Biol. Biochem.*, 26 (9), 1221-1231.

ITEB (1991) : "Troupeau allaitant, mode d'emploi", Chapitre 3 , *Les surfaces fourragères et l'alimentation du troupeau*, Diffusion Technipel, 123-202.

Legard F. (1991) : "Transfert of fixed nitrogen from white clover to associated grasses in swards grazed by dairy cows, estimated using 15 N methods", *Plant and soil*, 131, 215-223.

Limaux F. (1999) : *Modélisation des besoins en azote du blé, de la fourniture du sol et du coefficient apparent d'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine*, thèse de doctorat de l'INPL à Nancy.

Le Gall A., Le Meur D., Grasset M., Fougere M. (1999a) : "Le trèfle blanc : un moyen économique d'assurer la nutrition azotée des prairies", *Journée technique "Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest"*, Rennes, 25 février 1999.

Le Gall A., Legarto J., Cabaret M.M., Chambaut H. (1999b) : "Excédents des minéraux des systèmes d'élevage bovin et réduction des flux d'azote à l'échelle de l'exploitation", *Journée technique "Les éleveurs de ruminants, acteurs de la qualité de l'eau"*, 26 octobre 1999, Paris.

Lemaire G., Salette J. (1984) : "Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I- Etude de l'effet du milieu. II- Etude de la variabilité entre génotypes", *Agronomie*, 4(5), 423-430 et 431-436.

Loiseau P., El Habchi A., De Montard F.X., Triboi E. (1992) : "Indicateurs pour la gestion de l'azote dans les systèmes de culture incluant la prairie temporaire de fauche", *Fourrages*, 129, 29-43.

Loiseau P., Grignani C. (1991) : "Etat de l'azote organique et devenir de l'azote apporté sous les prairies de moyenne montagne", *Agronomie*, 11, 143-150.

Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S. (1996) : "Fertilisation des cultures annuelles de plein champ", *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les colloques, n°83, éd. INRA, 183-199.

De Montard FX. (1986) : "Raisonnement de la fertilisation des prairies et du plan de fumure de l'exploitation", *Forum Fourrages Auvergne*, 85-110.

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

Scholefield D., Lockyer D., Whitehead D., 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.

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

Simon J.C., Vertès F., Decau M.L., Le Corre L. (1997) : "Les flux d'azote au pâturage. I- Bilan à l'exploitation et lessivage de nitrate sous prairie", *Fourrages*, 151, 249-262.

Vertès F., Decau M.L. (1992) : "Suivis d'azote minéral dans les sols : risque de lessivage de nitrate selon le couvert végétal", *Fourrages*, 129, 11-28.

Vertès F., Soussana J.F., Louault F. (1995) : "Utilisation de marquage 15N pour la quantification des flux d'azote en prairie pâturée", *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, éd. INRA, Les colloques, n°70, 265-275.

Vertès F., Chaumier J.L., Decau M.L., Journet M. (1996) : "Nitrogen flows and leaching under grazed grasslands", *Grassland and Land Use Systems*, Proc. XVIth EGF, G. Parente, J. Frame, S. Orsi eds, Grado, 16-21 sept. 1996, 1, 867-871.

SUMMARY

Proposed method for the determination of a rational nitrogen fertilization of pastures

The nitrogen fertilization of pastures has been rather less investigated in France than that of annual crops. The method described here serves for the determination of rational fertilizer dressings for pastures, but it has to be adapted to regional circumstances (cf. following paper).

Following a reminder of the specific features of nitrogen flows under pastures, an explanation of the method's principle is given. The equation of utilization efficiency of a fertilizer and its adaptation to pastures is detailed term by term, each term of the equation being illustrated by references taken from Western France. The determination of nitrogen removal and of nitrogen supply by the soil, the contributions of recyclings by grazing and of symbiotic fixation, the direct effect of farmyard fertilizers, and the values of the apparent utilization co-efficient of a fertilizer are given in a wide development. The reasoning process is summed up in an application to an exclusively grazed pasture in Western France, followed by a discussion on its merits and its limits.