

*MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE PRATIQUE
POUR LE CALCUL DE LA FERTILISATION
DES PRAIRIES DANS LE MASSIF CENTRAL
HUMIDE*

I. La fertilisation azotée

LE BUT DE CET ARTICLE EST DE POSER LES BASES D'UNE MÉTHODE DE CONCERTATION PERMANENTE ENTRE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN MATIÈRE DE FERTILISATION des prairies pour l'Auvergne et le Massif Central. Il s'agit de mettre à jour périodiquement le conseil de fertilisation des prairies et la façon de le concevoir au fur et à mesure des progrès dans la connaissance du milieu et dans les résultats expérimentaux, tout en s'efforçant de l'adapter aux préoccupations des éleveurs.

Le conseil de fumure peut être basé sur les résultats d'essais régionaux en procédant par analogie de situation à partir de sites représentatifs ; mais ceux-ci sont rarement assez nombreux pour couvrir la grande variété des milieux rencontrés. Une autre difficulté est la diversité des sources d'éléments nutritifs dans les fermes d'élevage ; l'expérimentation est rarement conçue pour intégrer les effets des fumures organiques et des déjections au pâturage dans le calcul de fumure.

*par F.X. de Montard,
F. Anglade,
P. Monteilhet,
J.C. Thouly*

Le calcul de bilan par parcelle ou par groupe homogène de parcelles est nécessaire pour prendre en compte ces sources d'éléments et établir les ponts indispensables entre l'expérimentation et les conditions réelles en exploitation. Par ailleurs, le climat de l'année a une forte influence sur la production d'herbe observée et les bilans ; l'interprétation des résultats d'essais et des mesures au champ nécessitent d'inclure les paramètres climatiques et une bonne caractérisation fréquentielle du climat microrégional (F.X. de MONTARD, 1986).

Après les facteurs climatiques, l'alimentation azotée est considérée comme le facteur limitant principal et l'élément moteur de la croissance végétale.

C'est pourquoi la méthode de calcul de fertilisation azotée des prairies proposée dans cet article met l'accent sur le calcul du bilan de l'azote sous prairie en rapport avec un objectif de production réalisant une proportion connue du potentiel pédo-climatique (cf. coefficient de correction et Coefficients Techniques d'Utilisation de A. HENTGEN, 1982 et 1984).

Les autres éléments, traités dans une 2^e partie, sont considérés comme complémentaires de l'azote et leurs apports calqués sur les flux d'azote qui alimentent la plante.

Des progrès importants récents dans la connaissance des productions prairiales sur le terrain ont été acquis au travers de l'enquête S.C.E.E.S. 1982, des réseaux de recherche de références en exploitation et par l'expérimentation des fertilisations phosphatées et potassiques et du chaulage (S.C.P.A., 1984).

Par contre, un effort considérable reste à faire dans la connaissance du volume et de l'efficacité des 4 principales sources d'azote :

- l'azote minéral provenant de la matière organique du sol par action microbienne minéralisante ;
- l'azote minéralisé provenant des déjections animales ;
- l'azote de l'air fixé par les bactéries des légumineuses ;
- l'azote provenant des engrais minéraux.

Ces sources doivent satisfaire à l'objectif de production et aux exportations d'azote correspondantes, sachant que la fourniture du sol est très variable selon les parcelles, le type de terrain et le passé cultural.

Avant d'aboutir au calcul de l'apport d'azote minéral à réaliser, les étapes suivantes vont être abordées successivement :

- l'estimation du besoin en azote,
- l'estimation des quantités minéralisées par le sol,
- la valorisation des apports organiques
- et la contribution de la fixation symbiotique.

ESTIMATION DU BESOIN EN AZOTE

Les besoins totaux en azote sont fonction de l'objectif de production réalisable qui résulte d'un arbitrage entre le potentiel accessible, compte tenu du sol et du climat, et l'opportunité économique de sa réalisation totale ou partielle dans le cadre du système fourrager.

Dans le cadre de calcul proposé, on estime couramment à 25 kg la dose d'azote nécessaire à la production d'une tonne de matière sèche. En réalité, les teneurs en azote suivent une loi de dilution au fur et à mesure que croît la matière sèche sur pied (SALETTE et LEMAIRE, 1981 ; tableau I).

En fixant à environ 25 kg/t M.S. le besoin en azote exportable, on exerce en réalité une contrainte par rapport à l'exigence du potentiel accessible, contrainte qui se résout en un retard de croissance et une teneur plus faible à degré de croissance en matière sèche égal.

Pour diminuer cette contrainte, on peut avantageusement moduler la norme selon le type de récolte envisagé : 30 ‰ d'azote en pâture, 25 en ensilage et 20 en foin, 25 à 30 sur les repousses.

Après ce calcul du besoin d'azote en fonction de l'objectif de production et du stade de récolte, on déterminera la contribution des sources

TABLEAU I
DEGRÉ DE CROISSANCE ET TENEUR EN AZOTE
DES RÉCOLTES
 (Sources : J. SALETTE et G. LEMAIRE ;
 M. NIQUEUX, R. ARNAUD et F.X. de MONTARD)

FETUQUE ELEVEE au printemps (azote non limitant) à LUSIGNAN (plaines de l'Ouest)		PRAIRIE PERMANENTE DE FAUCHE au printemps (60 kg N/ha en fin d'hiver) à LAQUEUILLE (Monts d'Auvergne 1 050 m)	
MS (t/ha)	N (kg/t MS)	MS (t/ha)	N (kg/t MS)
-	-	0,5	50
1,0	50	1,0	46
-	-	1,5	42
2	42	2	38
3	32	3	31
4	25	4	24
5	22	5	19
6	19	6	17

d'azote présentes sur l'exploitation : la minéralisation du stock organique du sol, les déjections animales et la fixation symbiotique pour déduire ensuite par différence le complément que doit apporter la fumure minérale.

LA DÉTERMINATION DE L'AZOTE DES RÉCOLTES PROVENANT DU STOCK MINÉRALISABLE DU SOL

1. Expertise des quantités d'azote fournies par le sol

Le problème le plus difficile réside dans la détermination de l'azote minéral disponible à partir du stock du sol. L'analyse de sol ordinaire concernant Carbone, Azote, rapport C/N, pH... est d'un médiocre secours. De nouveaux critères sont actuellement recherchés sur les prairies d'Auvergne (P. LOISEAU, I.N.R.A., Station d'Agronomie) et cette recherche va demander plusieurs années. Toutefois, il est possible de faire dès

maintenant une estimation convenable du point de vue pratique si nous valorisons la connaissance qu'ont du terrain les agents de développement ; le problème est d'introduire une méthode pour les aider à structurer leurs observations. Il s'agit de réaliser une expertise sur la base d'une typologie des parcelles tenant compte d'une part de la roche mère, du modelé du terrain et des types de sols résultants et, d'autre part, des pratiques agricoles anciennes, récentes ou actuelles qui agissent sur le stock d'azote organique et sur le rythme de minéralisation.

On quitte donc le domaine habituel de l'analyse de sol pour privilégier la connaissance du terrain et des pratiques agricoles et faire correspondre aux types de prairies ainsi déterminés une quantité annuelle d'azote minéralisé à l'hectare.

TABLEAU II
ESTIMATION DU POUVOIR ALIMENTAIRE AZOTÉ
DES SOLS DE PRAIRIES DU PUY-DE-DÔME

niveau 1	50 kg N/ha/an 35 à 65	pH 5	(* sols engorgés riches en matière organique (peu active ((* sols sains mais superficiels ou pauvres (chimiquement
niveau 2	80 kg N/ha/an 65 à 95	pH 5,5	(sol de profondeur moyenne avec peu d'entretien en fumure organique ou bien entretien correct mais depuis moins de 10 ans
niveau 3	110 kg N/ha/an 95 à 125	pH 5,5	(sol de profondeur moyenne avec fort entretien organique ou pâture intensive (1) depuis 10 ans et plus
niveau 4	140 kg N/ha/an 125 à 155	pH 5,5	(sol profond et frais avec fort entretien organique ou pâture intensive (1) depuis 10 ans et plus
niveau 5	170 kg N/ha/an 155 à 185	pH 5,5	(sol profond, ne présentant pas de signe de sécheresse mais sain avec très fort entretien
(1) pâture intensive : plus de 500 UGB x jours/ha/an			

Au stade actuel de la réflexion avec le Développement, on a reconnu 5 niveaux de minéralisation de l'azote pour l'ensemble du département du Puy-de-Dôme et précisé la gamme de variation plus restreinte propre à chaque petite région (tableau II). On présume que ces niveaux sont applicables à des sols recevant des précipitations régulières (versants et plateaux exposés à l'ouest recevant plus de 900 mm par an). Dans les situations plus sèches, on conseille de prendre pour référence le niveau inférieur d'une unité ; et dans le cas d'un climat très favorable le niveau supérieur d'une unité.

Les fourchettes proposées par petites régions agricoles sont les suivantes (en kg N/ha) :

Montagne volcanique humide (Rochefort, Dômes, Sancy)	80 à 170
Montagne volcanique plus sèche (Cézallier et Artense)	50 à 140
Combrailles et versant ouest du Livradois Forez	80 à 140
Montagne granitique en versant est (Champeix, Combronde, Livradois Forez)	50 à 110
Plaine	50 à 110
(dans quelques situations très favorables)	140)

En pratique, l'expertise est basée sur la prise en considération de deux éléments de calcul :

- d'une part, la fertilité globale de la parcelle envisagée sous l'angle des pratiques de conduite qui lui ont été appliquées à moyen ou à long terme (fertilisation, mode et rythme d'exploitation) ;
- d'autre part, l'estimation de l'alimentation en eau d'après le bilan hydrique et le calcul de l'évapotranspiration réelle qui y correspond.

La fourniture d'azote par le sol est exprimée par le produit (PRATIC × E.T.R.), affecté d'un coefficient déterminé régionalement ;

- PRATIC désigne l'arrière-effet des pratiques de l'agriculteur sur la fertilité azotée du sol ; ce terme est largement lié négativement aux irrégularités de la topographie, à l'éloignement et, de façon générale, aux difficultés d'accès à la parcelle ;

- E.T.R. désigne l'évapotranspiration réelle faisant intervenir les éléments suivants du calcul du bilan hydrique : E.T.P. (évapotranspiration potentielle), pluviométrie, R.F.U. (réserve en eau facilement utilisable) du sol, présence d'une nappe d'eau, arrivée latérale d'eau sur la parcelle selon sa position topographique et la longueur de la pente amont.

Par convention, l'arrivée d'eau latérale reçoit la valeur 100 mm à l'aval d'une pente dépourvue de fossés d'assainissement ou de drains et longue de plus de 300 m sur roches ou sur matériaux peu perméables ; elle reçoit la valeur 50 mm à l'aval d'une pente dont la longueur est comprise entre 100 et 300 m ; elle est nulle lorsque la pente amont est longue de moins de 100 m ou lorsque le substrat est poreux (schistes à pendage transversal à la pente, calcaires, alluvions filtrantes sans nappe).

2. Application aux prairies des coteaux du Lembron

Une application de cette méthode a été effectuée sur 81 prairies des coteaux du Lembron (Puy-de-Dôme ; altitude 400-800 m) sur les productions obtenues en 1985. Une analyse en régression multiple a permis d'estimer la contribution des différentes sources d'azote (annexe 1) ; l'azote provenant du sol est exprimé par la relation :

$$\text{Fourniture N sol} = 70,3 \times \text{PRATIC} \times \frac{(\text{PL} + \text{R.F.U.} + \text{Ir})}{1000}$$

Dans cette équation, PRATIC désigne la fertilité azotée du sol résultant des pratiques d'entretien et d'utilisation des parcelles qui sont effectivement très dépendantes de l'accessibilité sensu lato ; le codage de ce terme est le suivant :

- 4 : terre labourable très accessible, cultivée en ray-grass d'Italie,
- 3 : prairie permanente ou pluriannuelle ensilable,
- 2 : prairie permanente ou pluriannuelle fauchable en foin,
- 1 : pacage exclusif avec épandage d'engrais mécanisable.

PL + R.F.U. + Ir est la somme, en millimètres, de la pluviométrie de la période de végétation active jusqu'à la date de la dernière exploitation

d'herbe, de la R.F.U. et de Ir, la dose moyenne d'irrigation estimée à 93 mm sur l'ensemble des parcelles irriguées.

La somme PL + R.F.U. est généralement comprise entre 400 et 500 mm pour une R.F.U. de 50 mm dans cette petite région de piémont abritée des vents d'ouest par le massif du Cézallier.

Plus haut en altitude, 600 - 900 m, les versants abrités ont couramment une E.T.R. de 450 à 550 mm ; les versants ouest et les altitudes supérieures, une E.T.R. de 550 à 600 mm.

Dans les coteaux du Lembron, l'année 1985 a été particulièrement sèche de juillet à novembre et il n'y a donc pas eu de repousse d'été et d'automne. L'exportation moyenne s'est élevée à 160 kg N/ha/an (écart type ± 63) et la fourniture moyenne du sol à 79 kg N ; soit respectivement 31, 62, 93 et 124 kg N/ha/an selon la valeur du terme PRATIC.

En année normale, la fourniture moyenne du sol serait de 95 à 105 kg N/ha/an.

3. Confrontation avec les résultats expérimentaux locaux

Ce chiffre est à rapprocher des références expérimentales obtenues en Auvergne sur des séries de 5 à 11 ans :

— *Sol volcanique de 55 cm à Marcenat (Cantal, altitude 1050 m)*

N fourni par le sol est de 105 kg/ha/an ; cette fourniture peut être modulée en fonction du déficit hydrique et du nombre de coupes par an (3 ou 6 dans cet essai) :

$$N \text{ sol} = 64 + 30 C_p - 0,40 \text{ DEF}$$

où N sol désigne la fourniture par le sol en kg/ha/an, C_p le nombre de coupes et DEF le déficit hydrique en mm par an. Le facteur N sol explique 35 % de la variance des exportations des récoltes.

— *Sol granitique à Saint-Genès-Champanelle*
(Puy-de-Dôme, altitude 880 m)

Cet essai permet de comparer 3 profondeurs de sol en cuves lysimétriques sans sous sol (tableau III).

TABLEAU III
EFFET DE LA PROFONDEUR
SUR LA FOURNITURE ANNUELLE D'AZOTE PAR LE SOL

Profondeur (cm)	Fourniture d'azote (kg/ha/an)
20	48 à 61
40	70 à 83
80	114 à 127

— D'autres mesures réalisées sur un réseau de 50 parcelles des Monts Dômes et Dore (annexe 2), principalement sur les sols volcaniques profonds (60 à 80 cm) autour de Laqueuille, Rochefort-Montagne et Saulzet-le-Froid, entre 850 et 1100 m d'altitude, ont permis d'estimer la fourniture moyenne du sol à 115 kg N/ha/an et de la moduler en fonction du taux d'azote total et du rapport C/N de l'horizon supérieur, de 0 à 5 cm, du sol.
Fourniture N du sol $\simeq 14,6 N (1 - 9 C/N) + 92$

Dans cette petite région dominée par la prairie naturelle, la teneur N du sol et le rapport C/N ne rendent compte toutefois que de 7 % de la variance de l'exportation annuelle d'azote des récoltes d'herbe.

— *En Combraille*, petite région granitique voisine, de polyculture et élevage, les mêmes facteurs N et C/N combinés couvrent 28 % de la variance des exportations d'azote des prairies et rendent compte ainsi des contrastes entre les prairies temporaires dont le sol est cultivé avec une périodicité très variable et les prairies permanentes : la richesse du sol en azote total est un indicateur intéressant à condition que la matière organi-

que puisse évoluer ; le rapport C/N qui permet de caractériser cet état d'évolution est plus élevé dans les zones à excès d'eau et dans les pâturages extensifs mal exploités.

— *Dans les Monts Dômes et Dore*, l'exploitation incomplète de l'herbe des pâturages extensifs et l'accumulation de litière entraînent une diminution de 55 kg N/ha/an de la fourniture par le sol, soit 60 kg en comparaison des 115 kg mesurés sur les prés et pacages correctement exploités.

— *En Margeride de Lozère* (F.X. de MONTARD, 1983), montagne granitique, la fourniture moyenne des sols des prés et des pacages entretenus a été estimée à 95 kg N/ha/an ; ce chiffre, plus faible que celui des Monts Dore et Dôme paraît refléter une pluviométrie moins abondante.

L'éloignement des bâtiments et les difficultés d'accès entraînent un défaut d'entretien et d'utilisation de l'herbe résultant en un déficit de 24 kg d'azote par rapport à cette fourniture moyenne.

L'hydromorphie permanente entraîne un déficit d'exportation de 27 kg N, l'hydromorphie temporaire un déficit de 18 kg N environ ; par ailleurs, cet effet négatif de l'hydromorphie est 2 fois plus accentué sur les pacages où les refus peuvent s'accumuler que sur les prés de fauche où la majeure partie de la récolte est exportée.

Les pelouses sèches oligotrophes, non fertilisées, issues de landes à callune par effet du pâturage ou de la fauche, exportent seulement 25 à 35 kg N/ha/an en versant sec et 50 à 60 en versant humide (F.X. de MONTARD, 1983, Margeride). Lorsqu'elles reçoivent une fertilisation azotée, le sol a tendance à en retenir une proportion importante, de sorte que les exportations n'excèdent les importations d'azote qu'après 2 ou 3 ans d'investissement et de réactivation de la flore graminéenne (F.X. de MONTARD, 1982).

4. Discussion

L'expression de la fourniture d'azote par les sols des prairies du Lembron en fonction des pratiques des agriculteurs et de la consommation d'eau montre la voie vers laquelle une certaine généralisation serait

possible : il faudrait pouvoir préciser la valeur du terme PRATIC dans différentes situations et exprimer plus précisément l'évapotranspiration réelle ; en effet le terme (pluie + R.F.U.) utilisé ici excède d'environ 20 à 25 % l'évapotranspiration réelle, compte tenu d'un excédent de pluies de 90 mm dans les 2 premières décades de mai. On propose donc d'appliquer le coefficient 85 g N/ha/mm au produit PRATIC × E.T.R. au lieu de 70 pour un premier essai de généralisation à la région :

$$N \text{ sol} = 85 \times \text{PRATIC} \times \frac{\text{E.T.R.}}{1000} \text{ (en kg N/ha/an)}$$

La valeur du terme PRATIC, ou grade de praticabilité, fait référence au contexte d'une petite région où sont clairement différenciables des catégories de parcelles dont le mode d'exploitation est bien individualisé.

En fait, le grade de praticabilité y est déterminé par six facteurs caractérisant les parcelles :

<i>Facteur</i>	<i>Effet</i>
— 1. terre labourable ou non	positif
— 2. présence de ray-grass italien	positif
— 3. difficulté d'accès (éloignement, ou chemin difficile)	négatif
— 4. pente	négatif
— 5. produit (exposition nord ou sud × pente)	{ positif p. le nord négatif p. le sud
— 6. Altitude	négatif

Index de détermination $r^2 = 0,78$; $n = 81$ (cf. annexe 1, équation (2)).

Dans d'autres contextes, il faudrait pouvoir inclure dans le calcul les pâturages intensifs dont l'état d'entretien est comparable à celui des prés de fauche mais utilisés exclusivement en pâture pour des raisons structurelles (parcelles situées à côté de l'étable). Par ailleurs, les pâturages extensifs au relief accidenté devraient aussi être inclus en fonction du taux de consommation de leur production.

Un développement plus ample de cette méthode intégrant progressivement d'autres facteurs est à prévoir au fur et à mesure que les prairies de nouvelles petites régions seront concernées.

Parallèlement aux efforts de recherche pour comprendre le fonctionnement des sols montagnards (TOSCA, 1986 ; LOISEAU, 1986), il y a un besoin manifeste de repérage des types de sol et des pratiques agricoles par petites régions agricoles, de façon à ce que le technicien de terrain puisse faire la meilleure expertise possible de l'azote minéralisable et calculer la fertilisation complémentaire en fonction des besoins associés à l'objectif de production.

Ce repérage des pratiques agricoles est possible, notamment au travers des réseaux constitués pour la recherche de références à la ferme.

A l'I.N.R.A., la contribution conjointe de la Science du Sol et de l'Agronomie se développe pour clarifier la typologie des sols à cette échelle et offrir une base concrète et pratique pour le diagnostic proposé.

Un exemple intéressant est offert par les travaux de Dominique MENIER (1985). Cet auteur a mis très clairement en relation :

- les différents types de sol en Margeride et leur organisation dans le paysage ;
- la productivité des prairies (d'après F. VALLION, RNED bovins) et le type de sol.

Toutefois l'intensification et le mode d'utilisation des prairies sont profondément affectés par la situation topographique des sols ; les sols eux-mêmes sont profondément modifiés par les pratiques agricoles ; il y a donc de profondes interactions qu'il est indispensable de clarifier.

Par ailleurs, la mise en œuvre de cette méthode ne doit pas faire abstraction d'autres facteurs importants :

** le facteur génétique*

On a observé dans le Lembron que le ray-grass d'Italie exportait davantage d'azote du sol que les autres graminées et la prairie naturelle. On peut interpréter ce fait comme un avantage phénotypique lié à la capacité de remonter en épis et à une plus grande activité d'absorption par les racines ou bien à une disponibilité d'azote supérieure dans un sol plus fréquemment travaillé. G. LEMAIRE (communication personnelle) souli-

gne des différences importantes d'exportation d'azote du sol entre la fétuque et le dactyle lorsque la disponibilité en azote du sol est limitée. Dans le cas de l'enquête du Lembron, aucune différence significative n'a pu être établie entre prairie naturelle, fétuque et dactyle. Les mesures effectuées sans apport d'azote minéral sur sol granitique en Margeride donnent l'avantage aux prés naturels de fauche sur la prairie de dactyle (110 kg N/ha/an contre 80). A Laqueuille (Puy-de-Dôme), en sol volcanique, à l'altitude 1050 m, un dactyle Floréal exploité en pâture par les moutons a exporté régulièrement 40 à 60 kg d'azote de moins que la prairie permanente (R. ARNAUD et al, 1983) quel que soit l'apport d'azote (0 à 500 kg/an). Ceci peut résulter d'une moindre adaptation à la pâture de Floréal.

** L'influence des apports azotés sur le prélèvement d'azote du sol*

Un autre facteur à considérer est la modification de la capacité d'absorption de l'azote du sol par la végétation prairiale lorsqu'elle est stimulée par des apports d'azote. Les apports provenant de l'extérieur peuvent entraîner une meilleure croissance des plantes et de leurs racines et une orientation plus importante du flux de minéralisation de l'azote du sol vers l'absorption et l'assimilation.

Dans le cas des prairies des coteaux du Lembron, l'analyse en régression multiple ne permet pas de mettre en évidence une telle interaction. La part de variance expliquée atteignant 79 % de la variance totale de l'azote exporté, on peut penser que l'interaction est limitée et noyée dans l'erreur résiduelle ($s = \pm 29,6$ kg N/ha/an).

5. Conclusion concernant le calcul de la fourniture d'azote par le sol

Dans l'état actuel des connaissances, bien que les références soient encore très incomplètes, il est déjà possible de bâtir un modèle de calcul provisoire sur les bases précédentes pour estimer le pouvoir alimentaire azoté des sols des prairies d'Auvergne et de Margeride, voire du Massif Central humide, au-dessus de 400 m d'altitude.

fertilisation azotée Pour des prairies correctement exploitées, où les refus n'excèdent pas 30 % de la matière sèche produite, la fourniture d'azote par le sol est 51

estimée à 85 g/ha/mm par grade de praticabilité et par mm d'évapotranspiration réelle. Le grade de praticabilité est estimé par l'équation (2) de l'annexe 1, plus adaptée au terrain que le codage direct 1,2,3,4 cité plus haut.

Pour tenir compte de la loi de dilution de l'azote en fonction du degré de croissance en matière sèche, et des capacités d'absorption d'azote de la végétation en fonction de son stade, la quantité obtenue est affectée d'un coefficient K : 0,9 pour les récoltes en foin, 1,0 pour l'ensilage et 1,1 pour les pâturages bien exploités.

Dans le cas des pâturages extensifs, le coefficient de praticabilité est calqué sur le taux de consommation ; par exemple 0,5 pour un taux de consommation de 50 %. Sur les versants et expositions sèches, on applique un coefficient 0,5.

6. Exemples de calcul de la fourniture d'azote par le sol

- Prairie d'ensilage (praticabilité 3) en année sèche : E.T.R. = 400 mm
Azote fourni par le sol = $85 \times 3 \times \frac{400}{1000} \times 1 = 102 \text{ kg N/ha/an.}$
- Pâturage exclusif ; épandage mécanisé des engrais ; non fauchable (praticabilité 1) ; en année moyenne : E.T.R. = 550 mm
Azote fourni par le sol = $85 \times 1 \times \frac{550}{1000} \times 1,1 = 51 \text{ kg N/ha/an.}$
- Prairie fanée (praticabilité 2) ; en année humide : E.T.R. = 600 mm
Azote fourni par le sol = $85 \times 2 \times \frac{600}{1000} \times 0,9 = 92 \text{ kg N/ha/an.}$
- Ray-grass italien d'ensilage (praticabilité 4) ; en année moyenne : E.T.R. = 550 mm
Azote fourni par le sol = $85 \times 4 \times \frac{550}{1000} \times 1 = 187 \text{ kg N/ha/an.}$

Bien que ce mode de calcul constitue déjà une étape opérationnelle, il est susceptible de nombreux perfectionnements ultérieurs. Par exemple, il faudrait tester l'interaction climat \times dose d'azote sur cette fourniture du sol, déterminer sa répartition saisonnière en fonction des paramètres climatiques, éclaircir les relations entre la fourniture du sol et la fixation symbiotique par les bactéries des légumineuses (M. NIQUEUX et R. ARNAUD, 1984), rendre compte des effets de l'hydromorphie...

LA VALORISATION DES APPORTS AZOTÉS ORGANIQUES

L'azote contenu dans les déjections n'est pas entièrement valorisé ; il se produit des pertes gazeuses ou par ruissellement et une certaine proportion entre dans le stock du sol pour un temps plus ou moins long, ou même est immobilisé. La lente minéralisation du stock organique du sol entraîne un arrière-effet qui est pris en compte dans la mention « fort entretien organique ou pâture intensive depuis 10 ans et plus » (tableau II) et, indirectement, dans le terme « praticabilité ».

Des normes pour calculer les arrière-effets ont été proposées par l'I.T.C.F. (1982) d'après les travaux de l'I.E.F.S. des Pays-Bas ; mais le passé des parcelles est rarement connu au-delà de 10 ans et l'application de ces normes sous un climat montagnard, à courte saison de végétation, fait problème.

1. Estimation de l'azote organique valorisable

Par contre, la valeur fertilisante disponible à court terme, c'est-à-dire principalement sur la coupe ou le ou les pâturages qui suivent l'épandage, peut être précisée (tableau IV).

C'est à dessein que seules les valeurs moyennes sont données ici. En général, la précision sur les doses appliquées est très médiocre et les quantités disponibles à l'échelle d'une ferme ne peuvent pas être calculées correctement par la sommation des doses appliquées par parcelle.

TABLEAU IV
**VALORISATION IMMÉDIATE DE L'AZOTE
 DES ENGRAIS DE FERME**

Fumier de bovins	0,8 kg par tonne *
Fumier de moutons	1,2 kg par tonne *
Fumier de volaille chair	4,0 kg par tonne *
Lisier de bovin	1,5 kg par m ³
Lisier de porcs	2,0 kg par m ³
Lisier de lapins	4,0 kg par m ³

* 1 tonne = 1,25 m³

Pour éviter de grossières erreurs, il est toujours préférable de calculer le pool total de lisier ou de fumier produit sur la ferme à partir du nombre d'animaux à l'étable et de la durée de stabulation et d'y appliquer une moyenne incluant les pertes.

D'après SCHMID (1967) les pertes interviennent à deux niveaux :

— À la fabrication et au stockage : le lisier dilué perd moins de 10 % de son azote par volatilisation de l'ammoniac et le fumier, qui subit une longue fermentation aérobie, 50 % de l'azote contenu dans les déjections à la sortie de l'animal.

— À l'épandage et à l'utilisation : par temps humide et sur une végétation active, ou par enfouissement dans un sol actif et sain, 30 % de l'azote restant dans le fumier est directement assimilable par les végétaux et 50 % de celui du lisier.

Compte tenu d'un coefficient de transfert de 60 % environ vers les parties aériennes, les taux réels d'exportation de l'azote contenu dans les apports organiques sont de 18 % de l'azote du fumier et de 30 % de l'azote du lisier ; soit, par rapport à l'azote total contenu dans les fécès et les urines libérées à l'étable, 9 % pour le fumier fait et 27 % pour le lisier.

*Calcul de la
 fertilisation azotée*

Si les conditions au champ sont médiocres, entraînement par des pluies excessives ou sécheresse, un coefficient de valorisation encore plus faible devra être adopté.

Par conséquent, un calcul correct des disponibilités en azote sur la ferme doit tenir compte du nombre d'U.G.B., du temps de séjour à l'étable et du type de produit fabriqué (tableau V). Ce tableau est construit empiriquement par estimation des situations intermédiaires et mesure l'efficacité des techniques de recyclage de l'azote.

La nature des produits et leur valeur azotée peuvent être précisées sur place par densimétrie (H. TUNNEY, 1979) ou estimées en moyenne (ta-

TABLEAU V
ESTIMATION DU TAUX DE RÉCUPÉRATION DE L'AZOTE
DANS LES SOUS-PRODUITS ET DANS L'HERBE
(en kg pour 100 kg d'azote libérés dans les déjections des bovins à l'étable ;
100 kg N = Azote libéré par 2,4 U.G.B. en 180 jours
soit environ 0,23 kg N par U.G.B. et par jour)

Azote contenu dans le produit après fabrication (kg pour cent kg excrétés)	Fumier fait	Fumier jeune	Lisier ressuyé	Lisier entier	Lisier dilué
	50	60-70	70-80	80-90	90 - 100
Azote soluble disponible pour les plantes soit en kg pour cent kg excrétés	(30 %) 15	(35 %) 20-25	(40 %) 30-35	(45 %) 35-40	(50 %) 45-50
Exportations dans l'herbe (borne supérieure, en kg)					
Apports en conditions favorables	Coef. 60 % 9	15	21	24	30
Apports en automne/hiver	45 % 6	11	16	18	23
Apports en conditions défavorables sécheresse ou ruissellement	< 30 % 4	7	11	12	15

bleau IV) (1). Connaissant le volume global et la nature des effluents de l'élevage, l'estimation des quantités épandues par parcelle peut être abordée sur des bases plus sûres en tenant compte du mode de répartition et des surfaces concernées.

Les indications chiffrées en t ou m³ par l'agriculteur sont à prendre en compte pour estimer cette répartition en pourcentage de la production totale de fumier ou de lisier sur les différentes parcelles ou sur des groupes de parcelles. Les quantités indiquées par l'agriculteur ont donc une valeur relative, indispensable pour connaître la répartition dans l'espace mais n'ont pas de valeur dans l'absolu en l'absence de pesée ou de mesures de volume précises.

2. Répartition de la fumure organique dans les fermes d'élevage

La répartition de la fumure organique doit tenir compte du rôle stimulateur de l'activité biologique du sol et pas seulement du bilan azoté minéral : un souci particulier doit donc être de répartir cette fumure sur les différentes catégories de parcelles de la S.A.U.

Il faut éviter de consacrer une part excessive aux terres labourables aux dépens des prairies, en particulier sur les cultures semées à l'automne pour lesquelles existent des risques de lessivage et des risques d'asphyxie en cas d'insuffisance de la structure et de l'aération du sol.

La mauvaise productivité des prairies dans certaines exploitations mixtes n'a pas d'autre cause qu'une insuffisance des restitutions organiques et des fumures minérales.

On propose d'apporter :

— sur les cultures d'hiver (blé, seigle...) une fumure organique modeste, notamment pour éviter les pertes par lessivage : en pratique, une proportion des engrais de ferme voisine ou un peu supérieure à la proportion de surface labourée ; par exemple, 20 % des surfaces, en cultures

56 (1) Il existe aussi un analyseur instantané d'azote ammoniacal des lisiers.

annuelles, recevraient 25 à 35 % des engrais de ferme, et les 80 % de surfaces en prairies recevraient les 70 % restants (45 % sur les prés de fauche, 25 % sur les pacages) ;

— sur les cultures de printemps, des apports organiques nettement plus importants sont préconisables ; mais il faut alors compenser le déficit d'azote organique sur les prairies par l'accroissement de la contribution des légumineuses et la fertilisation azotée minérale ; et éviter une suppression totale de la fumure organique ;

— sur les exploitations tout en herbe (S.T.H.) : 65 % des lisiers sont épandus sur les prés de fauche et 35 % des lisiers sur les pacages.

Une bonne valorisation des engrais de ferme suppose une bonne incorporation au sol, soit par enfouissement direct et mélange au sol, soit par application en surface en période humide favorable à l'activité de la microfaune.

3. Valorisation des déjections au pâturage

Une certaine analogie existe entre la valorisation des déjections au pâturage et celle des apports de lisier ; mais le type de temps, sec ou pluvieux, et la méthode de pâturage dont dépend la répartition, sont deux facteurs qui jouent un grand rôle pour modifier la réponse.

Une U.G.B. libère environ 1,5 m³ de déjections par mois dont la valorisation théorique est 1,5 kg N/m³. Théoriquement :
 $100 \text{ U.G.B.} \times \text{jour au pâturage} = 5 \text{ m}^3 \times 1,5 \text{ kg N/m}^3 = 7,5 \text{ kg d'azote minéral ou rapidement minéralisable.}$

Le coefficient obtenu par des mesures sur les prairies des Monts Dômes, principalement des pâturages à vaches laitières assez bien exploités, a été de 8 kg en moyenne pour 100 U.G.B. × jour, ce qui confirme cette hypothèse (F.X. de MONTARD, 1983, Monts Dômes).

Ce chiffre est caractéristique d'une région bien arrosée (900 à 1300 mm par an) et ne tient pas compte d'éventuelles pertes sur les trajets ou à l'étable.

TABLEAU VI
VALEUR « AZOTE » DU TEMPS DE PÂTURAGE
 (kg N/ha pour 100 U.G.B. × jours)

	Journées complètes	Traite à l'étable	Traite et nuit à l'étable
Pluviométrie 900 à 1 300 mm			
Pâturage tournant Parcelles < 3 ha	7,5	6,0	4,0
Pâturage libre (1) sur 3 à 5 ha	5,0	4,0	2,5
Pâturage libre sur plus de 5 ha	3,0	2,5	2,0
Pluviométrie 600 à 850 mm			
Pâturage tournant	6,0	4,5	3,0
Pâturage libre sur 3 à 5 ha	4,0	3,0	2,0
Pâturage libre sur plus de 5 ha	2,5	2,0	1,5

Le tableau VI permet d'intégrer globalement l'influence de ces divers paramètres sur la partie typique de la parcelle pâturée ⁽¹⁾.

FIXATION SYMBIOTIQUE PAR LES BACTÉRIES DES LÉGUMINEUSES

Cette fixation est difficile à estimer car très sensible aux conditions de température, d'humidité du sol et de compétition pour la lumière entre légumineuses et autres espèces. Elle est affectée aussi par la fertilisation

(1) En pâturage libre, une partie restreinte de l'espace pâturé (zones d'ombre, zones d'abreuvoirs, reposoirs) reçoit une part importante des déjections au détriment de la surface principale ; le phénomène est plus accusé sur de très grandes parcelles.

azotée. Une recherche spécifique est donc nécessaire dans nos conditions de moyenne montagne.

A défaut d'une méthode à la fois précise et pratique, on propose d'effectuer une estimation de la fixation symbiotique en fonction du *type de légumineuse* et de sa contribution en matière sèche dans l'association :

— *les légumineuses dressées*, luzerne, trèfle violet, fixeraient entre 30 et 45 kg N/t M.S. récoltée et transfèreraient peu d'azote à la graminée compagne (sauf en cas d'abondantes pertes de feuilles à la récolte) ;

— *les légumineuses à port rampant*, principalement le trèfle blanc, donnent une récolte plus riche en azote, exclusivement composée de feuilles, tandis que leurs organes bas, vieilles feuilles, stolons, racines, nodules, sont consommés par la microfaune. Les vers de terre peuvent céder rapidement l'azote métabolisé à la végétation par dépôt sur les parois des galeries (M. BOUCHE, 1986). Rapportée à la matière sèche des feuilles effectivement récoltées, la fixation totale bénéficiant à bref délai à l'ensemble de la végétation peut atteindre jusqu'à 65 kg/t M.S. de trèfle blanc présente dans la récolte.

Toutefois, les apports importants d'engrais minéraux azotés provoquent une forte baisse de l'activité fixatrice ; les légumineuses se comportent alors comme les autres plantes en assimilant directement les nitrates disponibles dans le sol. En conséquence, on ne compte pas de fixation pour la coupe qui suit un apport d'azote.

1. Exemple observé sur les prairies des coteaux du Lembron

Parmi les facteurs qui permettent de rendre compte des exportations annuelles d'azote de 81 prairies du Lembron, l'abondance des légumineuses intervient sous forme d'un facteur complexe :

$$26 \times \frac{\text{LEG}}{\text{N}} \times (1 + 0,004 \text{ K}_2\text{O})$$

expliquant 28 % de la variance environ (annexe 1). La contribution de ce facteur apparaît insignifiante, quelques kg N/ha, dès qu'il y a apport d'azote. Par contre, elle est importante en l'absence d'apports azotés et elle est accrue par les apports de potasse. Pour schématisée qu'elle soit, cette expression statistique permet d'exprimer une réalité tangible. Cette inter-

action recouvre un champ de variation de la fixation symbiotique de 0 à 140 kg N/ha/an ($P = 0,95$) dans les conditions des pratiques actuelles de conduite des prairies du Lembron et en année particulièrement sèche. Un champ plus vaste, jusqu'à 200 et 250 kg N/ha est envisageable en année humide avec une bonne fertilité potassique.

L'intérêt de cet exemple réside dans la définition d'une modalité d'intégration de la fixation symbiotique dans le calcul des fournitures d'azote dans une petite région où la diversité des prairies est très grande ; cette modalité est constituée par le produit :

« contribution des légumineuses \times (a + b Fertilisation potassique) » lorsque les apports azotés sont faibles ou nuls et par une valeur faible ou nulle lorsque les apports azotés dépassent 80 kg/ha/an.

Un tel schéma reste cependant trop grossier. D'autres illustrations microrégionales sont nécessaires pour se rendre compte que la fixation symbiotique peut jouer un rôle non négligeable lorsque les doses d'azote sont modérées.

2. Les prairies des Monts Dômes et Dore

Dans les prairies permanentes de la zone volcanique herbagère (de 850 à 1300 m d'altitude), constituées de prés de fauche, de pacages fertilisés et d'estives, la fertilisation minérale potassique ne représentait traditionnellement (référence 1976-1980) que peu de chose ; dans ce cas, c'est le produit « contribution des légumineuses \times K échangeable du sol » qui représente le mieux la fixation : 25 kg N en moyenne et couvrant un intervalle de variation ($P = 0,95$) de ± 30 kg N.

Les expérimentations avec fertilisation phosphatée et potassique non limitantes ont porté sur des prés de fauche de fenaison (Laqueuille 1050 m) ou d'ensilage (Rochefort-Montagne 850 m) et sur des pacages intensifs (Les Razats à Laqueuille, 1250 m).

En fenaison, la contribution du trèfle blanc spontané aux exportations d'azote reste modeste : environ 25 kg/ha/an avec une fertilisation azotée annuelle de 140 kg/ha et environ 65 kg sans fertilisation azotée.

Si la fenaïson est précédée d'un déprimage plus ou moins important, le trèfle blanc exporte de 45 à 65 kg/ha/an avec une fertilisation azotée annuelle de 140 kg/ha (R. ARNAUD et al, 1978).

En ensilage, les exportations sont estimées entre 200 et 340 kg/ha/an en fonction des apports azotés minéraux variant de 0 à 300 kg/ha/an selon les traitements.

La contribution du trèfle blanc varie (tableau VII) de 25 à 2 % en volume et de 74 à 8 kg/ha/an en azote exporté, décroissante avec la dose.

TABLEAU VII
EXPORTATIONS D'AZOTE D'UN PRÉ D'ENSILAGE
À ROCHEFORT-MONTAGNE
(altitude 850 m ; calcul basé sur l'hypothèse d'un taux d'exportation de 60 % de l'azote minéral épandu)

Dose d'azote (kg N/ha)	MS récoltée (t/ha/an)	MS du trèfle blanc (t/ha/an)	% du trèfle dans la récolte	Exportations d'azote totales (kg N/ha)	Azote du trèfle blanc (kg N/ha)	Fourniture par le sol (kg N/ha)	Azote de l'engrais (60 %) (kg N/ha)
0	7,59	1,85	24,4	199	74	137	0
100 (50 + 25 + 25)	9,66	1,80	18,6	258	72	138	60
200 (100 + 50 + 50)	10,46	0,92	8,8	303	37	151	120
300 (150 + 75 + 75)	11,53	0,24	2,1	338	8	158	180

Dans les pacages intensifs des Razats (1250 m), la production annuelle sans apports azotés est d'environ 5 t et l'azote des feuilles du trèfle blanc représente 30 à 40 kg/ha/an (10 à 15 seulement en 1985, année très sèche).

Les essais d'implantation de cultivars de trèfle blanc en association avec le ray-grass sur le domaine des Fumades à Laqueuille (1050 m) ont toujours été suivis d'une disparition rapide de la légumineuse en 2^e année, même lorsque l'implantation était faite avec 4 t/ha de chaux. Dans ce milieu, sols bruns andiques et andosols formés sur basalte en climat frais et presque constamment humide, les cultivars de trèfle blanc ne se maintiennent pas.

Toutefois, sur un sol volcanique acide et riche en matière organique situé à 1350 m d'altitude sur le versant nord-ouest, très pluvieux, des Monts Dore, une association de trèfle blanc et de dactyle a pu être installée et maintenue pendant 4 ans à 40 % de trèfle Ladino par apport annuel de 1000 kg de CaO, 50 kg de P₂O₅ et 100 kg de K₂O à l'hectare (P. LOISEAU, communication personnelle).

Ces faits soulignent les facteurs défavorables aux légumineuses sur ces types de sol (andosols et sols andiques) : un très faible taux de saturation, 16 % couramment, et une forte capacité d'échange qui rend onéreuse la correction de l'acidité.

D'après L. GACHON (1963) un taux de saturation de 45 à 50 % est nécessaire pour éviter les effets de toxicité Al+++ et Mn++ sur la luzerne. Ceci paraît s'appliquer aux cultivars de trèfle blanc en compétition avec une graminée, mais non aux légumineuses spontanées. Cependant, même dans ce dernier cas, le taux de saturation garde une grande influence et leur contribution peut s'accroître fortement sur des sols volcaniques de versants plus secs, par exemple dans la région du Velay ou sur les plateaux basaltiques du Lembron, où le pH des sols dépasse nettement 6,0.

Par ailleurs, l'altitude, par son effet sur les températures, limite les possibilités de la fixation symbiotique à une saison relativement brève.

3. Les prairies des zones granitiques

L'étude d'un ensemble de 30 prairies et pacages de Margeride de Lozère situés entre 900 et 1300 m d'altitude (F.X. de MONTARD, 1983) et où les apports azotés sont restés inférieurs à 30 kg N/ha/coupe, ou à 60 kg N/an, permet de mettre en évidence une contribution moyenne des trèfles blanc et violet de 35 kg N/ha (intervalle de confiance 0 à 95 kg N) aux exportations annuelles sur un total de 111 kg en moyenne (intervalle de confiance de 15 à 210).

L'étude des exportations d'azote de la fraction « légumineuses » et de la fraction « graminées et diverses » sur une vingtaine de prairies et pacages de la Haute Combraille (altitude 750 m) exploités en 3 ou 4 coupes par an

donne une contribution moyenne des légumineuses de 11 kg N/ha/coupe (intervalle de confiance de 0 à 50).

Les facteurs impliqués sont :

- l'existence d'un semis préalable, + 13 kg N/ha/coupe, par opposition aux prairies naturelles et aux temporaires de graminées pures ;
- le niveau de la fertilisation potassique, + 5 kg N/coupe en moyenne (intervalle de confiance 0 à + 18 kg N/ha/coupe) pour une fertilisation potassique de 40 kg K₂O (0 à 115) ;
- le niveau de l'ensoleillement journalier, 1,7 kg N/ha/coupe sont exportés par heure d'ensoleillement journalier moyen de la période soit 9,6 kg N/ha/coupe en moyenne (intervalle de confiance de 5 à 14).

Les exportations de la fraction « graminées et diverses » s'élèvent à 45 kg N/ha/coupe (intervalle de confiance 9 à 90 kg N) et dépendent des facteurs climatiques E.T.R. (0,21 kg N/mm) et de la température (-2,5 kg N/°C après avoir introduit E.T.R.) ; ce deuxième facteur exprime ici la baisse de l'efficacité de l'eau sur les prélèvements d'azote lorsque la température et le déficit qui l'accompagne s'accroissent (MORIZET et al, 1984). Les autres facteurs agissants sont le taux d'argile (réserve utile accrue des bas de pente et des fonds de talweg) et la fertilisation potassique. La fertilisation azotée moyenne a été très faible 10 kg/ha/coupe et ne marque pas.

Dans un essai mené en conditions de nutrition P et K non limitantes, à Saint-Genès-Champanelle (altitude 880 m) pendant 11 ans avec des apports azotés annuels variant de 0 à 350 kg/ha, le trèfle blanc a été très abondant dans les parcelles sans azote, exportant environ 8 kg N/ha/an par point de contribution de présence ; dans le cas d'apports azotés modérés l'exportation a été de 5 kg par point. Au-delà de 250 kg N/ha/an, le trèfle est pratiquement absent.

4. Les associations de trèfle blanc et graminées en zone de micaschistes

Les sols développés sur micaschistes sont, à l'image des sols granitiques, assez favorables aux légumineuses, pourvu que le taux de saturation soit satisfaisant.

Dans les essais d'association de trèfle blanc avec différents cultivars de ray-grass pérenne, dactyle et fétuque élevée, réalisés à Bourg-Lastic (altitude 840 m) par M. NIQUEUX et R. ARNAUD (1984) sur sol brun acide, les exportations d'azote sont très élevées et augmentent régulièrement de 300 à 375 kg/ha/an pour des doses N variant de 0 à 240 kg/ha/an. Il y a donc eu fixation symbiotique en plus de la fourniture du sol, estimée de 75 à 95 kg N selon le niveau des apports azotés, même en présence d'apports azotés importants. Ces chiffres correspondent à deux années relativement humides, 1982 et 1983 : la proportion de trèfle blanc est alors couramment comprise entre 30 et 60 % sur les cycles de repousse de printemps et d'été sur les parcelles qui n'ont pas reçu d'azote en début de cycle. En revanche, par été sec, la fixation est stoppée et le rôle du trèfle est alors insignifiant.

En année moyenne, la fixation symbiotique et la qualité du fourrage produit plaident en faveur de l'association ; en particulier, il ne semble pas s'exercer de compétition importante entre la graminée et la légumineuse pour l'absorption et l'assimilation de l'azote minéral du sol, au contraire des associations luzerne-dactyle où l'assimilation par la luzerne peut prévaloir sur celle du dactyle (P. CRUZ et G. LEMAIRE, 1986).

En définitive, les légumineuses jouent un rôle important dans la plupart des prairies lorsque la fertilisation minérale (ou son équivalent en azote labile du lisier) ne dépasse pas 150 à 200 kg N/ha/an et lorsque le taux de saturation en bases Ca^{++} , Mg^{++} , et K^{+} approche ou dépasse 50 %. Bien que les exportations d'azote des légumineuses ne constituent qu'un reflet très déformé de la fixation — la fixation est plus importante que l'exportation du trèfle blanc lorsqu'il y a transfert vers la graminée, et nettement inférieure lorsque de l'azote minéral est disponible en abondance dans le milieu —, elles en constituent un ordre de grandeur dans la mesure où le taux de trèfle dans la végétation reflète le déficit des disponibilités en azote minéral dans le sol par rapport au potentiel climatique.

En pratique :

— *en l'absence d'apports azotés*, l'apport annuel de la fixation symbiotique est compté en fonction de la contribution en volume relatif des légumineuses (tableau VIII) ;

TABLEAU VIII
ESTIMATION DU SUPPLÉMENT D'EXPORTATION D'AZOTE
PROVENANT DE LA FIXATION SYMBIOTIQUE
(kg/ha/an)

	Contribution relative en volume	Supplément d'azote
Trèfle blanc	10 à 15 %	50 à 100 kg ha ⁻¹ an ⁻¹
	20 à 30 %	100 à 150 "
	35 à 60 %	160 à 220 "
Légumineuses dressées	10 à 15 %	25 à 50 "
	20 à 30 %	50 à 100 "
	40 à 60 %	100 à 150 "
	60 à 80 %	150 à 200 "
	80 à 100 %	200 à 250 "

— *en présence d'apports azotés modérés*, c'est-à-dire, entre 50 et 100 kg N/ha pour 100 jours de végétation productive (température ≥ 6 °C et E.T.R. ≥ 1 mm par jour), les chiffres du tableau VIII sont divisés par 2 ;

— *lorsque les apports azotés sont importants*, supérieurs à 100 kg N/ha pour 100 jours productifs, la fixation est estimée nulle.

Ces chiffres sont rapportés à une E.T.R. de 500 à 550 mm/an. La répartition saisonnière sera faite en raison de l'E.T.R. et de la contribution saisonnière des légumineuses. Ces estimations constituent évidemment une étape provisoire dans l'établissement de la contribution des légumineuses à l'exportation d'azote. Bien d'autres facteurs peuvent intervenir : les légumineuses prairiales sont sensibles à un pâturage excessif, ou, à l'opposé, à des rythmes de fauche très lents, notamment lorsque d'autres espèces plus hautes leur font ombre (F.X. de MONTARD et al., 1983). Ainsi, un gazon court à faible surface foliaire aura une faible fixation symbiotique ; une herbe dense à grande surface foliaire, une forte fixation (C. MAR-

RIOT and A. RANGELEY, 1983). Une herbe haute limitera l'activité de fixation des légumineuses dominées.

D'autres recherches plus complexes et des mesures au champ nombreuses sont nécessaires pour donner une assise plus précise et plus définitive au bilan azoté, en associant des mesures de fixation symbiotique et d'assimilation de l'azote.

CALCUL DE L'APPORT D'AZOTE MINÉRAL

Le calcul de l'apport d'azote minéral à réaliser doit tenir compte de deux préoccupations majeures :

- répondre à l'objectif de production en complétant les autres sources d'azote principales qui viennent d'être passées en revue ;
- éviter les risques de pollution des nappes d'alimentation en eau ; ces risques sont très minces sous prairie sauf cas de remise en culture ou de grande sécheresse suivie de pluies abondantes, ou encore dans le cas d'application de fortes doses au pâturage (RYDEN, 1984).

L'objectif de production peut être très proche du potentiel accessible permis par le climat ou se situer nettement en deçà pour s'adapter aux contraintes d'utilisation.

La valorisation des différentes sources d'azote exige de tenir compte de l'évapotranspiration réelle aux différentes étapes de la saison de végétation et de l'influence négative des apports azotés minéraux sur la contribution pondérale des légumineuses et leur niveau d'activité de fixation.

Très schématiquement, on peut situer les années ou les zones climatiques vis-à-vis des disponibilités en eau :

*Climat de la période
de végétation*

Très humide	pousse continue E.T.R. = 600 à 660 mm
Humide	pousse avec un ralentissement d'un mois en été E.T.R. = 540 à 600 mm
Demi-sec	deux mois de croissance ralentie en été mais repousse de fin d'été E.T.R. = 480 à 540 mm
Sec	trois mois secs en été, très peu de repousses E.T.R. = 420 à 480 mm
Très sec	la production est limitée à 2 ou 3 mois E.T.R. = 360 à 420 mm

- sécheresse de printemps (1976) : les réserves de fourrages sont médiocres ;
- sécheresse d'été (1985) : les réserves sont normales mais il y a peu d'herbe à pâturer.

Le climat n'étant pas prévisible, on raisonne la fumure azotée sur le climat moyen et on essaye de peser les conséquences des variations climatiques et de la dose d'azote minéral sur les autres sources, notamment sur la fixation symbiotique.

L'observation visuelle et l'estimation, même approximative, du taux de légumineuses dans la prairie est un élément essentiel du diagnostic pour déterminer le point d'équilibre réalisé avec la fumure minérale azotée. Un calcul purement théorique ne peut suffire : il faut, au contraire, corriger progressivement le calcul pour s'adapter aux conditions concrètes de la prairie concernée ou, au minimum, utiliser les références expérimentales disponibles, puis tenir compte des résultats concrets obtenus par les exploitants et revoir la fumure en conséquence sur un ensemble de parcelles de référence.

1. Nature de l'engrais azoté

La nature de l'engrais azoté ne semble pas jouer sur la production dès lors que la température du sol et son aération sont suffisantes pour permettre une nitrification active.

Par contre, d'après RYDEN (1984), en cas de forts apports azotés de printemps, par exemple 120 kg N en prévision d'un ensilage, les pertes par dénitrification et volatilisation peuvent être importantes lorsque le sol est froid et gorgé d'eau ; en ce cas, l'azote sous forme de sulfate d'ammoniaque serait beaucoup mieux valorisé.

2. Quelques exemples de calcul

Considérons différentes catégories de prairies :

a) *Pacage à génisses*, bien entretenu en P et K mais éloigné et pentu, exposé au sud, altitude 900 m.

— Azote fourni par le sol

On calcule d'abord le grade de praticabilité par l'équation (2) de l'annexe 1 :

$$\begin{aligned} \text{PRATIC} &= 3,44 \\ &- 0,38 \times 1 \quad (\text{accès difficile par éloignement}) \\ &- 0,24 \times 2 \quad (\text{pente modérée codée 2}) \\ &- 0,11 \times 2 \quad (\text{pente tournée au sud, séchante}) \\ &- 1,55 \times 0,9 \quad (\text{altitude}) \\ &= 0,97 \end{aligned}$$

E.T.R. année moyenne : 550 mm

E.T.R. année sèche (- 20 %) : 440 mm

E.T.R. année humide (+ 20 %) : 660 mm

Azote fourni par le sol :

$$85 \times \text{PRATIC} \times \frac{\text{E.T.R.}}{1000} \times 1,1 = 50 \text{ kg N/ha/an (de 40 à 60 selon l'année)}$$

— Fertilisation organique

La parcelle est utilisée en rotation avec deux autres parcelles voisines ; elle est bien exploitée et les déjections sont bien réparties (tableau VI, deuxième ligne) soit 5 N pour 100 journées d'U.G.B. ; l'exploitant réalise entre 400 et 500 journées d'U.G.B./ha/an soit environ 22 kg N/ha recyclés en année moyenne.

— Fertilisation minérale azotée

Aucune, compte tenu de l'éloignement de la parcelle et de sa pente. Toutefois, 40 % de la surface est facilement accessible au tracteur pour l'épandage des engrais. Un épandage d'azote de 50 kg N/ha est envisageable sur cette partie en fin de printemps pour stimuler la repousse estivale.

— Contribution des légumineuses

Le versant étant relativement sec et exposé au sud, le pH et le taux de saturation en bases du sol permettent un développement satisfaisant des légumineuses, de 10-15 % au printemps et 20 à 30 % en été ; mais l'efficacité de la fixation est freinée par les basses températures de printemps et, 1 an sur 2, par la sécheresse estivale. La fixation annuelle est estimée entre 75 et 120 kg N en année humide et 25 à 40 en année sèche (tableau VII).

La fixation est répartie par convention entre d'une part 2/5 de son potentiel au printemps (mai et juin) et d'autre part 3/5, 2/5 ou 1/5 en été (juillet, août et septembre) selon que l'été est humide, moyen ou sec.

— Calcul des exportations d'azote (kg/ha/an)

Année	sèche		moyenne		humide	
Sol	40		50		60	
Déjections 450 U.G.B. j.	18		22		26	
Fertilisation N × 0,6	0	30	0	30	0	30
Fixation de printemps	30	30	30	30	30	30
Fixation d'été	25	12	50	25	75	37
	113	130	152	157	191	183

En conséquence, une fertilisation azotée modeste, sur une prairie bien pourvue en trèfles spontanés ne paraît pas utile.

b) Pacage à vaches laitières

Une parcelle mieux disposée, un pacage à vaches laitières non fauchable mais tout proche de l'étable (altitude 850 m) peut justifier une fertilisation azotée intensive.

$$\begin{aligned} \text{PRATIC} &= 3,44 \\ &- 0,24 \times 1 \quad (\text{pente faible}) \\ &- 1,55 \times 0,85 \quad (\text{altitude 850 m}) \end{aligned}$$

l'accès est facile (note 0) et l'exposition est-ouest (note 0),
soit PRATIC = 1,88.

Les E.T.R. sont très voisines du cas précédent, et la contribution du trèfle dans cette zone proche de l'étable, spontanément fertile en P et K, est potentiellement importante : 10 à 20 % en mai-juin et 25 à 35 % en été (zone de pH 6,0 à 6,5).

— Calcul des exportations d'azote (kg/ha/an)

Année	sèche	moyenne		humide	
Sol	78	97		116	
Déjections 600 U.G.B. j en année moyenne	24	30		36	
Fertilisation N = 0 ou 220 × 0,6	0 ou 132	0 ou 132		0 ou 132	
Fixation de printemps (tab. VIII)	40	0	40	0	40
Fixation d'été	30	0	60	0	90
Total	172	234	227	259	282
		284			

Les différences entre les options N = 0 et N = 220 dans les totaux d'azote exporté sont faibles et se creusent surtout en année sèche qui est peu favorable à la fixation symbiotique. Les différences sont plus marquées du point de vue de la récolte en matière sèche. Ces conditions sont voisines de celles réalisées sur une prairie permanente en sol granitique à Saint-

Genès-Champanelle (F.X. de MONTARD et al., 1982) et sur les associations de trèfle blanc et graminées implantées en sol sur micaschistes à Bourg-Lastic (M. NIQUEUX et R. ARNAUD, 1984) exploitées en 3 ou 4 coupes annuelles (rythme ensilage et pâture).

En année humide, les apports d'azote de (60 + 60) ou (90 + 90) aux 1^{re} et 2^e coupes ont permis une production de 12 à 12,5 t M.S./ha/an ; l'apport de (30 + 30) en été n'a pas de résultat significatif ; le rendement de l'association sans apports azotés est de 10 t M.S./ha en 4 coupes.

En année sèche l'écart se creuse soit 5,7 t M.S./ha sans apports azotés, 7,6 t/ha avec (60 + 60) au printemps et 8,5 t/ha avec (90 + 90).

Les apports (30 + 30) d'été permettent un supplément de 0,65 t/ha après une fertilisation de printemps (30 + 30) ou (60 + 60) ; par contre l'appoint est négligeable après (90 + 90). (30 + 30) au printemps fait gagner 1 t M.S./ha par rapport à un apport d'azote nul.

c) *Prairie naturelle d'ensilage*, sur une ancienne parcelle de culture (présence d'un tertre de culture, altitude 600 m, accès facile, terrain plat, versant est, abrité des vents dominants venant d'ouest.

$$\begin{aligned} \text{PRATIC} &= 3,43 \\ &+ 0,66 \times 1 \quad (\text{labourable}) \\ &- 1,55 \times 0,6 \quad (\text{altitude } 600 \text{ m}) \\ &= 3,16 \end{aligned}$$

L'emploi de cette parcelle comme prairie d'ensilage correspond à de bonnes potentialités : pente nulle, terre labourable d'accès facile qui a entraîné un bon entretien de la fertilité azotée. La valorisation de cette fertilité dépend évidemment de la R.F.U. qui est prise en compte dans le terme E.T.R. du produit « PRATIC × E.T.R. ».

Compte tenu de l'influence du phénomène de foehn en versant est, l'E.T.R. de la période de végétation est très voisine de la somme PLUIE + R.F.U. en mm ; la répartition de la production est principalement printanière, une coupe en mai et une coupe ou un pâturage en début d'été ; une petite récolte, irrégulière, 0 à 2 t M.S./ha est possible en automne.

La R.F.U. est estimée à 100 mm et l'E.T.R. moyenne à 475 mm ; on distingue une variante sèche, 380 mm, dans laquelle la deuxième repousse est diminuée et la repousse d'automne négligeable et une variante humide 560 mm dans laquelle les orages d'été permettent une bonne repousse de fin d'été et d'automne.

Les fournitures en azote du sol sont importantes :

$$85 \times \text{PRATIC} \times \frac{\text{E.T.R.}}{1000} \times 1 = 128 \text{ kg/ha/an}$$

(variante sèche : 102 et variante humide : 153).

Calcul des exportations d'azote (kg/ha/an).

Année	sèche	moyenne	humide
Pluie après juin	40 mm	120 mm	200 mm
Fourniture du sol	102	128	153
Déjection au pâturage (repousses) 100, 250 et 500 U.G.B. j.	4	10	20
Fertilisation N (100 + 80) × 0,6	108	108	108
Lisier en fin d'hiver 40 t/ha = 60 kg N × 0,6	36	36	36
Fixation (été et automne) avec 10 à 15 % de trèfle blanc	0	15	30
Total	250	297	347

Un peu de trèfle, 10 à 15 %, se développe en été et en automne dans la mesure des disponibilités en eau dans un sol à pH favorable (entre 6,5 et 7,0).

CONCLUSION

Plus qu'une simple méthode de calcul de la fertilisation minérale azotée, la démarche proposée s'efforce de mettre en situation les uns par rapport aux autres les différentes sources d'azote et d'expliquer l'écart qui existe entre les exportations réelles et la fumure appliquée.

Il est possible par cette méthode de situer respectivement les différentes sources d'azote, même si en l'état actuel des connaissances les raisonnements proposés paraissent encore imprécis. Nous avons tenté cette expérience pour deux raisons :

— d'une part, il existe d'excellents praticiens qui tireront profit sans tarder de ce schéma pour lui donner une efficacité concrète grâce à leur sens de l'observation des réactions de leurs prairies ; ce schéma s'offre à eux pour organiser leurs connaissances empiriques ;

— d'autre part, les principaux points où les recherches doivent être affinées sont mis en évidence.

Pour la clarté, le présent calcul ne modifie pas fondamentalement la nature des conseils de fumure couramment pratiqués (D. ZIEGLER et Ph. VIAUX, 1984) mais fournit un outil pour situer le rôle du sol, des légumineuses et des déjections dans le bilan d'exportation et de production final, dans les conditions très diversifiées de la moyenne montagne entre 400 et 1200 m d'altitude.

F.X. de MONTARD,
I.N.R.A., Agronomie (Clermont-Ferrand)
F. ANGLADE, P. MONTEILHET,
S.U.A.D. du Puy-de-Dôme
J.C. THOULY,
E.D.E. du Puy de Dôme.

Remerciements

Les auteurs remercient de leur aide : Michèle CHAMPION (E.D.E. 63), Jean-Yves CABAL (S.U.A.D. 63) et le groupe de travail sur la fertilisation des prairies d'Auvergne.

LISTE DE MOTS-CLÉS

Azote minéral, azote minéralisable, excrément, fertilisation azotée, fertilisation organique, fertilisation minérale, fertilisation raisonnée, fixation biologique de l'azote, Massif Central, méthode, moyenne montagne, prairie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARNAUD R., de MONTARD F.X. et NIQUEUX M. (1978) : « Influence du mode d'exploitation sur la production d'une prairie permanente en altitude », *Fourrages*, 75, 29-54.
- ARNAUD R., de MONTARD F.X. et NIQUEUX M. (1983) : « Essais de fertilisation minérale sur pâturage en montagne volcanique du Massif Central humide », *Fourrages*, 93, 3-33.
- BOUCHE M. et FERRIERES G. (1986) : « Cinétique de l'assimilation de l'azote d'origine lombricienne par une végétation prairiale non perturbée », *C.R. Acad. Sci.*, Paris t.302, série III, (2), 75-80.
- CRUZ P. et LEMAIRE G. (1986) : « Analyse des relations de compétition dans une association de luzerne (*Medicago sativa L.*) et de dactyle (*Dactylis glomerata L.*) II-Effets sur la nutrition azotée des deux espèces », *Agronomie* (à paraître).
- GACHON L. (1963) : « Les facteurs chimiques responsables de la croissance défectueuse de la luzerne en sols acides », *Bull. Assoc. fr. Étude Sol.*, 6, 291-354.
- HENTGEN A. (1982) : « Une méthode pour améliorer la connaissance de la production disponible des surfaces herbagères au niveau national », *Fourrages*, 92, 15-49, annexe 2.
- HENTGEN A. (1984) : « Le coefficient technique d'utilisation des prairies : signification et intérêt comme indicateur d'intensification », *Fourrages*, 100, 57-81.
- I.T.C.F. (1982) : *Valeur fertilisante des engrais de ferme*, Brochure technique 24 p.
- LOISEAU P. (1986) : « Pools organiques impliqués dans la dynamique de l'azote de 3 écosystèmes prairiaux de montagne », 2^e Colloque d'Écologie du Sol à Paimpont, Société d'Écologie, à paraître.
- MARRIOT C. et RANGELEY A. (1983) : « Nitrogen fixation and transfer by white clover », the Hill Farming Research Organisation, *Biennial report*, 1982 et 1983, 109-118.
- MENIER D. (1985) : *Typologie des sols de Margeride. Étude des relations entre facteurs du milieu et comportement prairial*, D.A.A. Sci. Sol, E.N.S.A. Montpellier 70 p.
- de MONTARD F.X. (1982) : « Amélioration pastorale des landes à callune par la fauche et la fertilisation », *Fourrages*, 91, 17-36.
- de MONTARD F.X. (1983) : « La production prairiale dans les Monts Dômes », *Système agraire et pratiques paysannes dans les Monts Dômes*, ouvrage I.N.R.A., p. 203-247, I.N.R.A. Publications, Versailles.

- de MONTARD F.X. (1983) : *La Margeride, la montagne, les hommes*, I.N.R.A. Publications :
1. Climat et potentialités herbagères, 439-455.
 2. Productivité herbagère des prés et des pacages, 457-473.
 3. Les landes à callune : valeur pastorale et possibilités d'amélioration, 475-499.
- de MONTARD F.X., LOISEAU P. et GACHON L. (1983) : « Nitrogen outputs in yields and by drainage on natural and sown meadows », *E.E.C. Workshop Wageningen*, octobre 1983, 11 p.
- de MONTARD F.X., LAISSUS R., PLANQUAERT Ph. et PLANTUREUX S. (1983) : « Importance et rôle du trèfle blanc dans les prairies permanentes », *Fourrages*, 94, 87-108.
- de MONTARD F.X. (1986) : « Calcul simplifié du potentiel de production et des exportations d'azote des prairies en fonction de la durée de la période de végétation dans le Massif Central », *Séminaire d'agrométéorologie en moyenne montagne*, avril 1986, à paraître.
- MORIZET J., ROBELIN M. et BAUCHER G. (1984) : « Étude des relations entre l'eau et la production végétale sous climat limagnais », *Agronomie*, 4, 407-416.
- RYDEN J.C. (1984) : *The flow of nitrogen in Grassland*, édité par Fertilizer Society, 44 p.
- SALETTE J. et LEMAIRE G. (1981) : « Sur la variation de la teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance ; formulation d'une loi de dilution », *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 292, série III, 875-878.
- SCHMID G. (1967) : *La valeur fertilisante du lisier et son influence sur l'état du sol et le rendement du végétal*, Doc. 5 p., C.N.L. et I.T.E.B., Journées d'information sur le lisier, 21 et 22 nov.
- S.C.P.A. (1984) : *Rapport annuel des essais de fertilisation*.
- TOSCA C. et LABROUE L. (1986) : « Le cycle de l'azote dans les milieux supraforestiers des Pyrénées Centrales : Minéralisation de l'azote dans les sols des pelouses subalpines », *Ecologia Plantarum*, (1), 57-74.
- TUNNEY (1979) : *Dry matter specific gravity and nutrient relationship of cattle and pig slurry*, Ed. J.C. Hawkins, E.E.C., Luxembourg, 430-445.
- ZIEGLER D. et VIAUX Ph. (1984) : « Modalités d'application de la fertilisation azotée en fonction des objectifs de gestion de la prairie permanente », *Fourrages*, 98, 145-166.

ANNEXE 1
DÉTERMINATION DES SOURCES D'AZOTE
ALIMENTANT LES PRAIRIES.
LE CAS DES PRAIRIES DES COTEAUX DU LEMBRON

Les coteaux du Lembron situés dans le Puy-de-Dôme à l'ouest de la plaine d'Issoire et en piémont à l'est du Massif du Cézallier, constituent une petite région mixte d'agriculture et d'élevage bovin laitier associés.

L'étude des sources d'azote est basée sur le relevé des plantings fourragers de l'année 1985 et sur l'estimation des matières sèches produites et des quantités d'azote contenues dans les récoltes d'herbe. Les exportations d'azote de 81 parcelles ont été analysées en régression multiple et 8 facteurs actifs ont été reconnus. Parmi ceux-ci, la « praticabilité » des parcelles s'est révélée être un facteur indépendant des épandages d'azote, et essentiel pour rendre compte de la fourniture d'azote par le sol. La praticabilité et l'alimentation en eau (exprimée en mm) peuvent être associées dans un terme produit $PRATIC \times (Pluie + R.F.U + Irrigation)$.

L'effet des légumineuses apparaît en interaction négative avec la dose d'azote épandue et positive avec la dose de potasse dans le terme $\{ LEG (1 + \frac{4 K_2O}{1000})/N \}$ où LEG est un code désignant la contribution pondérale des légumineuses (0 = moins de 15 % ; 1 = 20 à 35 % ; 2 = environ 50 % ; 3 = plus de 65 %) ; K_2O désigne la dose annuelle de potasse en kg/ha et N la dose d'azote en kg/ha.

L'azote exporté annuellement (kg/ha/an) est exprimé en fonction de 5 variables dans l'équation (1) suivante, présentée verticalement pour plus de commodité :

Equation (1)

*Coefficient de régression ×
écart type de la
variable correspondante*

$$\begin{aligned} \text{N exporté} &= 2,5 \\ &+ 0,070 \times \text{Praticabilité} \times (\text{Pluie} + \text{R.F.U.} + \text{Ir}) & 27,8 \\ &+ 0,462 \times \text{Dose N annuelle} & 32,9 \\ &+ 25,7 \times \text{Leg} \left(1 + \frac{4 \text{ K}_2\text{O}}{1000} / \text{Dose N}\right) & 33,6 \\ &+ 0,474 \times \text{Fumier} \quad (\text{en t/ha, total depuis 1980}) & 8,3 \\ &+ 0,202 \times \text{P}_2\text{O}_5 \quad (\text{en kg/ha/an}) & 6,1 \\ \text{Ecart-type résiduel} &= 29,6 & n = 81, r^2 = 0,780 \\ \text{Moyenne et écart-type :} & \quad \text{N exporté} = 160,4 \pm 63,1 \end{aligned}$$

Un calcul en régression multiple permet d'exprimer *le grade de praticabilité* en fonction des caractéristiques parcellaires (cas des coteaux du Lembron) :

Equation (2)

Signification

$$\begin{aligned} \text{PRATIC} &= 3,43 \\ &+ 0,66 \text{ LABOUR} : \text{parcelle labourable oui} = 1 ; \text{non} = 0. \\ &+ 1,14 \text{ R.G.I.} : \text{parcelle de ray-grass italien oui} = 1 ; \text{non} = 0 \\ &- 0,38 \text{ ACCES DIFFICILE} : \text{éloignement ou chemin malaisé} \\ & \quad \quad \quad 1 \text{ obstacle} = 1 \\ & \quad \quad \quad 2 \text{ obstacles} = 2 \\ &- 0,244 \text{ TOPO} : \text{plat} = 1, \text{pente modeste} = 2, \text{pente forte} = 3 \\ &- 0,105 \text{ TOPO} \times \text{EXPO} : \\ & \quad \text{EXPO} : \text{exposition nord} = -1 \text{ et sud} = +1 ; \text{autres} = 0 \\ &- 1,55 \times 10^{-3} \text{ ALTITUDE} : \text{en mètres} \\ n &= 81 & r^2 = 0,778 \end{aligned}$$

