

# Modélisation de la réponse à la fertilisation minérale azotée des prairies permanentes. Influence de la fertilité acquise

P. Loiseau

**A** lors que des progrès considérables ont été réalisés dans le calcul de fumure pour les céréales, beaucoup reste à faire concernant la fumure minérale azotée des prairies. Dans les régions à forte proportion de STH (Surfaces Toujours en Herbe), un meilleur raisonnement des apports minéraux présente un intérêt particulier pour les prairies permanentes de fauche parce que, d'une part elles reçoivent la plus grande partie des engrais azotés minéraux achetés par les éleveurs, d'autre part elles montrent une grande diversité (de MONTARD et BLANCHON, 1985), susceptible d'influer sur la valorisation des apports.

## • Le conseil de fumure

Sans attendre de nouvelles études analytiques, des travaux de synthèse sur la base des connaissances actuelles ont déjà permis de proposer un calcul des fumures tenant compte d'un grand nombre de conditions agronomiques : types de prairie,

---

### *MOTS CLÉS*

Azote minéral, efficacité, fertilisation minérale, fertilisation raisonnée, modélisation, prairie permanente, production fourragère.

### *KEY-WORDS*

Efficiency, forage production, mineral fertilization, mineral nitrogen, model setting-up, permanent pasture, rational fertilization.

### *AUTEUR*

I.N.R.A., Station d'Agronomie, 12, av. du Brézat, F63039 Clermont-Ferrand Cedex.

climat, diversité des modes d'exploitation, des formes de fumure et des objectifs de production (de MONTARD et al., 1986 ; de MONTARD, 1987). La formulation proposée tient compte de l'ensemble des sources d'azote : fixation symbiotique, fertilisation organique par les engrais de ferme ou les déjections animales, apports minéraux, fourniture du sol. Le *niveau de fertilité* des prairies est pris en compte dans un coefficient de "praticabilité" (de MONTARD, *ibid.*) qui permet une expertise des quantités d'azote récoltables provenant de la minéralisation des matières organiques du sol : dans la région du Lembron (Puy-de-Dôme), l'azote récolté issu de la minéralisation varie ainsi de 35 à 140 kg/ha en l'absence d'irrigation. Par ailleurs, le calcul fait appel à un *coefficient apparent d'utilisation des apports minéraux* de 60%. En effet, les résultats d'expériences disponibles dans la littérature (SALETTE et al., 1982 ; revue et travaux de TRIBOÏ, 1987), comme les résultats d'analyses en régression multiple sur des données issues de réseaux de parcelles chez les agriculteurs convergent très souvent vers ce chiffre (de MONTARD, 1983). Selon toute vraisemblance, la quantité d'azote fournie par le sol affecte la réponse de la prairie aux apports minéraux (RYDEN, 1984).

### • Travaux analytiques susceptibles d'améliorer le calcul de la fertilisation azotée des prairies

Sur la base des premiers travaux réalisés en liaison avec les organismes de développement, un programme de recherches a été lancé en 1987 par le Laboratoire de la production fourragère de Clermont-Ferrand : 1 - fixation symbiotique par le trèfle blanc dans ses associations avec les graminées, 2 - fourniture d'azote minéral par le sol, 3 - réponse des prairies aux apports minéraux azotés. Les aspects 2 et 3 sont abordés conjointement mais, dans un premier temps, de façon séparée du premier point, donc volontairement en l'absence de légumineuses. Le but de cette communication est d'exposer quelques premiers résultats obtenus sur la fourniture du sol et la valorisation des apports minéraux.

### • Essai de mesure des réponses à l'azote selon les types de prairie

Un essai multilocal a été mis en place en 1987 sur 4 prairies permanentes de fauche, sélectionnées dans un réseau consacré à l'établissement d'un référentiel sur les productions et les pratiques d'exploitation dans la région des coteaux du Lembron (POTIER et MONTEILHET, 1987). Les 4 prairies ont été choisies en fonction de leur "praticabilité". Ce concept fait intervenir plusieurs critères qui agissent plus ou moins directement sur le niveau de "fertilité" naturel ou acquis de la prairie : la faible praticabilité (P-) correspond à la fois à des situations plus sèches, à des

parcelles à la fois éloignées du siège de l'exploitation et peu fertilisées dans un passé ancien ; la forte praticabilité (P + ) correspond au contraire à des parcelles plus humides par nature ou irriguées, recevant au moins l'équivalent de 100 kg de N minéral depuis plusieurs décennies. Dans chacun des 2 types, deux parcelles ont été choisies selon leur niveau d'intensification récent : une parcelle recevant plus de 200 kg N/ha/an (I + ) depuis 10 ans, et une parcelle recevant comme par le passé moins de 100 kg N minéral/ha/an (I-). En 1986, les productions de matière sèche (MS) annuelles enregistrées par le réseau dans ces 4 prairies étaient de 5 t (P-I-), 6,5 t (P + I-), 7 t (P-I + ) et 8,5 t MS (P + I + ). Le mode d'exploitation des 4 prairies est lié à leur production : un foin et une pâture sur P-I- ; 2 ensilages et 2 pâtures sur P + I + .

En fait, il est difficile d'isoler l'effet de 2 facteurs, même synthétiques, dans le choix de sites. Les prairies sont aussi différentes par les sols (limoneux sur P-I-, argileux sur P + I + , argilo-sableux sur les deux autres sites). Le climat est aussi variable selon les sites car, dans cette région de piémont, les prairies s'étagent entre 400 (P + I-) et 750 m d'altitude (P-I-). Les différences de température moyenne entre les 2 sites extrêmes ont été en 1987 de 1, 4 ; 0,2 ; 0,8 et 2,6°C, respectivement pour les 4 périodes de pousse successives. Les précipitations ont varié selon les sites de 320 à 470 mm pendant la période de croissance, les différences résultant essentiellement des pluies orageuses d'août.

Le but de l'essai est de mesurer au champ la fourniture d'azote minéral par le sol et les coefficients apparents et réels ( $N_{13}$ ) d'utilisation des apports minéraux azotés en fonction des quantités apportées (0 à 450 kg N/ha/an). Une petite surface expérimentale a été isolée dans chaque prairie. Dans les essais, toutes les prairies et tous les niveaux de fumure ont été conduits selon le même mode d'exploitation en 4 coupes par an et sous une fertilisation phospho-potassique non limitante. La répartition saisonnière des apports azotés a été calquée sur le rythme de production des prairies dans la région, et appliquée à tous les traitements (tableau 1). Les pre-

Numéro de la coupe	1	2	3	4
Date d'apport	5/4	21/5	9/7	26/8
Dose annuelle	Doses apportées à chaque coupe			
75	30	15	15	15
150	60	30	30	30
300	120	60	60	60
450	180	90	90	90

**TABLEAU 1 : Fractionnement des apports d'azote sur les 4 prairies (kg N/ha)**  
**TABLE 1 : Partition of the nitrogen dressings on the 4 pastures (kg N/ha)**

miers résultats concernent uniquement les données classiques de réponse à l'azote et n'utilisent pas les analyses avec  $N_{15}$ . La formulation du *Coefficient moyen Apparent d'Utilisation de l'azote pour un apport donné* est la suivante :

$$\text{CAU (Apport)} = (\text{N Récolté (Apport)} - \text{N Récolté (O)}) / \text{Apport}$$

### • Elaboration d'un modèle de réponse à l'azote applicable à toutes les prairies

Conformément à ce qu'on pouvait attendre, la corrélation entre apports et récoltes d'azote, obtenue en utilisant l'ensemble des résultats annuels sur les 4 sites, est faible ( $r^2 = 0,41$ ). En fait, les courbes représentant les quantités d'azote récoltées en fonction des apports sont différentes pour chaque prairie (figure 1). On constate en particulier que les quantités d'azote mobilisées pour les apports nuls varient de 87 à 167 kg N/ha/an. Dans l'objectif d'une formulation du calcul de fumure, il faut rechercher une loi commune à l'ensemble des prairies faisant intervenir un paramètre mesurable ou estimable caractérisant chaque prairie.

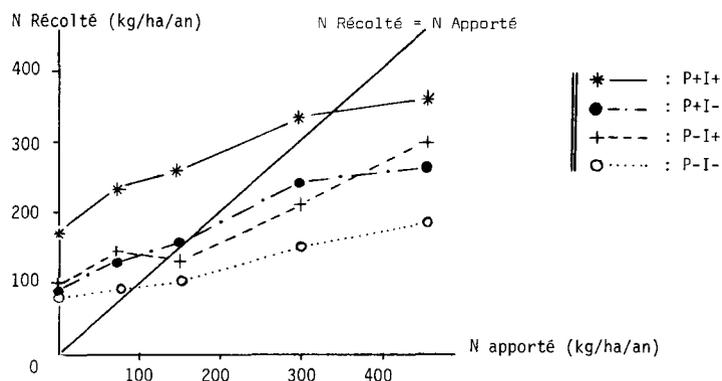


FIGURE 1 : Réponse à l'azote de 4 prairies (données expérimentales)

FIGURE 1 : Response of 4 pastures to nitrogen (experimental datas)

Une solution a été trouvée en constatant que les courbes devenaient superposables par une série de translations adéquates sur l'axe des apports N. En prenant comme référence la courbe relative à la prairie pauvre (P-I-), on peut superposer n'importe quelle autre courbe de réponse en effectuant un changement de variable tel que N Apporté devient la somme du N Apporté (N App) et d'une quantité de correction (Corr). Avec ce changement de variable, toutes les prairies répondent donc à une même loi paramétrée par le terme correctif spécifique de chaque prai-

rie. Le terme Corr vaut 0, 90, 130 et 310 respectivement pour les prairies P-I-, P-I+, P+I- et P+I+.

Pour que la superposition par translation soit acceptable, les potentialités de production doivent être semblables pour toutes les prairies, soit environ 370 kg N/ha/an obtenus pour P+I+. Quoique l'apport de 450 kg/ha n'ait pas été tout à fait suffisant pour atteindre ce plafond, les résultats obtenus n'infirmant pas cette hypothèse pour la prairie P-I+. Pour les 2 autres prairies, la production potentielle semble plafonner à des niveaux de N Récolté plus faibles. En effet, lors de la translation, 2 groupes de points se situent au dessous de la courbe générale. Ils correspondent aux apports élevés de 450 kg N/ha sur les prairies P+I- et P-I-. L'examen de l'humidité du sol montre que ces prairies sont sujettes à une sécheresse plus importante que les autres en 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> repousses (réserve en eau moyenne du sol approvisionnée à moins de 50%). Ces points ont été éliminés pour axer le propos sur la modélisation de la réponse à la fertilisation en conditions d'alimentation en eau pas ou peu limitante. Mais les points relatifs aux mêmes prairies pour les apports inférieurs à 450 kg N/ha se superposaient bien aux autres dans la translation et ont été gardés. Cela suppose que la sécheresse n'a affecté la récolte d'azote que sur les forts apports azotés. En effet, il semble légitime que l'accroissement précoce et rapide de l'indice foliaire induit par l'azote ait épuisé plus rapidement la réserve en eau et déclenché sélectivement sur ces traitements un niveau de sécheresse limitant pour l'assimilation N. Il reste que l'existence d'un même potentiel pour les prairies n'est pas prouvée pour autant et constitue une hypothèse pour la suite.

L'interprétation de la nouvelle variable est simple : à une constante près (la fourniture nette d'azote sur la prairie la plus pauvre), le terme  $N \text{ App} + \text{Corr}$  représente l' "azote fourni", c'est-à-dire la somme des apports et de la fourniture brute par le sol. L'attribution du même coefficient de valorisation aux deux sources d'azote a été récemment critiquée pour ce qui concerne les coefficients réels d'utilisation de l'azote sur blé (MACHET et coll., 1987). Cependant, le fait que la somme des sources explique les récoltes obtenues implique qu'à cette échelle de travail, on ne fasse pas d'erreur importante en supposant que la prairie utilise de la même façon l'azote du pool minéral quelle que soit sa provenance. C'est ce qu'exprime RYDEN (1984) en affirmant l'additivité de la fourniture du sol et des apports. Il reste alors à étudier de plus près la nouvelle relation entre l'azote récolté et ce qu'on appellera "azote fourni".

Un *modèle linéaire* exprimant l'azote récolté par an en fonction de l'azote fourni par an explique 88% de la variance de l'azote récolté pour l'ensemble des doses et pour les 4 prairies. La pente qui mesure le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (fourni par le sol ou apporté sous forme d'engrais minéral) est de  $42 \pm 6\%$ . Ce chiffre vaut évidemment pour les conditions de l'essai, notamment pour un rythme des fournitures et des apports au cours de l'année de 2/5 pendant la première pousse

et 1/5 pour les 3 repousses suivantes. Il est aussi relatif aux niveaux de la variable "N Fourni" explorés dans l'essai, soit 0 à 760 kg N (somme de 0 à 450 kg/ha d'apports minéraux et du coefficient Corr variant de 0 à 310 kg/ha).

En fait, une simple observation de la courbe de réponse montre qu'un *modèle sigmoïde* est plus adéquat qu'un modèle linéaire car, comme pour beaucoup d'autres facteurs, la réponse est d'abord croissante en fonction de la fourniture, puis décroissante pour les doses élevées. Un modèle sigmoïde symétrique par rapport au point d'inflexion (modèle logistique) explique en effet 91 % de la variance. La formulation du N récolté (N REC) est la suivante :

$$N_{REC} = \frac{\alpha + \beta \exp(\gamma \times N_{FOURNI} - \delta)}{1 + \exp(\gamma \times N_{FOURNI} - \delta)}$$

avec  $N_{FOURNI} = Corr + N_{Apporté}$

## • Paramètres du modèle et signification

Les paramètres a, b, c, et d de la courbe, obtenus par régression non linéaire multiple, permettent de chiffrer plusieurs termes remarquables : d'une part, les coordonnées et la valeur de la pente au point d'inflexion, c'est-à-dire les conditions d'obtention et la valeur maximale du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (*CAU marginal*) ; d'autre part, les valeurs de l'ordonnée aux asymptotes, c'est-à-dire les quantités minimales ou maximales d'azote récoltable. Ces valeurs sont les suivantes (figure 2) :

- CAU maximal de l'azote minéral :  $60 \pm 12\%$ ,
- Azote fourni qui maximise le CAU marginal : 401 kg,
- Azote récolté qui maximise le CAU marginal : 219 kg,
- Maximum d'azote récoltable : 371 kg (paramètre  $\beta$ ),
- Minimum d'azote récolté : 70 kg (paramètre  $\alpha$ ).

Il est remarquable de noter la convergence entre le CAU maximum et le CAU employé dans les conseils de fumure (60 %) ; en fait, les résultats précédents engagent à limiter l'emploi de cette valeur 60 % aux niveaux de fourniture optimum pour la valorisation de l'azote minéral. Il conviendrait de réduire cette valeur lorsque les fournitures totales deviennent inférieures à 300 ou supérieures à 500 kg/ha/an.

La valeur maximale d'azote récoltable ne représente qu'un potentiel pas toujours possible à atteindre : la réalisation du potentiel suppose d'abord l'absence de

sécheresse ; par ailleurs, la capacité du peuplement à accumuler l'azote et la matière sèche peut dépendre de sa structure et de sa composition botanique.

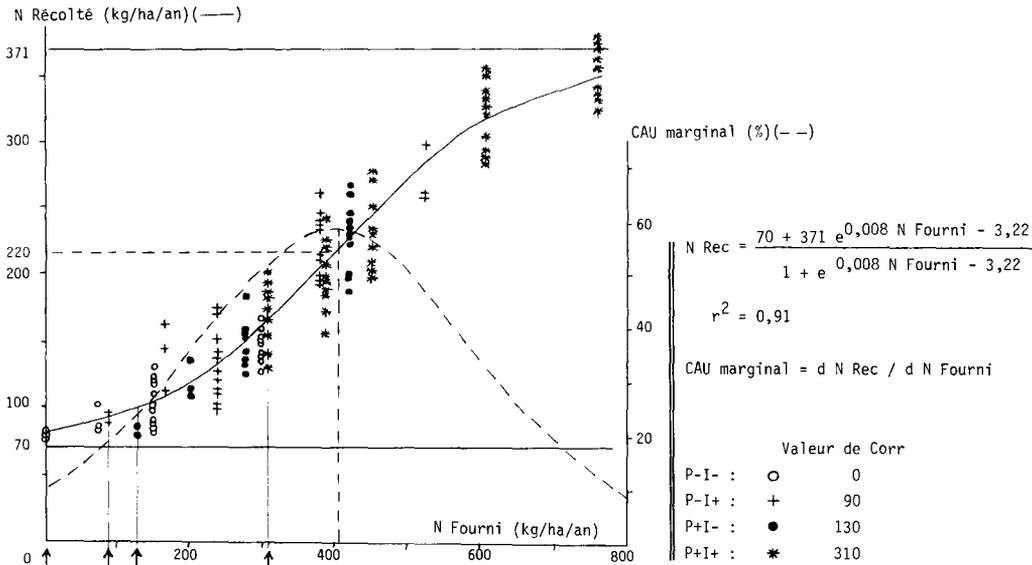


FIGURE 2 : Modèle général de réponse à l'azote "fourni" ( $N \text{ Fourni} = N \text{ Apporté} + \text{Corr}$ ) : azote récolté ( $N \text{ Rec}$ ) et coefficient marginal d'utilisation apparente ( $CAUm$ )

FIGURE 2 : General model of response to "supplied"  $N$  (supplied  $N = \text{applied } N + \text{Corr}$ ) : harvested nitrogen ( $N \text{ Rec}$ ) and marginal apparent coefficient of utilization ( $CAUm$ )

Le minimum d'azote récolté (80 kg N pour  $N \text{ Fourni} = 0$ ) pourrait correspondre à la mobilisation d'azote du sol relative à la fourniture azotée sur le témoin de la prairie pauvre. Il se peut aussi qu'une mobilisation d'azote vers les parties aériennes se produise de façon indépendante de la fourniture du sol. Une partie des 80 kg N correspondrait alors à l'utilisation de réserves en azote provenant des parties non récoltées du peuplement.

Selon le modèle logistique testé (TOMASSONE et al., 1983), le CAU n'est pas une constante mais une fonction parabolique de l'azote récolté. Le CAU marginal ( $CAUm$ ) passe par un maximum et s'exprime de la façon suivante en fonction de l'azote récolté ( $N \text{ REC}$ ) :

$$CAU \text{ m} = d N \text{ REC} / d N \text{ FOURNI}$$

$$CAU \text{ m} = \gamma (N \text{ REC max} - N \text{ REC}) \times (N \text{ REC} - N \text{ REC min})$$

On peut aussi exprimer le CAU marginal en fonction de l'azote fourni : la formule est complexe, mais la forme de la courbe simple (figure 2). Le changement de variable permet de revenir à l'expression du CAU marginal en fonction du N Apporté : il en résulte que la valorisation maximum des apports est obtenue pour des apports d'autant plus importants que la prairie est pauvre.

### • Variation des paramètres du modèle en fonction de la saison

Le modèle étudié jusqu'à présent pour les productions et apports annuels s'applique aussi bien aux différentes coupes, quoiqu'avec plus d'incertitude statistique. Pour toutes les coupes, la relation entre les quantités récoltées et les apports est mieux expliquée par le modèle sigmoïde que par le modèle linéaire. Les valeurs de  $r^2$  obtenues sont respectivement de 0,60 ; 0,84 ; 0,89 et 0,90 pour les coupes 1 à 4. Selon le modèle, les quantités maximales d'azote récolté sont de 133 kg pour la première coupe et de seulement 80 à 88 kg pour les repousses (figure 3), mettant en évidence une opposition entre une forme reproductrice dressée favorable à l'accumulation sur pied et une forme végétative gazonnante limitant la capacité de stockage.

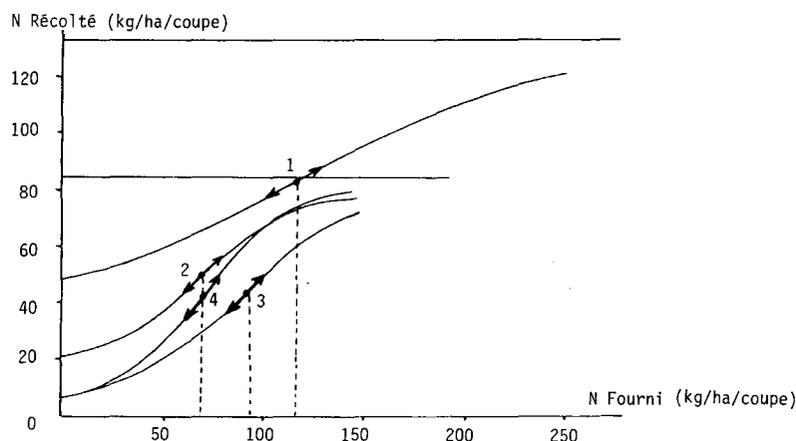


FIGURE 3 : Relation entre "azote récolté" et "azote fourni" pour les différentes coupes (indiquées par leur numéro ; 4 prairies confondues)

FIGURE 3 : Relationship between "harvested nitrogen" and "supplied nitrogen" for the different cuts (signalled by their number ; total of 4 pastures)

Les quantités d'azote récoltées pour les fournitures nulles sont de 47, 24, 7 et 7 kg N/ha pour les 4 coupes successives (figure 3). Ce résultat s'accorde avec une mobilisation à la montaison de réserves précédemment accumulées en période végétative. En absence de sécheresse grave (réserve utile maintenue à au moins la moitié de sa valeur), les CAU marginaux maximum sont respectivement de 40, 66,

65 et 93 %. Ils sont obtenus respectivement pour des fournitures N de 118, 72, 94 et 70 kg N (figure 3). Le CAU marginal maximum de 40 % obtenu ici pour la première coupe est inférieur à celui qui a été mesuré en moyenne en période de pleine croissance sur prairie normande par SALETTE et LEMAIRE (1982), soit 51 %. La valorisation maximale de l'azote, plus faible sur la première pousse reproductrice que sur les repousses estivales, pourrait s'expliquer d'une part par la mobilisation de réserves internes au peuplement, d'autre part par des conditions climatiques plus froides venant limiter la croissance aérienne et la fonction "puits".

Il est aussi probable que l'on constate sur les différentes repousses les arrière-effets des apports réalisés avant les coupes précédentes. Le marquage isotopique permettra sans doute de mesurer ces arrière-effets.

### **• Nutrition azotée des peuplements selon les conditions climatiques**

L'hypothèse d'action des températures est confirmée par l'examen de la nutrition azotée. Pour cela, on a pris comme référence les lois de dilution des teneurs de la matière sèche en azote obtenues sur prairie permanente en Normandie (SALETTE et LEMAIRE, 1981). A chaque coupe et à fourniture égale, la qualité de la nutrition azotée est semblable pour toutes les prairies. Mais, toujours à fourniture égale, la nutrition azotée est meilleure dans la première coupe que dans les repousses, alors que SALETTE et LEMAIRE trouvent les mêmes lois tout au long de l'année. La figure 4 exprime la qualité de la nutrition en fonction du degré de réalisation de la mobilisation potentielle d'azote. Si l'on choisit par exemple comme repère la valeur de l'azote fourni qui correspond au point d'inflexion du modèle (N Récolté intermédiaire entre les valeurs minimales et maximales), la qualité de la nutrition correspond respectivement à 95, 70, 70 et 75 % de la valeur optimale selon SALETTE et LEMAIRE pour les 4 pousses successives (figure 4).

Ces différences seraient-elles attribuables à une évolution botanique en fonction du climat et du numéro de la coupe ? L'effet de la composition botanique n'existant pas entre prairies, il est peu vraisemblable qu'il s'exerce entre périodes, alors même que les variations de composition dans le temps sont encore plus faibles.

Parmi les variables étudiées, le degré de sécheresse estimé par le taux moyen d'approvisionnement de la réserve en eau du sol ne joue pas de rôle important lorsqu'il est supérieur à 50 %. En revanche, le phénomène pourrait s'expliquer par le fait que les repousses sont obtenues à des températures moyennes plus élevées que celles de la première croissance printanière, soit respectivement 10, 15, 18 et 15 degrés par jour : l'absorption d'azote étant moins limitée par la température que la croissance, il se produirait au printemps une certaine accumulation d'azote dans les parties

aériennes sous des formes peu complexes ; au contraire, en été, une métabolisation totale de l'azote réduit avec incorporation rapide aux structures tissulaires serait permise par des conditions de température favorables à la croissance (ROBELIN, comm. pers.).

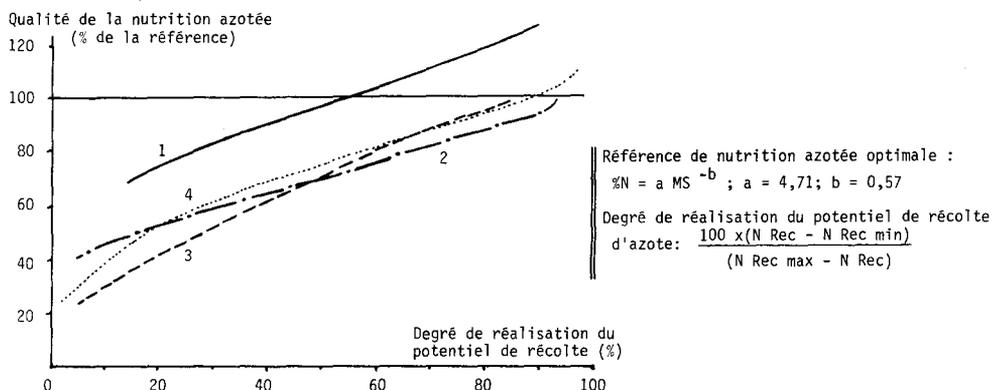


FIGURE 4 : Qualité de la nutrition azotée selon les références de SALETTE et LEMAIRE en fonction du degré de réalisation de la récolte potentielle d'azote (le chiffre correspond au numéro de la coupe)

FIGURE 4 : Quality of nitrogen nutrition according to SALETTE and LEMAIRE'S references, depending on the ratio of real to potential harvest (the number is that of the cut)

Un tel résultat engage à adapter pour la montagne et le piémont les normes de SALETTE et LEMAIRE sur le diagnostic de la nutrition azotée. En effet, les progrès de production calculables à partir de ces normes varient de façon considérable selon qu'il s'agit de la première pousse ou des repousses ultérieures. Par exemple, figure 4, un même niveau de nutrition azotée du peuplement chiffré à 80 % de l'optimum correspond à une mobilisation réelle d'azote de 30 % du potentiel s'il s'agit de la première pousse, et de 60 % s'il s'agit des repousses. On fait donc une grosse erreur dans le diagnostic instantané des progrès de productivité à attendre d'un nouvel apport.

## • Conséquences pratiques du modèle pour le conseil de fumure

L'agriculteur s'intéresse plutôt aux CAU moyens des apports qu'aux CAU marginaux. Le modèle permet de les calculer (figure 5). Le CAU moyen des apports sur une prairie donnée est représenté sur la figure 1 par la pente des droites passant par un point de la courbe de réponse et par l'ordonnée à l'origine. Il est maximum lorsque la droite devient tangente à la courbe de réponse, La figure 5, qui

exprime le CAU moyen en fonction des apports et du type de prairie caractérisé par Corr, montre que le CAU moyen maximum diminue sur les prairies pauvres ; en outre, il est obtenu pour des apports d'autant plus élevés que la prairie est plus pauvre : apports de 125 kg N pour la prairie P + I+ et de 570 kg pour la prairie P-I- (tableau 2).

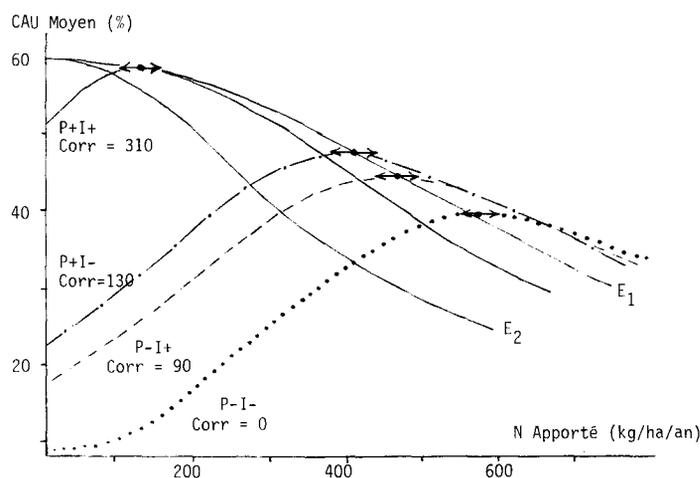


FIGURE 5 : Variations du coefficient moyen d'utilisation apparente de l'azote (CAU) selon l'apport et la prairie (E1 et E2 : enveloppes des CAU moyens maximaux et marginaux maximaux)

FIGURE 5 : Variations of the mean apparent coefficient of utilization of nitrogen (CAU) according to dressings and to pastures (E1 and E2 : envelopes of largest mean CAUs and of largest marginal CAUs)

	P-I-	P-I+	P+I-	P+I+
N récolté pour l'apport nul				
Expérimental	81	94	84	173
Modèle	44	83	100	176
N total fourni par le sol (Corr)	0	90	130	310
Apport maximisant le CAU marginal	401	310	270	90
Apport maximisant le CAU moyen	570	470	410	125
Valeur du CAU moyen maximum (%)	40	44	47	58

TABLEAU 2 : Paramètres remarquables de la fourniture du sol et de l'utilisation dans la récolte de l'azote minéral fourni selon la praticabilité et l'intensification récente de 4 prairies permanentes (P : praticabilité, fertilité ancienne naturelle ou acquise (P+ ou P-) ; I : intensification récente -10 ans- de la fertilisation azotée et de l'utilisation (I+ ou I-))

TABLE 2 : Significant parameters of mineral nitrogen supply by the soil or utilization in harvested material according to practicability and recent intensification of 4 permanent pastures (P : practicability, ancient fertility natural or acquired (P+ or P-) ; I : recent intensification -10 years- as regards N dressings and utilization (I+ or I-))

Il en résulte qu'aux faibles apports, le rendement agricole de l'azote est d'autant plus faible que la prairie est plus pauvre car, non seulement il faut investir plus d'azote pour obtenir la valorisation maximale, mais la valorisation obtenue alors est plus faible. Lorsque les apports sont augmentés, le CAU moyen le plus élevé est obtenu sur des prairies de plus en plus pauvres. Les conséquences pratiques de ce modèle sont donc importantes du point de vue de la gestion de l'azote : ce modèle permet de raisonner le choix des doses selon les prairies soit en conditions limitantes de disponibilité en fertilisants azotés (choix des prairies riches), soit en situation de pléthore avec risque de sous-utilisation éventuelle et de pollution (choix de prairies plus pauvres).

Les résultats précédents montrent qu'un mode de calcul des fumures azotées minérales plus conforme au comportement de l'azote dans le système sol-peuplement, et sans doute de portée plus générale, doit : 1 - appliquer le coefficient apparent d'utilisation de l'azote à la somme de la fourniture totale par le sol et des apports, et non aux seuls apports, 2 - faire varier le coefficient apparent d'utilisation en fonction de la fourniture totale au niveau du sol. Ainsi, la formule précédemment utilisée :

$$\text{N Récolté} = \text{Contribution de la fourniture du sol à la récolte (pour la prairie } i) + (0,60 \times \text{N Apporté})$$

devrait être remplacée par celle-ci :

$$\text{N Récolté} = \text{CAU (N Fourni)} \times \text{N Fourni,}$$

avec  $\text{N Fourni} = \text{Fourniture totale du sol (prairie } i) + \text{N Apporté.}$

Cette nouvelle formulation devient plus conforme aux principes de calcul déjà adoptés pour le blé. Nous avons donné ici la loi de variation du CAU moyen en fonction de l'azote fourni. Le même point crucial qu'auparavant demeure cependant lorsqu'il s'agit d'expertiser, pour une prairie *i* donnée, la fourniture totale du sol à la prairie, c'est-à-dire le coefficient *Corr* ou bien encore la minéralisation brute. En effet, il n'existe pas encore de test de routine pour déterminer la minéralisation du sol sous une prairie donnée et à une époque donnée (RYDEN, 1984). C'est pourquoi une partie des recherches futures devrait être orientée vers les méthodes de diagnostic de cette valeur au champ ou au laboratoire.

Il reste que le CAU pourrait varier aussi selon d'autres caractéristiques du milieu. L'échantillon ne présentait pas de conditions d'excès d'eau susceptibles de le diminuer. Mais on a constaté que la récolte potentielle était limitée dans certains cas de figure. La sécheresse est certainement un facteur à mettre en cause. Par ailleurs, la structure du peuplement et sa composition botanique ne sont pas à exclure en tant que facteurs d'action sur la récolte potentielle et sur le CAU aux forts approvisionnements. Ces 2 facteurs seraient à étudier et à prendre en compte pour paramétrer le modèle proposé ici. Concernant le facteur "composition botanique", il

serait toutefois très délicat de le dissocier du facteur "fourniture du sol", les deux étant généralement très liés.

Accepté pour publication, le 5 décembre 1988.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MACHET J.M., PIERRE D., RECOUS S., REMY J.C. (1987) : "Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures", *C.R. Acad. Agr. Fr.*, 73 (3) 39-55.
- de MONTARD F.X. (1983) : "La production prairiale", *Systèmes agraires et pratiques paysannes dans les Monts-Dore*, G. Bazin et al., INRA ed., 203-248.
- de MONTARD F.X. (1987) : "Raisonnement de la fertilisation des prairies et du plan de fumure dans les exploitations d'élevage", *Forum fourrages Auvergne 1986*, D. Micol, INRA, Chambre d'Agriculture, DRAF, ENITA Clermont-Ferrand Ed., 85-109.
- de MONTARD F.X., BLANCHON J. (1985) : "La prairie permanente, base fourragère modelée par la gestion de l'exploitant", *BTI*, 339/341, numéro spécial Montagne, 375-381.
- de MONTARD F.X., ANGLADE F., MONTEILHET P., THOULY J.C. (1986) : "Mise au point d'une méthode pratique pour le calcul de la fertilisation des prairies dans le Massif Central humide. I — La fertilisation azotée," *Fourrages*, 108, 39-78.
- POTIER J., MONTEILHET P. (1987) : "Etude de la maîtrise des facteurs de productivité de l'herbe par le suivi de parcelles fourragères en Limagne Sud", *Forum Fourrages Auvergne 1986*, D. Micol, INRA, Chambre d'Agriculture, DRAF, ENITA Clermont-Ferrand Ed., 111-116.
- RYDEN J.C. (1984) : "Fertilizers for grassland", *Chemistry and Industry*. 17 Sept. 1984, 652-657.
- TOMASSONE R., LESQUOY E., MILLIER C. (1983) : *La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*, INRA, Actualités scientifiques et agronomiques, Masson Ed., 180 p.
- TRIBOÏ E. (1987) : "Recovery of mineral N fertilizer in herbage and soil organic matter in grasslands of the Massif Central, France," *Fert. Res.*, 13, 99-116.
- SALETTE J., 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.
- SALETTE J., LEMAIRE G., LAISSUS R. (1982) : "Analyse de la croissance d'une prairie naturelle normande au printemps. II — Dynamique de l'absorption de l'azote et son efficacité", *Fourrages*, 91, 3-17.

### RÉSUMÉ

Un essai multilocal de réponse à l'azote minéral a été réalisé sur 4 prairies permanentes différenciant par leur fertilité naturelle ou acquise. Si l'on exclut les cas de sécheresse, les quantités d'azote récoltées par an sont expliquées à 91 % par une loi de réponse sigmoïde à un facteur (la somme des apports en N minéral et de la fourniture en N minéral par le sol de chaque prairie). Selon cette loi, la valeur maximale du coefficient marginal et apparent d'utilisation (CAU) de l'azote est de 60 % ; elle est atteinte pour une fourniture totale de 400 kg N/ha/an. La même loi s'applique à chaque coupe, avec des paramètres différents qui donnent lieu à discussion : en particulier, les CAU marginaux maximaux augmentent de 40 à 93 % entre la 1<sup>re</sup> et la 4<sup>e</sup> coupe. La loi de réponse à l'azote permet de calculer les CAU moyens des apports pour toute prairie. Les CAU moyens maximaux diminuent en même temps que la fertilité des prairies et sont atteints avec des apports d'autant plus importants que la prairie est plus pauvre. Pour tenir compte de ces résultats, une formulation du calcul des apports en azote minéral doit contenir un terme CAU moyen  $\times$  (N Apporté + N Fourni par le sol). Le problème pratique qui demeure est celui d'une méthode simple de diagnostic de l'azote fourni par le sol.

### SUMMARY

*Setting-up of a model for the response to the mineral nitrogen fertilization of permanent pastures. Influence of acquired fertility.*

A multilocal experiment concerning the response to mineral nitrogen was carried out on 4 permanent hay grasslands, differing in their natural or acquired fertility. When cases of drought are excluded, the amounts of nitrogen harvested per year are explained to the content of 91 % by a sigmoidal law of response to a factor which is interpreted as the sum of N mineral dressings and the N mineral supply from the soil of each field. In accordance with this law, the maximal value of the marginal Apparent Coefficient of Utilization (CAU) is 60 %. It is reached for a total supply of 400 kg N/ha/year. The same law applies to each cut, with different parameters, which are discussed : particularly, the maximal values of the marginal CAU increase from 40 to 93 % from the 1st to the 4th cut. For a given cut, the quality of the N- nutrition, estimated after LEMAIRE and SALETTE'S law of dilution is the same for all the fields for a given total N supply. But it varies in relation to cut, with the same ratio of real to potential N harvest. An interpretation is put forward on the role of temperatures. The law of response to N allows calculation of the mean CAUs of the dressings for any field. The maximum mean CAUs decrease with fertility, and are obtained for increasingly higher dressings when the fields are poorer. In order to take these results into account, an expression for the calculation of the N mineral dressings must contain a term mean CAU  $\times$  (N from dressings + N from soil). The practical problem remaining is to find a simple method for the determination of mineral N from soil.