

Diagnostic de nutrition minérale de l'herbe par analyse du végétal : application aux pelouses d'alpages

C. Brau-Nogué¹, M. Bassignana², A. Bornard^{1*}

Les alpages laitiers des Alpes du Nord françaises sont des pâturages d'altitude (1 500 à 2 000 m) exploités par des troupeaux bovins laitiers durant la période estivale. Situés dans les massifs sédimentaires qui forment la bordure occidentale des Alpes françaises, la plupart bénéficient de conditions pédoclimatiques favorables à la production herbagère (LEGROS et al., 1987 ; RICHARD, 1983). Ils sont, en outre, caractérisés par un mode d'exploitation traditionnel rigoureux visant à valoriser au mieux leur potentiel fourrager (DUBOST et BORNARD, 1987). Les systèmes de conduite des alpages laitiers des Alpes du Nord françaises connaissent aujourd'hui de profondes mutations humaines et technologiques qui se traduisent par l'abandon de certaines pratiques traditionnelles d'entretien. Il importe aujourd'hui d'en mesurer rapidement les conséquences sur la qualité et la productivité des pâturages.

* Etude réalisée dans le cadre du Programme de Recherche-Développement du G.I.S. Alpes du Nord (SUACI, 11, rue Métropole, F-73000 Chambéry).

MOTS CLÉS

Diagnostic, nutrition azotée, nutrition de la plante, nutrition phosphatée, nutrition potassique, pâturage de montagne, typologie des prairies.

KEY-WORDS

Diagnosis, grassland typology, nitrogen nutrition, phosphorus nutrition, plant nutrition, potassium nutrition, upland grazing.

AUTEURS

1 : C.E.M.A.G.R.E.F. Grenoble, Division I.N.E.R.M. (France).

2 : Università di Torino, Dipartimento di Agronomia (Italie).

CORRESPONDANCE

A. Bornard, C.E.M.A.G.R.E.F. - I.N.E.R.M., BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères.

L'estimation du niveau de fertilité minérale d'une prairie de longue durée se fait usuellement au moyen d'indicateurs plus ou moins synthétiques : développement de la biomasse aérienne (comparaison de rendements), extraction des ions disponibles (analyses de sol), composition floristique du peuplement en place (PLANTUREUX et al., 1987 ; BALENT, 1987). Ces techniques classiques de diagnostic posent toutefois à l'utilisateur un certain nombre de problèmes quand il s'agit d'interpréter les résultats : n'y a-t-il pas eu interaction avec d'autres facteurs de croissance ? Les minéraux extraits chimiquement lors de l'analyse de sol sont ils réellement utilisables par les plantes ? La composition floristique de la végétation observée reflète-t-elle exactement le niveau actuel de fertilité ?

De récents travaux effectués sur des prairies temporaires monospécifiques puis des prairies permanentes plurispécifiques ont permis de formuler les lois de dilution des éléments N, P et K au cours de la croissance des peuplements prairiaux. Établies initialement pour l'azote (SALETTE et LEMAIRE, 1981), elles ont ensuite été étendues à d'autres minéraux (SALETTE et al., 1989) et se formulent selon une équation du type :

$y = ax^b$, avec :

- y, la concentration de l'élément minéral (%),
- x, la matière sèche (MS) produite (t/ha),
- a et b, les coefficients potentiels de teneur et de dilution.

Des recherches ultérieures ont montré qu'il était également possible d'exprimer les concentrations de phosphore ou de potassium en fonction de la teneur en azote (SALETTE et HUCHÉ, 1989 et 1991 ; DURU, 1992a et 1992b). Les auteurs proposent des équations de référence correspondant au comportement normal d'un peuplement végétal en conditions non limitantes. Nous retiendrons comme références les équations suivantes :

$$N\% = 4,8 MS^{-0.32} \text{ (LEMAIRE et al., 1989)}$$

$$P\% = 0,24 N\%^{0.64} \text{ (DURU, 1992a)}$$

$$K\% = 1,62 N\%^{0.48} \text{ (DURU, 1992a)}$$

L'interprétation des résultats d'analyses s'appuie sur la comparaison des courbes de teneur minérale de l'herbe (PONS et al., 1989) ou sur le calcul d'indices de nutrition, dérivés des équations de référence (DURU, 1992a et 1992b) :

$$I_N = 100 \times (4,8 - 4,8 \times MS_{obs}^{-0.32} + N_{obs}) / 4,8$$

$$I_P = 100 \times 4,17 P_{obs} \times N_{obs}^{-0.64}$$

$$I_K = 100 \times 0,62 K_{obs} \times N_{obs}^{-0.48}$$

où MS_{obs} , N_{obs} , P_{obs} , K_{obs} sont respectivement les productions de matière sèche (en t/ha) et les teneurs en N, P et K de l'herbe.

Ces indices expriment l'écart entre les niveaux de concentration minérale observés et les niveaux de concentration minérale potentiellement atteints dans le cas d'une alimentation non limitante. Les indices de nutrition non limitante sont donc théoriquement égaux à 100.

Le diagnostic de fertilité au moyen des analyses minérales de fourrage constitue une solution séduisante pour sa rapidité de réponse et sa facilité de mise en œuvre. Toutefois, ce type d'outil n'a été utilisé qu'en zone de plaine ou de moyenne montagne (PONS et al., 1989 ; BALENT et al., 1989). Dans le cadre des recherches sur la dynamique des pelouses d'alpages laitiers, nous avons entrepris de tester la validité de ces modèles sur des pelouses d'altitude au moyen du dispositif expérimental présenté ci-après. Parallèlement à cette approche expérimentale, un premier essai de mise en application a été entrepris dans diverses situations de pelouses d'alpages en évolution, l'objectif étant d'évaluer la pertinence des indices de dilution minérale de l'herbe en tant qu'indicateurs complémentaires d'évolution de la végétation.

Matériel et méthodes

1. Dispositif expérimental

• Sites

Les deux sites d'étude sont situés sur l'alpage de Montclocher dans la zone des calcschistes du Beaufortain (Savoie, France). Le premier, noté PGF, est localisé en aval des chalets d'exploitation, dans un secteur régulièrement pâturé et fertilisé par "fertirrigation" (irrigation fertilisante avec le lisier) jusqu'en 1989 (altitude 1 800 m, exposition sud, pente 40%). Le sol est limoneux, légèrement acide (pH = 5,8). La végétation est une pelouse dense dominée par *Dactylis glomerata*, *Agrostis vulgaris* et *Festuca rubra*, de type "gras frais" selon la typologie de BORNARD et DUBOST (1992), représentative des meilleures pelouses rencontrées en alpages laitiers. Le second site, noté Pm, est localisé en amont des chalets, à proximité de la crête, dans un secteur pâturé tardivement, non fertilisé depuis 1960 (altitude 1 900 m, exposition sud, pente 40%). Le sol, de même origine que celui de la station précédente, est plus acidifié (pH = 5,0). La végétation est une pelouse à *Deschampsia flexuosa*, *Nardus stricta*, et *Festuca rubra*, de type "pelouse maigre acidophile", caractéristique des stations dont la fertilité s'est dégradée à la suite d'un allègement ou de l'abandon des pratiques d'entretien.

• Dispositif et mesures

Les mesures ont été conduites sur les mêmes sites pendant deux étés successifs (1991 et 1992). Les deux stations étaient soustraites au pâturage des vaches laitières.

res au moyen d'une clôture grillagée. Chaque défens, mesurant 210 m² était partagé en 3 parcelles de 70 m² soumises aux traitements suivants :

- traitement "NPK" : apport de NPK non limitant (150 kg N/ha, 120 kg P₂O₅/ha, 200 kg K₂O/ha,
- traitement "N" : apport de N non limitant (150 kg N/ha),
- traitement "T" : témoin, sans apport d'engrais.

Les engrais ont été épandus sur chaque station 10 jours après le déneigement, soit environ 100 degrés-jours après la date de départ en végétation, sous des formes solubles, rapidement assimilables (ammonitrate, superphosphate, chlorure de potassium).

Dans chaque parcelle, 6 à 8 prélèvements ont été réalisés à des intervalles de 7 à 10 jours, de début juin à début août, date du maximum de production du premier cycle de végétation (floraison des graminées). Les coupes ont été réalisées avec 3 répétitions, suivant la méthode des couloirs (0,1 m × 10 m), afin de prendre en compte la micro-hétérogénéité spatiale. En 1992, sur PGF, l'abondante biomasse des traitements avec azote nous a conduits à couper des rectangles de 0,5 m × 2 m. Les échantillons coupés, séchés en étuve à 70°C puis broyés, ont été soumis à analyse chimique pour la détermination des teneurs en N, P et K.

2. Stations hors dispositif

• Sites

Entre 1983 et 1992, de nombreux prélèvements de biomasse aérienne ont été effectués dans des pelouses d'alpages laitiers en vue d'une meilleure connaissance de leurs caractéristiques agronomiques ; 52 échantillons de fourrage, recueillis sur un total de 47 stations, ont été retenus pour la mise en application du diagnostic de fertilité minérale au moyen des analyses de fourrage.

Les échantillons ont été classés en fonction du type de végétation relevé sur leur station d'origine (tableau 1). Six catégories sont représentées : pelouses grasses fraîches (PGF), représentatives des stations les plus fertiles, souvent soigneusement entretenues ; pelouses grasses neutres (PGN) et moyennes neutres (PMN), formations généralement transitoires qui indiquent la présence d'un facteur limitant modéré ou un début de dégradation du niveau de fertilité de la station après arrêt des épandages ; pelouses moyennes sèches acidophiles (PMS) et pelouses maigres (Pm), aux caractères oligotrophes plus marqués, caractéristiques d'un abandon plus ancien de la fertilisation ; pelouses pré-nivales (PN), présentes sur les stations à enneigement tardif, non fertilisées du fait de leur éloignement ou de la saison de végétation trop courte (BORNARD et DUBOST, 1992).

Type de pelouse	PG (gras frais)	PGN (gras neutre)	PMN (moyen neutre)	PMS (moyen sec)	Pm (maigre)	PN (pré-nival)	Total
Fertilisation :							
- naturelle (L)	3	-	-	-	-	-	3
- actuelle (A)	10	2	1	-	-	-	13
- récente (R)	5	5	3	-	-	-	13
- passée (S)	1	8	2	2	-	-	13
- nulle (X)	-	-	-	1	6	3	10
Total	19	15	6	3	6	3	52

TABLEAU 1 : Répartition des échantillons selon les types de végétation et le régime de fertilisation.

TABLE 1 : Distribution of samples, according to vegetation type and fertilization regime.

Compte tenu du délai de réponse de la composition floristique à une modification des pratiques d'entretien, un deuxième classement des stations a été opéré en fonction de la date des derniers apports de fumure organique (tableau 1) : fertilisation actuelle (A : moins de 3 ans), récente (R : entre 3 et 7 ans), passée (S : entre 7 et 50 ans), ou nulle (X : plus de 50 ans). A cela se rajoute une cinquième classe de stations qui, bien que ne faisant l'objet d'aucun apport de fumier ou de lisier, sont surmontées par des affleurements calcaires et soumises, du fait de leur position topographique, à une fertilisation naturelle (L) par le biais des eaux de ruissellement chargées de minéraux (LEGROS et al., 1987).

• Mesures et traitement des données

Les échantillons séchés et pesés ont été soumis à une analyse minérale N, P, K ; chaque échantillon est donc caractérisé par la biomasse aérienne présente au moment de la coupe et par les concentrations minérales mesurées dans l'herbe.

La formulation du diagnostic de fertilité a été effectuée par comparaison avec des situations connues qui ont servi à établir des "courbes types". Dans le cas présent, nous avons étalonné notre modèle à partir de trois séries de mesures, effectuées en alpage entre 1983 et 1992 sur des stations correspondant à des niveaux de fertilisation organique bien identifiés, sur la base d'enquêtes et d'observations du sol ou de la végétation : "entretien" (épandages actuels et réguliers depuis au moins 30 ans), "transition" (fertilisation abandonnée depuis plus de 5 ans mais précédée d'épandages réguliers pendant au moins 30 ans) et "abandon" (fertilisation abandonnée depuis plus de 30 ans). Ces cas de figure illustrent les phases clés du processus de dégradation des pelouses d'alpages. Ils peuvent servir de base de comparaison pour l'établissement d'un diagnostic, mais ne sont, bien sûr, valables que dans le contexte des pelouses d'alpages des Alpes du Nord. Comme niveau non limitant, on a utilisé les courbes de référence de LEMAIRE et al. (1989) et de DURU (1992a).

Résultats

1. Dispositif expérimental

• Production de biomasse aérienne

Les productions des parcelles témoin dans les deux stations s'accordent avec celles relevées dans la région sur des pelouses de même type (BORNARD et DUBOST, 1992) : 3 t/ha sur les deux années pour le site PGF et 2,1 t/ha pour le site Pm au maximum de production du 1^{er} cycle (tableau 2).

Sur le site PGF, les épandages d'engrais minéraux ont un effet très marqué sur la production maximale de biomasse : + 90 % en moyenne sur les deux années pour le traitement N, + 131 % en moyenne pour le traitement NPK. L'effet de la fertilisation phospho-potassique sur la productivité de la pelouse ne devient perceptible qu'au cours de la seconde année d'épandage.

Sur le site Pm, l'augmentation de rendement observée sur les deux années est de + 57 % en moyenne pour le traitement N et de + 113 % en moyenne pour le traitement NPK. La différence entre les traitements N et NPK est perceptible dès la première année.

• Prélèvements et dilution des minéraux dans l'herbe

Les valeurs obtenues sur le dispositif expérimental sont rassemblées dans les tableaux 2 et 3.

	Production (t MS/ha)		Prélèvements (kg/ha)					
	PGF	Pm	N	PGF P	K	N	Pm P	K
NPK 1991	5,8	4,1	123	16	176	88	11	100
NPK 1992	8,1	4,7	170	27	344	103	15	129
N 1991	5,6	3,1	127	12	130	76	5	39
N 1992	5,8	3,2	131	12	134	75	7	41
T 1991	3,3	2,1	61	7	59	39	4	24
T 1992	2,7	2,0	52	6	54	36	3	21

TABLEAU 2 : Production aérienne et prélèvements de minéraux selon les traitements, au maximum de production du 1^{er} cycle de végétation, dans les parcelles expérimentales PGF (pelouse grasse fraîche) et Pm (pelouse maigre).

TABLE 2 : Aerial bio-mass production and mineral uptake according to treatments, at the peak of the first growth cycle ; PGF sites (lush, not dry) and Pm (thin, acidophilous).

	PGF			Pm		
	I _N	I _P	I _K	I _N	I _P	I _K
NPK 1991	92 (9)	68 (8)	127 (37)	82 (1)	62 (3)	98 (5)
NPK 1992	106 (9)	90 (2)	171 (17)	85 (4)	78 (3)	109 (9)
N 1991	97 (7)	50 (5)	87 (12)	77 (5)	40 (6)	51 (4)
N 1992	105 (9)	52 (4)	100 (10)	80 (5)	46 (6)	54 (4)
T 1991	64 (9)	62 (3)	85 (11)	52 (8)	52 (3)	54 (4)
T 1992	67 (4)	70 (4)	93 (05)	49 (6)	63 (8)	61 (5)

TABLEAU 3 : Valeurs moyennes et écarts types (entre parenthèses) des indices selon les traitements, dans les parcelles expérimentales PGF (pelouse grasse fraîche) et Pm (pelouse maigre).

TABLE 3 : Means and standard deviations (between brackets) of indices, according to treatments, PGF sites (lush, not dry) and Pm (thin, acidophilous).

— Azote

Les prélèvements augmentent fortement dans les parcelles N et NPK qui ont reçu 150 kg/ha d'azote. Sur la parcelle PGF, au cours de la deuxième année de traitement, leur niveau atteint 170 kg/ha, dépassant donc les apports annuels.

Dans les figures 1a et 1b on peut suivre la dilution de l'azote au cours de la croissance, pour les 2 sites et les 2 années. Sur PGF, l'indice 100 est atteint en seconde année pour les traitements "NPK" et "N", tandis que le témoin non fertilisé se situe, pour les 2 années, à un indice moyen de 65. Sur Pm, la courbe de référence

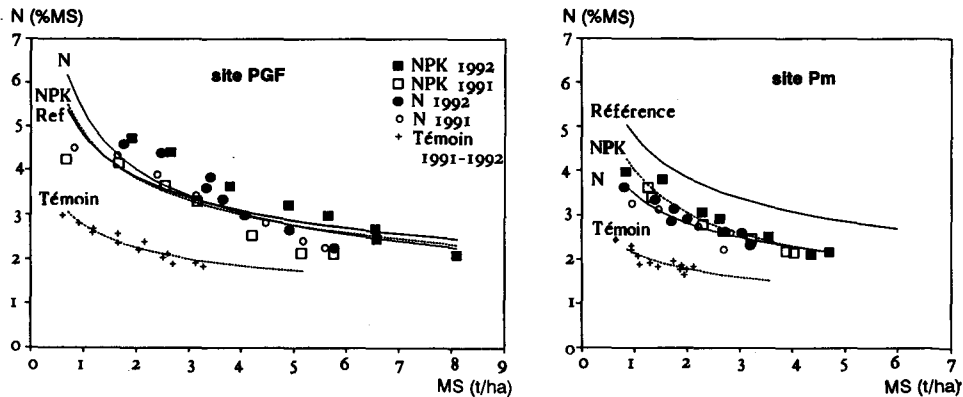


FIGURE 1 : Evolution des teneurs en azote au cours de la croissance sur les 2 sites expérimentaux. Equation de référence $N\% = 4,8 MS^{-0.32}$ (LEMAIRE et al., 1989).

FIGURE 1 : Evolution of nitrogen concentrations during growth on experimental sites PGF and Pm. Reference equation : $N\% = 4,8 MS^{-0.32}$ (LEMAIRE et al., 1989).

n'a été atteinte par aucune des 3 parcelles. L'indice moyen sur les 2 années exprime cependant une hiérarchie entre les 3 traitements : 82 à 85 pour "NPK" et 77 à 80 pour "N" d'une part, 49 à 52 pour le témoin d'autre part.

— Phosphore

Les quantités de phosphore prélevées sont plus importantes dans les parcelles ayant reçu un apport d'azote, en liaison avec la plus grande productivité de la pelouse. On observe, en outre, un décalage net entre les prélèvements des parcelles "NPK" d'une part, "N" et "T" d'autre part : à productivité égale, les prélèvements phosphatés augmentent nettement en présence de phosphore.

La comparaison des I_p sur les témoins des 2 sites confirme que les carences en P sont plus accentuées dans la nardaie (Pm). Cette hiérarchie entre sites se maintient au cours des 2 années dans les parcelles "NPK", malgré l'épandage d'une même quantité de phosphore. Toutefois, il nous faut noter la forte variabilité interannuelle de cet indice, visible notamment sur les parcelles témoin (tableau 3).

— Potassium

Comme dans le cas du phosphore, on observe un net décalage des prélèvements de potassium entre les parcelles ayant reçu ou non un apport d'engrais potassique. Sur PGF, le niveau des prélèvements en fin de croissance dans la parcelle "NPK" est de 180 kg/ha la première année et de 350 kg/ha la seconde, alors que les apports sont de 166 kg/ha. Cela laisse supposer une importante fourniture de K par le sol. Sur Pm, les prélèvements restent légèrement inférieurs aux apports.

Sur PGF, les parcelles "N" et "T" présentent un indice I_K voisin du niveau de nutrition non limitant alors qu'aucun apport de potassium n'a été réalisé (tableau 3). L'épandage d'un engrais NPK conduit, dans ce site, à un indice potassique moyen de 127 en première année, et de 171 en deuxième année. Le protocole expérimental ne permet pas de distinguer les effets respectifs des apports de P et K. La valeur élevée de I_K en seconde année est interprétée comme un indicateur de consommation de luxe de l'herbe en potassium que l'on ne peut cependant dissocier de la consommation utile.

Sur Pm (nardaie), la parcelle "NPK" atteint le niveau de nutrition non limitant dès la première année tandis que les parcelles "N" et "T" se situent à des indices moyens de 53 et 58. Ce résultat confirme le caractère oligotrophe de la station déduit de l'examen de la végétation en place.

• Interactions entre minéraux : relations P-N et K-N

Sur PGF et sur Pm, on n'observe pas de différence significative entre les indices I_N des parcelles "NPK" et "N" : l'effet synergique des éléments P et K sur la nutrition azotée (DURU, 1992a) n'est pas perceptible dans le cas présent.

L'indice I_p est plus faible dans les parcelles ayant reçu uniquement de l'azote. En revanche, pour le potassium, l'apport d'azote seul a un effet différent selon le site : sur PGF, I_K reste inchangé, voire légèrement supérieur au témoin, alors qu'on observe sur Pm, comme pour le phosphore, une légère chute de l'indice en présence d'azote. Ce phénomène est peut-être lié au mode de calcul des indices, qui fait intervenir le niveau de nutrition azotée de la pelouse (DURU, 1992a). Il semble également que la faible disponibilité du sol en éléments assimilables ne puisse pas satisfaire la demande supplémentaire en P et K des nouveaux tissus végétaux élaborés à la suite des apports azotés.

2. Fertilité minérale des pelouses d'alpage

Le deuxième volet de notre étude a pour objet la mise en relation des concentrations minérales observées avec d'autres paramètres connus tels que la composition floristique des pelouses ou les pratiques d'exploitation (tableau 1). Notre analyse est basée sur la comparaison des indices de nutrition minérale I_N , I_p et I_K .

• Relations entre indices et types de végétation

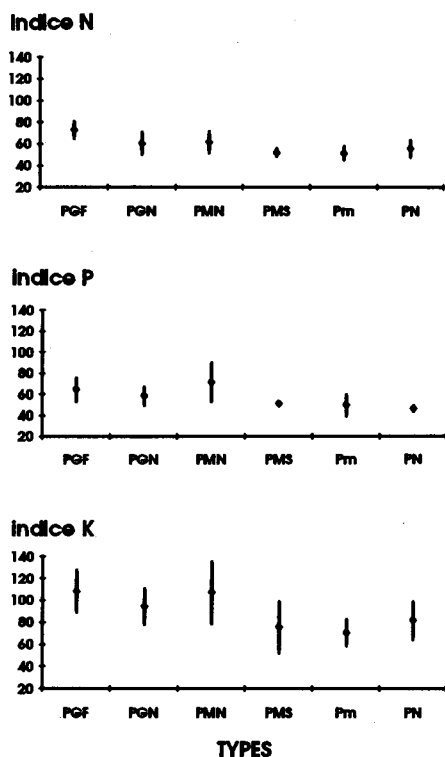
Les plages de variation de I_N , I_p et I_K se recouvrent fortement, ce qui ne permet pas de discriminer les types de végétation. On observe cependant une hiérarchie entre types (figure 2a) qui semble globalement en accord avec la productivité et la composition floristique des pelouses (BORNARD et DUBOST, 1992). On constate une légère différence entre minéraux : dans le cas de l'azote, l'indice moyen décroît régulièrement des pelouses grasses aux pelouses maigres ; dans le cas du phosphore et du potassium un décalage s'observe entre PGF, PGN, PMN d'une part, PMS, Pm et PN d'autre part.

• Relations entre indices et régime de fertilisation

La hiérarchie des valeurs moyennes des trois indices s'accorde avec le régime de fertilisation (figure 2b). La variabilité des indices reste importante au sein de chaque classe. Cependant, l'azote présente une plus grande homogénéité intraclasse et réagit plus rapidement à un changement de régime de fertilisation organique.

Le tableau 4 montre que l'indice azoté traduit mieux les pratiques de fertilisation que l'appartenance à un type de végétation. Dans le cadre d'une étude portant sur les relations entre végétation et pratiques, la teneur en azote pourrait donc être retenue comme un indicateur permettant de suivre les modifications des conditions d'alimentation de la végétation.

a - EFFET DU TYPE DE VEGETATION



b - EFFET DES PRATIQUES DE FERTILISATION

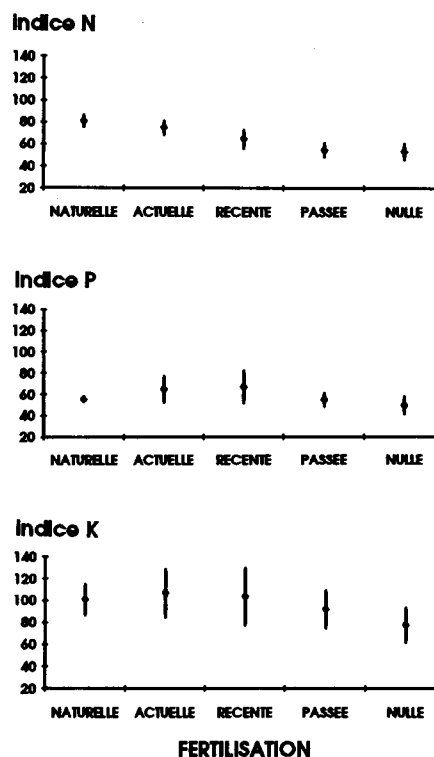


FIGURE 2 : Plages de variation (moyennes et écarts types) des indices de nutrition NPK selon a) le type de végétation et b) le régime de fertilisation. Types de pelouses : PGF, p. grasse fraîche ; PGN, p. grasse neutre ; PMN, p. moyenne neutre ; PMS, p. moyenne sèche ; Pm, p. maigre acidophile ; PN, p. nivale.

FIGURE 2 : Means and standard deviations of NPK nutrition indices, according to a) vegetation types and b) fertilization regimes. Sward types : PGF, lush, not dry ; PGN, lush, medium dry ; PMN, intermediate, medium dry ; PMS, intermediate, medium dry ; Pm, thin, acidophilous ; PN, pre-nival type.

• **Diagnostic de fertilité**

Est il possible d'établir un diagnostic de fertilité à partir des courbes de nutrition azotée ? Les 52 échantillons, identifiés par leur type de végétation ou leur régime de fertilisation, sont projetés dans un référentiel graphique construit à partir des 4 courbes types que nous avons définies dans le chapitre "méthodes".

	PGF (gras frais)	PGN (gras neutre)	PMN (moyen neutre)	PMS (moyen sec)	Pm (maigre)	PN (pré-nival)
Fertilisation :						
- naturelle (L)	81	-	-	-	-	-
- actuelle (A)	75	78	70*	-	-	-
- récente (R)	67	58	67	-	-	-
- passée (S)	63*	56	51	51	-	-
- nulle (X)	-	-	-	55*	52	56

*: échantillon unique

TABLEAU 4 : Moyenne des indices I_N selon les types de végétation et le régime de fertilisation.

TABLE 4 : Mean of I_N indices, according to vegetation type and fertilization regime.

Le regroupement par types de végétation (figure 3a) s'accorde globalement avec la hiérarchie déjà observée. Quelques stations sont positionnées à un niveau de fertilité qui ne correspond pas à la valeur indicatrice des espèces qui les caractérisent : c'est le cas, par exemple, des stations de type PGN non fertilisées depuis 5 à 30 ans. Par leur composition floristique, elles appartiennent encore à la catégorie des pelouses grasses (abondance de bonnes espèces fourragères), alors que le niveau de dilution de l'azote exprime déjà l'appauvrissement minéral lié à l'arrêt des pratiques de fertilisation. Inversement, d'autres stations sont situées à un niveau plus élevé que l'ensemble de leur catégorie : celles-ci ont fait l'objet d'une reprise récente de fertilisation ou sont soumises à des contraintes écologiques fortes (enneigement) qui ne permettent pas à la végétation en place d'exprimer le niveau de fertilité.

L'utilisation du critère "régime de fertilisation" améliore le classement des échantillons (figure 3b) : toutes les stations regroupées dans la catégorie "fertilisation actuelle" (A) sont situées au dessus de la courbe "transition" et, parmi celles-ci, 62 % dépassent le niveau "entretien". A l'opposé, les stations à fertilisation passée (S) ou nulle (X) sont toutes situées au dessous de la courbe "entretien", 92 % des "S" et 89 % des "X" ne dépassant pas le niveau "transition".

Discussion

1. Validation du modèle de référence

L'épandage d'azote sous forme minérale sur le site expérimental PGF permet de retrouver dès la première année, l'équation de référence proposée par LEMAIRE et al. (1989). On assiste, en seconde année, à un dépassement sensible de la courbe d'azote non limitant, phénomène déjà signalé par d'autres auteurs (GRANGER, 1992) et qui pourrait être le signe d'une consommation de luxe en cet élément.

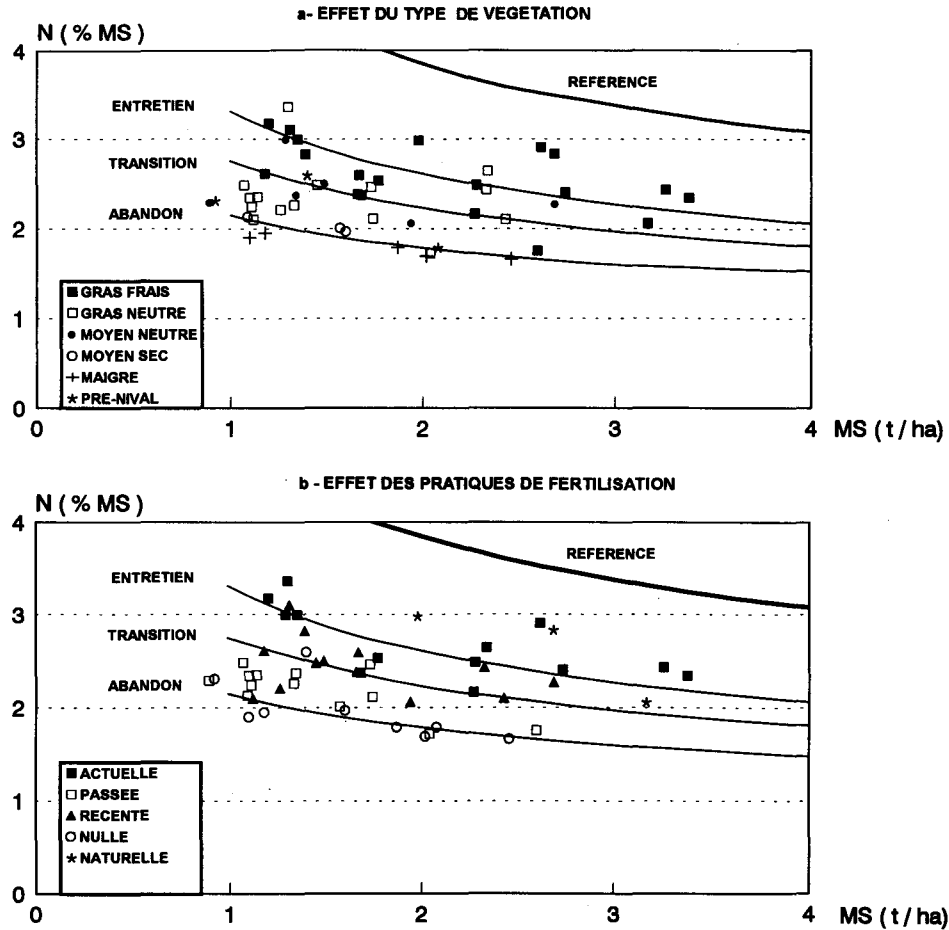


FIGURE 3 : Niveaux de nutrition azotée des stations selon a) le type de végétation et b) le régime de fertilisation.

FIGURE 3 : Nitrogen nutrition of stations, according to a) vegetation type and b) fertilization regime.

La courbe de référence pour l'azote n'a pas été atteinte sur la pelouse maigre acidophile (Pm), même après épandage d'engrais. Les quantités disponibles dans le sol ne sont certainement pas le seul facteur limitant la nutrition minérale des végétaux : d'autres paramètres tels que le développement racinaire peuvent intervenir sur l'absorption des minéraux et donc sur le régime trophique de la pelouse.

Les références établies pour P et K varient suivant les auteurs (SALETTE et HUCHÉ, 1991 ; DURU, 1992a) ; les milieux où elles ont été établies sont, en outre, différents des nôtres. Ces considérations nous invitent à la prudence quand il s'agit de conclure sur le degré de carence minérale d'un sol d'alpage, mais ne remettent pas en cause la pertinence des indices pour les comparaisons ou les suivis de stations.

2. Caractérisation des pelouses d'alpages laitiers

Les investigations menées sur l'alimentation minérale des pelouses d'alpages viennent enrichir la caractérisation initiale des types de végétation. La comparaison des régimes trophiques concorde globalement avec la hiérarchie établie initialement entre types de végétation, sur la base de leur composition floristique ou de leur niveau de production (BORNARD et DUBOST, 1992).

L'examen attentif du classement des parcelles montre toutefois qu'il peut y avoir distorsion entre la composition floristique observée et le régime trophique actuel. On distingue ainsi les stations "en équilibre" des stations "en évolution". Dans les premières, les pratiques sont stables depuis 2 à 3 décennies et le niveau trophique s'accorde avec les indicateurs floristiques (cas général des types "gras frais" et "maigre"). Dans les secondes, le régime de fertilisation a changé récemment et l'on note un décalage entre le niveau trophique et les informations floristiques. Ce cas de figure s'observe souvent dans le cas des pelouses "gras neutre" (PGN), "moyen neutre" (PMN) et "moyen sec" (PMS) qui sont considérées comme des formations transitoires entre une situation d'entretien régulier et une situation d'abandon total de la fertilisation.

Il est à noter que, pour l'azote, la courbe correspondant au niveau "entretien" se situe à environ 70 à 80 % du niveau habituellement cité en référence (obtenu en zone de plaine et sous climat océanique) et que les meilleures parcelles de notre échantillonnage, bien que fertilisées annuellement avec de la fumure organique, ne dépassent pas 90 % de cette référence. La minéralisation de la matière organique est soumise, en montagne, à de fortes contraintes qui influent directement sur l'activité microbienne des sols. Il se peut que les niveaux maximaux observés correspondent à un seuil de disponibilité de l'azote minéral directement conditionné par les caractéristiques pédoclimatiques des sols d'alpage (température et acidité notamment).

Il est plus difficile de comprendre la logique de comportement des indices I_p et I_K . Rappelons que les échantillons ont été prélevés sur des alpages d'origines géologiques variées et que les sols présentent, en relation avec la nature de la roche-mère, des capacités de stockage ou de libération des minéraux, différentes selon les massifs (LEGROS et al., 1987).

On remarque enfin le profil particulier des pelouses à "fertilité naturelle" (L) : elles présentent un I_p moyen proche de celui des pelouses à fertilisation passée alors que les indices I_K et surtout I_N les rapprochent plutôt de la classe "fertilisation actuelle". Ces particularités proviennent vraisemblablement de la nature des apports par ruissellement.

3. Application aux diagnostics de fertilité

Un des objectifs de cette étude était de développer une méthode rapide de détermination de la fertilité des sols d'alpage et d'arriver, par le biais des indicateurs trophiques, à une meilleure compréhension des processus d'évolution des pelouses d'alpages laitiers. A ce titre, le niveau de dilution de l'azote dans l'herbe, bien qu'il n'ait pas un pouvoir discriminant suffisant pour dissocier les types de végétation ou les régimes de fertilisation, semble pouvoir apporter de précieuses indications et permettre ainsi d'anticiper sur les évolutions futures de la végétation avant que les indicateurs floristiques classiques ne deviennent perceptibles. Dans tous les cas, la formulation d'un diagnostic de fertilité à partir des courbes de dilution minérale devra s'accompagner d'une enquête sur les dates de fertilisation afin de distinguer les événements récents des tendances évolutives à long terme.

On relève également une importante variabilité temporelle, visible dans les parcelles témoin du dispositif expérimental. Il est clair que les comparaisons de fertilité sur la base des indices de dilution ne pourront être opérées que dans le cadre d'un protocole précis, visant à réduire au maximum ces sources de variation.

Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre du dispositif expérimental confirment la validité du modèle théorique de dilution minérale sur un nouveau milieu : celui des pâturages d'altitude. Néanmoins, les conditions naturelles qui règnent entre 1 500 et 2 000 m constituent des contraintes écologiques fortes qui s'expriment assez clairement dans les niveaux de nutrition minérale de ces pelouses.

La typologie des pelouses d'alpages laitiers des Alpes du Nord externes a été construite à partir de variables floristiques ou physiologiques. Les analyses minérales nous permettent d'enrichir cette caractérisation et de confirmer l'hypothèse selon laquelle les types s'ordonnent selon un gradient de fertilité. Les mesures montrent également que la végétation réagit rapidement à un changement de régime de fertilisation, alors que les effets sur la composition floristique ne sont souvent perceptibles qu'après plusieurs années. Dans un contexte de développement agricole et de conseil auprès des aménageurs, ce type d'outil nous donne des arguments déterminants pour souligner l'importance des pratiques d'entretien sur la qualité et le devenir des espaces pâturés.

L'utilisation des indices de nutrition minérale ouvre des perspectives intéressantes en matière de diagnostic de fertilité mais il reste encore quelques obstacles à lever : biais introduits par le mode de calcul des indices, ajustement des références, variabilité temporelle.

L'application du modèle de dilution minérale n'a été testée, dans un premier temps, que sur un nombre limité d'échantillons. Il s'agit avant tout d'une démarche "exploratoire" qui nous permet de juger de la cohérence de ce type d'indicateurs avec les autres indicateurs et avec le modèle d'évolution de la végétation des alpages. Il est maintenant nécessaire d'élargir le dispositif afin d'en évaluer la variabilité spatiale et temporelle. Nous pourrions ainsi préciser les perspectives et les limites d'utilisation d'une telle méthode pour l'étude des formations herbacées d'altitude.

Accepté pour publication, le 27 février 1994

Remerciements

Cet article a bénéficié des conseils et des remarques de M. DURU.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALENT G. (1987) : *Structure, fonctionnement et évolution d'un système pastoral. Le pâturage comme facteur écologique dans les Pyrénées Centrales*, thèse de Doctorat d'Etat, Université de Rennes I, 146 p.
- BALENT G., DURU M., GIBON A. (1989) : *Références et modèles pour le diagnostic de fonctionnement et d'évolution de prairies permanentes. Cas des prairies de fauche dans les Pyrénées Centrales*, VI^e réunion du sous-réseau FAO des herbages de montagne, Kraków PL, 8 p.
- BORNARD A., DUBOST M. (1992) : "Diagnostic agro-écologique de la végétation des alpages laitiers des Alpes du Nord humides : établissement et utilisation d'une typologie simplifiée", *Agronomie*, 12, 581-599.
- DUBOST M., BORNARD A. (1987) : *Pratiques pastorales des alpages laitiers dans les Alpes françaises du Nord*, V^e réunion du sous-réseau FAO des herbages de montagne, Bled YG, 33 p.
- DURU M. (1992a) : "Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I. Etablissement de références", *Agronomie*, 12, 219-233.
- DURU M. (1992b) : "Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I. Validation de références", *Agronomie*, 12, 345-357.
- GRANGER S. (1992) : *Typologie de fonctionnement de prairies permanentes pâturées. Essai d'identification de voies à prospecter pour la gestion des prairies de l'Auxois*, thèse de Doctorat, Univ. de Bourgogne, 211 p.

- LEMAIRE G., GASTAL F., SALETTE J. (1989) : "Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content", *Proc. XVI^e Cong. Int. des Herbages*, Nice, I, 179-180.
- LEGROS J.P., PARTY J.P., DORIOZ J.M. (1987) : "Répartition des milieux calcaires, calciques et acidifiés en haute montagne calcaire humide", *Doc. Cart. Ecol.*, XXX, 137-157.
- PLANTUREUX S., BONISCHOT R., GUCKERT A. (1987) : "Effet des techniques d'intensification sur l'évolution de la végétation des prairies permanentes lorraines", *Acta OEcologica, OEcol. Applic.*, 8 (3), 229-246.
- PONS Y., LEMAIRE G., LAFON E., SALETTE J. (1989) : "Intensification des prairies des marais de l'Ouest. II. Fertilisation et méthodes de diagnostic de la nutrition minérale", *Fourrages*, 120, 367-381.
- RICHARD L. (1983) : "Nouvelles données pour la zonation écologique des Alpes Nord-occidentales et contribution à la notice de la carte écologique à 1/50 000^e Saint-Gervais", *Doc. Cart. Ecol.*, XXVI, 83-116.
- 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. Sc. Paris*, 292, 875-878.
- SALETTE J., HUCHÉ L. (1989) : "The diagnosis of grassland mineral nutrient status through herbage analysis", *Proc. XVI^e Congr. Int. des Herbages*, Nice, 65-66.
- SALETTE J., HUCHÉ L., LEMAIRE G. (1989) : "Modelling nitrogen and mineral nutrient uptake by a grass sward : short term studies during the sward growth", *Proc. XVI^e Congr. Int. des Herbages*, Nice, 61-62.
- SALETTE J., HUCHÉ L. (1991) : "Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples", *Fourrages*, 125, 3-18.

RÉSUMÉ

Deux séries de mesures ont été réalisées pour tester les possibilités d'application du modèle de dilution minérale de SALETTE et LEMAIRE aux pelouses d'altitude. Dans un premier temps, un dispositif expérimental a été mis en place sur 2 sites voisins, différenciés par le mode d'exploitation et le type de végétation. Des fertilisations N, P et K non limitantes ont été appliquées sur les 2 sites, suivies d'analyses de fourrages qui ont permis de connaître la dynamique de prélèvement des minéraux. Le second volet de l'étude a porté sur 47 stations reproduisant la diversité des situations rencontrées en alpages laitiers et concernait les relations qui existent entre le régime de fertilisation, la composition floristique et le niveau de fertilité estimé d'après les analyses minérales d'herbe.

Les résultats confirment la validité du modèle pour des pelouses d'altitude (1 500-2 000 m) et s'accordent avec les observations floristiques qui indiquaient une différence de régime trophique entre les 2 sites. Les indices de dilution minérale se sont révélés des indicateurs pertinents pour hiérarchiser les types de végétation et mettre en évidence les distorsions qui peuvent opposer la composition floristique d'un peuplement et son régime trophique.

SUMMARY

Diagnosis of the mineral nutrition of herbage by leaf analysis : an application to mountain pastures.

Two series of measurements were carried out to test the possibility of applying SALETTE's and LEMAIRE's model of mineral dilution to mountain pastures. Initially, two experimental sites were set up on two pastures differing in their management and in their vegetation. Non-limiting amounts of N, P and K fertilizers were applied, and the mineral content of herbage was repeatedly analysed during the first growing cycle, to follow the dynamics of mineral uptake. In a second step of the study, the relationship was examined between fertilization, botanical composition and fertility level as estimated by chemical analysis of the herbage. Samplings were made in 47 stations, representative of the various types of mountain pastures grazed by dairy cows.

The results showed that the model does fit high altitude (1 500-2 000 m) swards, and that it was in accordance with botanical observations which had suggested a difference of nutrient status between the two sites. Indices of vegetation proved a relevant tool for setting-up a hierarchy of vegetation types, and for revealing distortions between botanical composition and trophic status of swards.