

Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps.

II. Validation de références

M Duru ¹

(avec la collaboration de Y Cransac ², A Dalmière ², M Rosière ², P Marion ² et R Roussel ²)

¹ INRA, centre de recherches de Toulouse, station d'agronomie, BP 27-31326 Castanet-Tolosan;

² Chambre d'agriculture de l'Aveyron, carrefour de l'agriculture, 12000 Rodez, France

(Reçu le 8 août 1991; accepté le 17 mars 1992)

Résumé — Dans un précédent article, nous avons proposé une méthode de diagnostic de la nutrition minérale à partir de la connaissance des teneurs en éléments minéraux de l'herbe (N, P et K) et de la biomasse aérienne. Des courbes de référence, N en fonction de la biomasse pour la nutrition azotée, P et K en fonction de N pour la nutrition phosphopotassique ont été établies, puis des indices combinant ces différents critères ont été définis. Nous nous proposons ici de valider ces indices à partir de données issues de 3 dispositifs expérimentaux où sont comparés des fertilisants ou modes d'exploitation de l'herbe différents. Chacun des dispositifs est situé dans une zone pédoclimatique différente et comporte 2 parcelles contrastées par leur niveau de nutrition, notamment en phosphore.

Nous montrons qu'il y a une bonne correspondance entre les indices et la biomasse aérienne récoltée. Pour le phosphore et le potassium, les relations avec les résultats de l'analyse chimique de terre conventionnelle (phosphore assimilable, potassium échangeable) ne sont pas satisfaisantes. Les limites pour utiliser ces indices sont présentées. Puis nous montrons en quoi ils constituent une méthode de diagnostic facile à mettre en œuvre pour contrôler l'évolution pluri-annuelle du niveau de nutrition d'une parcelle. Il pourrait ainsi être possible, par une fertilisation mieux adaptée, de corriger l'éventuelle inadéquation entre les besoins des plantes en éléments minéraux et leur fourniture par le sol qui pourrait s'instaurer à partir de la mise en œuvre de la méthode des bilans, associée à l'analyse chimique de terre.

nutrition minérale / azote / phosphore / potassium / diagnostic / prairie

Summary — **Diagnosis of nutrient level for permanent grasslands in spring. II. Validation of models.** *In a previous paper the authors proposed a method for diagnosing plant nutrition from determination of herbage mineral content (N, P, K) and aerial biomass. Control curves were established: N in relation to aerial biomass for nitrogen nutrition level, P and K in relation to N for phosphopotassium nutrition level, then indexes combining these different criteria were defined. The present study aims at validating these indexes utilising data from the 3 experimental models in which different fertilizer or exploitation treatments are compared. Each experiment was located on land in a specific pedoclimatic area, and consisted of two parcels which differed significantly in their nutritional level, particularly that of phosphorus. A regression index was established which showed that there was a good correspondence between the indexes and the aerial biomass yield. For phosphorus and potassium, the relationships based on conventional chemical analysis of soil components (assimilable phosphorus, exchangeable potassium) were unsatisfactory. The conditions under which these indexes should be used have been presented: a control treatment with no nitrogen limitation, grass cut before leaf senescence. These indexes could provide a simple diagnostic method for controlling the pluri-annual evolution of the grass nutrient level in a given parcel. It would therefore be possible, via a better adapted fertilization, to correct possible deficiencies between plant requirements and soil mineral supply; this could be set up via regular assessments combined with chemical analysis of soil components.*

mineral nutrition / nitrogen / phosphorus / potassium / diagnosis / grassland

INTRODUCTION

Le diagnostic de nutrition minérale d'une culture est le plus souvent réalisé à partir des teneurs en éléments minéraux qui sont comparées à des valeurs de référence (Martin et Matocha, 1972). Mais elles sont souvent difficiles à utiliser car, d'une part, les teneurs varient au cours du temps et, d'autre part, de multiples interactions existent pour l'absorption des différents éléments minéraux. Tenant compte de ces limites, nous avons proposé dans un précédent article (Duru, 1992), des références pour caractériser les niveaux de nutrition *N*, *P*, et *K* de prairies permanentes. Ces références ont été établies par l'étude des variations concomitantes de la biomasse aérienne récoltée et des teneurs en éléments minéraux de parcelles différentes soumises ou non à une fertilisation minérale. Pour comparer aisément différentes parcelles, traitements et années, nous avons élaboré des indices de nutrition, un indice de 100 étant considéré comme non limitant pour l'élément considéré. L'indice de nutrition azotée a été défini à partir des données de biomasse et de teneurs en azote, les indices *P* et *K* sont calculés à partir d'une combinaison des teneurs en *P* et *K* d'une part, et *N* d'autre part.

Le présent article a pour objet de tester la validité de ces indices. On s'attachera tout particulièrement à vérifier 3 hypothèses :

(I) pour une date de récolte donnée, les biomasses aériennes correspondant aux différentes modalités de fertilisation d'une même parcelle sont bien corrélées aux valeurs moyennes des indices des différents traitements ; les valeurs moyennes étant calculées à partir des données antérieures ou égales à la date de récolte considérée. À cette fin, plusieurs paramètres sont intéressants à considérer. La cinétique d'accumulation de biomasse peut être décomposée schématiquement en 2 phases : en fin d'hiver ou au début du printemps, la croissance est exponentielle en fonction des températures, tant que l'interception du rayonnement n'est pas proche du maximum. Le seuil correspondant est d'environ 1,5 t MS/ha (Lemaire, 1985; Duru, 1989) et équivaut à un rendement courant pour la mise à l'herbe. Durant la deuxième phase, l'accroissement de la biomasse en fonction des températures peut être considéré comme linéaire tant que la sénescence est négligeable. La fin de

cette phase correspond généralement au tout début épiaison (stade de récolte ensilage). Les relations entre indices de nutrition et rendements peuvent être étudiées à l'issue de chacune de ces phases;

(II) si des variations d'indices sont observées au cours d'une pousse, on vérifiera qu'elles correspondent bien à des différences de niveau de nutrition minérale et qu'elles ne sont pas un artefact provenant de coefficients d'ajustement sans valeur générale;

(III) les indices de nutrition sont des critères plus adaptés que les tests analytiques du sol pour réaliser un diagnostic de l'offre alimentaire du sol, notamment dans le cas des prairies permanentes.

Pour valider la première hypothèse, on est confronté à plusieurs difficultés si on cherche à effectuer une validation en mobilisant des données provenant de sites et/ou années différents. En effet, la somme de températures nécessaire pour obtenir un rendement de 1,5 t dépend des modes d'exploitation d'automne (fertilisation azotée, date et intensité de défoliation) qui conditionnent la dynamique d'apparition de talles en hiver (Lemaire, 1985) et par les températures basses qui peuvent entraîner une mortalité de talles (Duru, 1987a). Il en résulte que, pour comparer des parcelles, notamment au début du printemps, on doit s'assurer que le climat hivernal, les modes d'exploitation et les caractéristiques du peuplement à l'automne sont similaires. Dans le cas contraire, on risque d'interpréter des écarts de rendement par des niveaux de nutrition, alors qu'il pourrait s'agir d'arrière-effets de conduite automnale, pratiques dont les effets sont difficiles à connaître, sauf à caractériser *in situ* les états du peuplement. Pour comparer des parcelles d'un même site, on peut penser s'affranchir de cette difficulté en comparant les vitesses de croissance, mais on est confronté à une deuxième difficulté, compte tenu de l'influence possible de la nature des espèces présentes.

Compte tenu du cahier des charges indiqué ci-dessous, nous avons retenu des dispositifs expérimentaux dont les données par parcelle sont suffisamment nombreuses pour tester le plus rigoureusement possible la validité des indices de nutrition.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites expérimentaux

Trois sites dont les dispositifs répondaient aux exigences rappelées ci-dessus ont été retenus, dans les Pyrénées : 2 parcelles (latitude 47°30', longitude 2°, altitude 1 250 m), dans l'Aubrac : 2 parcelles (49°45', 0°30', 900 à 1 000 m), vallée de l'Aveyron : 2 parcelles (49°15', 0,30°, 550 à 650 m). Sur chaque site, les parcelles ont été échantillonnées de façon à avoir un gradient de nutrition *P* et *K*. À cette fin, une première sélection de parcelles a été effectuée empiriquement préalablement à l'étude proprement dite, à partir de l'histoire culturale des parcelles, des résultats d'analyse de terre et d'une indication des niveaux de rendement. Ensuite, pour les sites Aubrac et Aveyron, nous avons retenu 2 parcelles présentant un gradient de nutrition *P* et *K* au vu des premières analyses minérales, de façon à installer un dispositif plus complet que celui mis en place précédemment.

Dans la suite du texte, les parcelles seront caractérisées par 2 premières lettres indiquant le site (PY : Pyrénées, AU : Aubrac, AV : vallée de l'Aveyron). Une deuxième lettre rendra compte globalement du niveau de nutrition *PK* en l'absence de fertilisation minérale (S : satisfaisant, D : déficient). Ces évaluations ont été réalisées au vu de premiers résultats d'analyses minérales et de mesures de biomasses sur un échantillon de parcelles plus important que celui retenu dans cette étude.

Dans la vallée de l'Aveyron, les sols sont neutres ou calcaires et riches en éléments fins. En Aubrac, ils sont moins argileux que dans la vallée, leur richesse en matière organique et en limon en font des andosols. Dans les Pyrénées, ils correspondent à des dépôts glaciaires.

Les caractéristiques physicochimiques des sols, ainsi que les principales espèces présentes sont rassemblées dans le tableau I. Le classement des 2 parcelles d'un même site au regard des analyses chimiques du sol est cohérent avec la caractérisation présentée ci-dessous, excepté pour le site de l'Aubrac (*P* et *K*) et de l'Aveyron (*P*). D'une manière générale,

Tableau I. Caractéristiques des parcelles étudiées. Analyses chimiques de l'horizon 0-10 cm, phosphore mesuré par la méthode Dyer sauf en AVD (= méthode Joret-Hébert), composition botanique (d'après Balent, comm pers) évaluée d'après la méthode des points-quadrats (seules les espèces dont la proportion de contacts est supérieure à 50% sont indiquées).

	AU		AV		PY	
	S	D	S	D	S	D
<i>Analyse chimique de terre (0-10 cm)</i>						
pH	5,9	5,5	7,1	7,5	6,5	6,3
Mo (%)	12,9	18,1	5,4	5,9	7,0	10,0
P ₂ O ₅ assimil (‰)	0,16	0,63	0,24	0,03(*)	0,11	0,04
méthode Dyer						
K ₂ O échangeable (‰)	0,29	0,46	0,15	0,16	0,24	0,17
<i>Composition botanique</i>						
<i>Agrostis capillaris</i>	X	X				X
<i>Anthoxanthum odoratum</i>		X	X	X		
<i>Arrhenaterum eliatum</i>		X				X
<i>Bromus erectus</i>			X	X		
<i>Cynosurus cristatus</i>	X			X		
<i>Dactylis glomerata</i>					X	
<i>Festuca arundinacea</i>	X		X	X		
<i>Festuca rubra</i>		X				X
<i>Holcus lanatus</i>	X			X		
<i>Lolium perenne</i>	X		X	X	X	
<i>Poa trivialis</i>	X		X	X	X	
<i>Trisetum flavescens</i>						X
<i>Lathyrus pratensis</i>				X		
<i>Lotus corniculatus</i>						X
<i>Medicago lupulina</i>				X		
<i>Trifolium pratense</i>		X		X		X
<i>Trifolium repens</i>		X	X		X	
<i>Cerastium fontanum</i>		X				
<i>Ranunculus acris</i>	X			X		
<i>Taraxacum officinalis</i>				X	X	

le graminées sont les espèces les plus représentées dans les prairies étudiées.

Traitements de fertilisation

En Aubrac et dans la vallée de l'Aveyron, 7 traitements différents par les apports phosphopotassiques ont reçu 150 kg d'azote, et 3 d'entre eux sont sans apport d'azote. La fertilisation a été apportée début février (Aveyron), ou début mars (Aubrac). Le premier apport phosphopotassique a été effectué en 1989; il a été renouvelé sur les mêmes emplacements au printemps 1990. L'apport d'azote est, par contre, réalisé chaque année sur des emplacements différents. Les traitements sont récapitulés dans le tableau II.

Dans les Pyrénées, 4 régimes d'exploitation ont été pratiqués chaque année sur les mêmes emplacements : 4 coupes par an, 3 coupes avec 2 options (une première précoce ou tardive), 2 coupes. Ce dispositif est par ailleurs scindé en 2 parties, l'une est mise en défens en permanence, l'autre est pâturée de début novembre à début mai par des ovins. Dans ce cas, les coupes font suite à cette période de pâturage, mais elles sont réalisées aux mêmes dates que dans le dispositif sans pâturage. L'essai a été mis en place en 1981 et a été conduit de la même manière jusqu'en 1986. Pour tous les traitements, un apport de fumier a été réalisé chaque année au printemps. L'apport annuel brut a été de 140 kg de N, 26 kg de P et 160 kg de K. En 1987, un seul contrôle de rendement a eu lieu au 20 juin de façon à tester les arrière-effets des régimes de défoliation. Nous ne considérons que ces derniers résultats. On fait l'hypothèse que les différents régimes de défoliation ont entraîné des exportations très différentes en éléments minéraux et ont pu ainsi modifier l'offre du sol puis les niveaux de nutrition minérale.

Contrôles

En Aubrac et en vallée de l'Aveyron, les prélèvements d'herbe ont eu lieu à 5 ou 6 dates pour les traitements

témoins sans apport d'engrais phosphopotassique, et 4 dates pour les autres, soit toutes les 2 semaines environ au sein d'une période allant du départ en végétation (hauteur de l'herbe comprise entre 5 et 15 cm), à l'épiaison des graminées. Les dates de prélèvement varient avec l'altitude des parcelles. Dans les Pyrénées, un seul contrôle de croissance a été réalisé le 20 juin.

Pour chaque traitement et chaque date, les coupes ont été effectuées sur 4 microplacettes de 0,25 m² (Aubrac et Aveyron), ou 0,5 m² (Pyrénées). Après passage à l'étuve durant 48h pour détermination du poids sec, les 4 échantillons ont été mélangés pour l'analyse minérale.

Climat

Les pluviométries et les températures moyennes décennales de la période d'étude sont représentées figure 1. Les pluviométries des sites Aubrac et vallée de l'Aveyron sont particulièrement faibles au mois de mars. On peut supposer que l'eau a été facteur limitant à cette période, tout particulièrement pour les parcelles AVD et AVS où les températures étaient les plus élevées. Pour les sites AU et AV, les températures augmentent rapidement à partir de fin avril. Durant toute la durée de l'étude, elles ont été supérieures aux moyennes annuelles.

Traitement des données

Les indices de nutrition ont été calculés à partir des équations proposées précédemment (Duru, 1992). L'indice d'azote est établi à partir d'un prélèvement d'herbe dont on mesure la teneur en azote et la biomasse aérienne exprimée en t de matière sèche. Pour calculer les indices de nutrition en P et K, il suffit de connaître les teneurs en ces éléments et en azote. Mais nous avons montré précédemment que les valeurs de ces indices peuvent dépendre du niveau de nutrition azotée. Nous estimerons le biais éventuellement introduit en comparant les indices de P et K des

Tableau II. Caractérisation et identification des différents traitements de fertilisation pour les dispositifs de l'Aubrac et de la vallée de l'Aveyron.

Caractérisation de la fertilisation	Identification	Apport d'azote	
		Oui (N ₁)	Non (N ₀)
Témoin	P ₀ K ₀	X	X
Superphosphate (120 kg P ₂ O ₅ /ha)	P ₁₂₀ sup K ₀	X	
Superphosphate (60 kg P ₂ O ₅ /ha)	P ₆₀ sup K ₀	X	X
Scories (60 kg P ₂ O ₅ /ha)	P ₆₀ sc K ₀	X	
Bicalcique (60 kg P ₂ O ₅ + 90 kg K ₂ O/ha)	P ₆₀ K ₉₀	X	
"20-20" (60 kg P ₂ O ₅ + 60 kg K ₂ O/ha)	P ₆₀ K ₆₀	X	
Chlorure de potassium (60 kg K ₂ O/ha)	P ₀ K ₆₀	X	X

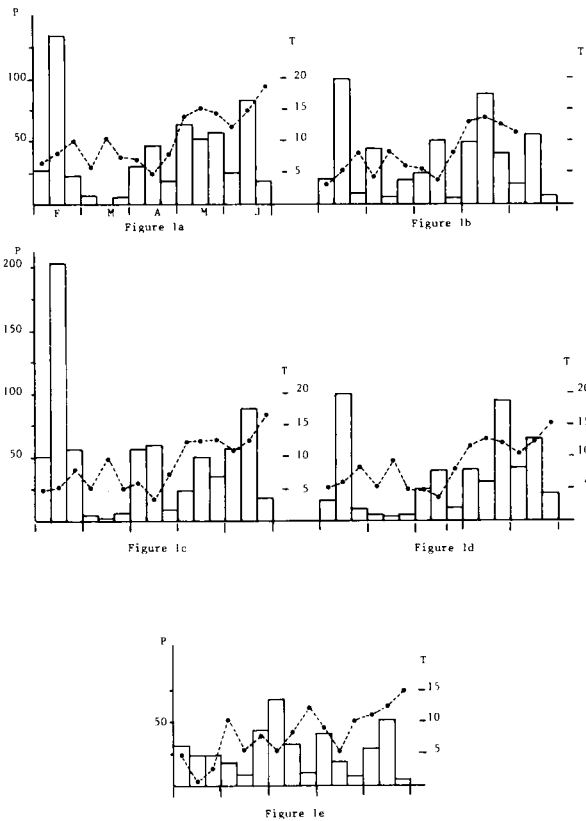


Fig 1. Températures moyennes décadaires (●—) et pluviométrie décadaire (□) pour les sites et parcelles étudiées : 1a (AVD), 1b (AVS), 1c (AUD), 1d (AUS) et 1e (PY).

différents traitements aux teneurs en P ou K correspondantes.

Les formules utilisées sont rappelées ci-après. N , P et K sont les teneurs en éléments minéraux N, P et K de l'herbe, MS la quantité de matière sèche en $t \cdot ha^{-1}$.

$$ln = (1 - MS^{-0,32} + N/4,8) \times 100$$

$$lp = (4,17 P \times N^{-0,64}) \times 100$$

$$lk = (0,62 K \times N^{-0,48}) \times 100$$

Pour présenter la gamme de variation des indices de nutrition induite par les différents traitements, nous avons réalisé une analyse en composantes principales pour les sites Aubrac et Aveyron d'une part, Pyrénées d'autre part.

L'étude des relations entre biomasse aérienne et indices de nutrition a été réalisée par des calculs de régressions progressives. Sauf précision contraire, le seuil de 5% a été retenu comme probabilité pour introduire les variables.

Pour les sites Aubrac et Aveyron où les mesures de biomasse ont été réalisées à plusieurs dates, 2 relations ont été étudiées entre biomasse et indices. La première concerne la biomasse à $800 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{j}$ après le premier février. Ce choix est motivé pour comparer des parcelles situées sur des sites différents. Le cumul des températures est initialisé au premier février car de nombreuses études ont montré qu'aux environs de

cette date, les vitesses d'apparition et d'élongation des feuilles de graminées augmentent en relation avec le changement d'affectation des assimilats. La somme de température de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ correspond approximativement à un stade de récolte ensilage. La biomasse a été calculée par interpolation en fonction des températures entre les 2 dates encadrant la valeur considérée. Les indices retenus dans les régressions correspondant à la moyenne des indices calculés aux 4 dates de mesure.

La deuxième relation vise à établir les liaisons entre la précocité du départ en végétation (telle que nous l'avons définie précédemment) et la nutrition minérale. Toutefois, plutôt que d'estimer les sommes de températures pour atteindre $1,5 \text{ t/ha}$, nous avons retenu la biomasse aérienne au premier contrôle car nous ne disposons pas, pour tous les traitements, des données nécessaires à l'interpolation. Dans tous les cas, les calculs ont été faits, séparément ou non, pour les 2 traitements de fertilisation azotée, de façon à s'affranchir du biais introduit lors du calcul des indices lp et lk (Duru, 1992).

RÉSULTAT

Comparaison des indices de nutrition et des courbes de dilution du P et du K

Cette comparaison a pour objectif de contrôler le biais introduit lorsqu'on caractérise la nutrition P et K par les relations $P-K = f(N)$, plutôt que $P-K = f(MS)$.

Nous avons comparé les indices moyens P et K à la teneur en ces éléments pour une valeur de biomasse aérienne de $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Cette valeur correspond à la phase de pleine croissance, après départ en végétation et avant épiaison. Sur la figure 2 sont représentées ces teneurs par parcelle en indiquant par des symboles différents les traitements n'ayant pas reçu d'apport de N. Pour P, on note une assez bonne relation entre les 2 critères ($r^2 = 0,79$). Mais pour les placettes sans apport de N, les teneurs sont inférieures à indices équivalents, tout particulièrement pour les parcelles AUS et AUD. Si on considère séparément chacun des sous-ensembles de points, les corrélations sont augmentées ($r^2 = 0,83$ pour les traitements N_1 et $0,97$ pour les traitements N_0). Ces résultats sont conformes à ceux observés précédemment (Duru, 1992). Pour K, les mêmes tendances sont observées ($r^2 = 0,73$ tous traitements confondus, $0,80$ pour les N_1 et $0,83$ pour les N_0 .) Cependant, les écarts entre les placettes avec ou sans apport d'azote ne sont importants que pour la parcelle AUS.

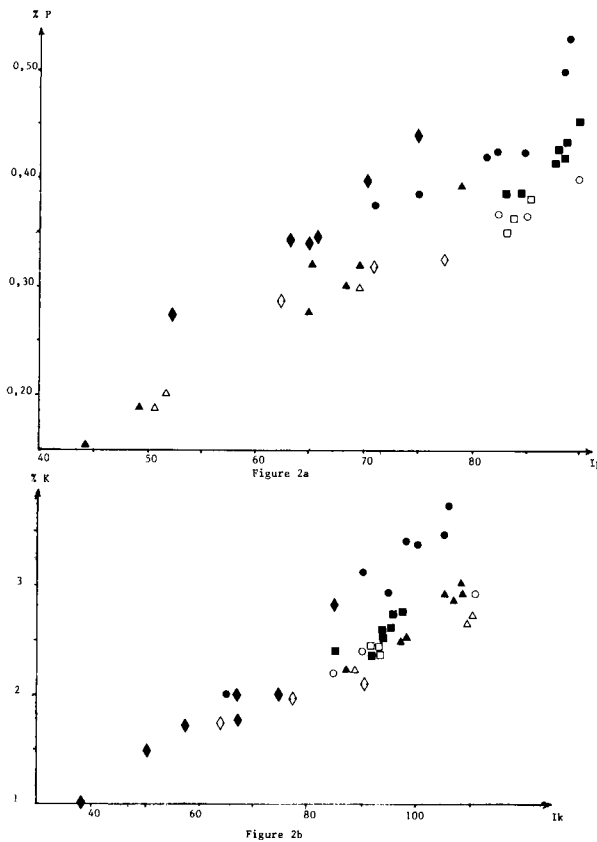


Fig 2. Relations entre indices de nutrition P et teneur de l'herbe en P des différents traitements et parcelles pour une biomasse aérienne de 4 t/ha (2a); *idem* pour le K (2b). Parcelles AUS ●○, AUD ◆◇, AVS ■□, AVD ▲△. Placettes avec apport d'azote (symboles noirs) ou sans apport (symboles blancs).

Champ de variation et variabilité des indices de nutrition

Comparaison des indices de nutrition des différentes parcelles et traitements

Deux analyses en composantes principales ont été effectuées en considérant comme variables les indices ln , lp et lk . La première concerne les sites Aubrac et Aveyron, la seconde les sites Pyrénées.

Dans le premier cas (fig 3), les axes 1 et 2 expriment respectivement 46% et 37% de l'inertie. L'indice N est fortement corrélé à l'axe 2 (77% de sa variance), alors que les indices lp et lk sont le plus fortement corrélés à l'axe 1, (respectivement 76 et 50%). La projection dans le plan 1-2 des données montre que les traitements témoins ont les indices lp et lk les plus bas, tout particulièrement pour les parcelles AUD et AVD, ce qui est tout à fait normal puisque c'est sur cette base qu'ont été choisies les parcelles 3 ans

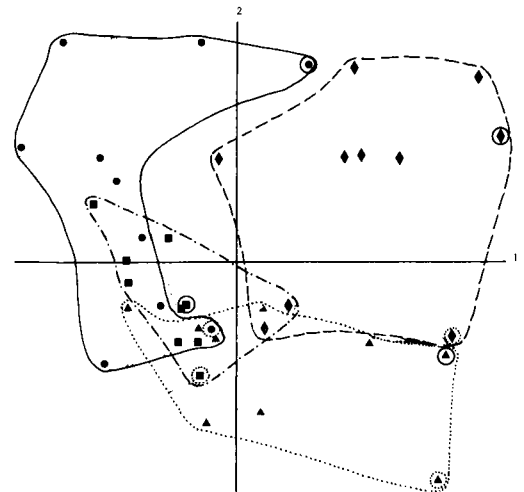


Fig 3. Analyse en composantes principales pour les indices N , P et K des parcelles et traitements des sites AU et AV. Représentation du plan 1-2 (axe 1 horizontal). Parcelles AUS ●, AUD ◆, AVS ■, AVD ▲, ○, ◇ placettes des traitements témoins, respectivement avec et sans apport d'azote.

auparavant. Après 2 années de fertilisation phosphopotassique, les points correspondant aux placettes où il y a eu apports d'engrais se déplacent sur l'axe 1, ce qui témoigne d'une amélioration de la nutrition phosphopotassique. Mais les différents traitements d'une même parcelle se recourent encore peu.

Pour le site Pyrénées (fig 4), les axes 1 et 2 expriment respectivement 78% et 19% de l'inertie. Les indices P et K sont fortement corrélés à l'axe 1 (92 et 83% de leur variance) alors que l'indice N est corrélé aux 2 axes (respectivement 60 et 40% de sa variance). Après les 6 années d'application des mêmes traitements, les 2 parcelles sont toujours bien différenciées, notamment par rapport à l'axe 1. La projection en individus supplémentaires des indices établis en première année d'expérimentation montre que pour la parcelle D, les indices P et K ont peu changé alors qu'ils ont légèrement augmenté pour la parcelle S. Par contre, l'indice N a diminué pour la parcelle S, mais fortement augmenté pour la parcelle D.

Variabilité des indices au cours de la pousse

Pour les sites AU et AV, les indices moyens par traitement et leurs coefficients de variation sont indiqués dans le tableau III. Pour l'ensemble des traitements et parcelles, les coefficients de variation sont inférieurs ou égaux à 10% dans 30 cas sur 40 pour ln , 34 pour lp , 31 cas pour lk .

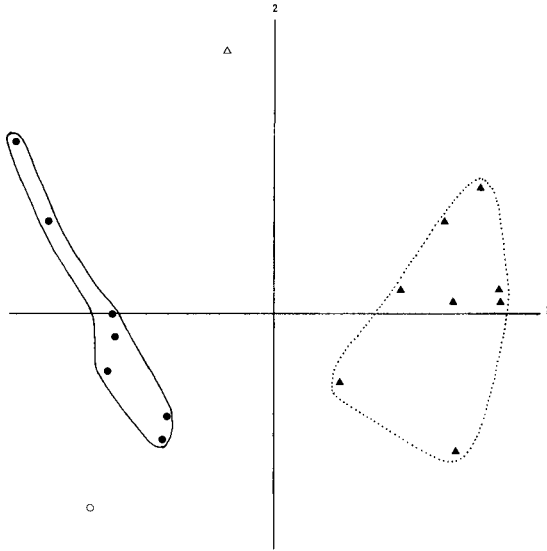


Fig 4. Analyse en composantes principales pour les indices *N*, *P* et *K* des parcelles et traitements du site PY. Représentation du plan 1-2 (axe 1 horizontal). Parcelles S● et D▲; projection en individus supplémentaires des points en première année d'expérimentation (en symboles blancs).

Il importera de vérifier si ces variations au cours de la pousse correspondent à des différences de nutrition. Si tel est le cas, lors de récoltes à un stage proche de l'épiaison, les biomasses des traitements d'une même parcelle doivent être mieux corrélés à la moyenne des indices établis au cours de la pousse qu'à l'indice correspondant à la récolte.

En préalable à la vérification de cette hypothèse, nous avons comparé les indices moyens à ceux de la dernière date de prélèvement. Pour l'azote, les indices moyens sont généralement plus élevés que ne le sont ceux des dernières dates, excepté pour les valeurs les plus basses des 2 parcelles de type D (fig 5a). Si les indices permettent un diagnostic instantané, ceci signifie que la nutrition en N tend à baisser au cours de la pousse. Pour P les données des parcelles type S et de la parcelle AUD sont situées presque toujours en dessous de la bissectrice (fig 5b), ce qui indiquerait une tendance à une amélioration de la nutrition au cours de la pousse. Dans le cas du K nous observons la même tendance pour les parcelles type D et la parcelle AVS (fig 5c).

Tableau III. Moyennes et coefficients de variation des indices *N*, *P* et *K* des différents traitements et parcelles des sites Aubrac et vallée de l'Aveyron (voir tableau III pour légendes).

Traitements		AUS			AUD			AVS			AVD		
		In	lp	lk	In	lp	lk	In	lp	lk	In	lp	lk
N_1 P ₀ K ₀	m	103	71	65	94	53	50	81	84	93	87	44	87
	cv	8	10	18	12	6	10	6	4	4	9	5	10
N_1 P ₁₂₀ sup K ₀	m	113	89	92	109	75	85	93	89	95	94	79	109
	cv	13	6	9	14	4	15	7	8	5	4	7	9
N_1 P ₆₀ sup K ₀	m	108	89	108	101	69	58	98	91	96	92	69	110
	cv	9	5	13	9	10	14	12	5	10	7	4	3
N_1 P ₆₀ sc K ₀	m	107	82	60	95	63	38	92	89	85	91	65	97
	cv	9	9	8	9	8	5	9	4	3	4	9	4
N_1 P ₆₀ bi K ₉₀	m	104	85	99	95	65	67	93	89	96	92	69	107
	cv	9	12	4	12	9	26	11	7	11	6	8	9
N_1 P ₆₀ K ₆₀	m	101	85	90	96	67	68	92	87	97	86	64	109
	cv	7	5	7	10	12	10	9	4	5	4	7	5
N_1 P ₀ K ₆₀	m	100	75	106	98	52	75	89	82	94	89	48	98
	cv	7	7	13	7	9	5	9	5	7	11	27	8
N_0 P ₀ K ₀	m	85	82	90	79	63	63	82	84	93	73	52	89
	cv	4	5	6	7	16	6	5	3	5	3	5	8
N_0 P ₆₀ sup K ₀	m	89	85	111	87	72	92	85	85	94	90	48	98
	cv	11	15	6	16	5	14	7	1	2	11	27	8
N_0 P ₀ K ₆₀	m	86	92	87	84	78	78	85	84	91	84	72	110
	cv	9	6	13	9	5	8	8	1	1	4	7	4

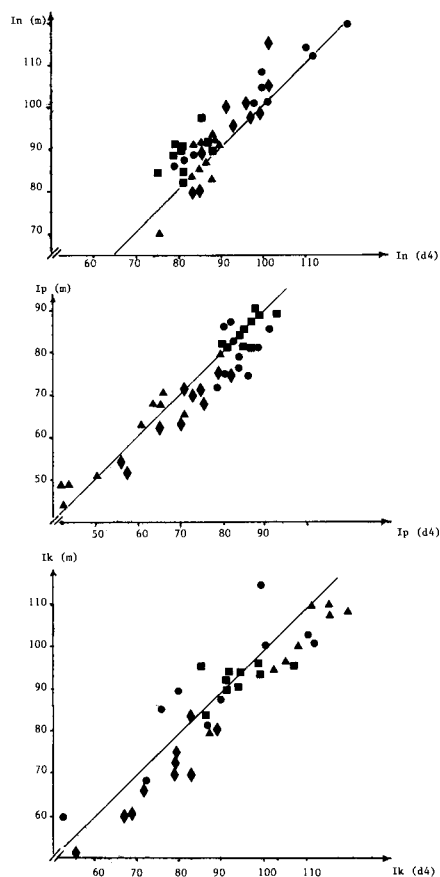


Fig 5. Relations entre la moyenne des indices calculés au cours de la pousse (m) et l'indice correspondant au dernier contrôle (d4), pour N (5a), P (5b) et K (5c). Parcelles AUS●, AUD◆, AVS■, AVD▲.

Relations entre les différents indices

Pour les traitements N_1 des parcelles de l'Aubrac et de la vallée de l'Aveyron, on note des indices de nutrition azotée variant en fonction des apports d'engrais P et K, de 100 à 113 (AUS), de 94 à 101 (AUD), de 89 à 93 (AVS) et de 87 à 92 (AVD), (tableau III). Ces résultats témoignent de l'effet des apports de P et K sur l'absorption de l'azote, sans doute en relation avec une meilleure croissance racinaire comme nous l'avons suggéré précédemment (Duru, 1992). On remarque de même un effet des apports de P sur les indices Ik .

Afin de mieux préciser ces interrelations, nous avons représenté les variations conjointes des indices Ip et In (fig 6a), Ip et Ik (fig 6b), Ik et In (fig 6c) pour les traitements N_1 . Les apports d'engrais P se traduisent par des accroissements des Ip plus importants que des In . Les accroissements de Ip sont les plus importants pour les 2 parcelles ayant les indices des traitements té-

moins les plus bas. Quant aux indices Ip et Ik , on remarque qu'ils sont généralement liés positivement entre traitements d'une même parcelle. L'observation détaillée des données montre que les Ik les plus élevés ne correspondent pas aux traitements avec apport de K seul ou en mélange avec du P (engrais bicalcique). Par ailleurs, on remarque que l'apport de P sous forme de scories se traduit par une diminution nette de l'indice Ik pour les parcelles AUS, AUD et AVD, alors que l'indice Ip augmente. L'apport seul de K se traduit par des accroissements importants de l'indice Ik pour les parcelles AUD et AUS dont les indices du traitement témoin sont les plus faibles, mais dans tous les cas, l'indice Ip varie peu. Les indices N et K n'apparaissent nettement liés que pour la parcelle AUD (fig 6c). Pour les autres parcelles, on observe de larges gradients de Ik pour des In similaires.

D'une manière générale, les liaisons observées entre indices pour différents traitements d'une même parcelle, tout particulièrement entre In et Ip , constituent une contrainte pour tester leur validité. Pour s'en affranchir, on considérera simultanément les traitements de plusieurs par-

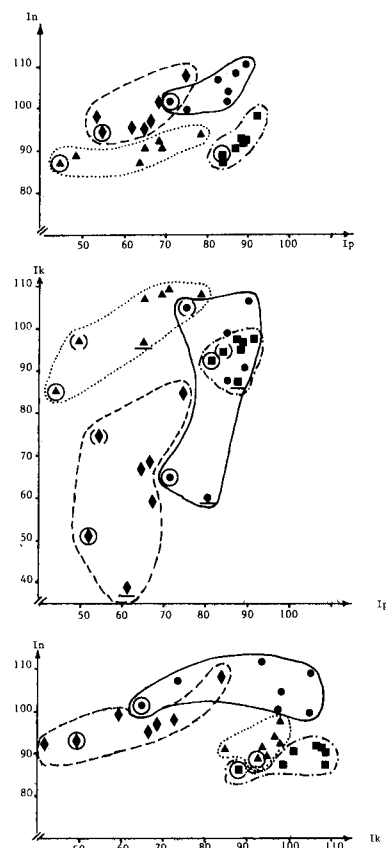


Fig 6. Relations entre les indices N et P (6a), K et P (6b), N et K (fig 6c), pour les traitements N_1 des parcelles AUS●, AUD◆, AVS■, AVD▲. Traitement témoin O, apport de scories — et de KCl ().

celles. Ainsi, pour tester la validité des lp , on pourra regrouper les données des 2 parcelles de chacun des sites dans la mesure où le champ de variation des ln est similaire (fig 6a).

Relations entre indices de nutrition et biomasse aérienne

Biomasse à 800 degrés-jours pour les sites Aubrac et Aveyron

Pour chacune des parcelles des dispositifs Aubrac et Aveyron, c'est l'indice N qui est le mieux corrélé à la biomasse. Le coefficient concernant K n'est jamais significatif. Celui concernant P est significatif pour les 2 parcelles où il est le plus bas sur les placettes témoin (tableau IV). En ne considérant que les traitements N_1 , on note que seuls les ln sont retenus (au seuil de 5% d'introduction des variables) pour les parcelles AUS et AVS. Pour les 2 autres parcelles, c'est la variable lp qui est retenue et secondairement la variable ln pour la parcelle AUD si le seuil d'introduction des variables est de 10%.

Compte tenu du champ de variation des indices P et N des 2 parcelles d'un même site et étant donné les similarités de leur conditions pédoclimatiques, nous les avons considérés dans une même régression. Pour chacun des sites, il apparaît une corrélation entre la biomasse à 800 °C·j et les indices N et P , le coefficient de

l'indice azote étant toujours bien plus élevé que celui du phosphore (tableau IV).

Biomasse au démarrage de la végétation pour les sites Aubrac et Aveyron

À la première date de contrôle, soit 435-523 °C·j après le premier février selon les sites, la variable indice N est retenue dans l'établissement des régressions pour chacune des parcelles ainsi que l'indice de P pour AVD (tableau V). Si on ne considère que les traitements N_1 , on ne note une corrélation significative que pour AVS (indice N) et pour AVD (indices N et P).

Biomasse au stade début floraison du dactyle pour le site Pyrénées

Pour les parcelles S et D considérées séparément, seule la variable ln est retenue (au seuil de 5% pour l'introduction des variables) dans l'établissement des régressions linéaires entre biomasse et indices (tableau VI). Le coefficient de pente de la variable ln est supérieur en S. Si on considère l'ensemble des données des 2 parcelles, la variable lp est prise en compte et il en résulte une amélioration significative de la corrélation. Sur la figure 7, nous avons reporté les données observées à la même date en première année d'expérimentation. On note que pour la parcelle D, les coordonnées du point $MS-ln$ sont

Tableau IV. Caractéristiques des ajustements entre indices et biomasse aérienne à 800 °C·j pour les sites Aubrac et vallée de l'Aveyron.

	Constante	ln	lp	n	r^2	s	Écart type résiduel
$N_1 + N_0$							
AUS	- 640	12,5	/	10	0,95	0,001	31,1
AVS	-1 399	22,8	/	10	0,81	0,001	57,1
AUD	- 666,3	7,9	5,4	10	0,85	0,001	33,5
AVD	-1 009	14,5	5,3	10	0,94	0,001	37,3
N_1							
AUS	- 219	8,5	/	7	0,80	0,01	21,1
AVS	-1 120	19,9	/	7	0,54	0,1	64,7
AUD	-1 125	12,7	5,2	7	0,84	0,02	36,3
AVD	152,6	/	7,7	7	0,92	0,001	30,9
AU	-1 000	11,2	5,9	14	0,87	0,001	52,1
AV	- 860,1	14,3	3,1	14	0,71	0,001	58,4

Tableau V. Caractéristiques des ajustements entre indices et biomasse aérienne au premier contrôle pour les sites Aubrac et vallée de l'Aveyron.

Traitements et parcelles	Constante	ln	lp	n	r ²	s	Écart type résiduel	
$N_1 + N_0$	AUS	- 48,7	2,3	10	0,91		17,2	
	AVS	-203,5	4,3	10	0,87		24,3	
	AUD	- 67,7	2,1	10	0,67		28,8	
	AVD	-242,8	3,6	2,2	10	0,92	19,2	
N_1	AUS					NS		
	AVS	-141	3,8		7	0,43	0,1	32,4
	AUD						NS	
	AVD	-306,3	4	2,6	7	0,86	0,01	19,8

Tableau VI. Caractéristiques des ajustements entre indices et biomasse aérienne pour le site Pyrénées centrales.

	Constante	ln	lp	n	r ²	s	Écart type résiduel
PYS	-381,7	14,5		8	0,74	0,01	31,8
PYD	-277,3	11,2		8	0,98	0,001	13,5
PY	-452,1	11,8	1,9	16	0,90	0,001	20,7

situées dans le prolongement de la courbe ajustée avec les données de 1987, et que les lp et lk sont voisins. Par contre, pour la parcelle S, les coordonnées du point MS - ln , ont une ordonnée nettement inférieure que l'on peut mettre en relation avec la forte réduction du niveau de nutrition azoté observée entre 1981 et 1987 pour l'ensemble des traitements de cette parcelle.

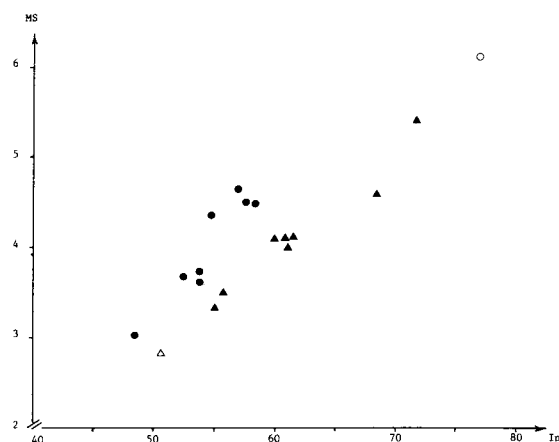


Fig 7. Biomasse aérienne récoltée (MS en t/ha) en fonction de l'indice N (ln) pour le site PY. Parcelles S●, D▲. Résultats de septième année d'expérimentation (symboles noirs) et première année (symboles blancs).

DISCUSSION

Relations entre indices de nutrition et biomasses récoltées

L'ensemble des données recueillies sur les différents sites montrent que c'est presque toujours l'indice N qui est retenu en premier lieu dans l'établissement des régressions progressives, même lorsque l'on ne considère que les traitements N_1 , excepté pour la parcelle AVD. Ce gradient de nutrition azotée pour les placettes N_1 provient alors des effets indirects des apports d'engrais phosphopotassiques (Aubrac et Aveyron) ou des arrière-effets des modes d'exploitation (Pyrénées).

Les données recueillies dans les Pyrénées montrent que, pour des ln compris entre 50 et 60, le passage des lp d'environ 65-70 à 100 et des lk d'environ 70-80 à des valeurs supérieures à 100 se traduit par des accroissements de biomasse de 0,7 à 1,0 t (fig 7). L'effet d'une augmentation de ln apparaît plus important puisqu'un accroissement de 10 points entraîne une augmentation moyenne de rendement de 1,3t.

Les données des sites AU et AV montrent que les Ip sont pris en compte dans l'établissement des relations linéaires pour les 2 parcelles de type D. Les valeurs extrêmes vont de 52 à 75 (AUD) et de 44 à 79 (AVD) alors que les Ip sont supérieurs à 65 ou 70 pour les 2 autres parcelles. Cet ensemble de données montre, comme nous l'avons signalé lors de l'établissement de l'équation de référence (Duru, 1992), que les valeurs des indices considérées comme non limitantes sont sans aucun doute surestimées.

La variable Ik n'est jamais prise en compte dans l'établissement des régressions linéaires, bien que des différences importantes d'indices aient été observées entre traitements. Pour les parcelles AUS, AVS et AVD, les valeurs de Ik sont toujours supérieures à 84 (de 84 à 111). Mais pour la parcelle AUD, les Ik vont de 38 à 92 sans que l'introduction de la variable soit significative. Dans ce cas particulier, la variable Ik est très liée à la variable In (traitements N_1). Le dispositif est donc mal adapté pour valider cet indice. Pour s'affranchir de cette contrainte, nous avons sélectionné des traitements différant par les Ik mais ayant des In et Ip similaires. Nous avons 2 traitements répondant à cette exigence : P60sc.K0 et P60bi.K90 (tableau III). Les In , Ip et Ik sont respectivement de 95, 63 et 38 dans le premier cas, 95, 65 et 67 dans l'autre. Les biomasses correspondantes sont significativement différentes (test de Newman-Keuls) : 4,18 t et 6,50 t au troisième contrôle, 6,50 t et 8,36 t au quatrième contrôle. Dans le cas des données du site Pyrénées, les valeurs des Ik sont bien supé-

rieures à 100 (ordonnée de la figure 8b). Il s'agit vraisemblablement de cas où il y a consommation de luxe, phénomène bien connu pour le K.

L'indice In est pris en compte dans toutes les régressions. Pour la plupart des parcelles, l'indice est inférieur à 100. Toutefois, on remarque que les In sont supérieurs à 100 en AUS pour 4 des 10 traitements. Ceci montre que cet indice In n'a pas été établi par excès, contrairement aux 2 autres.

Interprétation des variations d'indice au cours de la pousse

Les variations d'indices observées au cours de la pousse peuvent avoir 2 origines. Elles peuvent traduire des différences de nutrition en l'élément considéré ou bien être un artefact résultant d'une inadéquation des coefficients des courbes de dilution de référence. Pour vérifier le bien fondé de la première hypothèse, nous avons comparé les r^2 des régressions entre la biomasse récoltée au dernier contrôle en fonction des indices moyens de la pousse (censés intégrer les variations de nutrition) ou bien de l'indice calculé pour ce dernier contrôle (diagnostic de nutrition au moment même du prélèvement). Si le r^2 est supérieur dans le premier cas, on peut penser que les variations d'indice au cours de la pousse traduisent bien des différences de nutrition. Ce test a été fait pour l'azote dans le cas des parcelles AUS et AVS ainsi que pour P pour la parcelle AVD. Les taux de variances expliquées sont effectivement plus élevés lorsque

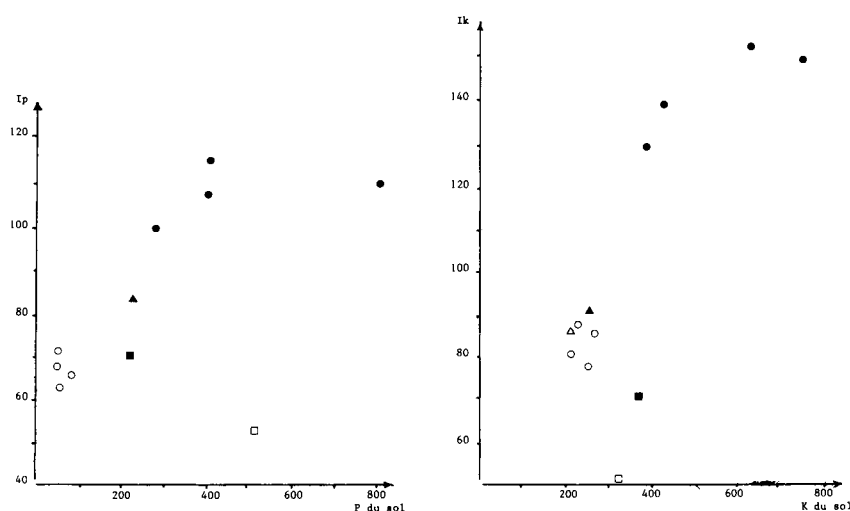


Fig 8. Relations entre les résultats d'analyse chimique de sol de l'horizon 0-5 cm (P_2O_5 et K_2O en ppm) et les indices de nutrition. Indice P et P assimilable (pour les parcelles où les mesures par la méthode Dyer sont disponibles) (fig 8a), indice K et K échangeable (fig 8b) pour les sites AU (■), AV (▲) et PY (●) symboles noirs pour les parcelles S et blancs pour les parcelles D.

les régressions sont établies avec les indices moyens. Ils sont respectivement de 77 et 51% pour AVS ($n = 10$), 80 et 57% pour AUS ($n = 10$), 94 et 81% pour AVD ($n = 7$). On peut donc penser que les variations d'indices observées au cours de la pousse traduisent des variations de nutrition. Les diminutions d'indices d'azote très souvent observées au cours de la pousse (fig 5a) correspondraient alors à une déficience en azote, même avec les doses importantes. Pour mieux valider cette hypothèse, il serait toutefois souhaitable de disposer d'un dispositif plus complet où l'on ferait varier les fournitures au cours de la pousse par des dates d'apport d'engrais différentes.

Relations entre les analyses chimiques du sol et les indices de nutrition P et K

La comparaison des indices P et K à l'offre alimentaire du sol estimée par les analyses chimiques conventionnelles demande de choisir, pour celles-ci, une profondeur de prélèvement des échantillons de terre dans la mesure où les résultats en dépendent fortement. En effet, tout particulièrement dans le cas des prairies permanentes où la fertilisation est apportée en surface, les éléments minéraux y sont concentrés à proximité si bien qu'on observe généralement un important gradient avec la profondeur. En toute rigueur, pour choisir cette profondeur, il faudrait connaître la densité de racines par horizon. À défaut de disposer de ces mesures, nous avons retenu la profondeur 0-5 cm après avoir vérifié que le classement entre parcelles n'était pas changé si on considérait l'horizon 0-15 cm.

La relation entre les 2 critères est de type logarithmique (fig 8a,b). Les taux de variance expliqués avec ce modèle sont de 56% ($p < 0,01$) pour P et 98% ($p < 0,001$) pour K . L'observation détaillée par site montre que les liaisons entre les indices et les analyses en P et K du sol sont les meilleures pour les 2 parcelles des Pyrénées. Par contre, pour le site AU, les points sont très nettement excentrés, notamment dans le cas du P . Rappelons qu'il s'agit d'andosols pour lesquels le pouvoir fixateur pour le P est très élevé (Fardeau, com pers). La mise en relation des quantités de biomasse avec les analyses chimiques de terre, toutes parcelles confondues aurait donné des corrélations moins bonnes qu'avec les indices établis à partir des analyses de plantes, puisque la parcelle AUD a les teneurs en P du sol parmi les plus élevées alors

que les indices P et les rendements sont les plus bas. L'avantage du diagnostic de la nutrition par le calcul d'indices à partir des teneurs des plantes en éléments minéraux est alors de ne faire d'hypothèse ni sur le développement racinaire, ni sur d'éventuelles fixations et libérations qui peuvent être très variables selon les types de sols.

CONCLUSION

Les indices de nutrition ont été établis à partir de comparaison de plusieurs prairies permanentes soumises à différents traitements de fertilisation dans les Pyrénées centrales. Ces indices ont été calculés sur d'autres sites expérimentaux très différents par leur conditions pédoclimatiques. Nous avons montré par des calculs de régression qu'ils exprimaient bien les écarts de rendement observés entre différents traitements de fertilisation sur une ou plusieurs parcelles. Nous avons confirmé que les références non limitantes pour les indices P et K avaient été établies par excès contrairement à l'indice N .

L'étude détaillée des variations des indices au cours de la pousse a montré qu'elles pouvaient traduire des évolutions de nutrition. Mais nous avons mis en évidence que les différences d'indices P et K parfois observées entre traitements d'une même parcelle différant par leur niveau de nutrition azoté était un artefact. Ces 2 observations signifient qu'un certain nombre de précautions doivent être prises pour réaliser un diagnostic. Si le prélèvement d'herbe servant à l'analyse n'est réalisé qu'à une seule date, il est préférable de ne pas récolter trop tard car les baisses d'indice proviendraient alors de la sénescence de l'herbe. En deuxième lieu, si l'objectif est de réaliser un diagnostic pour P et K , il est à recommander de disposer d'un témoin avec nutrition azotée non limitante.

Un résultat original de ce travail a été de se doter d'une méthode permettant d'évaluer les interactions entre éléments minéraux. Nous avons observé très souvent un effet positif des apports de P sur les nutriments en N et K des prairies. On peut penser que cet élément favorise l'élongation racinaire et par là, augmente l'accessibilité aux autres minéraux. Dans nos conditions, cet effet des apports de P sur la nutrition en N a pu être observé même sur les placettes ayant reçu de forts apports d'azote dans la mesure où une sécheresse précoce avait limité la nutrition azotée des traitements témoins. Il en résulte que la plus

grande prudence doit prévaloir dès que l'on compare différents traitements de fertilisation en P. Les effets des apports de P doivent être interprétés en référence aux éventuelles variations de niveau de nutrition azoté.

Ces réserves d'utilisation étant faites, le référentiel proposé et les indices de nutrition qui en découlent nous semblent particulièrement performants par la possibilité qu'ils offrent de contrôler aisément l'évolution pluriannuelle du niveau de nutrition minérale d'une parcelle donnée (Duru, 1987b). Ce diagnostic devrait alors permettre de corriger rapidement et efficacement la fertilisation minérale ou organique appliquée antérieurement, ce qui est impossible à réaliser par le seul emploi de la méthode classique des bilans (Boniface et Trocmé, 1988; Bosc, 1988), même associée à l'analyse chimique de terre classique. En effet, des dérives entre la fourniture par le sol et les apports préconisés peuvent s'instaurer si on ne tient pas compte de la fixation ou bien des libérations possibles, qui sont difficilement mesurables. Dans le cas particulier des prairies permanentes fertilisées par des apports organiques, la difficulté d'utilisation de la méthode des bilans est renforcée car on connaît mal les apports et surtout leur valorisation. Enfin, cette méthode permet d'établir des diagnostics sur la nutrition en P et K sans nécessiter *a priori* d'informations précises sur le type de sol et sa fertilité ainsi que sur l'enracinement. Mais, pour interpréter les écarts aux valeurs de référence et formuler des conseils de fumure, il sera nécessaire d'en rechercher les causes. Les données analytiques du sol apporteront alors des informations très utiles pour guider le choix de la fertilisation, surtout si on fait appel à des tests plus complets (Quemener, 1978; Fardeau et Jappe, 1988) permettant d'estimer par exemple le pouvoir fixateur (P et K), la CEC et le K libérable (test NaTPB) pour K et les caractéristiques des cinétiques de dilution isotopique pour P.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le FIDAR qui a financé ce travail de recherche en collaboration avec la chambre d'agriculture de l'Aveyron.

RÉFÉRENCES

- Boniface R, Trocmé S (1988) Enseignements fournis par divers essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 2-Essais sur la fumure phosphatée. *In: Phosphore et potassium dans les relations sol-plante*. INRA, 279-402.
- Bosc M (1988) Enseignements fournis par divers essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 3-Essais sur la fumure potassique. *In: Phosphore et potassium dans les relations sol-plante*. INRA, 403-466
- Duru M (1987a) Croissance hivernale et printanière de prairies permanentes pâturées en montagne. I. *Écophysologie du dactyle*. *Agronomie* 7, 41-50
- Duru M (1987b) Effect of animal manure on phosphorus and potassium content of herbage. Proc Int Symp Eur Grassland Fed, Wageningen, Pays-Bas, 31 août-8 sept
- Duru M (1989) Variability of leaf area index extension rate on permanent grasslands. XV Int Grassland Congr, Nice, France, 501-502
- Duru M (1992) Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I. Établissement de références. *Agronomie* 12, 219-233
- Fardeau JC, Jappe J (1988) Valeurs caractéristiques des cinétiques de dilution isotopique des ions phosphate dans les systèmes sol-solution. *In: Phosphore et potassium dans les relations sol-plante*. INRA, 79-100
- Lemaire G (1985) Cinétique de la croissance d'un peuplement de fétuque élevée pendant l'hiver et le printemps. Effets des facteurs climatiques. Thèse de doctorat d'état, Université de Caen, 96p
- Martin WE, Matocha JE (1972) Plant analysis as an aid in the fertilization of forage crops. *Soil Sci Soc Am J*, 393-425
- Quemener J (1978) The measurement of soil potassium. *IPI Res Topics* 4, 48p