

Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples

J. Salette, L. Huché

Disposer d'un outil de diagnostic d'état de nutrition minérale, à l'échelle d'une parcelle, permet de définir, d'ajuster et de contrôler une politique de fertilisation, celle-ci étant définie en fonction des objectifs de production tant quantitatifs que qualitatifs, des modes d'utilisation et de gestion de la parcelle en tenant compte des réserves en éléments minéraux disponibles dans le sol.

L'analyse de sol est un premier outil pour établir un diagnostic de l'état de fertilité du sol par l'estimation de la quantité d'un élément minéral jugé "assimilable" par la plante. Mais concernant la prairie, plusieurs raisons rendent difficiles l'interprétation d'une analyse de sol : la forte hétérogénéité intraparcellaire, en particulier pour les parcelles pâturées, l'imprécision sur le volume de sol prospecté par les racines, la différence dans la dynamique de prélèvement des minéraux par les racines (notamment pour le potassium, K) entre espèces prairiales et espèces cultivées pour lesquelles ont été établies les normes usuelles d'interprétation (SALETTE, 1975).

Il est important de définir pour le peuplement prairial des indices caractérisant la composition chimique des végétaux et dont les variations reflètent toute

MOTS CLÉS

Courbe de croissance, diagnostic, modélisation, nutrition azotée, nutrition potassique, prairie.

KEY-WORDS

Diagnosis, grassland, growth curve, modelling, nitrogen nutrition, potassium nutrition.

AUTEURS

I.N.R.A., Laboratoire d'Agronomie de la Prairie, Beaucouzé, F-49000 Angers

absorption insuffisante ou excessive d'un élément donné ou tout déséquilibre entre éléments. L'analyse minérale d'un échantillon représentatif de la biomasse aérienne récoltable répond à ces objectifs. Cette méthode de diagnostic d'état de nutrition minérale, mise au point pour les peuplements de graminées monospécifiques, semble également utilisable sur de nombreuses prairies plurispécifiques (temporaires et permanentes).

Bases physiologiques de la méthode

1. Notion de comportement normal d'un peuplement végétal

En conditions de croissance satisfaisantes (absence de contraintes climatiques, pédo-climatiques ou nutritionnelles limitant la croissance du peuplement), la composition des tissus végétaux réalise un certain équilibre entre les différents éléments chimiques essentiels à la croissance. Cet équilibre et son évolution au cours de la repousse caractérisent le comportement normal d'un peuplement au cours de la croissance. Pour chaque élément, des teneurs limites peuvent être déterminées, en deçà ou au delà desquelles la croissance sera affectée.

LAGATU et MAUME (1932) ont, les premiers, proposé la méthode du diagnostic foliaire basée sur l'analyse d'un lot de feuilles caractéristiques et la comparaison des teneurs à celle de témoins établis sur des parcelles de référence. De nombreux travaux ont suivi et ont été plus spécialement valorisés pour les cultures pérennes qui permettent plus facilement une correction de la fertilisation au cours du temps. Tous ces travaux ont en commun la définition d'une teneur critique qui correspond à un seuil de réponse à un apport fertilisant supplémentaire.

Pour les peuplements prairiaux, le diagnostic foliaire est difficilement envisageable au plan pratique car le choix et le prélèvement de feuilles caractéristiques est délicat et très difficile à réaliser. Nous avons étudié la possibilité d'un diagnostic à partir de l'analyse de l'ensemble des parties aériennes récoltables : l'analyse chimique traduit alors une moyenne de la composition minérale entre feuilles d'âges différents et représente l'état physiologique du peuplement végétal à un stade de croissance donné (SALETTE, 1989).

D'autre part, contrairement aux démarches du diagnostic foliaire, notre travail n'est pas uniquement basé sur la notion de seuil de réponse ou "teneur critique", mais sur une approche en continu d'un ensemble de relations entre teneurs et production de biomasse et de leur évolution au cours d'une période de croissance. Les différentes relations obtenues entre les variables considérées se traduisent par des équations simples qui correspondent à ce que l'on peut appeler "un comportement normal" du peuplement végétal (SALETTE et DUMAS, 1970). Cela étant

déterminé, il résulte logiquement que tout écart au "normal" prend par lui-même une valeur de diagnostic.

Par ailleurs, au delà du seuil de réponse à l'apport d'un élément nutritif considéré, les espèces fourragères, par la nature de l'objectif de production qui concerne la totalité de biomasse végétale récoltable à produire, permettent de bien définir un concept de niveau d'azote non limitant correspondant à la réalisation d'un potentiel de production accessible (SALETTE, 1987). Il en résulte une plus grande facilité d'exploration du comportement végétal sur toute la gamme de l'intervalle de réponse aux différents niveaux de nutrition azotée ou minérale.

2. Dilution de l'azote et des minéraux au cours de la repousse : notion de degré de croissance

Pour les peuplements de graminées prairiales, la teneur dans la biomasse aérienne récoltable de la plupart des éléments minéraux diminue au cours de la croissance de la repousse. Plutôt que de repérer cette diminution des teneurs par rapport au temps ou à des repères de stade traduisant un "âge physiologique", SALETTE et LEMAIRE ont proposé la référence à la biomasse végétale élaborée au cours de la repousse depuis la dernière défoliation. C'est cette quantité, représentative d'un état de réalisation de la repousse, que l'on appelle degré de croissance (SALETTE, 1989). L'équation de dilution établie pour l'azote (SALETTE et LEMAIRE, 1981) a pu être généralisée à la plupart des autres éléments minéraux (SALETTE, 1982 ; SALETTE et al., 1989) :

$$M\% = \alpha (MS)^{-\beta}, \text{ avec :}$$

- M%, la teneur en l'élément minéral considéré,
- α est un coefficient appelé potentiel de teneur ($\alpha = M\%$ lorsque $MS = 1$ c'est-à-dire lorsque la repousse a élaboré la première tonne de biomasse sèche),
- β est appelé coefficient de dilution,
- MS est le degré de croissance défini ci-dessus.

La courbe de dilution d'un élément minéral M dépend du niveau de nutrition azotée (figure 1). Pour un même degré de croissance, en conditions de nutrition minérale satisfaisante, la teneur (M%) dans la biomasse aérienne récoltable est d'autant plus élevée que le niveau de nutrition azotée est élevé. Il en résulte que les courbes de dilution d'un minéral correspondant à une nutrition azotée non limitante sont les seules utilisables simplement pour la pratique du diagnostic.

3. Relations entre teneurs en minéraux et teneurs en azote

En conditions de croissance normale et de nutrition minérale satisfaisante, l'absorption des éléments minéraux par le peuplement prairial doit s'ajuster à la

vitesse d'élaboration des nouveaux tissus végétaux, c'est-à-dire à la dynamique d'absorption et de métabolisme de l'azote et du carbone. Ceci est d'ailleurs la base physiologique du raisonnement agronomique qui fait de l'azote le "pivot de la fertilisation".

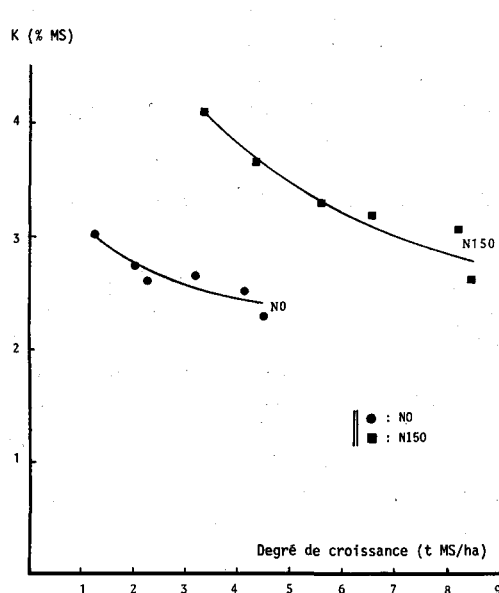


Figure 1

FIGURE 1 : Courbe de dilution du potassium : croissance de printemps d'un peuplement de ray-grass anglais (cv. Réveille, Le Pin-au-Haras (Orne), 1987) avec deux niveaux de fertilisation azotée (NO : aucun apport d'azote et N150 : 150 kg N/ha à la sortie de l'hiver). Effet du niveau de nutrition azotée sur la dilution du potassium. Equations d'ajustement :

- NO : $K\% = 3,06 (MS)^{-0,167}$ $r = 0,926$
 - N150 : $K\% = 6,70 (MS)^{-0,414}$ $r = 0,927$

FIGURE 1 : Dilution curve for potassium in a perennial ryegrass sward growing in Spring at two nitrogen nutrition levels. Effect of N level on K dilution

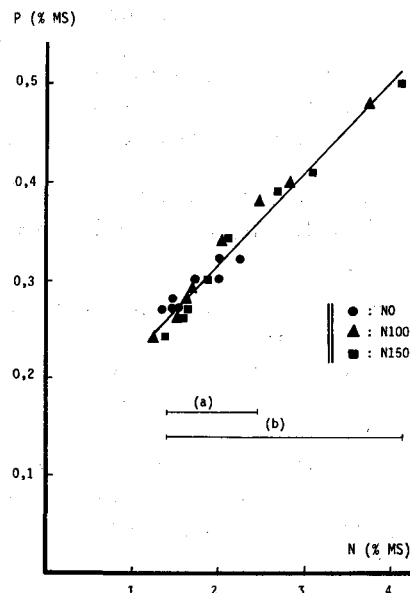


Figure 2

FIGURE 2 : Relations entre P% et N% : croissance de printemps d'un peuplement de ray-grass anglais (cv. Réveille, Le Pin-au-Haras (Orne), 1987 ; NO, N100 ou N150 : 0, 100 ou 150 kg N/ha apportés en sortie d'hiver). Ajustement à une droite (tous niveaux N confondus) : $P\% = 0,091 (N\%) + 0,133$ ($r = 0,983$). On notera l'amplitude de variation des teneurs au cours de la croissance de la repousse dans le cas d'une conduite peu intensive de la parcelle (a) ou dans le cas d'un peuplement à vitesse de croissance élevée et proche du maximum réalisable (b).

FIGURE 2 : Relationship between P% and N% in a perennial ryegrass sward growing in Spring (cv. Reveille, Le Pin-au-Haras (Orne), 1987 ; NO, N100 or N150 : 0, 100 or 150 kg N/ha applied at end of Winter). Linear ajustement (aggregate of all N levels) : $P\% = 0,091 (N\%) + 0,133$ ($r = 0,983$).

Les teneurs en minéraux dans la biomasse récoltable s'ordonnent donc en fonction de la teneur en azote : au cours de la croissance, la teneur en un élément M % est liée à la teneur en azote par une relation de régression linéaire (SALETTE 1982 ; SALETTE et al., 1973) :

$$M\% = a (N\%) + b$$

Lorsque le niveau de nutrition minérale n'est pas trop faible, le niveau de nutrition azotée du peuplement ne modifie pas la relation entre teneurs en azote et en minéraux (même équation d'ajustement), seule l'amplitude de variation des teneurs au cours de la croissance est affectée (figure 2). Ces relations entre teneurs en minéraux et teneurs en azote caractérisent donc le comportement normal d'un peuplement, indépendamment du niveau de nutrition azotée et sont utilisables dans la pratique quel que soit le niveau de production de la parcelle.

On peut donc se baser sur le fait que les relations de référence établies en conditions de nutrition minérale satisfaisantes, entre M % et MS d'une part et entre M % et N % d'autre part, caractérisent le comportement normal du peuplement prairial. Tout écart à la normale prend alors valeur d'un diagnostic utilisable et renseigne sur la nature et l'importance relative d'éventuels déséquilibres ou déficiences de la nutrition minérale (SALETTE, 1982, 1989 ; SALETTE et HUCHÉ, 1989).

Pratique du diagnostic

1. Opérations sur la parcelle

Pour une parcelle donnée, la détermination du degré de croissance du peuplement et l'analyse minérale de la biomasse aérienne récoltable permettent la mesure de l'écart des points (N %, MS), (M %, MS) et (M %, N %) aux points correspondant à une courbe de référence traduisant le comportement normal d'un peuplement prairial en cours de croissance. L'écart à la normale est la base du diagnostic et de l'interprétation des résultats d'analyses : dans une première approximation, il peut se faire graphiquement.

L'influence du niveau d'azote sur l'équation de dilution des minéraux, la relation linéaire entre les teneurs en azote et les teneurs en minéraux et le constat que l'azote est le plus souvent, dans une parcelle de prairie, le facteur limitant principal de la production, nous ont amenés à proposer sur chaque parcelle la mise en place d'une sous-parcelle sur laquelle les apports d'azote sont suffisamment élevés pour réaliser un état de nutrition azotée non limitant pour la croissance de la repousse (SALETTE et HUCHÉ, 1989). Cet apport supplémentaire d'azote est utilisé comme outil d'estimation de la capacité du sol à répondre à une demande minérale plus élevée du peuplement, liée à l'élaboration de tissus végétaux supplémentaires résultant de

l'effet azote, facteur auquel s'ajoute le rôle de cation d'accompagnement de l'anion nitrate, notamment pour le potassium.

Le diagnostic est alors basé sur l'écart entre les courbes de référence et les points caractérisant la parcelle p à analyser ($M_p\%$, $N_p\%$) et ($M_p\%$, MS_p) et l'évolution de cet écart sous l'effet d'un apport d'azote supplémentaire en début de repousse (position des points caractérisant la sous-parcelle "à azote non limitant" nl : ($M_{nl}\%$, $N_{nl}\%$) et ($M_{nl}\%$, MS_{nl})). Il en résulte une beaucoup plus grande sensibilité de la méthode qui permet de différencier, pour expliquer une teneur donnée $M\%$, l'effet du niveau d'azote et l'effet du niveau de fertilité du sol pour l'élément M.

2. Etablissement de normes (courbes de références)

	$M\% = a + (b N\%)$	$M\% = \alpha (MS)^{-\beta}$
Etats de nutrition potassique		
- E : excédentaire	$K\% = 1,80 + (0,55 N\%)$	$K\% = 5,00 (MS)^{-0,30}$
- S : satisfaisant	$K\% = 1,40 + (0,50 N\%)$	$K\% = 4,40 (MS)^{-0,30}$
- R : limite (zone à risque)	$K\% = 1,30 + (0,45 N\%)$	$K\% = 3,50 (MS)^{-0,25}$
- I : insuffisant		
Etats de nutrition phosphatée		
- E : excédentaire	$P\% = 0,17 + 0,07 N\%$	$P\% = 0,62 (MS)^{-0,40}$
- S : satisfaisant	$P\% = 0,13 + (0,06 N\%)$	$P\% = 0,45 (MS)^{-0,30}$
- R : limite (zone à risque)	$P\% = 0,10 + (0,055 N\%)$	$P\% = 0,36 (MS)^{-0,25}$
- I : insuffisant		

TABLEAU 1 : Relations caractérisant le comportement d'un peuplement prairial pour différents niveaux de nutrition potassique et phosphatée. Equations des courbes permettant la délimitation de zones caractéristiques d'un état de nutrition donné (cf. figures 4 et 5). Ces équations sont issues expérimentalement d'un ensemble concernant des croissances de printemps pour les espèces et les lieux suivants (unicité de comportement pour l'ensemble lieux × types de prairie) :

- pour le potassium : Aspach (ray-grass anglais et fétuque élevée), Le Pin-au-Haras (ray-grass anglais), Le Robillard (fétuque élevée et prairie permanente), Laval (dactyle), Maine-et-Loire (fétuque élevée et ray-grass anglais), Vosges (prairie permanente) ;
 - pour le phosphore : Le-Pin-au-Haras (ray-grass anglais), Lusignan (fétuque élevée et dactyle), Saint-Laurent-de-la-Prée (prairie permanente), réseau S.N.S.T. (Ain, Haute-Marne, Pyrénées), Vosges (prairie permanente).

TABLE 1 : Characteristic relationships for different P and K nutrition status of a given sward

Le suivi de la dynamique de prélèvement du phosphore et du potassium lors de croissances de printemps de peuplements prairiaux, sur de nombreuses parcelles différenciées par leur niveau de fertilité phosphatée ou potassique (parcelles des réseaux S.N.S.T. et S.C.P.A., parcelles I.N.R.A. et Chambres d'Agriculture), nous amène à proposer des relations caractéristiques du comportement d'un peuplement prairial en cours de croissance pour différents niveaux de nutrition phosphatée et potassique (tableau 1). Ces relations reflètent les comportements observés sur plusieurs lieux et plusieurs espèces.

L'état de nutrition pour l'élément minéral M d'une parcelle dont les points (M%, MS) et (M%, N%) sont proches d'une courbe de référence donnée peut être assimilé à l'état normal caractérisé par cette courbe. Les relations citées dans le tableau 1 permettent donc de délimiter des zones caractéristiques d'état différents de nutrition (figures 4 et 5) :

— *zone à état de nutrition satisfaisant* : une augmentation des apports en M ne permet pas d'accroître la production et il y a seulement augmentation des teneurs M% ; le sol est capable de fournir une demande supplémentaire en M (la sous-parcelle à azote non limitant donne des points (M_{nl}%, N_{nl}%) et (M_{nl}%, MS_{nl}) qui restent dans la zone "à état de nutrition satisfaisant") ;

— *zone à état de nutrition excédentaire* : une diminution des apports de M n'entraîne pas de diminution de production mais seulement une diminution des teneurs M% ;

— *zone à risque* : le sol n'est pas capable de répondre à une demande supplémentaire en M mais un apport supplémentaire de M n'entraînera pas systématiquement d'augmentation de la production (la réponse est fonction du niveau de production permis par les conditions climatiques de la saison) ;

— *zone à état de nutrition insuffisant* : un apport plus important de M entraîne une augmentation de la production et des teneurs en M ; le degré de déficience est proportionnel à l'écart des points (M%, MS) ou (M%, N%) à la courbe de référence "état de nutrition satisfaisant" (interprétation graphique).

3. Exemples de réalisation pratique d'un diagnostic

• Quelques précautions pour le choix de la période de prélèvement

Des conditions climatiques particulières (manque d'eau, excès d'eau dans le sol, températures excessives ou trop faibles) entraînent des croissances irrégulières et, par conséquent, des conditions anormales pour le prélèvement des éléments minéraux et leur métabolisme par les plantes. Il convient de ne prélever que des échantillons correspondant à une prairie en cours de repousse régulière, conditions généralement réalisées dans nos climats pour les croissances de printemps.

Les références ont été établies sur des croissances végétatives (avant la pleine montaison) ou sur des croissances de repousses herbacées, l'élaboration d'organes spécialisés n'intervenant pas significativement, au moins au début, pour modifier la distribution des éléments minéraux. Dans la pratique, des échantillons prélevés jusqu'au stade épiaison ne nous ont pas posé de problème ; au delà, l'hétérogénéité entre prélèvements augmente très fortement.

Il en résulte que les prélèvements doivent être effectués sur des peuplements dont le degré de croissance est compris entre 2 et 5 t MS/ha. En deçà, le couvert végétal étant à peine fermé, on n'est pas encore dans le domaine de validité des courbes de dilution des éléments minéraux (et le comportement de dilution des divers nutriments n'est pas équivalent) ; au delà, la répartition de ces éléments minéraux dans la plante est modifiée par une proportion importante de feuilles sénescentes et éventuellement de tiges en cours de lignification ou d'épis en cours de remplissage.

• Mode opératoire sur la parcelle

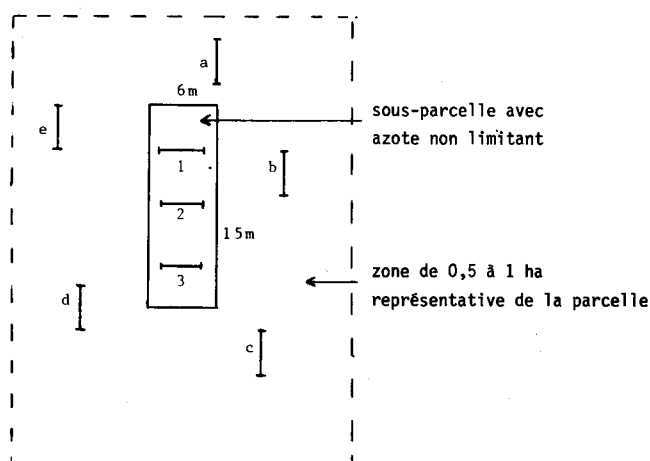


FIGURE 3 : **Diagnostic de nutrition minérale d'une parcelle : mode opératoire.** En début de croissance une sous-parcelle est délimitée (15 m × 6 m) sur laquelle on apporte 150 kg N/ha (parcelle dite à "azote non limitant"). Lorsque la production fourragère est suffisante (> 2 t MS/ha), 8 emplacements sont choisis : 3 dans la parcelle à azote non limitant (1, 2, 3) et 5 dans le reste de la parcelle (a, b, c, d, e).

Sur chaque emplacement, prélever 10 à 15 poignées d'herbe (parties aériennes supérieures à 4 ou 5 cm) ou 5 m linéaires par coupe mécanique (motofaucheuse ou microtondeuse) ; peser l'ensemble de la récolte et constituer un échantillon représentatif d'environ 500 g de matière verte, pour séchage à l'étuve, broyage et analyse.

FIGURE 3 : *Method for herbage sampling for the diagnosis of the mineral nutrition of a grassland plot.*

— L'opération de diagnostic doit, pour une parcelle donnée, être prévue dès le début de la croissance afin de permettre le choix dans la parcelle d'une zone homogène et représentative pour y délimiter une sous-parcelle (15 m × 5 m) sur laquelle un apport équivalent à 150 kg N/ha est fait en début de croissance, quels que soient les apports azotés faits par l'agriculteur.

— Lorsque la production fourragère est suffisante (> 2 t MS/ha), choisir 3 emplacements dans la "sous-parcelle" et 5 emplacements dans le reste de la parcelle (figure 3). Sur chaque emplacement :

- prélever soit 10 à 15 poignées d'herbe (parties aériennes, coupe de 4 à 5 cm au dessus du sol), soit 5 m linéaires à la microtondeuse ou à la motofaucheuse (lorsque l'on détermine MS/ha) ;

- peser l'ensemble de la récolte, constituer un échantillon représentatif d'environ 500 g de matière verte, l'identifier et le sécher à l'étuve (< 80°C).

— Expédier au laboratoire les échantillons identifiés, pour broyage et analyse (azote et minéraux principaux).

Le prélèvement de 10 à 15 poignées d'herbe ne permet pas l'estimation du degré de croissance, le diagnostic se fera alors uniquement par rapport aux références (N%, M%). Avec une motofaucheuse (lame de 0,9 m) et des prélèvements sur 5 m linéaires, l'estimation du degré de croissance est satisfaisante avec 3 répétitions (coefficient de variation < 8%) mais la méthode est difficile à mettre en œuvre (difficulté de transport d'une motofaucheuse, temps de récolte et de pesée importants). Avec une microtondeuse, la faible largeur de prélèvement (0,10 m) augmente considérablement les "effets de bordure" ; ceux-ci peuvent être réduits en prélevant une surface carrée de 0,5 m² plutôt qu'une bande de 5 m de long sur 0,10 m de large (DURU, communication personnelle).

• Exemples

Les figures 4a et 4b illustrent les possibilités d'utilisation de l'analyse minérale du végétal comme outil de diagnostic de l'état de nutrition potassique d'une prairie permanente :

— en l'absence de fertilisation potassique, l'écart à la courbe de référence caractérisant un état de nutrition satisfaisant est très important, l'apport supplémentaire d'azote ne permet pas d'augmentation de la production, l'état de nutrition potassique de la parcelle est jugé très insuffisant ; il est même le facteur limitant principal de la croissance et de la production ;

— avec une fertilisation potassique de 150 kg K₂O/ha/an, cet écart se réduit nettement, mais l'apport supplémentaire d'azote entraîne une chute des teneurs en

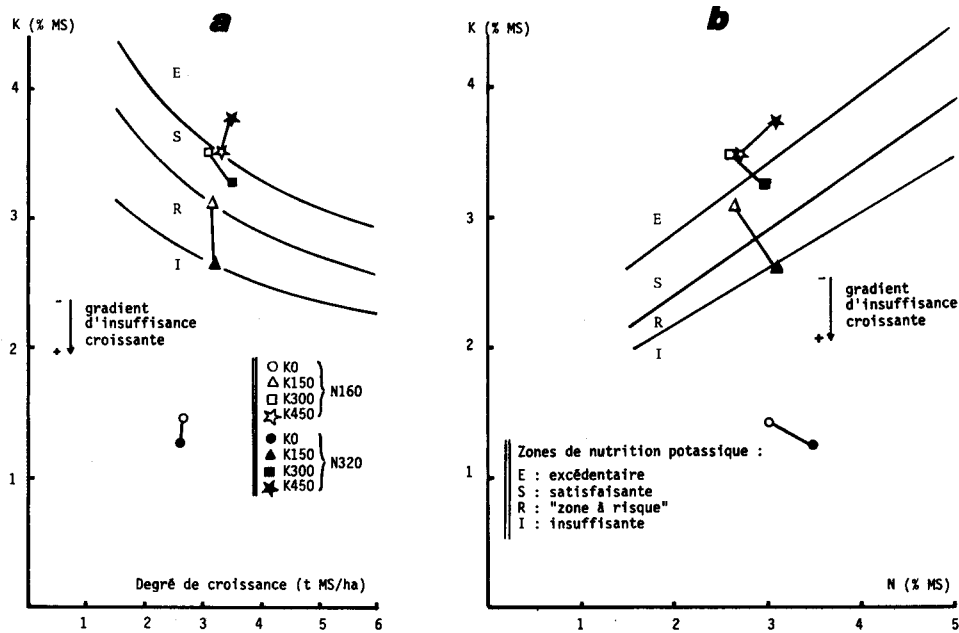


FIGURE 4 : Diagnostic de l'état de nutrition potassique, à l'échelle de la parcelle : relations entre teneur en potassium et a) degré de croissance, b) teneur en azote. Cas d'une prairie permanente (Le Robillard, Calvados) au printemps. Apports fertilisants réalisés depuis 4 ans :
 - 2 niveaux N : N160 et N320 correspondant respectivement à des apports annuels de 160 et 320 kg N/ha sous forme d'ammonitrate dont 40 et 80 kg apportés en sortie d'hiver.
 - 4 niveaux K : K0, K150, K300 et K450 correspondant respectivement à des apports annuels de 0, 150, 300 et 450 kg K_2O /ha sous forme de chlorure de potassium.
 Le diagnostic est basé sur l'écart des points à la courbe de référence caractérisant un état de nutrition potassique satisfaisant et son évolution sous l'effet d'apports azotés plus importants. On notera l'effet important de la dose d'azote sur les teneurs en K et la nécessité d'en tenir compte pour le diagnostic.

FIGURE 4 : *Example of K nutrition diagnosis using the two proposed models (K% in relation to DM production and to N contents). Measurements from a permanent pasture at Le-Robillard (Calvados) in Spring*

potassium, révélatrice d'une incapacité du sol à fournir toute demande supplémentaire de potassium (créée ici par l'apport supplémentaire d'azote) ; l'état de nutrition potassique de la parcelle est donc "insuffisant" ;

— avec une fertilisation potassique de 300 kg K_2O /ha/an le comportement du peuplement prairial est jugé normal ; d'ailleurs des apports de potassium plus importants ne présentent pas d'intérêt et entraînent une consommation de luxe en potas-

sium. La dose d'étude K300 est même un peu élevée (figure 4b) et des apports de 250 kg K₂O/ha/an seraient suffisants.

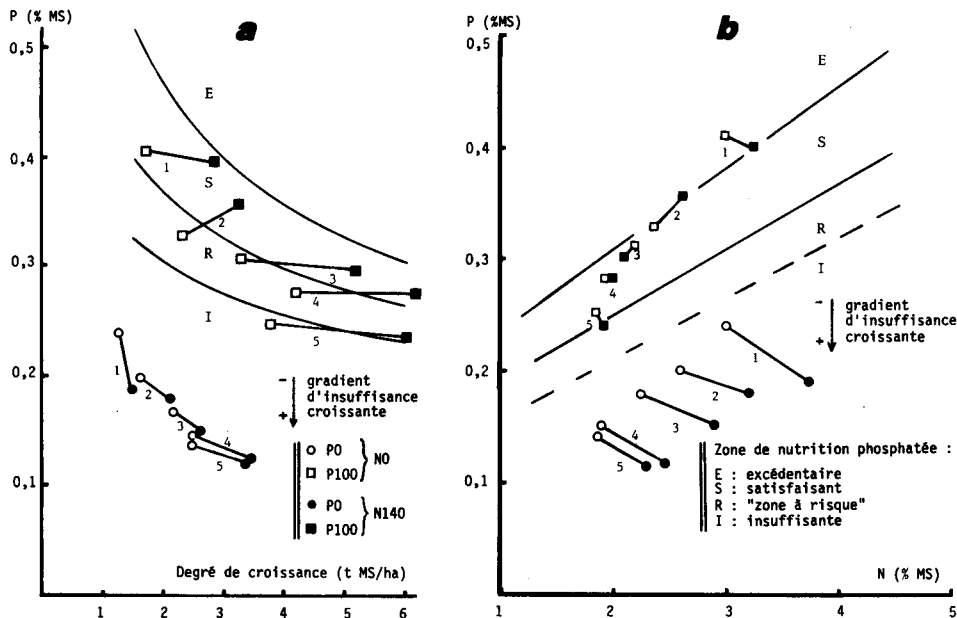


FIGURE 5 : Diagnostic de l'état de nutrition phosphatée, à l'échelle de la parcelle : relations entre teneur en phosphore et a) degré de croissance, b) teneur en azote. Cas d'une prairie permanente au printemps (Ain, essai S.N.S.T., 1989). Apports fertilisants réalisés depuis 6 ans : - 2 niveaux N : N0 (aucun apport) et N140 (140 kg N/ha/an sous forme d'ammonitrate dont 70 kg à la sortie de l'hiver) ; - 2 niveaux P : P0 (aucun apport) et P100 (100 kg P₂O₅/ha/an sous forme de scories 12%). 1, ..., 5 : n° des coupes successives au cours de la repousse de printemps ; le prélèvement 5 correspond à un prélèvement au stade floraison.

Le diagnostic est basé sur l'écart des points à la courbe de référence caractérisant un état de nutrition phosphatée satisfaisant et son évolution sous l'effet d'apports azotés plus importants.

FIGURE 5 : Example of P nutrition diagnosis using the two proposed models (P% in relation to DM production and to N contents). Measurements from a permanent pasture (Ain, S.N.S.T. trial, 1989) in Spring

Les figures 5a et 5b illustrent de la même manière les possibilités de diagnostic d'état de nutrition phosphatée d'une prairie permanente :

— en l'absence de fertilisation phosphatée, l'écart à la courbe de référence caractérisant un état de nutrition satisfaisant est très important, l'apport supplémentaire d'azote ne permet qu'un faible accroissement de la production et augmente encore

un peu plus la distance des points à la courbe de référence ; l'état de nutrition phosphatée de la parcelle est donc jugé "très insuffisant" ;

— avec une fertilisation phosphatée de 100 kg P_2O_5 /ha/an, les points (N%, M%) et (MS, M%) sont proches des points correspondants à la référence de nutrition phosphatée satisfaisante ; l'apport supplémentaire d'azote permet une forte augmentation de la production sans entraîner de baisse des teneurs en phosphore ; l'état de nutrition phosphatée de la parcelle est donc jugé tout à fait "satisfaisant" ;

— l'azote ne permet une forte augmentation de la production que sur les parcelles recevant 100 kg P_2O_5 /ha/an. De ce fait, en l'absence de fertilisation phosphatée, l'état de nutrition phosphatée de la parcelle est non seulement très insuffisant mais même limitant pour la production fourragère.

Discussion

Au cours d'une même repousse de printemps, cette méthode de diagnostic a été testée pour différents degrés de croissance (figures 5a et 5b). Les diagnostics, faits pour une même parcelle à des degrés de croissance successifs, concordent ; ceci témoigne du large domaine d'application de cette méthode au cours de la repousse ; seul le prélèvement fait au stade floraison ($n^{\circ}5$) donne une interprétation légèrement discordante.

Avant tout diagnostic il convient de s'assurer que les prélèvements ont été effectués sur un peuplement répondant aux conditions de validité de la méthode :

- repousse non affectée par des conditions climatiques ayant eu des répercussions sur la régularité de la croissance ou du prélèvement des éléments minéraux,
- repousse végétative (avant la pleine montaison) ou croissance herbacée,
- degré de croissance compris entre 2 et 5 t MS/ha au moment du prélèvement.

Sur les nombreuses parcelles testées, dans la mesure où l'apport supplémentaire d'azote en début de croissance sur la sous-parcelle a permis au peuplement d'atteindre un état de nutrition azotée non limitant, les diagnostics fournis par les deux représentations ($M\% = f(MS)$ et $M\% = f(N\%)$) concordent. Bien que dans une première période d'application de la méthode il soit très formateur de réaliser les deux approches conjointement, la concordance des diagnostics émis nous amène à privilégier, pour la vulgarisation de la méthode et sa pratique courante, la représentation $M\% = f(N\%)$ reliant la teneur en minéral à la teneur en azote, pour deux raisons :

- ce mode de diagnostic ne nécessite pas l'estimation du degré de croissance, la référence à la teneur en azote intégrant à la fois l'âge physiologique et la dilution

des différents éléments minéraux, par l'effet de l'azote sur l'accélération de la croissance des repousses ;

— les courbes de référence $M\% = f(N\%)$ caractérisent le comportement normal d'un peuplement en cours de croissance, en conditions de nutrition satisfaisante mais pas nécessairement non limitante pour la production. Cette méthode de diagnostic peut donc s'appliquer à toute parcelle quel que soit son niveau d'intensification.

Toutefois, pour un diagnostic du niveau de nutrition azotée, la connaissance du degré de croissance est indispensable puisqu'on ne dispose que de la seule référence de dilution de l'azote ($N\% = f(MS)$).

Dans l'interprétation de la nutrition minérale, il convient de privilégier l'effet sur le comportement du peuplement prairial de la dose supplémentaire d'azote apportée en début de repousse sur la sous-parcelle. L'évolution de la position des points ($M\%$, MS) ou ($M\%$, $N\%$) sous l'effet de l'azote révèle l'existence ou non dans le volume de sol prospecté par les racines, d'une réserve en l'élément minéral M disponible pour le peuplement prairial : c'est un indicateur de la marge d'évolution possible de l'objectif de production de la parcelle sans détérioration de l'état de nutrition en M du peuplement.

Les équations de délimitation de zones caractéristiques d'un état de nutrition donné, proposées dans le tableau 1 ne sont qu'une première approximation. L'établissement de normes plus précises, caractéristiques de milieux pédo-climatiques donnés et de divers niveaux de fertilité minérale est en cours (BONISCHOT, DURU, HUCHÉ, KUNG-BENOIT, DE MONTARD, PONS). A titre d'exemple, dans le Marais Poitevin, les teneurs souhaitables en K des échantillons sont inférieures aux teneurs de référence citées ici (tableau 1), certaines fonctions du potassium dans la plante étant probablement assurées par le sodium prélevé en quantité importante dans les sols étudiés (PONS et al., 1989, 1991).

Conclusions

Le comportement normal d'un peuplement prairial en cours de croissance, du point de vue de sa dynamique de prélèvement de l'azote et des autres éléments minéraux essentiels, peut être caractérisé par deux relations :

- la dilution des éléments minéraux au cours de la croissance,
- les relations linéaires positives entre les teneurs en azote et en différents minéraux.

Le diagnostic de l'état de nutrition minérale est basé sur l'examen conjoint des dilutions et des relations entre teneurs en azote ($N\%$) et en minéral ($M\%$). L'écart

entre les courbes de référence et les points (M%, MS) et (M%, N%) caractérisant la parcelle observée, et l'évolution de cet écart sous l'influence d'un apport supplémentaire d'azote en début de repousse constituent la base du diagnostic.

L'équation de dilution de l'azote permet également un diagnostic du niveau de nutrition azotée (SALETTE et LEMAIRE, 1981 ; LEMAIRE et SALETTE, 1984).

Les équations proposées, caractérisant pour différents niveaux de nutrition potassique et phosphatée le comportement moyen de différents peuplements prairiaux en cours de croissance, ne sont qu'une première approximation ; l'élaboration de normes caractéristiques de milieux pédo-climatiques très différents est nécessaire et en cours de réalisation.

Cette méthode de diagnostic, mise au point pour les peuplements prairiaux à base de graminées, s'avère applicable à de nombreuses parcelles de prairies temporaires et permanentes. Son utilisation sur céréales est également possible, ses possibilités d'application pratique sont en cours d'étude.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.,
"La prairie permanente : typologie et diagnostic",
les 25 et 26 avril 1990.

Remerciements

Les auteurs remercient la Société Commerciale de la Potasse et de l'Azote (S.C.P.A.), la Société Nationale des Scories Thomas (S.N.S.T.) et les Chambres d'Agriculture du Calvados, de Haute-Marne et des Vosges pour les résultats de réseaux d'essais qu'elles ont mis à leur disposition.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- KUNG-BENOIT A. (1989) : *Les prairies permanentes lorraines : lois de croissance potentielle, croissance en conditions limitantes*, mémoire relance agronomique Lorraine, 4ème cycle, octobre 1989, 77p.
- LAGATU et MAUME (1932) : "Le diagnostic foliaire de la pomme de terre", *Ann. agron.*, 3, 306-362.
- LEMAIRE G., SALETTE J. (1984) : "Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. Etude de l'effet du milieu", *Agronomie*, 4(5), 423-440.
- 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.
- PONS Y., LAFON E. (1991) : "Comment déterminer les facteurs limitants d'une prairie au printemps ? Cas des Marais de l'Ouest", *Fourrages*, 125, ci-après.

Diagnostic de nutrition minérale d'une prairie par analyse du végétal

- SALETTE J., DUMAS Y. (1970) : "Constantes de comportement de *Digitaria decumbens* Stent. : relations entre la teneur en azote et le rapport feuilles/tiges ; influence de différentes conditions de milieu", *C. R. Acad. Sc. Paris*, 271, série D, 200-202.
- SALETTE J.E., DUMAS Y., SOBESKY O. (1973) : "Eléments d'écologie des herbages à *Pangola* dans divers milieux des Antilles françaises. II. Données sur les éléments minéraux chez *Digitaria decumbens* cultivé dans divers milieux", *L'Agronomie tropicale*, 28, 833-845.
- SALETTE J. (1975) : "La fertilisation de la prairie : principes, problèmes et perspectives", *Fourrages*, 62, 177-202.
- SALETTE J., LEMAIRE G. (1981) : "Sur la variation de la teneur en azote de graminées fourragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution", *C. R. Acad. Sc. Paris*, 292, 875-878.
- SALETTE J. (1982) : "The role of fertilizers in improving herbage quality and optimization of its utilization", *Proc. of the 12th Intern. Potash Inst. Congr.*, Goslar, June 1982, 305p., Ed. I.I.P., Berne, 117-144.
- SALETTE J. (1987) : "Mieux expliquer les variabilités dans la production d'herbe : intérêt et applications du concept de potentiel de production", *Production fourragère au printemps, prévision et diagnostic*, édition AFPP, pp.3-12, 75p.
- SALETTE J. (1989) : "Possibilité de diagnostic de déficiences de la nutrition minérale par analyse du végétal : cas des graminées prairiales", *Ennemis et Maladies des prairies*, G. Raynal Edit., Publ. I.N.R.A., 225-228
- SALETTE J., HUCHÉ L., (1989) : "The diagnosis of grassland mineral nutrient status through herbage analysis", *XVIth Intern. Grassl. Congr.*, Nice, October 1989, 65-66.
- SALETTE J., HUCHÉ L., LEMAIRE G. (1989) : "Modelling nutrient uptake by the grass sward : short term studies during the sward growth", *XVIth Intern. Grassl. Congr.*, Nice, October 1989, 61-62.

RÉSUMÉ

La connaissance des lois de comportement d'un peuplement prairial en cours de croissance permet de proposer un outil de diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie, basé sur les teneurs en azote et en minéraux du fourrage récoltable.

Les relations caractéristiques de ce comportement normal sont décrites : dilution de l'azote et des minéraux au cours de la repousse, relations entre teneurs en azote et teneurs en minéraux. Les principes du diagnostic par interprétation des teneurs sont décrits : détermination de l'écart à une courbe dite normale, effet de la nutrition azotée sur cet écart. Les conditions de mise en pratique de la méthode sont discutées et des exemples sont présentés pour la nutrition phosphatée et potassique. Pour des conditions pédo-climatiques et nutritionnelles variées et pour divers types de végétation, des courbes de références caractéristiques d'états de nutrition minérale différents sont proposées.

SUMMARY

Diagnosis of the mineral nutrition status of a pasture through herbage analysis : principles, implementation, examples

For different grasslands, nitrogen and mineral contents of the herbage at several successive dates throughout the growth period give the basis for two models : dilution equation, and linear relation between mineral and nitrogen contents.

Corresponding reference curves were established for different mineral nutrition status and growing conditions, which lead to a good diagnosis method through herbage analysis. The principles of this method are given, with the deviations from the so-called reference curves, and the effect of nitrogen nutrition on these deviations. The conditions for the practical implementation of this method are discussed, with examples for the phosphatic and potassic nutritions. Characteristic reference curves are proposed for various status of mineral nutrition, corresponding to different pedo-climatic and nutritional conditions and to different types of swards.