

DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DE NUTRITION MINÉRALE DES GRAMINÉES PAR ANALYSE DE LA PLANTE ; APPLICATIONS A COURT ET A LONG TERME.

par Jean Salette¹, Lydie Huché-Thélier²

RÉSUMÉ

La raison principale des échecs attribués aux méthodes de diagnostic de la nutrition minérale par analyse du végétal réside dans la très grande variabilité des teneurs en azote ou en minéraux en fonction des conditions de croissance de la culture et des conditions de prélèvement des échantillons.

Notre étude concerne les graminées prairiales et les céréales, et l'échantillon analysé est constitué de la totalité des parties aériennes récoltables du peuplement en cours de croissance. Nous avons mis au point des lois de comportement du végétal qui permettent d'ajuster la variabilité des teneurs à des modèles simples : dilution de l'azote et des minéraux exprimée en fonction de la croissance elle-même, et non de la durée de la croissance ; relation linéaire entre teneurs en minéraux et teneurs en azote.

La comparaison avec les modèles des données recueillies au champ constitue la base du diagnostic proposé. Par ailleurs les lois de dilution établies permettent de calculer une équation donnant le prélèvement de l'azote ou des minéraux en fonction des quantités de matière sèche récoltables progressivement élaborées soit au cours d'une croissance, soit lors de la succession de récoltes sur plusieurs saisons ou plusieurs années. Ceci constitue une base pour connaître les relations production x fertilisation : c'est un outil pour la gestion à long terme d'une fertilisation optimisée.

PLANT ANALYSIS AS A METHOD FOR OPTIMIZING FERTILIZATION IN GRASSES AND CEREALS

SUMMARY

Nitrogen and minerals (P, K, S ...) contents are considerably varying in graminaceous tissues (grasses and cereals) according to stage of growth and nutrient levels in soils, particularly soil nitrogen availability. It is the main reason of the failure of diagnosed methods based on plant analysis. The proposed method allows to model content variations with two main concepts : (i) cumulated dry matter throughout growth which leads to assess dilution of elements in the growing plant, (ii) a linear relation between any plant mineral content and its nitrogen content.

Comparison of actual field data with the corresponding models allows to determine the level of mineral nutrition for any of the studied elements. The dilution model also allows assessing the

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherches émérite à l'Institut national de la Recherche agronomique (INRA), membre du comité national de l'INAO, centre INRA d'Angers, BP 57 ? 49071 Beaucouzé.

² UMR A 462 SAGAH (Sciences AGronomiques Appliquées à l'Horticulture) INRA/INH/UA, BP 57, F-49071 Beaucouzé Cedex, France.

mineral removal of the growing crop and cumulated mineral removals over successive yields, which is of special help for long term studies.

La méthode et les résultats que nous présentons ici sont une synthèse de plus de 20 ans et concernent essentiellement des graminées prairiales en zone tempérée (Fétuque, Dactyle, Ray-grass dans plusieurs régions de France) et en zone tropicale humide (*Digitaria sp.* aux Antilles). Des expérimentations moins nombreuses ont permis de vérifier que nos résultats étaient transposables au blé.

Les relations entre des teneurs de la plante en azote ou en différents minéraux et le fonctionnement du peuplement végétal ont été établies :

- d'une part une loi de dilution traduisant la diminution des teneurs au cours de la croissance (croissance au cours de la repousse après défoliation dans le cas des graminées prairiales ; croissance après semis pour le blé),
- d'autre part une relation linéaire entre la teneur en certains éléments essentiels pour la nutrition et la teneur en azote.

Les échantillons analysés concernent l'ensemble des parties de la plante récoltables par une coupe au-dessus de la surface du sol. Il ne s'agit donc pas d'analyse foliaire au sens strict du terme (difficulté pratique de sélectionner des feuilles en position définie sur la plante) mais de l'analyse d'un ensemble de feuilles d'âges divers, et, pour les peuplements à des stades de croissance plus avancés, d'un ensemble de feuilles, tiges et, parfois, inflorescences.

Chacune des relations générales établies et correspondant aux équations présentées correspond à un état normal du fonctionnement du peuplement végétal.

Les dysfonctionnements éventuels sont caractérisés par un écart à la normale mesuré par la comparaison des teneurs observées à celles qui constituent la référence : l'écart à la normale de fonctionnement prend alors la valeur d'un diagnostic.

1. Diminution des teneurs en cours de croissance ; loi de dilution.

Si la diminution des teneurs (N, minéraux) au cours de la croissance a été mise en évidence depuis très longtemps, l'étude de sa cinétique n'a jamais donné que des résultats incertains : repérer les phénomènes liés à la croissance en fonction du temps ne permet aucun résultat généralisable. Quant au repérage par rapport aux stades phénologiques classiques, s'il garde toute sa valeur pour caractériser des étapes dans le développement, il ne donne aucune cohérence aux études des phénomènes de croissance *sensu stricto* c'est à dire au processus d'élaboration progressive de la matière végétale et aux phénomènes connexes.

Si l'expression du génome correspond à une potentialité de croissance, la réalisation effective de cette croissance est fonction de nombreux facteurs physiques et chimiques correspondant à la variabilité – dans l'espace et dans le temps – des conditions de sol et de climat. Nous avons donc été conduits à analyser divers phénomènes en fonction non pas du temps [$x = f(t)$], mais en fonction de la croissance elle-même exprimée par la biomasse végétale récoltable à un instant donné au cours de la croissance (elle s'exprime en matière sèche par unité de surface).

Nous proposons d'appeler « degré de croissance » la quantité de biomasse élaborée progressivement au cours de la croissance et cumulée à un instant donné, par exemple lors d'une coupe ou du prélèvement d'un échantillon (16,20)

La diminution progressive de la teneur de la plante en divers éléments E (azote, potassium, phosphore, ...) peut alors se décrire selon une loi de comportement simple et fiable, modélisable sous forme d'une équation dite de dilution, montrant que cette teneur E% en divers éléments est une fonction simple du degré de croissance (fig 1) :

$$E\% = \alpha (MS)^{-\beta} \quad (\text{équation 1})$$

Cette loi de dilution a d'abord été établie pour l'azote (18). De nombreuses équations de dilution ont ensuite été établies permettant la généralisation de cette loi, d'une part à l'azote pour d'autres espèces (1, 5, 10, 11), d'autre part à plusieurs minéraux (15, 22).

Dans tous les cas étudiés, les éléments P, K, S suivent la loi de dilution (14, 22). D'autres éléments ne la suivent que sous certaines conditions, notamment le calcium, le magnésium et le sodium. (17). Il serait intéressant d'approfondir les raisons de ces comportements différents, ce qui rejoint l'idée que les milieux fortement calcaires engendrent des comportements différents pour le prélèvement et le métabolisme de ces minéraux (21).

Par ailleurs, l'équation de dilution des minéraux dépend du niveau de nutrition azotée. Celui-ci modifie le comportement du peuplement végétal vis à vis des minéraux (afin d'assurer l'élaboration de nouveau matériel végétal et le maintien des équilibres ioniques). Un niveau de nutrition azoté plus élevé se traduit, à même durée de repousse, par une augmentation de la biomasse et des teneurs en minéraux ; la comparaison à même degré de croissance se traduisant évidemment par la seule augmentation des teneurs (figure 2). Seules les courbes de dilution des teneurs au cours de la croissance obtenues en conditions de nutrition azotée non limitante peuvent servir de référence pour le diagnostic concernant les divers minéraux.

2. Modèle de prélèvement de l'azote et des minéraux au cours de la croissance

La loi décrivant ces prélèvements est la conséquence mathématique simple de l'équation de dilution, le prélèvement cumulé à un instant donné étant le résultat du produit entre la biomasse et la teneur au même moment, d'où l'équation

$$E \text{ prélevé} = 10 \alpha (MS)^{1-\beta} \quad (\text{équation 2})$$

Cette équation caractérise le fonctionnement du couple plante x milieu et permet l'étude précise des flux de prélèvement de différents minéraux dans le sol. Ceci pourrait conduire à renouveler, par des études de dynamique de croissance, certains aspects des relations entre l'offre du sol et « la demande » du peuplement végétal, ce qui permettrait sans doute d'aller au-delà de l'ancienne notion de « besoins d'une culture ».

3. Application à l'étude des prélèvements par le peuplement du végétal sur des durées plus longues.

Ceci est particulièrement intéressant pour les prairies puisqu'elles sont exploitées pendant plusieurs années par plusieurs récoltes annuelles, mais aussi pour des études sur plusieurs années de diverses successions culturales sur la même parcelle.

Les quantités cumulées d'un élément E prélevé par le peuplement de graminées au cours des saisons, exploitations successives d'herbe avec des vitesses de croissance différentes et/ou au cours d'années successives, sont reliées à la biomasse récoltable par une équation générale du type :

$$(E_{\text{prélevé}})_{\text{cum}} = \alpha (MS_{\text{cum}})^b \quad (\text{équation 3})$$

Dans de nombreux cas il s'agit d'une relation linéaire (b=1) :

$$(E_{\text{prélevé}})_{\text{cum}} = \alpha (MS_{\text{cum}})$$

la pente de cette droite, α , a la dimension d'une teneur (E%), teneur moyenne ajustée qui traduit une constante de comportement, une situation en équilibre stable (entrées<->sorties).

Dans d'autres cas, il s'agit d'une relation du type puissance : la valeur du coefficient b, ou plus exactement son écart à la valeur 1 (situation d'équilibre), traduit le degré d'appauvrissement (b<1) ou d'enrichissement (b>1) du milieu (figure 3).

4. Un deuxième outil pour maîtriser la variation des teneurs : une relation linéaire entre teneurs en azote et teneurs en minéraux.

Au cours de la croissance, et de manière régulière, les diminutions concomitantes des teneurs en azote (N%) et en minéraux (M%, pour les minéraux dont la teneur suit la loi de dilution) se traduisent par une relation linéaire entre teneurs :

$$M\% = a (N\%) + b \quad (\text{équation 4})$$

En conditions de nutrition minérale satisfaisante, cette relation linéaire est indépendante du niveau de nutrition azotée du peuplement (figure 4) et peut être assimilée à une droite de référence d'un état de nutrition minérale satisfaisant.

4.1 – Application au diagnostic de la nutrition minérale au cours de la croissance.

Toute prairie peut être caractérisée par l'analyse minérale d'un échantillon d'herbe représentatif. La distance du point (M%, N%), correspondant à l'échantillon analysé, à la droite de référence représentant un état de nutrition satisfaisant permet un diagnostic graphique (19, 20) ; l'écart à la normale est visualisé (figure 5)

Des zones caractéristiques d'états de nutrition différents peuvent ainsi être délimitées sur le graphique (20) :

- Zone à état de nutrition satisfaisant : une augmentation des apports en M ne permet pas d'accroître la production, il y a seulement augmentation de la teneur (M%). Ceci correspond aux classiques consommations « de luxe ».
- Zone à état de nutrition excédentaire : une diminution des apports de M n'entraîne pas de diminution de la production mais seulement une diminution des teneurs M%.
- Situation à surveiller : un apport supplémentaire de M n'entraînera pas systématiquement d'augmentation de la production (la réponse est fonction des conditions climatiques de la saison).

- Zone à état de nutrition insuffisant : un apport plus important de M entraîne une augmentation de la production et de la teneur en M. Le degré de déficience est proportionnel à l'écart graphique entre le point (M%, N% représentant la parcelle) et la zone de référence caractérisant l'état de nutrition satisfaisant.

De même que pour la nutrition azotée (8), le diagnostic de nutrition minéral peut aussi être fait par calcul d'indices qui représentent l'écart à la droite de référence.

Des indices ont été proposés sur peuplements prairiaux (2) :

- pour le phosphore : $iP = 100 P\% / (0.15 + 0.065 N\%)$,
- pour le potassium : $iK = 100 K\% / (1.6 + 0.525 N\%)$.

Des valeurs d'indices supérieures à 120 correspondent à un état de nutrition excédentaire en l'élément considéré, des valeurs comprises entre 80 et 120 à un état satisfaisant à très satisfaisant (> 100), des valeurs comprises entre 60 et 80 à un état de nutrition insuffisant et des valeurs inférieures à 60 à un état de nutrition très insuffisant.

4.2 – Application à l'estimation des réserves en minéral M facilement mobilisables dans le sol.

On a vu ci-dessus que le niveau de nutrition azotée agit sur la teneur en M et par conséquent sur le niveau de prélèvement de ce minéral par le peuplement végétal (M_{prlv}). Sous l'effet d'un apport d'azote supplémentaire (bande de terrain recevant une fertilisation azotée supplémentaire) la teneur M sera augmentée si l'offre du sol est suffisante. Nous avons donc, ainsi, un outil d'estimation de la capacité du sol à répondre à une demande plus élevée du peuplement végétal. C'est également un outil utilisable pour comparer les dynamiques de prélèvement dans des types de sol différents.

La figure 6 illustre ce comportement pour l'état de nutrition phosphatée d'une prairie permanente qui en l'absence de fertilisation phosphatée est jugé comme une situation à surveiller et qui se dégrade sous l'effet d'un apport d'azote, traduisant l'incapacité du sol à fournir au peuplement la demande supplémentaire en P. Par contre, ce même peuplement avec apport de fertilisation phosphatée, présente un état de nutrition satisfaisant et le sol est capable de répondre à la demande supplémentaire en P liée à l'apport supplémentaire d'azote (N% et P% augmentent, l'état de nutrition phosphatée reste satisfaisant).

4.3 – application à l'étude sur le long terme des relations entre prélèvement cumulé d'un minéral et prélèvement d'azote

$M_{prlv} = f(\text{niveau d'azote})$

L'ajustement des représentations $M_{prlv} = f(N_{prlv})$ à une relation de type puissance ($M_{prlv} = \alpha (N_{prlv})^\beta$) permet de visualiser sur le long terme des équilibres (β proche de 1) ou des déséquilibres (l'écart de β à la valeur 1 traduisant leur intensité) entre éléments dans les pratiques de fertilisation.

Par exemple, la figure 7 montre, sur une prairie de dactyle conduite en fauche sans apport de potassium, une stagnation des quantités cumulées de potassium prélevées, révélant une incapacité du sol à fournir la demande supplémentaire en potassium créée par une intensification de la fertilisation azotée. L'épuisement du sol en potassium a été d'autant plus rapide que le niveau de fertilisation azotée était élevé.

Un autre exemple de déséquilibre est reporté figure 8, pour une prairie permanente conduite en régime azoté peu intensif. Sur cette parcelle une fertilisation phosphatée régulière et conséquente conduit à un enrichissement de l'herbe en phosphore au cours des années. Il permet aussi une meilleure valorisation de l'azote apporté puisque les quantités d'azote exportées par le peuplement

prairial augmentent significativement (+200 kg N sur 9 ans par rapport à la parcelle ne recevant pas de P). Cette représentation montre aussi que sur la parcelle ne recevant pas de phosphore, celui-ci est vraiment le premier facteur limitant à la fois pour la croissance et pour le prélèvement des autres éléments en particulier de l'azote.

5 – un exemple d'application à des enquêtes régionales.

L'outil de diagnostic proposé a été testé de 1994 à 1997 par un groupe de travail national sur la nutrition PK des prairies (3, 23), regroupant, l'INRA, L'institut de l'Elevage, l'ITCF de 7 chambres départementales d'agriculture (22, 25, 62, 63, 64, 71 et 76). D'autres groupes ont fonctionné à l'échelle de chambres régionales d'Agriculture (Basse-Normandie, Pays de la Loire). Ces différents groupes ont permis de tester la faisabilité de la méthode, son domaine de validité et le nombre important de prairies suivies permet de disposer d'état des lieux sur la nutrition PK des prairies en France. La gamme de prairies suivies est très large, tant au niveau de leur composition (prairies monospécifiques (graminées), prairies plurispécifiques (prairies temporaires de longue durée ou prairies permanentes)) que de leur exploitation (fauche ou pâture par des bovins ou des ovins) et des pratiques de fertilisation (conduite intensive avec forts apports, conduite plutôt extensive avec peu ou pas d'apports, apports sous forme organique ou minérale). Globalement sur 255 prairies suivies, les 2/3 présentent un état de nutrition phosphatée ou potassique satisfaisante, 1/4 des parcelles ont un état de nutrition phosphatée excédentaire (contre 17 % pour le potassium) et seulement 7 % des prairies présentent un état de nutrition phosphatée insuffisant, pour le potassium la part de ces prairies déficitaires augmente sensiblement (15 %). Selon ces résultats, les prairies françaises sont donc plutôt bien alimentées et l'on rencontre plus de situations d'excès que de situations d'insuffisance.

CONCLUSIONS

Principal progrès : représentation de l'évolution des teneurs en fonction du degré de croissance et non plus d'un stade physiologique.

Intérêt de disposer d'un outil de diagnostic utilisant la plante comme révélateur de la fourniture du sol. De plus l'herbe c'est ce que va consommer l'animal : plus parlant pour l'éleveur. => outil de dialogue technicien – éleveur.

Démarche à long terme : outil de représentation de choix de pratiques à long terme, interprétation d'essais de longue durée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) COLNENNE C., MEYNARD J.M., REAU R., JUSTES E., MERRIEN A., 1998. – Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Ann. Bot.* 81, 311-317.
- (2) DURU M., THELIER-HUCHE L., 1997. – N and P-K status of herbage : use for diagnosis on grasslands. In Diagnostic procedures for crop N management *Les colloques de l'INRA*, 82, 125-138.

- (3) FARRUGGIA A., THELIER-HUCHE L., VIOLLEAU S., LEBRUN J.M., BESNARD A., 2000. – L'analyse d'herbe pour piloter la fertilisation phosphatée et potassique des prairies. Exemples d'application de la méthode. *Fourrages*, 164, 447-459.
- (4) HUCHE L., JOURDAN O., HNATYSZYN M., RAMON J., QUEMENER J., SALETTE J., 1990. – Nutrition azotée et potassique de peuplements prairiaux : évolution et équilibre à long terme. Influence du mode d'exploitation. *Fourrages*, 123, 223-239.
- (5) JUSTE E., MARY B., MEYNARD J.M., MACHET J.M., THELIER-HUCHE L., 1994. – Detremination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot.*, 74, 397-407.
- (6) LEMAIRE G., 1985. – Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* SCHREB.) pendant l'hiver et le printemps. Effet des facteurs climatiques. *Thèse d'état*, Université de Caen.96p.
- (7) LEMAIRE G., SALETTE J., 1984. – Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu, II Etude de la variabilité entre génotypes. *Agronomie*, 4 (5) 423-430 et 431-436.
- (8) 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. *XVIth Intern. Grassl. Congr.*, Nice, October 1989, 179-180.
- (9) LOUE A., 1984. – Blé, orge. In *l'analyse du végétal dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales*. Ed. Lavoisier Tec&doc, 810p., 643-666.
- (10) NEY B., DORE T., SAGAN M., 1997. The nitrogen requirement of major agricultural crops. Grain legumes. In *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Ed. G. Lemaire. Springer-Verlag, Berlin, 107-117.
- (11) PLENET D., LEMAIRE G., 1999. – Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil*, 216, 65-82.
- (12) 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.
- (13) SALETTE J., 1971. – Equilibre de la fertilisation des prairies de Pangola. Notes présentées aux journées techniques sur la Production Fourragère, 19-22 Janvier, Guadeloupe et Martinique. Publ. Mineogr ? ? ? station d'Agronomie, centre INRA, Petit Bourg, Guadeloupe, 45p.
- (14) SALETTE J., 1978. – Sulfur content in grasses during primary growth. *Symposium on Sulfur in Forages*, Wexford. Ed. Sulfur Institute, 142-152.
- (15) SALETTE J., 1982. – The role of fertilizers in improving herbage quality and optimization of its utilization. *Proceedings of the 12th International Potash Institute Congress*. Goslar, June 1982, 305 p.; Ed. I.I.P., Berne, 117-144
- (16) SALETTE J., 1989. – Possibilités de diagnostic de déficiences de la nutrition minérale par analyse du végétal : cas des graminées prairiales. In *Ennemis et Maladies des prairies*. G. Raynal Ed., Publ. INRA, 225-228
- (17) SALETTE J., 1992. – Approche de la dynamique du magnésium dans les peuplements prairiaux. In *Un point sur le magnésium en Agriculture*, ouvrage coordonné par M. Coppenet. Ed. INRA, 213-226.
- (18) 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. *CR Séances Acad. Sc. Paris*, 292, 875-878.
- (19) SALETTE J., HUCHÉ L., 1989. – The diagnosis of grassland mineral nutrient status through herbage analysis. *XVIth Intern. Grassl. Congr.*, Nice, October 1989, 65-66.

- (20) SALETTE J., HUCHÉ L., 1991. – Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par analyse de végétal : principes, mise en œuvre, exemples. *Fourrages*, 125, 3-18
- (21) SALETTE J, 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
- (22) 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.
- (23) THELIER-HUCHE L., BONISCHOT R., CONTAT F., SALETTE J., 1996. – Incidence à long terme d'une absence prolongée de fertilisation phosphatée sur prairie permanente. *Fourrages*, 145, 53-62
- (24) THELIER-HUCHE L, FARRUGGIA A., CASTILLON P., 1999. – L'analyse d'herbe, un outil pour le pilotage de la fertilisation des prairies temporaires et permanentes. *Plaquette COMIFER- ACTA, Institut de l'Elevage- ITCF*.32p.

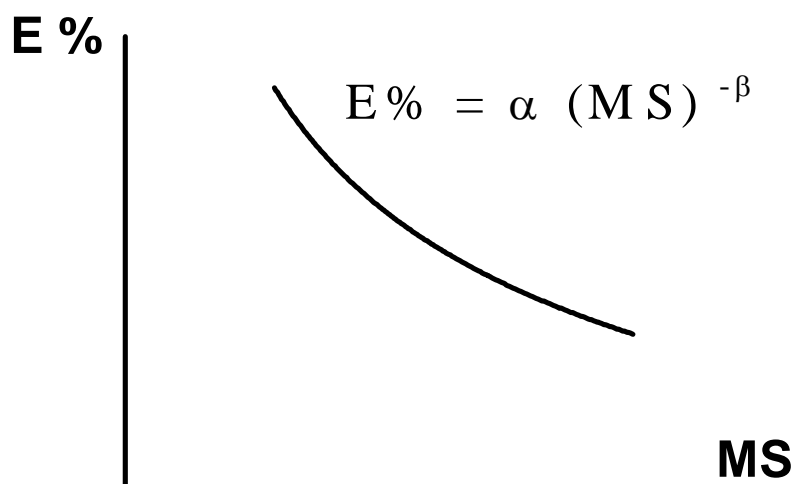


Figure 1 : Evolution de la teneur d'un élément E (exprimé en % de la matière sèche de l'échantillon prélevé) en fonction du degré de croissance (biomasse végétale élaborée exprimée en matière sèche (MS) par unité de surface). Formulation d'une loi de dilution : $E\% = \alpha (MS)^{-\beta}$ où α , appelé potentiel de teneur, est la teneur en E pour $MS = 1$, et où le coefficient $\beta (< 1)$ représente le coefficient de dilution.

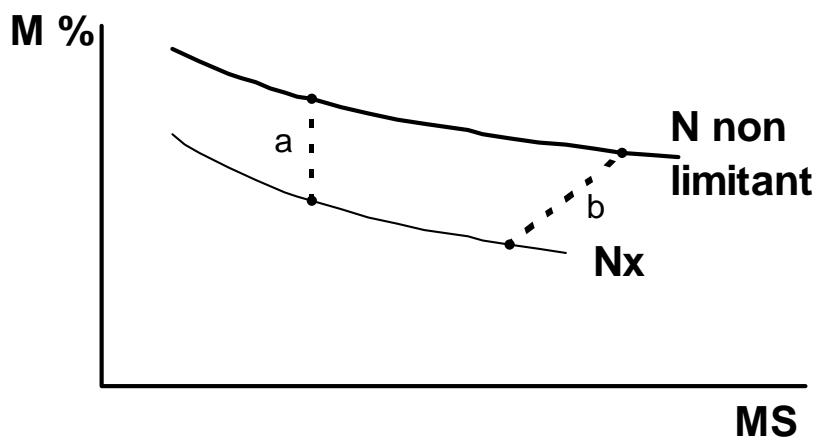


Figure 2 : Dilution des éléments minéraux (M) au cours de la croissance (exprimée en matière sèche). Incidence du niveau de nutrition. Pour deux niveaux de nutrition azotée, $N_x < N$ non limitant.

Un niveau de nutrition azoté plus élevé se traduit, pour une même biomasse, par des teneurs en M plus élevées (a), et, pour une même durée de repousse c'est à dire pour une même date de prélèvement, par une biomasse et une teneur plus élevées (b).

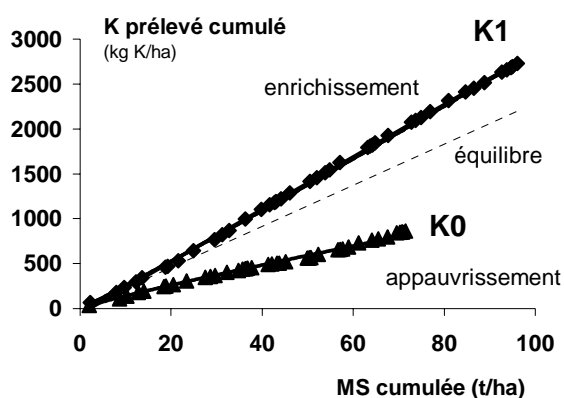


Figure 3 : Dynamique de prélèvement du potassium à long terme par une prairie permanente(essai SCPA - lycée agricole le Robillard, Calvados).

Cumul sur 7 ans (1978-1984) des prélèvements de potassium en fonction des quantités de matière sèche produites cumulées coupe après coupe. Cas d'une parcelle exclusivement fauchée, recevant $320 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et deux niveaux de nutrition potassique K0 : aucun apport et K1 : $450 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. L'ajustement à une relation puissance montre pour K0 un appauvrissement du milieu et un enrichissement pour K1 (4). Equations de prélèvement :

Pour K0 : $K_{\text{cum}} = 17,97(\text{MScum})^{0,89}$, $r^2 = 0,996$,

Pour K1 : $K_{\text{cum}} = 22,87(\text{MScum})^{1,05}$, $r^2 = 0,995$

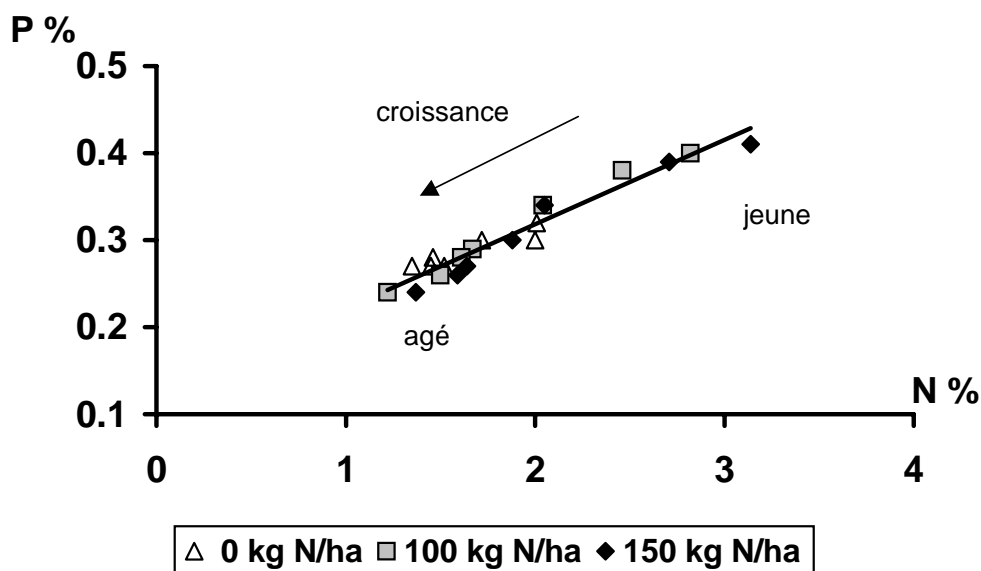


Figure 4 : Relation entre teneur en phosphore et teneur en azote d'un peuplement de Ray-grass anglais au cours de la croissance de printemps pour 3 niveaux de fertilisation azotée (Le Pin au Haras, 1987) (20).

FERTILISATION

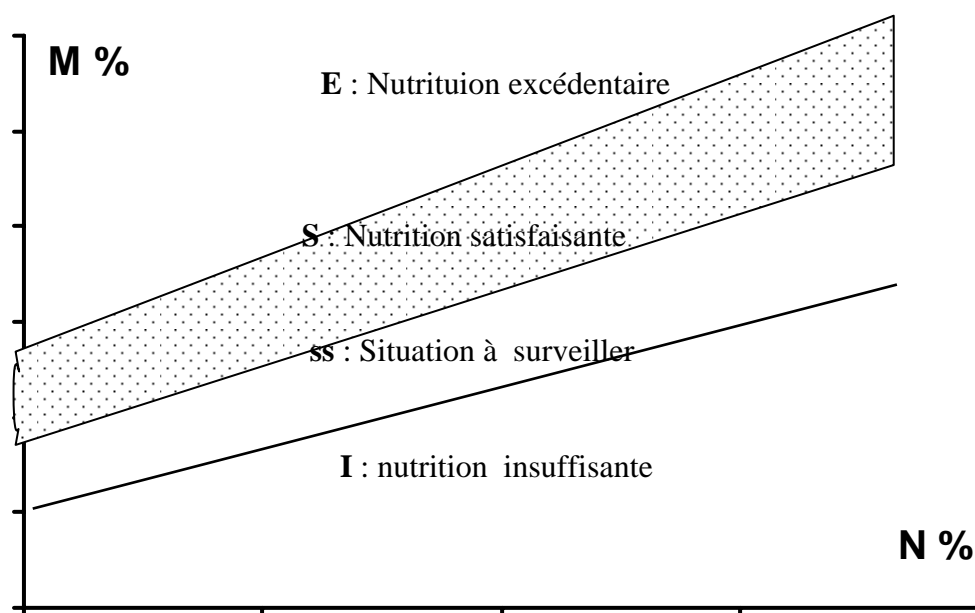


Figure 5 : Diagnostic de nutrition minérale sur prairies par analyse d'herbe. Méthode graphique d'interprétation (19). Toute parcelle, représentée par la composition minérale d'un échantillon d'herbe(M%, N%), peut être située sur cet abaque. Sa position dans l'une des zones définies permet de formuler un diagnostic sur son état de nutrition.

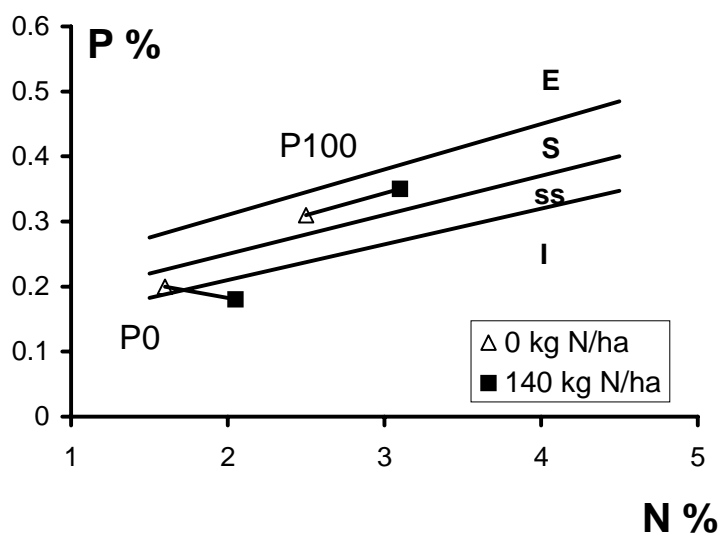


Figure 6 : Exemple de diagnostic de nutrition phosphatée sur une prairie permanente (essai SNST – Vosges) conduite avec deux niveaux de fertilisation phosphatée (0 et 100 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$, sous forme de scories Thomas) et deux niveaux de fertilisation azotée (0 ou 140 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$, sous forme d'ammonitrate). En l'absence de fertilisation phosphatée, l'état de nutrition phosphatée de la parcelle est considéré comme à surveiller; il se dégrade sous l'effet de l'apport d'azote, traduisant l'incapacité du sol à fournir la demande supplémentaire en P du peuplement prairial, résultant d'un niveau plus élevé d'azote. Par contre, avec fertilisation phosphatée, la prairie présente un état de

nutrition phosphatée satisfaisante et le sol est capable de répondre à la demande supplémentaire en P liée à l'apport d'azote (23).

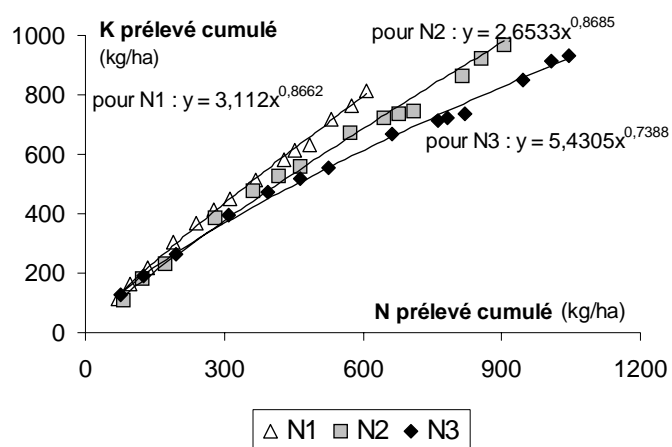


Figure 7 : relation entre le prélèvement de potassium et le prélèvement d'azote à long terme (4 ans) sur une prairie de dactyle conduite en fauche et ne recevant pas de fertilisation potassique (essai SCPA – Laval – Mayenne), avec 3 régimes de fertilisation azotée : N1, N2 et N3 correspondant respectivement à des apports de 200, 300 et 400 kg N.ha⁻¹.an⁻¹, sous forme d'ammonitrate). L'ajustement des relations à des fonctions puissance ($K_{cum} = \alpha (N_{cum})^\beta$) montre l'appauvrissement du milieu en K (écart de β à la valeur 1).

Equations d'ajustement des relations :

- pour N1 : $K_{cum} = 3.11 (N_{cum})^{0.866}$, $r^2 = \text{à compléter}$
- pour N2 : $K_{cum} = 2.65 (N_{cum})^{0.868}$, $r^2 = \text{à compléter}$
- pour N3 : $K_{cum} = 5.43 (N_{cum})^{0.739}$, $r^2 = \text{à compléter}$

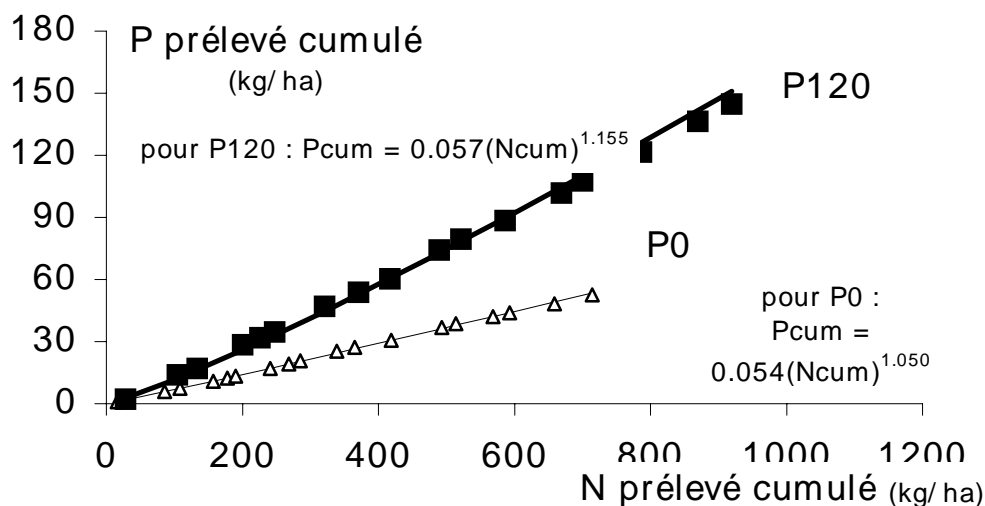


Figure 8 : relation entre le prélèvement de phosphore et le prélèvement d'azote à long terme (9 ans) sur une prairie permanente conduite en fauche (essai SNST – Voges), recevant 70 kg N.Ha⁻¹.an⁻¹, sous forme d'ammonitrate – Mayenne), avec 2 régimes de fertilisation phosphatée : P0 : aucun apport de phosphore et P120 : 120 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹, sous forme de scories Thomas (23). L'ajustement des relations à des fonctions puissance ($P_{cum} = \alpha (N_{cum})^\beta$) montre l'enrichissement du milieu en P (écart de β à la valeur 1).

Equations d'ajustement des relations :

- pour P0 : $P_{cum} = 0.054 (N_{cum})^{1.005}$, $r^2 = \text{à compléter}$
- pour P120 : $P_{cum} = 0.057 (N_{cum})^{1.155}$, $r^2 = \text{à compléter}$

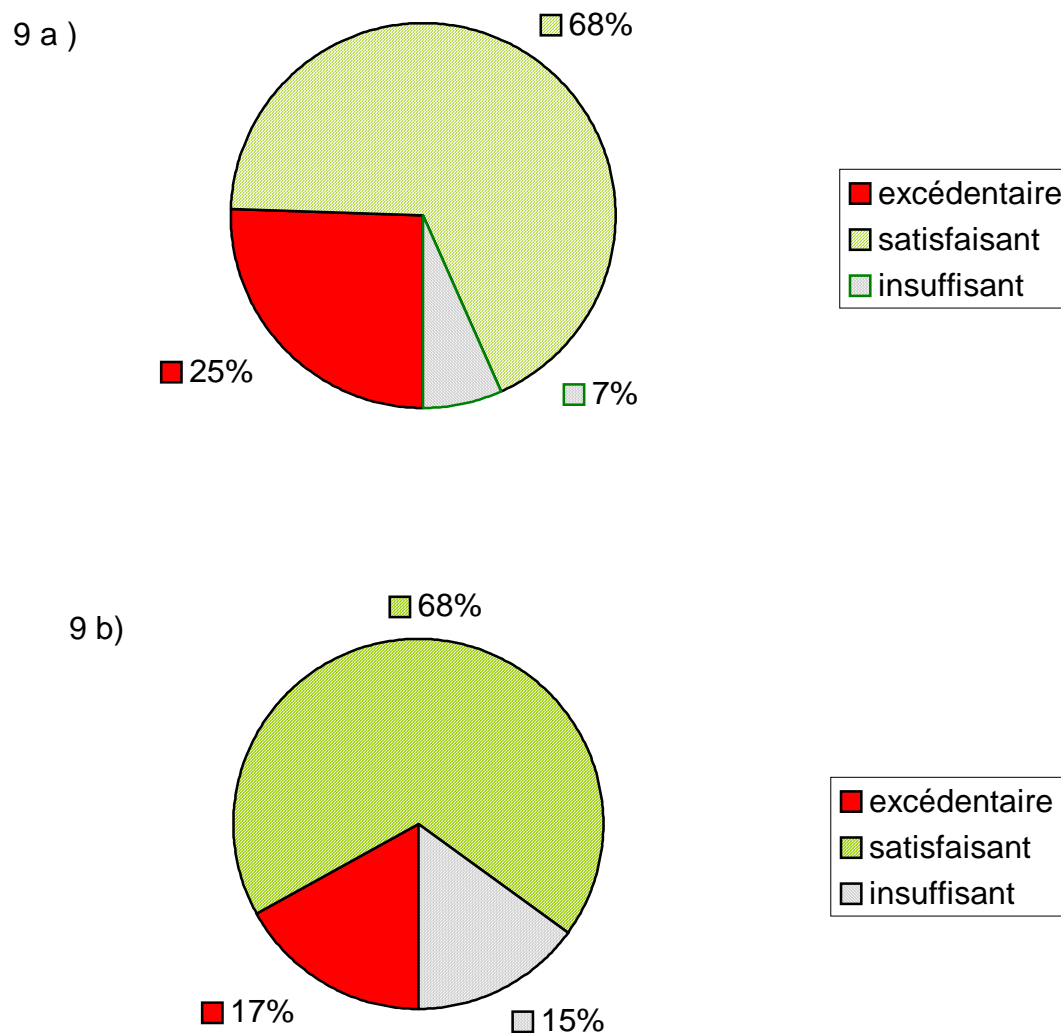


Figure 9 : Résultat d'une enquête sur la fertilité des sols de prairies réalisée sur 255 prairies en France, selon la méthode de diagnostic par analyse d'herbe (24). (a) : état de nutrition phosphatée, (b) : état de nutrition potassique.