

Les ressources P-K du sol peuvent-elles être des facteurs limitant la pérennité des prairies ?

F. Gastal¹, C. Jouany², M.-L. Decau¹

1 : INRAE, UE FERLUS, 86600, Lusignan, France

2 : INRAE, UMR AGIR, 31326, Castanet-Tolosan, France

Résumé

Depuis une quinzaine d'année, il est observé à l'échelle nationale une diminution des pratiques de fertilisation minérale, notamment en P et surtout en K. De ce fait, la question se pose de savoir si ces diminutions de fertilisation minérale peuvent expliquer la diminution de production et la perte de pérennité observées sur le terrain dans un certain nombre de situations.

Des outils de diagnostic, basés sur l'analyse d'herbe (indices de nutrition N, P et K) ou sur l'analyse de sol (pour les prairies temporaires), ont été proposés depuis un certain nombre d'années.

La pertinence de ces outils est illustrée sur trois dispositifs expérimentaux de longue durée, en prairie temporaire et en prairies permanentes. Ces dispositifs permettent d'illustrer que la nutrition P et/ou K peut devenir limitante si l'entretien de la fertilité n'est pas suffisant, et expliquer au moins pour partie leur baisse de production et de pérennité. Les résultats montrent également que ces contraintes P-K sont très liées au bilan minéral à la parcelle, et que ces bilans minéraux sont en prairie extrêmement variables selon les modes de gestion et selon les modes d'exploitation appliqués. La pertinence et les limites des indicateurs de nutrition végétation et sol utilisés sur prairie et cultures fourragères sont discutées.

Mots-clé : prairie, production, pérennité, phosphore, potassium, analyse de sol, indice de nutrition

Introduction

La pérennité des prairies, c'est-à-dire le maintien au cours des années de leur niveau de production, de leur composition notamment en légumineuses et de la valeur pastorale des espèces qui la composent, a fréquemment tendance à diminuer avec leur âge (Voisin, 1960 ; Agreste, 2010 ; Vertès et *al.*, 2022). Ce problème est notamment observé sur les prairies temporaires après leur 3^{ème} année. Parmi les différentes hypothèses qui peuvent expliquer cette perte de production ou de composition des prairies, une insuffisance de la fumure d'entretien et la baisse consécutive de fertilité du sol sont des éléments évoqués dans certaines situations (Lemoine et *al.*, 2020).

Face à l'augmentation du coût des engrais, on observe effectivement depuis un certain nombre d'années une tendance à la réduction ou même à des impasses de fertilisation P et K. En effet, les données des enquêtes nationales sur les prairies montrent que si les surfaces fertilisées en engrais minéraux avaient largement augmenté entre 1981 et 1998, surtout pour N et K, les surfaces fertilisées en P et K minéral ont en revanche fortement régressé entre 2001 et 2017 (SCEES 1984, 1998 ; Agreste 2004, 2020). Les doses d'engrais minéral apportées sur les parcelles fertilisées ont, elles-aussi, fortement diminué de 1982 à 2017, aussi bien pour N, P et K. Les surfaces et quantités de fumures organiques épandues ont en revanche augmenté entre 2001 et 2017. Toutefois cette augmentation des surfaces avec apports organiques ne compense sans doute pas, de loin, les diminutions de surfaces et doses de fertilisants minéraux. Ainsi, bien qu'une partie des sols français ait accumulé des stocks importants de P et K du fait des fertilisations importantes des années 1980-2000, les baisses de fertilisation enregistrées sur prairie dans les 15 dernières années peuvent, dans certaines situations, créer des carences plus ou moins prononcées.

Ainsi en Moselle il était montré qu'en 2009, si une majorité des parcelles étaient bien pourvues en P, en revanche plus de 25% des prairies étaient nettement déficitaires en K (Lamy, 2010). Plus récemment, une étude conduite dans le Grand Est montrait que la situation s'est largement dégradée depuis le début des années 2000, puisque sur l'ensemble des parcelles enquêtées, on passait de 8% à 20% de parcelles carencées en P entre les périodes 1994-2001 et 2014-16, et de 28% à 59% de parcelles carencées en K dans le même temps (CA Lorraine, 2018).

La dynamique de la fertilité sous prairies et cultures fourragères est dépendante de nombreux facteurs liés au milieu et à la gestion. Les pratiques antérieures de fertilisation, les précédents culturels et la nature

des sols sont des éléments importants. Les pratiques de gestion en cours (niveau et nature, organique ou minérale, de la fertilisation, restitutions directes de résidus, restitutions indirectes via les déjections des animaux au pâturage), sont également des facteurs qui contrôlent la dynamique des nutriments et la fertilité des sols dans les systèmes fourragers (Jeangros et Sinaj, 2018a ; Jeangros et Sinaj, 2018b).

Les objectifs de cette communication sont : a) de montrer comment l'utilisation d'outils de diagnostic adaptés aux prairies, notamment les indices P-K déterminés sur végétation, permet une analyse quantitative de l'évolution à long terme de la fertilité P et K, et de ses implications sur la productivité et la pérennité des prairies ; b) de montrer que cette dynamique est très dépendante du mode de gestion des prairies (fauche ou pâture, fertilisation) et des rotations prairies-cultures (notamment la durée de la phase prairie).

Cette communication s'appuie sur les résultats de plusieurs dispositifs de longue durée : le dispositif d'observation ACBB de Lusignan, en prairies temporaires en rotation, et les dispositifs de fertilisation de longue durée d'Ercé (09) et de Gramond (12), sur prairies permanentes.

1. Les outils pour caractériser la disponibilité en N-P-K des prairies

Les deux démarches classiques de l'agronomie pour caractériser la disponibilité en minéraux, sont l'analyse de sol, utilisée essentiellement sur cultures, et l'évaluation d'indices de nutrition dérivés des analyses sur la végétation. Les indices de nutrition ont initialement été établis sur prairies semées à flore simple, et ont été ensuite étendus sur prairies permanentes et sur certaines cultures.

1.1. Les indices de nutrition

La méthode s'appuie sur le principe de dilution des éléments minéraux comme l'azote, le phosphore et le potassium, qui se produit au cours de la croissance des couverts végétaux. Cette dilution se traduit par une diminution de la concentration en N, P et K du couvert au fur et à mesure que la quantité de biomasse augmente lors de sa croissance. Les principes liés à la dilution et aux indices N sont rappelés ici car l'analyse des dynamiques de P K conduite plus loin fait aussi appel à l'interaction avec les niveaux de disponibilité et la dynamique de nutrition N.

Salette et Lemaire (1981) ont établi le principe de dilution concernant l'azote, et établi une courbe de dilution « critique », représentant la teneur en azote minimale pour obtenir une croissance non-limitante (Figure 1A). Cette courbe de dilution « critique » est exprimée en fonction de la biomasse qui s'accumule progressivement au cours d'un cycle de croissance. Toute augmentation de la teneur en N au-delà de la concentration critique n'entraîne pas d'augmentation du rendement, tandis que toute diminution en deçà entraîne une réduction de croissance quasiment proportionnelle. Des courbes de dilution de l'azote ont été testées et validées par la suite sur différentes espèces de graminées et légumineuses fourragères pérennes (Lemaire et Salette 1984 sur fétuque élevée ; Lemaire et Denoix 1987 sur dactyle ; Marino et al., 2004 sur raygrass ; Lemaire et al., 1985 sur luzerne) et annuelles (Plénet et al., 2000 sur maïs). Dans le cas des graminées fourragères comme la fétuque élevée, le dactyle ou le raygrass, la teneur critique en N est donnée par :

$$\mathbf{N \text{ critique} = 4,8 (MS)^{-0,33}}$$

De manière analogue, les concentrations minimales en P et en K du couvert qui permettent une croissance non-limitante correspondent aux teneurs critiques en P et en K. Les éléments P et K suivant le même principe de dilution au cours de la croissance du couvert que N, les teneurs critiques en P et K sont chacune exprimées en fonction de la teneur en azote (Figures 1B, 1C; Salette et Huché, 1981 ; Duru et Théliier-Huché, 1997; Théliier-Huché et al., 1999) :

$$\mathbf{P \text{ critique} (\%) = 0,15 + 0,065 \text{ N\% mesuré}}$$

$$\mathbf{K \text{ critique} (\%) = 1,6 + 0,525 \text{ N\% mesuré}}$$

Les relations critiques pour P et K sont celles établies sur prairie semée de graminées (Salette et Huché, 1981) et testées aussi sur prairie permanente (Duru et Théliier-Huché, 1997). Sur maïs, une relation différente a été proposée pour P (Ziadi et al., 2007). Il n'en n'existe pas pour K.

Ces courbes critiques sont utilisées pour calculer l'indice de nutrition, qui permet de faire un diagnostic sur le niveau de nutrition du couvert. L'indice de nutrition exprime l'écart au comportement non-limitant donné par la courbe critique (Figure 1D). Il est calculé à partir du rapport entre la concentration en un élément N, P ou K mesurée sur un couvert donné, et la concentration critique en cet élément. Il est souvent exprimé en pourcent. Cet indice peut aussi bien être appliqué à N (Gastal et al., 1992 ; Lemaire et Gastal 1997) qu'à P ou K (Duru et Ducrocq, 1997) :

$$\mathbf{IN-N (P) (K) (\%) = 100 * \text{concentration N (P) (K) mesurée} / \text{concentration N (P) (K) critique}}$$

La valeur de l'indice reflète le niveau de satisfaction des besoins en N, P ou K du couvert. Il est utilisé pour faire un diagnostic : une valeur d'indice de 100 rend compte d'une nutrition optimale ; selon que la

valeur est inférieure ou supérieure à 100 l'absorption de l'élément considéré est, respectivement, insuffisante ou excessive.

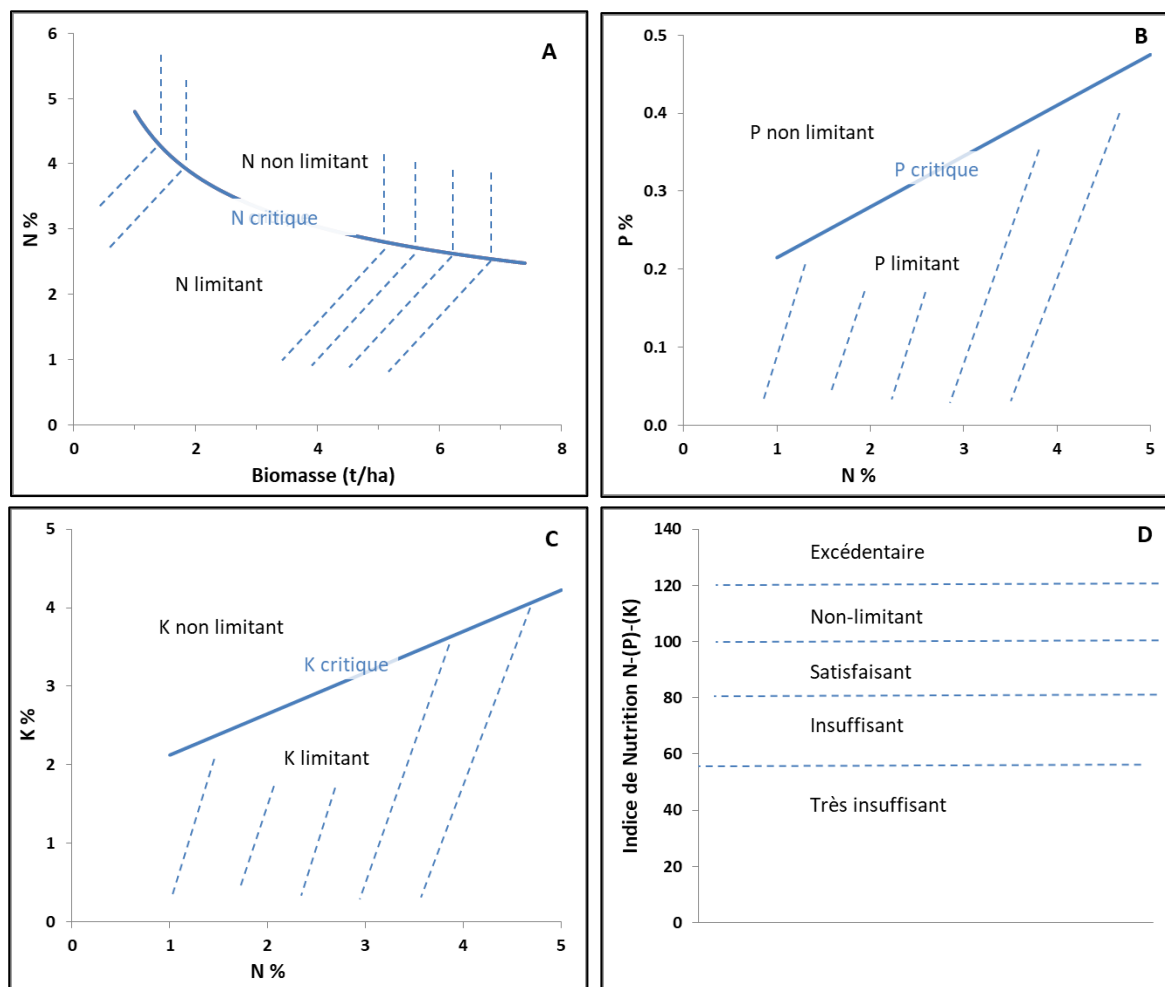


Figure 1 : principe des courbes critiques pour l'azote (A), le phosphore (B) et le potassium (C) et des indices de nutrition N, P et K qui en sont dérivés (D).

Sur le plan méthodologique, le prélèvement est fait sur des plantes ou un couvert végétal en conditions de croissances satisfaisantes, c'est à dire en dehors de période d'excès d'eau ou de sécheresse et ne présentant pas de signes d'attaque de bio-agresseurs. Il faut éviter les prélèvements sur biomasse faible (<1,5 t/ha) ou trop élevée (>7-8 t/ha). Pour les fourragères annuelles, le prélèvement doit être fait au plus tard à la floraison, car les remobilisations qui ont lieu durant les périodes de remplissage des grains perturbent les relations de dilution. Le mode opératoire consiste à prélever et évaluer la biomasse d'échantillons représentatifs de l'ensemble de la parcelle ; après séchage et broyage, ces échantillons sont analysés au laboratoire pour la détermination de leur concentration en N, P et K.

Plus récemment, des formules de correction (Jouany et al., 2005 ; Cruz et al. 2006) ou des proxys basés sur l'analyse des feuilles bien éclairées du couvert (Farruggia et al., 2004) ont été proposés pour le cas de prairies contenant des légumineuses.

1.2. Les analyses de sol

Différentes méthodes d'analyse existent pour évaluer le niveau de disponibilité en P (K) du sol. La grande majorité des méthodes disponibles en routine mobilisent des extractions chimiques qui mettent en solution une partie du P(K) présent dans le sol. Les réactifs utilisés agissent selon des mécanismes semblables à ceux mis en œuvre dans la rhizosphère pour libérer du P ou du K dans la solution du sol.

Pour le P, en France, trois méthodes sont utilisées en routine : la méthode Dyer (Dyer, 1894) réservée aux sols acides, la méthode Joret-Hébert (Joret et Hébert, 1955) destinée aux sols calcaires et la méthode Olsen (Olsen et al., 1954) initialement développée pour les sols neutres et alcalins. Cette dernière méthode est devenue la méthode de référence car elle est adaptée à tous types de sols et ses valeurs se rapprochent le mieux du compartiment du P effectivement biodisponible (Fardeau et al., 1988).

En ce qui concerne le K, les méthodes d'extraction de sol reproduisent les mécanismes d'échange ionique qui contrôlent le passage des cations du sol vers la solution où ils sont prélevés par les racines. Pour le K, en France, la principale méthode utilisée et la méthode du potassium échangeable (Metson, 1956).

Pour ces deux éléments P et K, l'indicateur de biodisponibilité obtenu par l'analyse de sol est mobilisé pour faire un diagnostic et raisonner la fertilisation. Les références issues d'essais de fertilisation P(K) conduits dans différents environnements pédoclimatiques ont permis d'identifier les valeurs de ces indicateurs pour les seuils de réponse à P (K), par culture et grand type de sol, et de raisonner la fertilisation (COMIFER, 2019). Il faut noter que les seuils ont été déterminés dans des conditions où seul P (ou K) sont limitants pour la croissance.

2. Evolution de la fertilité et conséquences sur l'évolution de la production de prairies en rotation : enseignements du dispositif d'observation ACBB de Lusignan

Le dispositif d'observation à long terme ACBB (Agro-écosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité) de Lusignan constitue une bonne illustration de l'évolution de la fertilité et de la production de prairies initialement semées, selon leur mode de gestion. Ce dispositif, implanté en 2005, est suivi depuis lors.

Brièvement (cf Gastal et al., 2022 pour plus de détails), les modalités expérimentales étudiées comprennent (Tableau 1):

- un sous-dispositif T1-T5 comprenant 5 modalités de rotation de prairies de fauche avec des cultures et permettant d'analyser l'effet de la durée de la phase prairie dans la rotation : des traitements de rotation dans lesquels la phase prairie est de 3 ans (T2) ou 6 ans (T3), alternant avec 3 années de succession maïs-blé-orge; des traitements « témoin culture » (T1, succession maïs-blé-orge) et « témoin prairie permanente » (T5, prairie semée en 2005 et maintenue depuis lors) ; une variante à faible fertilisation azotée du traitement rotation prairie de 6 ans-cultures 3 ans (T4) ;

- un sous-dispositif P1-P4 comprenant 4 modalités permettant de comparer les effets de la fauche et du pâturage, sur prairie permanente semée (respectivement P2 et P4) et sur rotation prairie 6 ans-cultures (respectivement P1 et P3). Les traitements P1 et P2 du sous-dispositif P1-P4, en fauche, sont équivalents aux traitements T3 et T5 du sous-dispositif T1-T5.

Tableau 1 : Rotations appliquées sur le dispositif expérimental SOERE ACBB de Lusignan.

	Année	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Sous-dispositif Fauche																			
T1	Rotation cultures (Maïs-Blé-Orge)	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
T2	Prairie 3 ans/ cultures 3 ans, N+	C1	C2	C3	Prairie 3 ans			C1	C2	C3	Prairie 3 ans			C1	C2	C3	Prairie 3 ans		
T3	Prairie 6 ans/ cultures 3 ans, N+	Prairie 6 ans						C1	C2	C3	Prairie 6 ans						C1	C2	C3
T4	Prairie 6 ans/ cultures 3 ans, N-	Prairie 6 ans						C1	C2	C3	Prairie 6 ans						C1	C2	C3
T5	Prairie permanente, N+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Sous-dispositif Fauche/Pâturage																			
P1 (=T3)	Prairie 6 ans, fauche, N+	Prairie 6 ans						C1	C2	C3	Prairie 6 ans						C1	C2	C3
P2 (=T5)	Prairie permanente, fauche, N+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P3	Prairie 6 ans, pâturage, N+	Prairie 6 ans						C1	C2	C3	Prairie 6 ans						C1	C2	C3
P4	Prairie permanente, pâturage, N+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Les prairies ont été semées en mélange de fétuque élevée, dactyle et raygrass anglais. Les parcelles fauchées ont subi 3 à 4 fauches par an selon les conditions météorologiques. Les parcelles pâturées ont été conduites en pâturage tournant de bovins en production laitière à un chargement moyen de 17 UGB/ha et une fréquence moyenne de 6 à 9 pâturages /an.

Les sols étaient très largement pourvus en P et K lors de la mise en place du dispositif en 2005. De ce fait, aucune fertilisation P-K n'a été apportée entre 2005 et l'été 2019. Une fertilisation PK de redressement a été apportée à l'automne 2019.

Le rendement annuel des prairies a diminué progressivement de 2005 à 2019 sur toutes les prairies, et a diminué dans une moindre mesure sur la rotation cultures. La diminution de rendement a été la plus forte pour les prairies de fauche, aussi bien permanentes qu'en rotation longue (T5, P2, T3, P1 ; perte moyenne de rendement de 0,53 t MS/an), intermédiaire pour les prairies de fauche en rotation courte, pour les cultures et pour les prairies pâturées (T2, T1, P3, P4 ; perte moyenne de rendement de 0,30 t MS/an), et la plus faible pour la prairie peu fertilisée en N (T4 ; perte moyenne de rendement de 0,09 t MS/an).

L'indice de nutrition en azote est resté relativement stable (IN-N de 50 à 60 %) sur l'ensemble des prairies et des années (non montré). L'indice de nutrition P, non-limitant (120%) dans les premières années, a progressivement diminué mais s'est maintenu entre 80 et 110% jusqu'en 2019 (non montré), indiquant que la nutrition P est restée satisfaisante sur pratiquement tous les traitements. En revanche, l'indice de nutrition K, initialement de 120%, a fortement chuté et est devenu très limitant (30%) sur les prairies de fauche (Figure 3A). L'indice de nutrition K est par contre resté satisfaisant (80-100%) sur les prairies pâturées (Figure 2B).

On peut noter que lors d'une transition de prairie vers culture, l'indice de nutrition K remonte transitoirement (T2 en 2010 et T3 en 2015). La libération probable de K dans le sol suite à la destruction des prairies et à la mortalité de leur importante biomasse aérienne et racinaire, explique probablement cette observation.

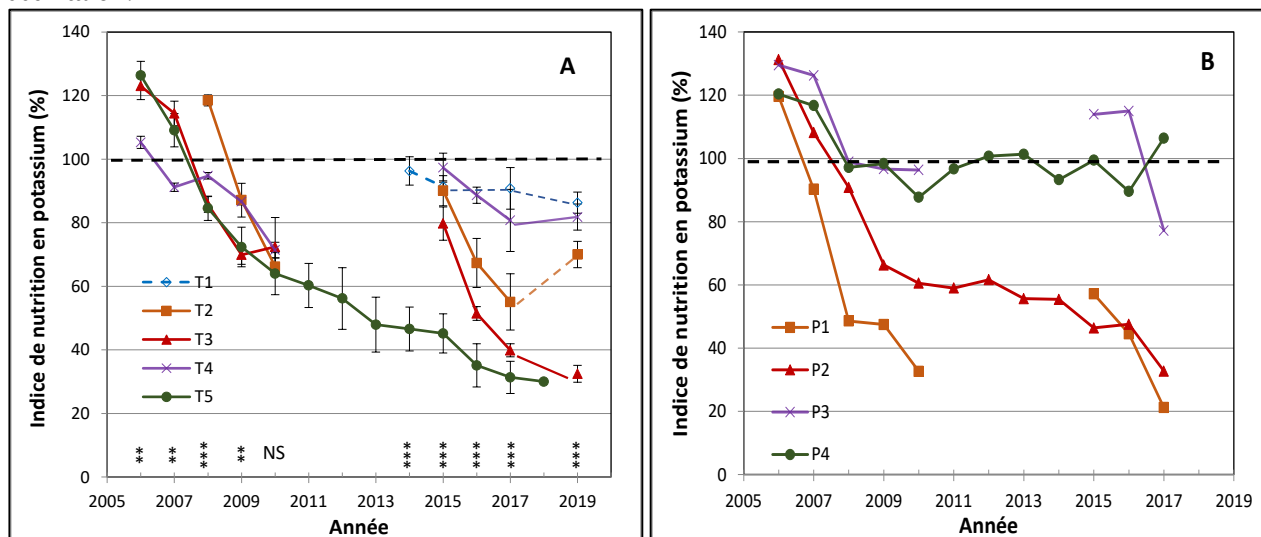


Figure 2 : Evolution de l'indice de nutrition IN-K sur les prairies des différents traitements (T5, P2 : prairie permanente semée et fauchée ; T2, T3, P1 : prairies fauchées en rotation ; P4 : prairie permanente semée et pâturée ; P3 : prairie pâturée en rotation).

Ainsi, la chute de productivité des prairies de fauche s'explique dans une large mesure par la diminution de leur nutrition K. La fertilisation de redressement apportée fin 2019 permet effectivement une remontée de la production de ces prairies en 2020-21 (non montré), confirmant, s'il le fallait, ce diagnostic de déficience en K.

Les bilans de K à la parcelle, calculés comme la différence entre les apports de K par fertilisation (nuls ici puisque pas de fertilisation K), les restitutions estimées (parcelles pâturées) et les quantités de K exportées par les prairies et les cultures (cas des rotations), diffèrent fortement entre traitements (Figure 3). Le bilan de K est le plus négatif dans le cas des prairies de fauche (T3, T5, P1, P2), qui exportent des quantités élevées de K. Inversement, le bilan de K est le moins négatif pour les prairies pâturées (P3, P4), sur lesquelles le pâturage assure une restitution importante (91% de restitution selon Lançon, 1978). Enfin, le bilan est intermédiaire pour les cultures (T1) et pour les prairies en rotation courte (T2) ou peu fertilisées en N (T4).

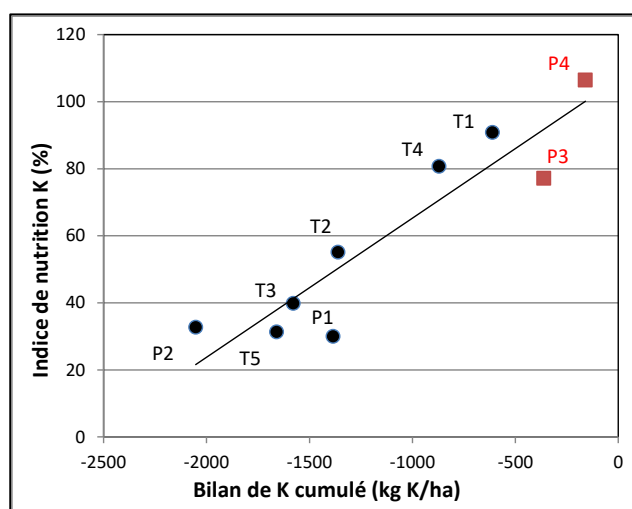


Figure 3 : Relation entre les bilans de K (imports – exports) cumulés sur la période 2005-17, et les indices de nutrition K en 2017, selon le mode de gestion des parcelles (noir : parcelles fauchées ; rouge : parcelles pâturées. Cf Figure 1 pour le détail des codes parcelle).

Ainsi, sur l'ensemble des traitements, il apparaît que la chute d'indice de nutrition K est très dépendante du bilan K à la parcelle, qui varie fortement selon le mode de gestion des prairies.

3. Réponse à P et à N - Enseignements de deux dispositifs de longue durée en prairie permanente

Les dispositifs de Ercé et de Gramond, implantés sur prairie permanente, complètent celui de Lusignan ; ils ont pour objectif d'analyser l'impact de régimes de fertilisation N et P contrastés, sur deux types de sol distincts. Le site d'Ercé, en Ariège, suivi entre 1999 et 2018, est caractérisé par un sol argilo-limoneux d'alluvion tandis que le site de Gramond, suivi entre 1998 et 2014, localisé dans l'Aveyron, se caractérise par un sol limono sableux.

Sur chaque site, deux niveaux de fertilisation P, P0 et P50, recevant respectivement 0 et 50 kg P/ha/an apportés en février sous la forme de triple super phosphate, étaient croisés à deux niveaux de fertilisation N, N0 et N1, recevant respectivement 0 et 160 kg N/ha/an, apportés en février et après la première coupe sous forme d'ammonitrate. Du K était également apporté sous la forme de KCl, à la dose de 200 kg K/ha/an, pour assurer une nutrition K optimale quels que soient les niveaux de fertilisation N et P.

La quantité de P disponible dans le sol a été mesurée lors de la mise en place des essais (Olsen et al, 1954). A Ercé les teneurs correspondent à des niveaux de fertilité P limitants alors qu'à Gramond le sol est largement pourvu en P, du fait d'apport importants de scories dans les années 60-70.

3.1. Impacts de la fertilisation N et P sur la production

Pour les deux sites, les impacts des apports de N et de P sont analysés sur la biomasse annuelle totale.

Quel que soit le traitement, on observe une variabilité interannuelle de la production fourragère, plus marquée à Ercé qu'à Gramond, qui est à mettre en relation avec la variabilité climatique. A Ercé, selon l'année la pluviométrie varie entre 400 mm et 1026 mm sur la période comprise entre le 1^{er} février et la date de la première fauche ; sur la même période, selon l'année, la somme des températures varie entre 162 °C (2002) et 407 °C (2005).

L'analyse de variance à deux facteurs, N et P, montre un effet N sur la production annuelle totale significatif 10 années sur 19 à Ercé et 12 années sur 16 à Gramond. L'augmentation moyenne de matière sèche permise par l'apport de N (N1- N0) est de 3,5 t / an à Ercé et de 2,9 t /an à Gramond.

L'effet P est significatif, uniquement à Ercé, 2 années sur 19. En l'absence de fertilisation N (N0) l'apport de P augmente significativement la production pour une seule campagne (2006). En présence de fertilisation N (N1), l'apport de P augmente significativement la production 13 années sur 19. On ne mesure pas d'effet significatif de P à Gramond. L'augmentation moyenne de la production permise par l'apport de P (P1- P0) est de 2 t/an à Ercé et de 0,8 t/an à Gramond.

Pour un niveau de N donné, l'indice de rendement (I.R.) qui correspond au ratio de la production annuelle totale du traitement P0 sur celle du traitement P1, reste stable à Gramond et égal en moyenne à 96% et 87% pour les traitements N0P0 et N1P0, respectivement (non montré).

A Ercé, I.R. diminue progressivement entre 1999 et 2017 et passe de 99 % à 85 % pour le traitement N0 et de 96% à 59% pour le traitement N1 (non montré) ; ce résultat confirme que l'impact d'une limitation en P sur la production de fourrage est plus important en présence de fertilisation N.

Enfin, on observe une interaction positive entre N et P à Ercé 6 années sur 19 : l'augmentation de production liée à l'apport de P dépend du niveau de N.

3.2. Impact de la fertilisation N et P sur l'état nutritionnel de la prairie

Pour les deux sites, l'impact d'un apport de N et de P est analysé sur les indices de nutrition mesurés sur le premier cycle de croissance.

◆ Réponse de l'indice N à la fertilisation N et P

Sur l'ensemble de l'étude l'IN-N moyen est de 59% pour les parcelles sans azote (N0P0 et N0P1) et 82% pour les parcelles avec (N1P0 et N1P1) à Ercé et de 56% (N0P0 et N0P1) et 80% (N1P0 et N1P1) à Gramond. Pour les deux sites et quel que soit le traitement, on n'observe pas de tendance à l'augmentation ou à la diminution de l'IN-N avec le temps.

Sur les deux sites on observe un effet significatif de la fertilisation N sur l'indice de nutrition N pour l'ensemble des prélèvements excepté à Gramond (1999 et 2001) où l'absence de réponse à N s'explique par la

présence de trèfle blanc dans les échantillons analysés. A Ercé l'effet positif d'un apport de P sur l'IN-N est significatif en 2006 et 2007. Il n'y a pas d'effet positif de la fertilisation P sur l'IN-N à Gramond.

Ces résultats montrent que lorsque P est limitant, cas d'Ercé, un apport de P améliore la croissance et se traduit par une augmentation du niveau de nutrition N de la prairie ; dans le cas où P n'est pas limitant, comme à Gramond, un apport de P n'a pas d'effet significatif sur la croissance et le niveau de nutrition N. Enfin, sur le site d'Ercé, on note un effet d'interaction négative sur IN-N à 5 dates ; le manque de P a limité la croissance et donc la dilution du N pour le traitement N1P0 en comparaison avec N1P1.

◆ Réponse de l'indice P à la fertilisation N et P

Sur l'ensemble de l'étude l'IN-P moyen est de 70% pour les parcelles sans phosphore (NOPO et N1P0) et 116% pour les parcelles avec (NOP1 et N1P1) à Ercé, et de 107% (NOPO et NOP1) et 128% (NOP1 et N1P1) à Gramond.

Sur le site d'Ercé, on observe un effet significatif et positif de la fertilisation P sur l'IN-P pour l'ensemble des dates à Ercé et 11 années sur 17 à Gramond. En parallèle, on observe un effet significatif de la fertilisation N sur l'IN-P pour 15 dates sur 19 à Ercé et 12 dates sur 17 à Gramond. Dans tous les cas exceptées deux années à Gramond (1998 et 2009), l'apport d'azote se traduit par une diminution qui rend compte de la dilution des éléments minéraux avec la croissance augmentée par l'apport de N.

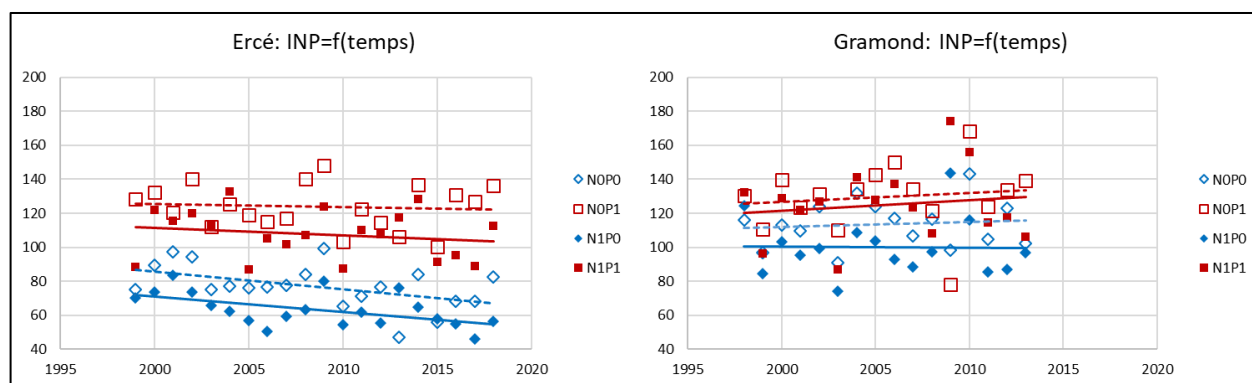


Figure 4 : Evolution de l'INP dans le temps à Ercé et Gramond.

A la différence de l'INN qui reste stable sur la durée de l'expérimentation, on observe à Ercé une diminution progressive de l'INP avec le temps (Figure 4) qui ne s'observe pas à Gramond (Figure 4). L'évolution de l'indice INP avec le temps met en évidence les contrastes entre les deux sites. Dans le cas d'Ercé où les réserves du sol sont faibles, un apport de N entraîne une diminution de l'indice P qui se maintient à des valeurs suffisantes (>80%) lorsque les parcelles sont fertilisées en P. En l'absence de fertilisation P, les réserves du sol ne sont pas suffisantes pour satisfaire les besoins en P du couvert, plus importants en N1 qu'en N0, et diminuent progressivement sur la durée de l'essai. Parallèlement l'IN-P diminue au-delà de 80% et la production de fourrage est réduite. A l'opposé, sur le dispositif de Gramond où les réserves en P du sol sont importantes, l'IN-P se maintient à des niveaux de nutrition satisfaisants quel que soit le régime de fertilisation N et ce malgré l'épuisement des réserves avec le temps.

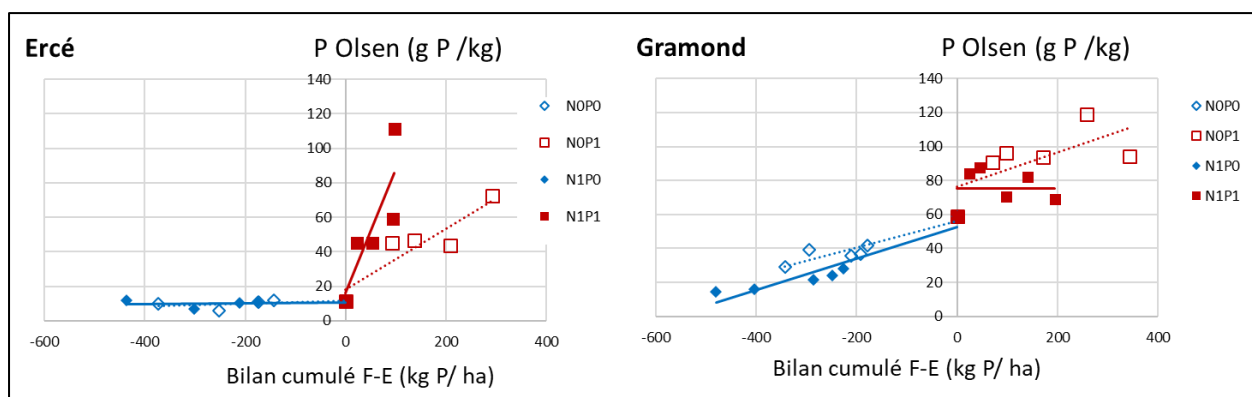


Figure 5 : Relation entre le P disponible, estimé par la méthode Olsen, et les bilans de P (F-E) cumulés à Ercé et Gramond.

La relation construite entre IN-P et les bilans cumulés de P mesurés dans le temps permet de mettre en évidence la dynamique conjointe de ces deux variables (Figure 5) et confirme que la variation de l'IN-P avec

le temps est en lien direct avec les bilans de P (F-E) aussi bien pour les traitements fertilisés (bilan positif) que les traitements non fertilisés (bilan négatif). De la même manière, on observe une relation entre l'indicateur Olsen qui rend compte de la variation du niveau des ressources en P du sol avec les bilans cumulés (Figure 6).

L'ensemble de ces résultats mettent en avant le rôle de N dans la dynamique du P dans les systèmes fourragers.

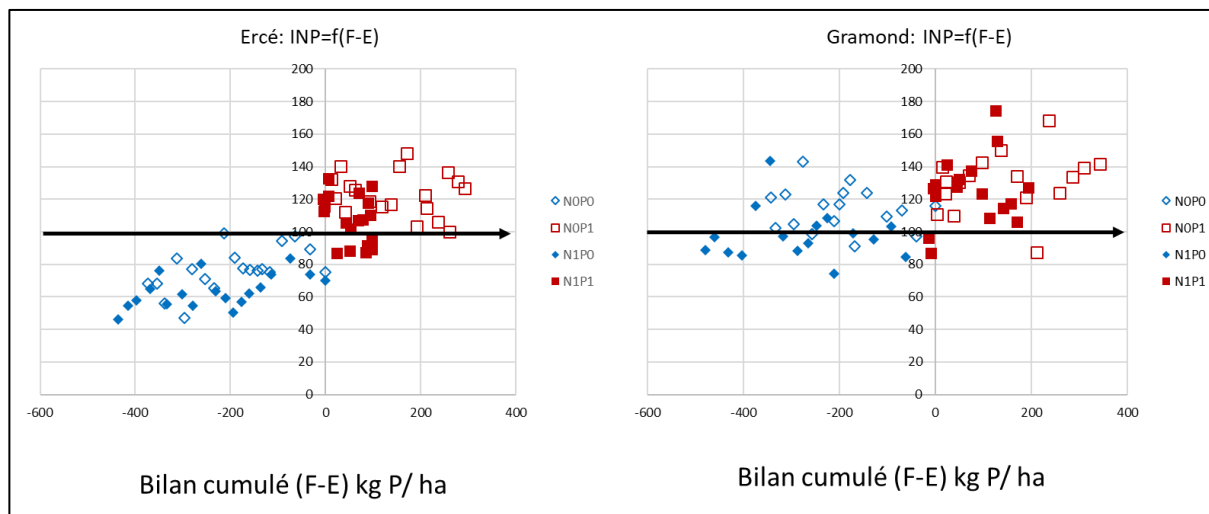


Figure 6 : Relation entre l'INP et les bilans de P (F-E) cumulés à Ercé et Gramond.

4. Synthèse et discussion

4.1. Intérêts et limites des indices de nutrition N P et K appliqués aux prairies

Dans les deux dispositifs expérimentaux de long terme choisis comme illustrations dans cet article, les indices de nutrition se révèlent des outils de diagnostic opérationnels, précis, fiables et pertinents. En effet ces outils permettent une quantification précise, année par année, de la dynamique de nutrition N, P et K, selon les sols et les modalités de gestion des prairies. Ils permettent d'identifier les situations dans lesquelles le niveau des ressources du sol ne permet pas de satisfaire les besoins en nutriment du couvert et entraîne une perte de rendement, et de préciser quel est l'élément N, P ou K en cause. Ainsi dans l'exemple du dispositif ACBB Lusignan, c'est la fertilité K qui est en cause alors que dans le cas du dispositif Ercé c'est la nutrition P qui peut être impliquée.

Sur le principe, la réduction de croissance résultant d'une réduction de nutrition est proportionnelle à la diminution de l'indice de nutrition en dessous de la valeur de 100% (Duru et Thélier-Huché, 1995). Les résultats obtenus sur les deux dispositifs montrent effectivement qu'il existe une relation proportionnelle entre l'indice de nutrition et la production lorsque l'indice de nutrition est limitant (<100%). Les indices de nutrition sont donc des indicateurs quantitatifs, qui reflètent directement le fonctionnement et la croissance des couverts végétaux.

Il faut insister sur le fait que l'estimation de ces indices ne préjuge en rien de la valeur cible à viser par l'éleveur. L'objectif de l'éleveur peut être d'optimiser la nutrition PK et donc de maintenir les indices à un niveau « satisfaisant » afin de valoriser l'azote apporté et optimiser la production. Mais des indices IN-P (ou IN-K) plus faibles peuvent éventuellement satisfaire les objectifs d'un certain nombre d'éleveurs, en production non-intensive. Dans ces situations, les enjeux associés à la fertilisation PK sont alors plus faibles.

Le maintien de la production n'est pas le seul critère à prendre en compte pour définir les niveaux d'indicateurs cible qu'il s'agisse d'indices de nutrition ou d'analyse de sol. Des valeurs faibles peuvent aussi représenter un niveau de ressource P-K du sol induisant un risque pour le maintien des légumineuses et de leur proportion dans la végétation prairiale, et compromettant de ce point de vue l'évolution de la pérennité.

Parmi les principales incertitudes qui subsistent sur ces indices, on peut mentionner le cas des prairies riches en légumineuses (prairies multi-espèces à plus de 30% de légumineuses, prairies dites « artificielles », composées de légumineuses pures). Vis-à-vis de ce type de prairies, il serait nécessaire de vérifier si les courbes critiques en P et K, établies sur graminées, sont identiques ou peuvent éventuellement être plus élevées pour les légumineuses. On peut aussi mentionner le cas des couverts fourragers annuels comme le maïs, pour lesquels on ne dispose pas encore de courbe critique pour K.

Spécifiquement pour les systèmes fourragers des manques de connaissances subsistent concernant les engrais de ferme. Des références d'équivalence existent selon l'élément et la nature de ces engrais. Le suivi des indices de nutrition peut permettre de s'assurer, en complément du suivi des concentrations dans le sol, des effets à moyen et long terme de ces engrais de ferme sur la fertilité des sols et la nutrition minérale des prairies.

4.2. Le mode de gestion et le mode d'exploitation des prairies jouent un rôle majeur sur les bilans minéraux et la dynamique de la fertilité

Les données des deux dispositifs montrent que le mode d'exploitation des prairies affecte de manière considérable la dynamique des indices de nutrition. Les indices IN-P et IN-K chutent d'autant plus fortement et plus rapidement que les quantités exportées de P et K, cumulées sur la durée d'observation, sont importantes. Dans le dispositif ACBB de Lusignan, les exportations de P et surtout de K sont les plus fortes, conduisant donc aux bilans P-K les plus négatifs, sur les prairies de longue durée fauchées (T5, T3, P1, P2). Les exportations sont intermédiaires sur les traitements prairies fauchées de plus courte durée (T2, P1), et plus faibles sur les traitements cultures (T1), prairie peu fertilisée en N (T4) et prairies pâturées (P3, P4). Dans le traitement cultures (T1), la plus faible exportation de P et K que celle des prairies est liée au fait que les cannes de maïs sont restituées au sol et que les pailles de céréales sont pauvres en P et K. Elle explique la diminution plus faible et plus lente des indices IN-P et surtout IN-K sur les phases et le traitement culture que sur les phases et les traitements prairie. Pour les traitements prairies pâturées, les faibles exportations de P et K à travers le lait ou la viande sont déterminées dans une certaine mesure par des biomasses prélevées par les animaux inférieures à la quantité d'herbe produite, et surtout par les restitutions animales au pâturage. Les restitutions de P et le K au pâturage peuvent en effet représenter respectivement de l'ordre de 66% et 91 % des quantités ingérées (Lançon, 1978).

Dans le dispositif de Ercé-Gramond, en absence de fertilisation P, les exportations de P sont les plus élevées (et les bilans les plus négatifs) pour les niveaux de fertilisation N forts. Pour le site d'Ercé où le niveau des ressources en P est faible, on observe une diminution marquée de l'indice de nutrition P avec le temps. A l'opposé pour le site de Gramond, dont le sol est largement pourvu en P, l'IN-P reste stable malgré les bilans négatifs. Les traitements fertilisés en P, avec ou sans N, ont des bilans P positifs et maintiennent des indices P supérieurs à 100% sur les deux sites.

L'évolution à long terme des indices IN-P et IN-K dépend donc du bilan entre les apports par fertilisation minérale et par les restitutions organiques (pâturage) et l'exportation d'éléments par les récoltes, qui varie fortement selon le type de production végétale et son mode de gestion. Elle dépend aussi de la nature des sols.

4.3. Relations avec les concentrations en minéraux dans le sol

Nos données expérimentales permettent de montrer qu'il existe une relation étroite entre concentration en P Olsen et indice IN-P d'une part (Figure 7A), et entre concentration en K échangeable et indice IN-K d'autre part (Figure 7B).

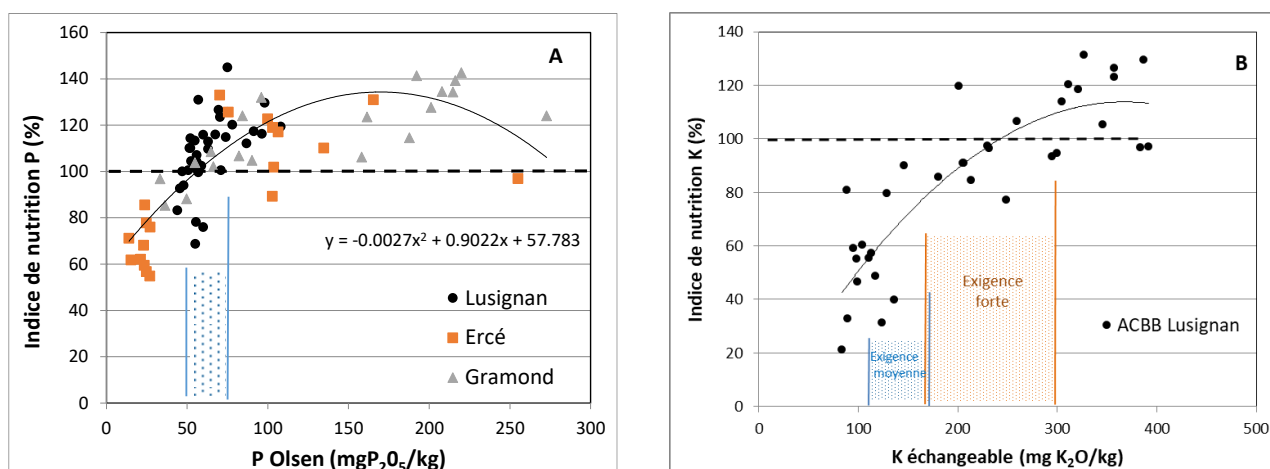


Figure 7 : Relations entre concentration en P Olsen (A) et K échangeable (B), et indices de nutrition P et K, respectivement, sur l'ensemble des dispositifs ACBB Lusignan, Ercé et Gramond pour P et sur le dispositif ACBB Lusignan pour K. Les seuils T entretien et T impasse de la méthode Comifer sont indiqués à titre de comparaison, selon le niveau d'exigence des cultures.

Concernant P, le seuil de concentration critique en P Olsen qui se dégage de nos résultats se situe autour de 50 mg P₂O₅/kg sol pour les dispositifs de Lusignan et de Gramond, et de 70 mg/kg pour le dispositif de Ercé. Ces valeurs semblent cohérentes avec celles données dans les tables du Comifer, qui indiquent un seuil d'entretien de 50 mg P₂O₅/kg (seuil d'impasse de 80 mg/kg) pour le type de sol correspondant au dispositif de Lusignan (Poitou-Charentes, « terres rouges »). Concernant K, le seuil de concentration critique en K₂O échangeable qui se dégage des résultats du dispositif de Lusignan est proche de 250 mg K₂O /kg sol. Cette valeur semble correspondre aux seuils du Comifer pour des cultures à exigence forte (respectivement 170 et 300 mg/kg pour les seuils renforcement et impasse) plutôt qu'aux seuils pour des cultures à exigence moyenne qui sont plus faibles. Toutefois, les seuils de concentration critique dans le sol préconisés par la méthode Comifer pour le diagnostic de fertilité et le raisonnement de la fertilisation en prairie temporaire (Comifer, 2019 ; Deleau, 2020) sont généralement établis à partir de références obtenues en systèmes et sur sols de culture. Leur application aux prairies de zones essentiellement herbagères peut parfois poser question.

L'analyse de sol donne une idée assez précise du niveau des réserves en P et K disponibles pour les cultures (valeur pronostique); ce niveau des réserves facilement mobilisables dépend à la fois des caractéristiques intrinsèques des sols (roche mère, texture) et des pratiques de fertilisation (apports anciens : rôle des scories à Gramond). En absence de fertilisation, la dynamique des indices IN-P est différente selon que ce niveau est élevé (Gramond) ou faible (Ercé). Lorsque le niveau de P (ou K) initial est élevé, l'indice diminue progressivement en restant dans la zone où le niveau de nutrition P (ou K) reste satisfaisant. Dans ces situations, il est possible de faire une impasse de quelques années sans pénaliser la production. Lorsque le niveau de P (ou K) initial est proche du seuil de réponse identifié par l'analyse de sol, l'indice diminue progressivement et peut atteindre très vite la zone où le niveau de nutrition P devient limitant ; dans ce cas une impasse est déconseillée.

5. Conclusion

Les dispositifs supports de la présente étude montrent la validité et la pertinence des indices de nutrition N-P-K pour faire un diagnostic sur prairies, aussi bien permanentes que temporaires. Ces outils sont relativement simples à mettre en œuvre sur le terrain. Pour l'essentiel développés et validés dans les années 1990-2000, leur intérêt ré-émerge aujourd'hui dans le contexte de réduction de la fertilisation P et K sur les systèmes prairiaux.

Les dispositifs expérimentaux supports de la présente étude permettent aussi et peut-être surtout, de mettre en évidence la grande variabilité de l'impact des pratiques de gestion et d'exploitation sur la dynamique dans le temps des indices de nutrition NPK pour les systèmes prairiaux. Cette variabilité est susceptible d'affecter, selon les situations, la pérennité des prairies à travers le maintien de leur production au cours du temps. Elle peut aussi affecter leur pérennité à travers la dynamique de leur équilibre graminées-légumineuses.

De manière tout à fait cohérente avec les grands principes de gestion de la fertilisation P-K, qui servent de base aux recommandations du Comifer, cette variabilité de la dynamique de fertilité P-K selon les modalités de gestion et d'exploitation des systèmes prairiaux, est déterminée par le bilan et l'équilibre entre les apports d'éléments (fertilisation minérale, restitutions organiques), leurs exportations (très variables selon les espèces, le niveau de fertilisation N et les modalités de gestion et d'exploitation), et la nature des sols.

En élevage, les bilans minéraux sont généralement analysés à l'échelle de l'exploitation. Ils sont difficiles à établir à l'échelle de la parcelle avec suffisamment de précision pour servir de base de diagnostic de la fertilisation, compte tenu de leur forte variabilité qui peut exister entre parcelles d'une même exploitation, selon leur position topographique et géographique et selon la structure de l'exploitation. Les indices de nutrition fournissent une évaluation, à cette échelle de la parcelle, de l'état de nutrition en temps quasiment réel en regard des pas de temps annuels ou pluri-annuels de gestion de la fertilisation P-K. Ils ne se substituent donc pas à l'analyse de bilans, mais en sont complémentaires.

Les indices de nutrition sont mobilisables aussi bien sur prairie temporaire que permanente, et dans certains cas sur cultures fourragères annuelles. Pour ces dernières, les références peuvent faire défaut sur certaines espèces et pour certains éléments, par exemple pour K sur maïs.

Enfin, la présente étude illustre dans le cas de nos dispositifs expérimentaux, la cohérence entre le diagnostic basé sur les indices de nutrition et le diagnostic basé sur l'analyse de sol. Les résultats obtenus sur le dispositif ACBB de Lusignan indiquent une relativement bonne cohérence entre les indices critiques pour P et les seuils de la méthode Comifer pour cet élément. Pour K, ce sont les seuils pour les cultures à

forte exigence qui semblent les mieux adaptés, alors que les seuils pour les cultures à moyenne exigence semblent faibles.

L'approche Comifer est plus difficile à mettre en œuvre en ce qui concerne les prairies permanentes et pour les prairies temporaires dans certaines zones d'élevage : le prélèvement d'un échantillon de sol représentatif d'une parcelle est plus difficile à réaliser, du fait notamment de la présence de forts gradients de P, et les références disponibles sont rares en système de fauche.

Références Bibliographiques

- Agreste (2004). Enquête sur les pratiques culturales en 2001. Numéro 159, juin 2004.
- Agreste (2010). Pratiques culturales 2006. Agreste Les dossiers, numéro 8, juillet 2010.
- Agreste (2020). Enquête pratiques culturales en grandes cultures 2017. Principaux résultats. Numéro 9, novembre 2020.
- CA Lorraine (2018). Fertilisation P-K des prairies permanentes. Fiche technique fertilisation des prairies, juin 2018.
- Comifer, (2019). La fertilisation P-K-Mg. Les bases du raisonnement. Brochure, Comifer Ed.
- Cruz P., Jouany C., Theau J.P., Petibon P., Lecloux E., Duru M., (2006). L'utilisation de l'indice de nutrition azotée en prairies naturelles avec présence de légumineuses. Fourrages 187, 369-376.
- Deleau D., (2020). Prairies : deux approches très différentes pour les apports PK. Disponible sur <https://www.arvalis-infos.fr/prairies-temporaires-ou-permanentes-deux-approches-tres-differentes-pour-raisonner-la-fumure-de-fond>
- Duru M., Thellier-Huché L., (1995). N and P-K status of herbage : use for diagnosis of grasslands. Dans "Diagnostic procedures for crop N management", Poitiers, Ed. INRA, Les colloques n° 82.
- Dyer B., (1894). On the analytical détermination of probably available mineral plant food in soils. J. Chem. Soc., 65, 115-167.
- Fardeau J.C., Morel C. et Boniface R., (1988). Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine. Agronomie, 8 : 577-584.
- Farruggia A., Théliier-Huché 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.
- Farrugia,A., Gastal, F., Scholefield, D., 2004. Assesment of nitrogen status of grassland. Grass Forage Sci. 59, 113-120.
- Gastal F., Bélanger G., Lemaire G., (1992). A model of the leaf extension rate of tall fescue in response to nitrogen and temperature. Ann. Bot. 70, 437-442.
- Gastal F., Decau M.L., Tedesco E., (2022). Dynamique de nutrition NPK et de production de prairies temporaires en rotation avec des cultures : enseignements de 15 années d'observation sur le dispositif ACBB de Lusignan. Fourrages, soumis.
- Jeangros, B., Sinaj, S., (2018a). Effets du mode d'utilisation sur les besoins en phosphore et en potassium d'une prairie du Jura. Recherche Agronomique Suisse 9, 256-263.
- Jeangros, B., Sinaj, S., (2018b). Besoins en phosphore et en potassium d'une prairie de fauche du Jura riche en fétuque rouge. Recherche Agronomique Suisse 9, 192-199.
- Joret, G., Hebert, J., (1955). Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. Ann. Agron., 2, 233-299.
- Jouany C., Cruz P., Theau J.P., Petibon P., Foucras J., Duru M., (2005). Diagnostic du statut de nutrition phosphatée et potassique des prairies naturelles en présence de légumineuses. Fourrages 184, 547-555.
- Jouany C., Morel C., Ziadi N., Belanger G., Sinaj S., Stroia C., Cruz P., Theau J.P., Duru M., (2021). Dynamics of diffusive soil phosphorus in two grassland experiments determined both in field and laboratory conditions. European Journal of Agronomy 125 (2021) 126249.
- Lamy M. (2010). Nutrition phosphatée et potassique des prairies permanentes dans l'Est de la France. Analyse des pratiques de fertilisation sur 56 parcelles de Moselle. Fourrages, 204, 283-287.
- Lañçon L., (1978). Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets (1ère partie). Fourrages, 75, 55-88.
- 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. Agronomie, 4(5), 423-440.
- Lemaire G., Cruz P., Gosse G., Chartier M., (1985). Etude des relations entre la dynamique de prélèvement d'azote et la dynamique de croissance en matière sèche d'un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.). Agronomie 5, 685-692.
- Lemaire G., Denoix A., (1987). Dry-matter summer growth of tall fescue and cocksfoot in western France. 1. Studies in non-limiting nitrogen nutrition and water-supply conditions. Agronomie, 7(6), 373-380.
- Lemaire G., Gastal F., (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire G. (ed), Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Heidelberg, 3-43.
- Lemoine C., Surault F., Poilane A., Cliquet J., Gastal F., (2021). « Dynamique floristique, production et valeur alimentaire de prairies du nord Deux-Sèvres gérées en pâturage tournant dynamique », Fourrages, 246, 51-66
- Marino M.A., Mazzanti A., Assuero S.G., Gastal F., Echeverria H.E., Andrade F., (2004). Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. Agronomy Journal, 96, 3, 601-607.
- Metson A.J., (1956). Methods of chemical analysis for soil survey samples. NZ Soil Bur Bull n°12
- Olsen, S.R. and al., (1954). Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. Cir. U.S. Dep. Agr., n° 939, 1-19.
- Plénet D., Lemaire G., (2000). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Détermination of critical N concentration. Plant Soil 216 :65-82.
- 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., Huché L., (1991). Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en oeuvre, exemples. Fourrages, 125, 3-18.
- SCEES (1984). Les prairies en 1982. Collections de statistique agricole. Service Central des Enquêtes et études statistiques. Etude N°233, septembre 1984.
- SCEES (2000). Les prairies en 1998. Chiffres et données en agriculture. Numéro 128, décembre 2000.

- Theulier-Huché L., Farruggia A., Castillon P., (1999). L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires. Plaquette COMIFER, ACTA, Institut de l'Elevage, ITCF.
- Vertès et al., (2022). Trajectoires et déterminants de la pérennité de prairies semées dans le grand-ouest de la France. Journées de printemps 2022.
- Voisin A., (1960). Dynamique des herbages. La Maison Rustique, Paris, 320 pages.
- Ziadi N., Bélanger G., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C., Claessens A., (2007). Relationship between P and N Concentrations in Corn. Agron. J. 99 : 833–841.