



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Dynamique de nutrition NPK et de production de prairies temporaires en rotation avec des cultures annuelles: enseignements de 15 années de suivi sur le dispositif observatoire de Lusignan

F. Gastal¹, M.-L. Decau¹ et E. Tedesco¹

RESUME

Depuis une vingtaine d'années, une diminution des pratiques de fertilisation minérale a été observée sur les prairies à l'échelle nationale, notamment en P et surtout en K. Ces diminutions de fertilisation minérale peuvent conduire à un risque de diminution de production et de perte de pérennité dans un certain nombre de situations de terrain.

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

La pertinence de ces outils est illustrée ici sur le dispositif expérimental de longue durée ACBB de Lusignan. Ce dispositif explore les cycles biogéochimiques de prairies temporaires et rotations prairies-cultures annuelles dans différents modes de gestion : durée de la prairie dans la rotation, exploitation en fauche ou en pâturage, niveau de fertilisation N. Les résultats obtenus sur 15 années illustrent que si la nutrition P se maintient à un niveau suffisant, en revanche la nutrition K peut devenir limitante, conduisant à une baisse de production et de pérennité. Les résultats montrent également que les contraintes de nutrition P-K sont très liées au bilan minéral à la parcelle. Ces bilans minéraux sont en prairie extrêmement variables selon les modes de gestion appliqués. Ainsi la baisse de fertilité K du sol pour la végétation est la plus rapide et la plus forte en système de prairie fauchée et fertilisée en N, intermédiaire dans les rotations courtes prairie-culture, et la moins rapide et la moins forte en système de rotations annuelles, en prairie peu fertilisée en N et en prairie pâturée. Lors des phases de transition de prairie à culture annuelle, les indices de nutrition montrent des comportements singuliers.

La pertinence et les limites des indicateurs de nutrition basés sur la végétation et sur le sol, utilisés sur prairie et cultures annuelles, sont discutées.

SUMMARY

Dynamics of NPK nutrition and production of temporary grasslands in rotation with annual crops: lessons from 15 years of monitoring on the Lusignan observatory system

Over the last twenty years, we have observed a decrease in mineral fertilization practices grasslands on a national scale, particularly in P and especially in K. These decreases in mineral fertilization can lead to a risk of decreased production and loss of sustainability in a certain number of field situations.

Diagnostic tools, based on grass analysis (N, P and K nutrition indices) or soil analysis, have been proposed for a number of years.

The relevance of these tools is illustrated here on the ACBB long-term experimental set-up in Lusignan. This system explores the biogeochemical cycles of temporary grasslands and grassland-annual crop rotations under different management modes: duration of the grassland in rotation, mowing or grazing, level of N fertilization. The results obtained over 15 years illustrate that while P nutrition is maintained at a sufficient level, K nutrition can become limiting, leading to a decrease in production and sustainability. The results also show that P-K nutrition constraints are very much linked to the mineral balance in the field. These mineral balances are extremely variable in grassland depending on the management methods applied. Thus, the decrease in soil K fertility for vegetation is most rapid and strongest in mowed and N-fertilized grassland systems, intermediate in short grassland-crop rotations, and least rapid and weakest in annual rotation systems, in grassland with little N fertilization and in grazed grassland. During the transition phases from grassland to annual crop, the nutrition indices show singular behaviors.

The relevance and limitations of vegetation and soil-based nutrition indicators used on grassland and annual crops are discussed.

AUTEURS

1 : INRAE, UE FERLUS, 86600 Lusignan France ; francois.gastal@inrae.fr

MOTS-CLES : Prairies, production, pérennité, phosphore, potassium, indices de nutrition

KEY-WORDS: Grasslands, production, sustainability, phosphorus, potassium, nutrition indices

REFERENCE DE L'ARTICLE : Gastal F., Decau M.-L., Tedesco E., (2022). « Dynamique de nutrition NPK et de production de prairies temporaires en rotation avec des cultures annuelles : enseignements de 15 années de suivi sur le dispositif observatoire de Lusignan », Fourrages 250, 49-61.

La pérennité des prairies semées, c'est-à-dire le maintien au cours des années de leur niveau de production, de leur composition en légumineuses et de la valeur pastorale des espèces qui la composent, a fréquemment tendance à diminuer avec leur âge. Ce phénomène, déjà décrit depuis longtemps par Voisin (1960), a été observé encore récemment sur des réseaux régionaux de prairies (Lemoine *et al.*, 2021 ; Vertès *et al.*, 2022) ou dans les statistiques agricoles (Agreste, 2010). Parmi les différentes hypothèses qui peuvent expliquer la diminution de production ou l'évolution de la composition floristique des prairies, une insuffisance de la fumure d'entretien et la baisse de fertilité du sol qui peut s'ensuivre sont des éléments évoqués dans un certain nombre de situations (Lemoine *et al.*, 2021). Face à l'augmentation du coût des engrais, une tendance à la réduction ou même à des impasses de fertilisation est observée depuis un certain nombre d'années, notamment en P et K.

En effet, les données des enquêtes nationales sur les prairies (Tableau 1) 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 ont en revanche fortement régressé entre 2001 et 2017. Les doses d'engrais minéral apportées sur les parcelles fertilisées ont, elles-aussi, fortement diminué de 1982 à 2017, aussi bien pour N que pour P et K. Les surfaces recevant des fumures organiques ont en revanche notablement augmenté entre 2001 et 2017, mais les quantités de fumure apportées sur ces surfaces ont diminué. Les quantités d'éléments ne semblent pas avoir été déterminées avec précision. Toutefois, sous hypothèse de composition inchangée, l'augmentation de fertilisation organique semble loin de compenser la diminution fertilisation minérale, surtout pour les prairies temporaires. 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 de ces 20 dernières années peuvent dans

certaines situations créer des carences plus ou moins prononcées.

Ainsi, sur la base des indices de nutrition PK, il était montré en Moselle 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 montre que la situation s'est largement dégradée depuis le début des années 2000, puisque les parcelles carencées en P sont passées de 8 % à 20 % entre les années 1994-2001 et 2014-16, tandis que les parcelles carencées en K sont passées de 28 % à 59 % dans la même période (CA Lorraine, 2018). Des données très récentes confirment ces tendances en Wallonie (Lambert *et al.*, 2020).

La dynamique de la fertilité, entendue ici comme la disponibilité de P et K dans le sol pour la végétation, est dépendante de nombreux facteurs liés au milieu et à la gestion. Les pratiques antérieures de fertilisation et la nature des sols sont des éléments importants. Les pratiques actuelles (niveau et nature, organique ou minérale, de la fertilisation, restitutions directes des résidus, restitutions indirectes *via* les déjections animales au pâturage), sont également des éléments importants (Corpen, 1999 ; Kayser et Isselstein, 2005 ; Knoden *et al.*, 2007 ; Huguenin-Elie *et al.*, 2017 ; Jeangros et Sinaj, 2018).

Les objectifs de cet article sont a) de montrer comment l'utilisation d'outils de diagnostic adaptés aux prairies, notamment les indices N-P-K déterminés sur végétation, permet une analyse quantitative à court et long terme de l'évolution de la fertilité N, P et K, et de mettre cette évolution en lien avec la productivité et la pérennité des prairies, et b) de montrer que cette dynamique est très dépendante du mode de gestion des prairies (fauche ou pâture, fertilisation) et de l'alternance entre prairies et cultures annuelles au sein des rotations, notamment de la durée de la phase en prairie.

	Azote minéral		Phosphore		Potasse		Fumure organique			
	Proportion des surfaces (%)	Dose sur parcelles fertilisées (kgN/ha)	Proportion des surfaces (%)	Dose sur parcelles fertilisées (kgP ₂ O ₅ /ha)	Proportion des surfaces (%)	Dose sur parcelles fertilisées (kgK ₂ O/ha)	Proportion des surfaces (%)	Dose sur parcelles fertilisées (kgN/ha)		
Enquêtes "Prairies" du SCEES	1982	43	94	58	87	46	85	25	-	
	1998	PT	62	39	58	53	62	82	18	130
PP		49	47	60	52	60	65	17	104	
Enquêtes "Pratiques culturales"	2001	PT	71	61.1	45	42.3	48	61.9	28	-
		PP	61	59.2	42	40.2	44	65.7	11	-
	2017	PT	63.2	66.4	19.5	30.1	19.9	41	44.5	116
		PP	36	54.7	16.6	27.7	16.9	37.5	30.3	87

TABLEAU 1 : Evolution des pratiques de fertilisation sur prairie à l'échelle nationale au cours des 40 dernières années. PT : prairies temporaires ; PP : prairies permanentes. D'après SCESS 1984, 2000 ; Agreste 2004, 2010.
Table 1 : Evolution of fertilization practices on grassland on a national scale over the last 40 years. TP: temporary grasslands; PP: permanent grasslands. According to SCESS 1984, 2000; Agreste 2004, 2010.

1. Matériel et méthodes

1.1. Dispositif et traitements

Le dispositif d'observation à long terme ACBB (Agro-écosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité) de Lusignan a pour objectif d'évaluer les cycles des éléments biogéochimiques et la biodiversité de prairies insérées dans différentes modalités de rotations prairies-cultures annuelles. Le dispositif, mis en place en 2005, est suivi depuis lors.

Brièvement, les modalités expérimentales étudiées comprennent (Tableau 2):

- sur un premier sous-dispositif (T1-T5), 5 modalités de rotation prairies de fauche-cultures permettant d'analyser l'effet de la durée de la phase prairie dans la rotation : deux traitements de rotations prairies de 3 ans et prairies de 6 ans alternant avec 3 années de succession maïs grain-blé-orge (T2 et T3, respectivement) ; un traitement « témoin » culture (T1 : succession maïs grain-blé-orge) et un traitement « témoin » prairie permanente semée (T5). Enfin, un traitement T4 est une variante à faible fertilisation azotée du traitement rotation prairie de 6 ans (T3) ;
- sur un second sous-dispositif (P1-P4), 4 modalités permettant de comparer l'effet de la fauche et du pâturage, sur prairie permanente semée (respectivement P2 et P4) et sur rotation prairie 6 ans-culture (respectivement P1 et P3). Les traitements P1 et P2 du sous-dispositif P1-P4, en fauche, sont équivalents aux traitements T3 et T5

du dispositif T1-T5. Les traitements P3 et P4 sont pâturés.

Les modalités du sous-dispositif T1-T5 sont appliquées sur des parcelles de 0,3 à 0,4 ha, dans un dispositif complet randomisé en blocs à 4 répétitions. Les modalités du sous-dispositif P1-P4 sont appliquées sur des parcelles de 3 à 4 ha chacune, permettant de gérer le pâturage et, au-delà du cadre de cet article, d'effectuer des mesures de gaz à effet de serre par « tour à flux », sans répétition de ces parcelles compte tenu de leur dimension.

L'ensemble des parcelles est réparti sur une surface expérimentale de 25 ha, homogène du point de vue des caractéristiques de sol. Le sol est un sol brun argilo-limoneux profond (Cambisol), à pH compris entre 6,2 et 6,8. Le site est soumis à un climat de type océanique, caractérisé par des hivers relativement doux, une pluviométrie moyenne annuelle de 698 mm sur les 30 dernières années et une sécheresse estivale marquée se prolongeant plus ou moins longtemps sur l'automne, selon les années.

Les prairies ont été semées sur la base d'un mélange de fétuque élevée, dactyle et raygrass anglais. Dans nos conditions expérimentales d'étés relativement secs, le raygrass anglais a disparu après quelques années. Des espèces diverses autres que celles semées ont pu s'installer progressivement. Elles sont restées en très faible abondance sur les prairies de fauche, mais ont pris plus d'importance sur les prairies pâturées.

Les parcelles fauchées ont généralement permis 3 à 4 fauches par an selon les conditions météorologiques. Les parcelles pâturées ont été exploitées en pâturage tournant de bovins en production laitière, à un

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 annuelles (Maïs-Blé-Orge)	Maïs	Blé	Orge	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O
T2	Prairie 3 ans/ cultures annuelles 3 ans, N+	M	B	O	Prairie 3 ans			M	B	O	Prairie 3 ans			M	B	O	Prairie 3 ans		
T3	Prairie 6 ans/ cultures annuelles 3 ans, N+	Prairie 6 ans						M	B	O	Prairie 6 ans						M	B	O
T4	Prairie 6 ans/ cultures annuelles 3 ans, N-	Prairie 6 ans						M	B	O	Prairie 6 ans						M	B	O
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/ cultures fauche, N+	Prairie 6 ans						M	B	O	Prairie 6 ans						M	B	O
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/ cultures, pâturage, N+	Prairie 6 ans						M	B	O	Prairie 6 ans						M	B	O
P4	Prairie permanente, pâturage, N+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

TABLEAU 2 : Rotations appliquées sur le dispositif expérimental ACBB de Lusignan. M : maïs grain. B : blé. O : orge d'hiver.

Table 1 : Rotations applied on the ACBB experimental system in Lusignan. M: grain corn. B: wheat. O: winter barley.

chargement instantané moyen compris entre 15.5 et 18.5 UGB/ha, une durée de pâturage de 3 à 6 jours par cycle et 6 à 9 cycles de pâturage par an, également selon les conditions météorologiques et la disponibilité en herbe.

Concernant les cultures, les cannes de maïs ont été restituées au sol tandis que les pailles de blé et d'orge ont été exportées.

Une fertilisation en azote a été appliquée sur les cultures selon les recommandations du logiciel PC-AZOTE (Kunrath *et al.*, 2015). Sur les prairies, la fertilisation en azote a été appliquée pour maintenir un indice de nutrition N (*cf.* plus bas) de l'ordre de 60 à 80 %, relativement représentatif de la situation de la prairie Française moyenne et permettant d'éviter des pertes de N excessives. Ainsi, des doses moyennes annuelles de 103, 201, et 82 kg N minéral/ha ont été appliquées respectivement sur les cultures annuelles, les prairies fauchées et les prairies pâturées. Une fertilisation moyenne annuelle de 44 kg N minéral/ha a été appliquée sur les prairies peu fertilisées (traitement T4).

Les sols étaient très largement pourvus en P et K lors de la mise en place du dispositif en 2005. 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 (300kg/ha de P₂O₅ à 18 % et K₂O à 36 %) et au début du printemps 2021 (119 kg/ha de K₂O à 36 %).

1.2. Prélèvements et analyses de végétaux et de sol

La biomasse d'herbe produite sur les parcelles en prairie a été déterminée par des prélèvements à la récolteuse mécanique à herbe (coupe à 6 cm au-dessus du sol) sur 3 placettes de 10 m² (soit une surface totale de 30 m²) sur les parcelles T1 à T5 et sur 6 placettes de 10 m² (soit une surface totale de 60 m²) sur les parcelles P1 à P4. Sur les parcelles pâturées (P3 et P4), les prélèvements d'herbe ont été faits immédiatement avant et immédiatement après chaque pâturage, permettant d'évaluer non seulement la croissance de l'herbe entre deux pâturages mais aussi la quantité prélevée par les animaux pendant le pâturage. Sur les cultures, les masses de grains et de tiges et feuilles ont été prélevées séparément, en quatre placettes de 12 m² chacune par parcelle. Toutes les biomasses prélevées ont été séchées à l'étuve à 60°C pendant au moins 72 heures.

La production végétale récoltée annuellement a été calculée sur prairie comme la somme des biomasses des prélèvements d'herbe successifs de l'année, et pour les céréales comme le total des masses de feuilles, tiges et grains à la récolte.

Des sous-échantillons de chaque prélèvement de biomasse ont été broyés pour analyse chimique. Les analyses chimiques ont été faites selon la méthode Dumas pour le N total et par ICP (torche à plasma) pour

P et K. Les données de teneur en minéraux concernent la période 2005-19. Les quantités de minéraux N, P et K exportées ont été calculées comme le produit des biomasses et des teneurs, cumulés sur le total des fauches ou des pâturages. Dans le cas de prairies pâturées, les restitutions de P et K ont été estimées sur la base d'un taux de restitution de l'ingéré de 73 % pour P et 91,5 % pour K (Whitehead 2000). Les bilans P et K ont été calculés comme la différence entre les apports par fertilisation (nuls dans cette expérimentation), et par restitutions (estimées au pâturage), et les exportations par les prairies et les cultures.

Des prélèvements de sol ont été effectués tous les 3 ans de 2005 à 2017. Le sol a été prélevé en respectivement 5 et 20 points sur les parcelles T1-T5 et P1-P4, sur 3 horizons (0-25cm, 25-50cm, 50-75 cm). Les analyses ont permis de déterminer la concentration en P selon la méthode Olsen et en K échangeable.

1.3. Calcul des indices minéraux sur végétation

Les indices de nutrition de la végétation ont été déterminés selon les principes énoncés pour l'azote par Salette et Lemaire (1981) et Lemaire et Salette (1984), et pour le P et le K par Salette et Huché (1991), repris ensuite par Duru et Thellier-Huché (1995), Thellier-Huché *et al.*, (1999), Farruggia *et al.*, (2000). Brièvement (*cf.* Gastal et Jouany, 2022 pour une présentation synthétique plus détaillée), les indices de nutrition N, P et K (respectivement IN-N, IN-P et IN-K) ont été calculés comme le rapport entre les teneurs en azote, phosphore et potassium observées dans la végétation et les teneurs critiques en azote, phosphore et potassium permettant une croissance maximale :

$$\text{IN-N (P) (K) (\%)} = 100 \times \frac{\text{concentration N (P) (K) mesurée}}{\text{concentration N (P) (K) critique}}$$

Ces indices de nutrition expriment l'écart au comportement non-limitant donné par la courbe critique. Ils sont exprimés en %. Des indices IN-N, IN-P ou IN-K compris entre 80 % et 100 % correspondent à des états de nutrition N, P ou K satisfaisants, des indices supérieurs indiquent une nutrition excédentaire, et des indices inférieurs à des états de nutrition limitants (Gastal et Jouany, 2022). Dans ce dernier cas la réduction de croissance due au manque de N, P ou K est quasiment proportionnelle à la valeur de l'indice.

Sur végétation prairiale, la teneur critique en azote, permettant une croissance optimale, a été calculée en fonction de la biomasse, compte tenu du principe de dilution (Salette et Lemaire, 1981) :

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

Pour P et K, les teneurs critiques ont été calculées sur la base des relations P/N et K/N (Salette et Huché, 1991) :

P critique (%) = 0,15 + 0,065 N% mesuré

K critique (%) = 1,6 + 0,525 N% mesuré

dans lesquelles N, P ou K critique sont les teneurs permettant une croissance maximale, MS la matière sèche récoltée (t/ha) et N% mesuré est la teneur en N mesurée sur la végétation.

Les indices de nutrition des phases en prairie de notre dispositif ont été évalués sur la base des analyses faites sur la biomasse prélevée lors de la première fauche, entre mi- et fin avril. En effet, les indices de nutrition évalués à cette période de l'année sont plus représentatifs de l'état de la végétation que ceux estimés sur des prélèvements plus tardifs dans l'année, qui présentent des risques de sécheresse édaphique et d'interaction entre nutrition minérale et hydrique (Farruggia *et al.*, 2000).

Pour les céréales, les indices de nutrition N, P et K ont été évalués sur le même principe que sur prairie mais selon des modes de prélèvement et des courbes de référence différents. Pour respecter le domaine de validité des courbes de référence, qui se limite aux phases végétatives de la végétation, les indices ont été obtenus à partir de prélèvements faits avant la floraison des céréales. En effet, des prélèvements qui auraient été faits sur la biomasse aérienne à la récolte en grain n'auraient pas de signification physiologique compte tenu des réallocations qui interviennent lors des phases de remplissage des grains. Ainsi, les prélèvements pour l'évaluation des indices minéraux sur culture ont été faits durant le mois d'avril pour le blé et l'orge, et entre mi-juin et mi-juillet pour le maïs. Ces prélèvements spécifiques à la phase en culture annuelle des rotations, n'ont été faits qu'à partir de 2014, et les données sont manquantes en 2016 et en 2018. Les indices de nutrition sur blé et orge en phase végétative ont été calculés selon les mêmes équations que celles données plus haut pour une végétation prairiale de graminées. L'indice de nutrition N du maïs a été évalué à partir de Plenet et Lemaire (2000) :

N critique (%) = 3.4 (MS)^{-0.37}

L'indice de nutrition P du maïs a été évalué selon Ziadi *et al.*, (2007) :

P critique (%) = 0,10 + 0.094 N% mesuré

Aucune référence équivalente n'étant disponible sur le maïs pour K, nous avons estimé l'indice de nutrition K du maïs à partir de la concentration de K par g matière fraîche selon Schneider *et al.*, (2003).

1.4. Traitement des données

Les données ont été analysées séparément pour les deux sous-dispositifs T1-T5 d'un côté et P1-P4 de l'autre, compte tenu de leurs différences d'organisation. Les données de production de la période 2005-19 (avant la fertilisation PK de redressement) ont été analysées sur la base d'un modèle mixte (modèle « lme », package « nlme4 », logiciel R) prenant en compte les facteurs bloc,

traitement, année et l'interaction année x traitement comme effets fixes, et la parcelle comme effet aléatoire. L'une des variables liées au bilan hydrique (pluviométrie, indice climatique P-ETP), calculée sur l'année ou sur la période de croissance (1er mars- 30 novembre) a également été ajoutée comme co-variable à effet fixe pour absorber une partie de la variation liée aux différences climatiques entre années. Sur la base de ce modèle, une comparaison des pentes de diminution de la biomasse avec les années a été faite (fonction « emtrends », package « emmeans »). Sur le sous-dispositif P1-P4 qui n'est pas répété en blocs complets, les analyses statistiques sont basées sur les répétitions intra-parcelle (« pseudo-répétitions »).

Les données d'indices de nutrition en N, P et K ont été analysées sur la base d'analyses de variance et de comparaisons de moyennes, réalisées année par année. Dans le cas du sous-dispositif P1-P4, les échantillons pour analyse chimique ont été regroupés par parcelle, de sorte qu'on ne dispose pas de répétition des indices de nutrition par traitement. Toutefois, les sous-dispositifs T1-T5 et P1-P4 étant installés de manière contiguë et sur un sol homogène, les intervalles de confiance des indices N-P-K de P1-P4 sont en principe comparables à ceux calculés pour le dispositif T1-T5. L'effet bloc du dispositif T1-T5 s'est systématiquement révélé non significatif et n'a pas été retenu dans les analyses de variance date à date.

2. Résultats

2.1. Evolution de la production de biomasse

Pour chaque traitement, l'évolution de la production de biomasse d'une année à l'autre est très irrégulière (Figure 1). Dans une large mesure, ces variations sont imputables à la variabilité climatique entre années. Sur notre site à sécheresse estivale voire automnale marquée, les variations de pluviométrie annuelle (Figure 1A) et d'indice P-ETP (Figure 1B) sont fortes. On peut noter visuellement la concomitance assez évidente entre les variations interannuelles de pluviométrie ou d'indice P-ETP, et les variations de production de biomasse. Les variations de production de biomasse sont d'ailleurs plus marquées sur prairie que sur culture, ces dernières étant 2 années sur 3 des cultures d'hiver (blé ou orge), moins sensibles aux fluctuations de la pluviométrie ou de l'indice P-ETP annuels. Ces variables pluviométrie ou indice P-ETP, annuelles ou sur la période de végétation, ressortent comme significatives dans les analyses sur la biomasse. La variable P-ETP sur la période de végétation est la variable climatique la plus explicative des fluctuations de la biomasse entre années, selon le critère d'Akaike et le R2 du modèle mixte, ce qui conduit à la retenir comme co-variable dans le modèle d'analyse (Tableau 3).

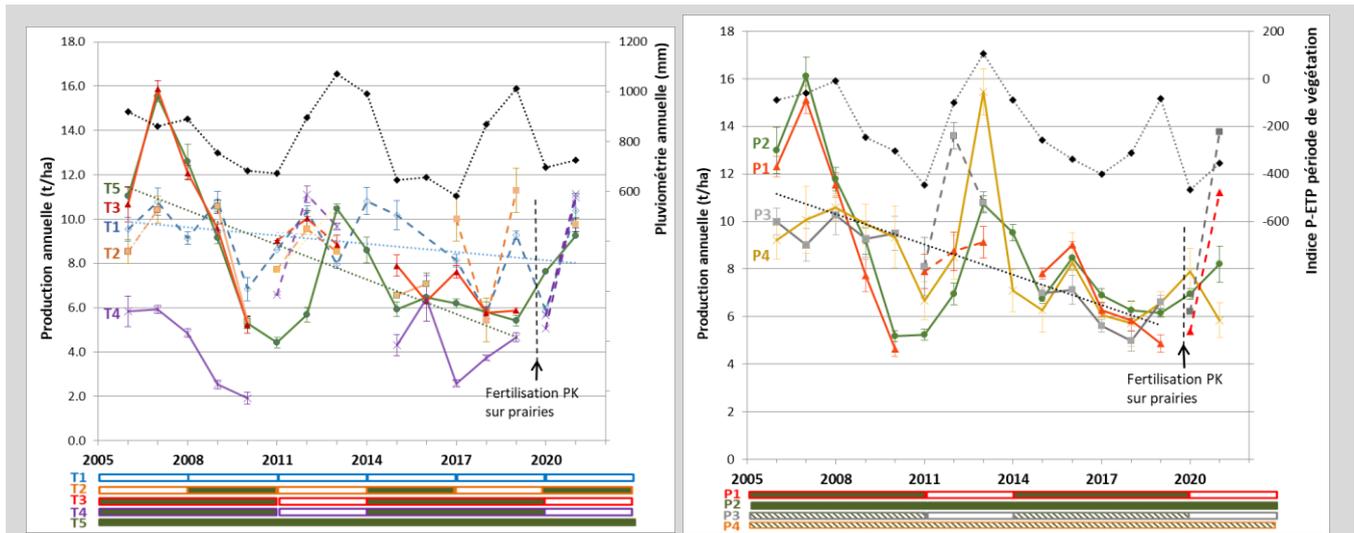


FIGURE 1 : Evolution de la production de biomasse au cours des années sur le dispositif T1-T5 (gauche) et sur le dispositif P1-P4 (droite). Les traitements sont explicités en détail dans le Tableau 2. Les symboles sont indiqués sur les graphiques et dans les chronoséquences sous les abscisses (segments pleins verts : phases de prairie en fauche; segments vides : phases culture des rotations ; segments verts hachurés : prairies pâturées). Les productions annuelles durant les phases de prairie sont reliées en trait plein tandis que les productions durant les phases de culture sont reliées en tireté. Les droites de régression en pointillé représentent les régressions pour les traitements culture (T1, bleu) et prairie semée permanente (T5 et P2, vert). La pluviométrie annuelle est représentée en losanges et pointillés noirs sur 2A (échelle de droite). L'indice climatique P-ETP sur la période de végétation est représenté en losanges et pointillés noirs sur 2B. *Figure 1 : Evolution of biomass production over the years on the T1-T5 device (left) and on the P1-P4 device (right).*

Sur la période 2005-19, l'interaction entre l'année et le traitement est hautement significative pour le sous-dispositif T1-T5 (Tableau 3A), indiquant que la diminution de production au cours des années est plus forte pour certains traitements que pour d'autres. Ainsi cette diminution est faible sur la rotation prairie-culture T4 peu fertilisée en N (Tableau 4A). La production diminue de manière intermédiaire sur la rotation cultures annuelles (T1) et la rotation prairies 3 ans-culture 3 ans (T2). La diminution est la plus rapide sur la rotation à phase de prairie longue (T3) et sur la prairie semée permanente (T5). Sur le sous-dispositif P1-P4, la diminution de production au cours des années est significative mais ne diffère pas entre les traitements (Tableaux 3B, 4B).

Facteur	P-ETP période de végétation	Bloc	Année	Traitement	Interaction année X traitement
A : analyse T1-T5	***	NS	***	***	***
B : analyse P1-P4	-	NS	***	NS	NS

TABLEAU 3 : Analyses de variance sur l'évolution des rendements au cours des années, pour les dispositifs T1-T5 et P1-P4 analysés séparément.
Table 3 : Variance analyses on the evolution of yields over the years, for devices T1-T5 and P1-P4 analyzed separately.

	Traitement	Pente (t MS/ha/an)	Erreur standard	Comparaison des pentes au seuil 10 %
A : analyse T1-T5	T4 (Prairie 3 ans N-)	-0.0856	0.0896	a
	T1 (Cultures annuelles)	-0.2291	0.0896	abc
	T2 (Prairie 3 ans)	-0.253	0.0896	ab
	T5 (Prairie permanente)	-0.5225	0.0896	bc
	T3 (Prairie 6ans/cultures)	-0.5477	0.0896	c
B : analyse P1-P4	P1 (Prairie 6 ans fauche)	-0.554	0.0842	a
	P2 (Prairie permanente fauche)	-0.479	0.0842	a
	P3 (Prairie 3 ans pâturage)	-0.411	0.0842	a
	P4 (Prairie permanente pâturage)	-0.315	0.0842	a

TABLEAU 4 : Comparaison des pentes de diminution des productions annuelles en fonction des années pour les dispositifs T1-T5 (A) et P1-P4 (B) analysés séparément. Des lettres différentes indiquent une différence significative à 10 %.

Table 4 : Comparison of slopes of decline in annual production as a function of year for devices T1-T5 (A) and P1-P4 (B) analyzed separately.

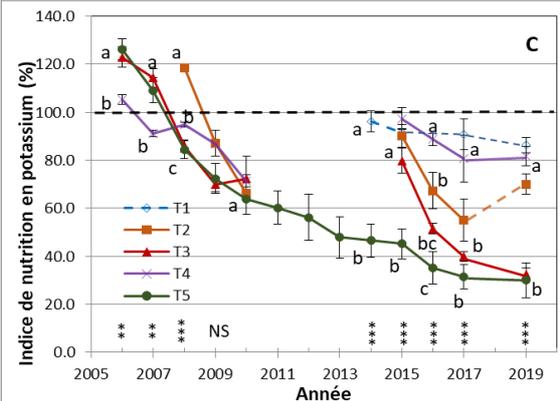
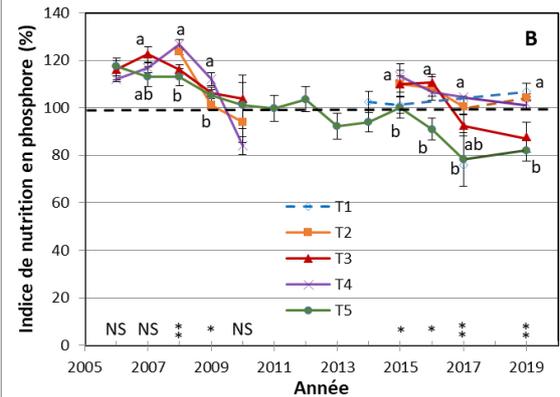
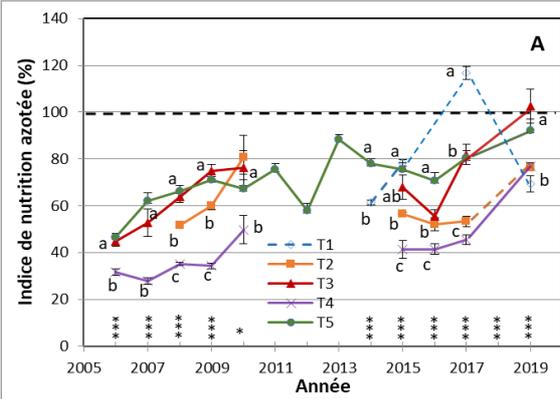


FIGURE 2 : Evolution des indices de nutrition IN-N (A), IN-P (B) et IN-K (C) au cours des années sur le dispositif T1-T5. T1 : témoin cultures ; T5 : prairie permanente ; T2, T3, T4 : rotations prairie-culture en fauche (cf. Tableau 2 pour plus de détails). Les symboles sont indiqués dans les graphiques. Les données sur les cultures annuelles ne sont disponibles qu'à partir de 2014. La ligne horizontale en pointillé noir indique l'indice de nutrition 100 non-limitant pour la croissance. Les étoiles en bas de graphique indiquent le niveau de significativité de l'effet des traitements (NS : non significatif au seuil 5 %). Des lettres différentes indiquent des différentes significatives au seuil de 5 %.

Figure 2: Evolution of the nutrition indices IN-N (A), IN-P (B) and IN-K (C) over the years on the T1-T5 set-up. T1: crop control; T5: permanent grassland; T2, T3, T4: grassland-crop rotations with mowing (see Table 2 for more details).

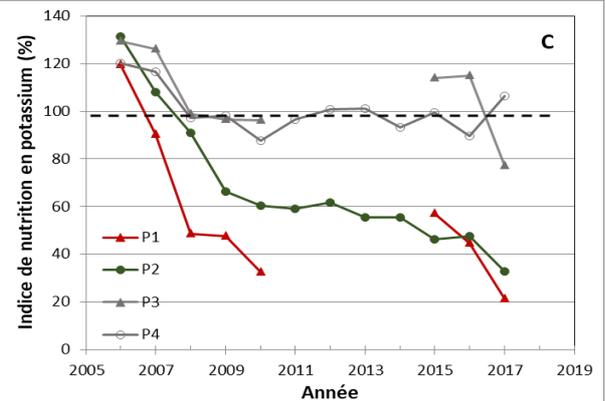
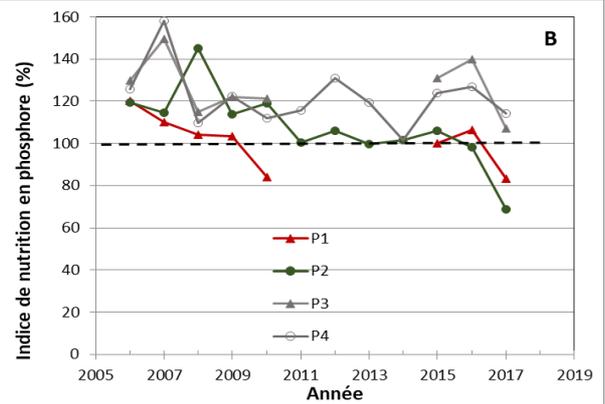
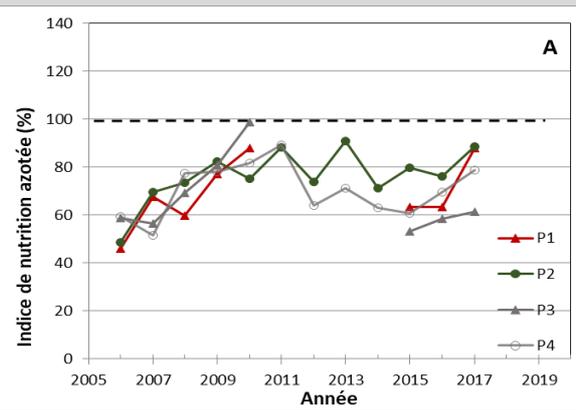


FIGURE 3 : Evolution des indices de nutrition IN-N (A), IN-P (B) et IN-K (C) au cours des années sur le dispositif P1-P4. P1: rotation prairie fauchée-cultures annuelles ; P2 : prairie permanente fauchée ; P3: rotation prairie pâturée-cultures ; P4 : prairie permanente pâturée (cf. Tableau 2 pour plus de détails). Les symboles sont indiqués dans les graphiques. Les indices de nutrition sur les phases de culture annuelles ne sont disponibles qu'à partir de 2014. La ligne horizontale en pointillé noir indique un indice de nutrition non-limitant pour la croissance.

Figure 3: Evolution of the nutrition indices IN-N (A), IN-P (B) and IN-K (C) over the years on the P1-P4 system. P1: mowed grassland-annual crop rotation; P2: permanent mowed grassland; P3: grazed grassland-crop rotation; P4: permanent grazed grassland (see Table 2 for more details).

prairies à partir de la fin de l'année 2019 conduit à une remontée très significative des productions des prairies fauchées et des cultures annuelles lors des années 2020 et 2021, alors que les valeurs de pluviométrie et d'indice P-ETP restent basses durant ces 2 années. Ceci prouve de manière très concrète que la remontée au moins partielle des valeurs de production est liée à l'apport de P et/ou K et non pas aux fluctuations climatiques entre années. Cette remontée de production ne conduit pas à un retour à des niveaux de biomasse équivalents à ceux observés dans les premières années du dispositif. En revanche, la production des prairies pâturées n'est pas augmentée par cet apport PK de redressement.

2.2. Dynamique des indices de nutrition N-P-K

Les valeurs de l'indice de nutrition en azote sont en moyenne de 63 % sur les phases prairie des traitements bien fertilisés (tous traitements sauf T4) durant les années 2006 à 2012, et ont tendance à être un peu plus élevées (73 %) dans les 6 années suivantes (Figures 2A et 3A). Comme attendu, l'indice de nutrition N est significativement plus faible sur le traitement peu fertilisé T4, passant de 30 % à 40-45 % sur la période d'observation. Les indices de nutrition N sont comparables sur les prairies fauchées (72 %) et les prairies pâturées (69 %) du dispositif P1-P4, en raison de l'ajustement des doses de fertilisation N appliquées. Ces valeurs sont dans une plage habituelle pour des prairies intensives raisonnablement fertilisées.

Les valeurs d'indice de nutrition P des prairies des années 2006 à 2008 se situent en moyenne globale à 117 % et 125 % respectivement sur les sous-dispositifs T1-T5 et P1-P4 (Figures 2B et 3B). Ces valeurs sont élevées et similaires entre traitements, hormis les parcelles pâturées (P3, P4) qui ont un indice IN-P un peu plus élevé que les parcelles fauchées. Ces valeurs correspondent à des concentrations élevées en P dans le sol (moyenne de 91,4 mg P₂O₅/kg de sol en 2005, tous traitements confondus, cf. Figure 6A), traduisant un stock initial de P (en 2005) important sur l'ensemble des parcelles du dispositif. Au cours des années, les valeurs des indices de nutrition P diminuent significativement, de manière un peu plus marquée pour la prairie semée permanente (T5). Toutefois les indices de nutrition P en fin de période restent à des valeurs non-limitantes pour la croissance (80 à 120 %).

Une situation très différente est observée pour la nutrition K (Figures 2C et 3C). Les valeurs de l'indice IN-K observées durant les années 2006-07, en moyenne globale de 107 % et 118 % respectivement sur les prairies des dispositifs T1-T5 et P1-P4, traduisent une nutrition K élevée et même excédentaire en début d'expérimentation. Elles correspondent à des concentrations élevées dans le sol (moyenne de 336 mg K₂O/kg de sol en 2005, tous traitements confondus, cf. Figure 6B). Les valeurs d'indice IN-K diminuent fortement au cours des 15 années d'observation,

tombant à des valeurs de l'ordre de 30 % en fin de période pour les traitements les plus bas. L'ampleur de la diminution de l'indice de nutrition K diffère très largement entre les traitements. La diminution est la plus marquée pour les traitements dominés par la prairie fauchée de durée longue (T5, la prairie semée permanente et T3, la prairie de 6 ans en rotation). La diminution de l'indice IN-K est intermédiaire pour la prairie fauchée à durée intermédiaire (T2, prairie de 3 ans) et est la plus faible pour les traitements prairies pâturées (P3, P4), cultures annuelles (T1) et prairie faiblement fertilisée en azote (T4).

On peut également souligner que pour les traitements de rotations prairie-culture annuelles fauchées et fertilisées en N (T2, T3, P3), l'indice IN-K diminue de manière marquée au cours de la première phase prairie, remonte de manière significative suite au passage à la phase culture (comparaison des valeurs de IN-K de T2 et T3 en 2010 et 2015), et reprend une diminution plus forte durant la seconde phase de prairie, que le « témoin » prairie permanente semée (comparaison de la diminution de IN-K de la seconde phase prairie de T2, T3 et P3 de 2015 à 2017, aux valeurs de T5 et P2).

3. Discussion

3.1. Evolution des indices de nutrition et relation avec les niveaux de production végétale

La diminution de production végétale observée notamment sur les prairies de fauche, n'est pas liée à l'évolution de la nutrition N ou de la nutrition P. En effet, l'indice de nutrition IN-N est stable ou en légère augmentation selon les traitements. De son côté, l'indice de nutrition P, bien que montrant une diminution significative sur la majorité des traitements, reste à des valeurs quasiment non limitantes de la croissance végétale (> 80-90 %) sur les 15 années d'observation. Avant la fertilisation de redressement qui n'intervient que fin 2019, la diminution progressive de production observée au cours des années peut s'expliquer dans une large mesure par la diminution de la nutrition K des différentes végétations, révélée par la très forte diminution de l'indice de nutrition IN-K sur prairies de fauche (T3, T5), et également significative sur la succession de culture (T1). Cette explication est également confortée par le fait que la production remonte au moins partiellement dans les mois et les années qui suivent l'apport de redressement de PK à la fin 2019. Les résultats d'analyse permettant le calcul des indices IN-P et IN-K sur 2020-21, après la fertilisation PK de redressement, ne sont pas encore disponibles mais permettront de vérifier dans quelle mesure l'indice IN-K remonte en parallèle.

Concernant les interactions éventuelles entre nutrition minérale et disponibilité en eau dans le sol, la

mesure des indices de nutrition au printemps permet à la fois de s'affranchir des interactions avec l'alimentation hydrique, la sécheresse intervenant généralement plus tard dans l'année, et de disposer d'indices de nutrition lors de la saison la plus déterminante pour la production, maximale au printemps. Les interactions entre nutrition N et PK sont illustrées par l'augmentation progressive de l'indice de nutrition N au cours des années, alors que la nutrition K chute notablement. La chute de nutrition K crée une diminution des besoins en N des prairies, qui se traduit, à fertilisation N relativement similaire au cours des années, par une augmentation de l'indice de nutrition N. Inversement, les situations dans lesquelles les fertilisations N sont faibles (prairie T4 non fertilisée) entraînent un moindre besoin en K et par conséquent une diminution plus faible de l'indice de nutrition K. Dans cette logique, on peut supposer que des fertilisations N plus élevées que celles appliquées dans la présente expérimentation auraient conduit à une chute plus rapide des indices de nutrition K.

Sur le principe, la réduction de croissance découlant d'une réduction de nutrition est proportionnelle à la diminution d'indice de nutrition en dessous de la valeur de 100 %. Nos résultats montrent effectivement une réduction très parallèle de la biomasse et de l'indice IN-K aussi bien sur les phases ou les traitements prairies que sur les phases ou les traitements cultures annuelles. L'exception notable est le cas des prairies pâturées (P3-P4), pour lesquelles la production de biomasse chute de manière importante au cours des années d'observation, alors que ni l'indice IN-K ni les indices IN-N et IN-P ne diminuent. Sur ces prairies pâturées, on a observé une évolution importante de la composition en espèces, avec un développement beaucoup plus marqué d'espèces diverses non semées que sur les prairies de fauche. Il s'agit en majorité d'espèces à faible valeur pastorale : dicotylédones à rosette comme la porcelle, des crépides, le pissenlit ; petites graminées comme le pâturin annuel et le pâturin commun. Il est décrit dans la littérature que dans le cas des prairies semées de plus ou moins longue durée, l'évolution floristique et la richesse en espèces sont plus importantes en prairie pâturée qu'en prairie de fauche (Bullock, 1994). Ce développement d'espèces non semées à faible valeur pastorale nous semble la cause la plus probable de diminution de production sur ces parcelles pâturées.

3.2. Les quantités d'éléments exportés et les bilans minéraux expliquent dans une large mesure la dynamique des indices de nutrition

On peut supposer que la diminution des indices IN-P et surtout IN-K en prairie de fauche et en cultures annuelles résulte d'un déséquilibre entre les apports minéraux et organiques (nuls entre 2005 et 2019 sauf sur les prairies pâturées du fait des restitutions

animales), et l'exportation d'éléments par les récoltes. Nos données montrent effectivement que les indices IN-P et surtout IN-K chutent d'autant plus fortement et plus rapidement que les quantités exportées cumulées sur la période 2005-18 sont importantes, se traduisant par un bilan minéral d'autant plus déficitaire (Figure 4) puisque les apports par fertilisation sont nuls. Les exportations de P et surtout de K sont les plus fortes, et les bilans de P et K sont les plus négatifs, sur les traitements prairies de longue durée fauchées (T5, T3 et P2), intermédiaires sur les traitements prairies fauchées de plus courte durée (T2, P1), et plus faibles sur les traitements cultures annuelles (T1), prairie peu fertilisée en N (T4) et prairies pâturées (P3, P4). Les phases de cultures annuelles et le traitement T1 ont un positionnement un peu particulier puisque les exportations de P sont relativement élevées, juste inférieures à celles des prairies fauchées, tandis que les exportations de K sont faibles et proches de celles des prairies pâturées. En maïs, les grains, qui représentent moins de 50 % de la production aérienne, sont exportés mais les cannes sont restituées au sol, tandis qu'en blé et orge, grains et pailles sont exportés. Les teneurs en P et surtout en K sont généralement faibles dans les grains et dans les pailles de céréales. Ces restitutions

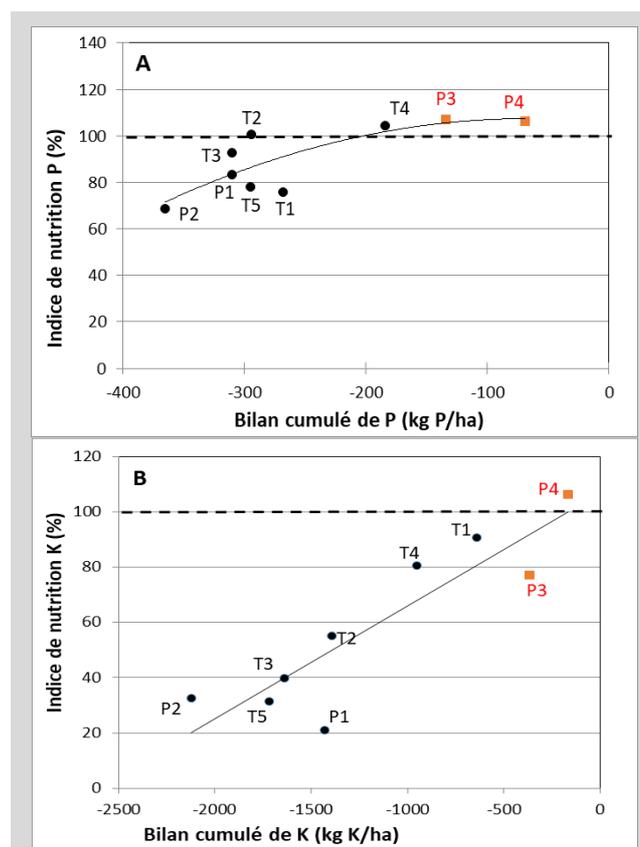


FIGURE 4 : Relation entre bilans minéraux P et K cumulés sur la période 2005-17, et indices de nutrition P (5A) et K (5B) mesurés en 2017. Figure 4 : Relationship between cumulative P and K mineral balances over the period 2005-17, and P (5A) and K (5B) nutrition indices measured in 2017.

partielles et ces plus faibles teneurs en P et surtout en K du maïs et des céréales par rapport à l'herbe des prairies, expliquent les exportations modérées de P et surtout de K, et la diminution plus faible et plus lente des indices IN-P et surtout IN-K sur les phases et le traitement cultures annuelles que sur les phases et les traitements prairies fauchées.

Pour le traitement de prairie fauchée peu fertilisée en azote (T4), la limitation de la disponibilité et de l'absorption d'azote par la végétation prairiale conduit à une réduction de l'absorption et donc de l'exportation de P et K. Ce résultat rejoint ceux de l'étude des interactions nutrition P x nutrition N de Jouany *et al.*, (2022), qui montre que les exportations de P sont réduites lorsque la nutrition N est déficitaire. Enfin pour les traitements pâturés, la quantité de biomasse prélevée par les animaux est inférieure à la quantité d'herbe produite, ce qui est une première cause de leur moindre exportation de P et K. La seconde cause est évidemment l'importance des restitutions animales. P et K sont majoritairement exportés dans les fèces et dans les urines, respectivement (Lançon, 1978 ; Whitehead, 2000). Leurs restitutions peuvent représenter de l'ordre de 66 et 91 % des quantités ingérées, respectivement (Lançon, 1978). L'estimation et la déduction dans le bilan annuel des quantités de P et de K restituées dans les fèces et les urines conduit à un bilan entrée-sortie des prairies pâturées beaucoup moins déficitaire que le bilan de P et K des prairies de fauche (on peut faire l'hypothèse que sur les 15 années d'expérimentation et en pâturage tournant à chargement instantané élevé, la restitution des déjections couvre la parcelle de manière relativement homogène). Le bilan des prairies pâturées est également nettement moins déséquilibré que celui des cultures dans le cas de P, mais plus proche dans le cas du K, comme discuté précédemment.

Dans le présent dispositif expérimental, le type de sol est homogène. Dans d'autres situations et au-delà du bilan importations-exportations, on peut bien entendu supposer que la nature du sol affectera également la rapidité et l'ampleur de la chute de IN-P et IN-K lors d'une impasse à long terme de fertilisation P et/ou K, malgré des stocks et des teneurs qui peuvent être initialement élevées dans le sol (Jouany *et al.*, 2022).

3.3. Les alternances prairie-cultures annuelles modifient la dynamique de nutrition P et K

L'examen des relations entre indices de nutrition et bilans minéraux cumulés, de manière dynamique année après année depuis le début de l'expérimentation, permet de mettre en évidence le comportement particulier des rotations prairie-cultures annuelles dans le cas du K (Figure 5). En effet, alors que l'indice de nutrition IN-K diminue de manière linéaire avec le cumul progressif des bilans de K sur les traitements

continus prairie (T5) et culture (T1), des discontinuités apparaissent dans la dynamique de l'indice IN-K lors des transitions prairie-culture.

Les transitions de prairie vers cultures annuelles (tiretés des courbes T2, T3, T4) montrent une ré-augmentation partielle de l'IN-K durant les 3 années de culture qui s'ensuivent, et inversement les retours à la prairie après les 3 années de phase de culture (traits pleins) montrent une accélération de la chute d'IN-K. Les moindres exportations de K durant les phases de culture, combinées à la libération probable de K dans le sol suite à la destruction des prairies et à la mortalité de leur importante biomasse aérienne et surtout racinaire, expliquent probablement cette observation. Le même phénomène est observé pour P (non montré), quoiqu'avec une ampleur plus faible.

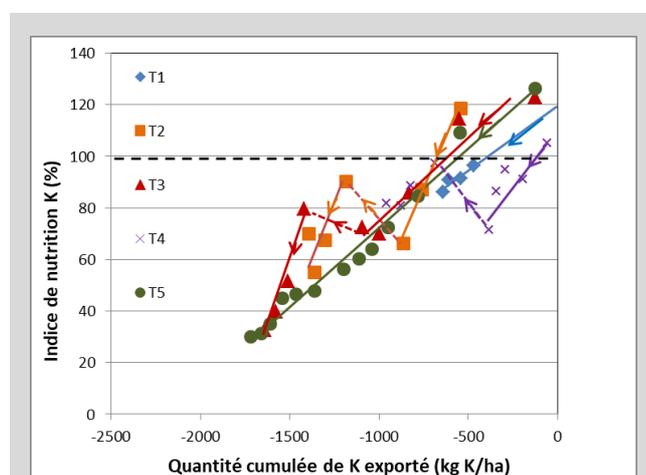


FIGURE 5 : Comparaison des dynamiques de l'indice de nutrition IN-K avec la dynamique de bilan K cumulé sur les rotations prairie-culture (T2, T3, T4) et sur les témoins cultures annuelles (T1) et prairie semée permanente (T5) au cours des années 2005-17. Traits pleins: phases des rotations en prairie ; tiretés: phases en cultures annuelles.

Figure 4 : Comparison of the dynamics of the IN-K nutrition index with the dynamics of the cumulative K-balance on the grassland-crop rotations (T2, T3, T4) and on the annual crop (T1) and permanent sown grassland (T5) controls during the years 2005-17. Solid lines: phases of grassland rotations; dashed lines: phases of annual crops.

3.4. Relations entre les indices de nutrition P et K et les concentrations en minéraux solubles dans le sol

Nos données expérimentales permettent de montrer une relation étroite entre concentration en P Olsen et indice IN-P d'une part (Figure 6A), et concentration en K échangeable et indice IN-K d'autre part (Figure 6B). Concernant P, nos données d'indice IN-P suggèrent une concentration critique en P Olsen de l'ordre de 50 mg P₂O₅/kg de sol. Nos données, obtenues en conditions majoritairement non limitantes de P, ne permettent pas d'établir très précisément ce seuil critique. Toutefois, la valeur critique de P Olsen observée dans notre expérimentation est cohérente avec les seuils « renforcement » et « impasse » de respectivement 50 et 80 mg P₂O₅/kg de sol indiqués par le Comifer (2019) pour nos sols (Terres rouges, ex Région Poitou-Charentes) et pour les cultures à exigence moyenne ou élevée. Concernant K, le seuil de concentration critique en K₂O échangeable qui se dégage de nos résultats est

de l'ordre de 250 mg K₂O/kg. Cette valeur semble cohérente avec les seuils du Comifer pour des cultures à exigence forte (respectivement 170 et 300 mg K₂O /kg pour les seuils renforcement et impasse) plutôt qu'aux seuils plus faibles pour des cultures à exigence moyenne. Toutefois, les seuils de concentration critique dans le sol définis dans 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 en zones herbagères peut parfois poser question.

3.5. Intérêts et limites des indices de nutrition N P et K dans le cas des prairies semées de plus ou moins longue durée et des rotations prairies-cultures annuelles

Les indices de nutrition IN-N, IN-P et IN-K ont été proposés à partir de principes développés initialement sur prairie temporaire de graminées (Salette et Lemaire, 1981 ; Salette et Huché 1991). La présente étude illustre une fois de plus leur opérationnalité et leur pertinence sur ces prairies temporaires. Ces outils ne sont pas dépendants de la nature des sols ni du niveau d'exigence de la végétation. De ce fait ils ne nécessitent aucun calage ni du premier point de vue ni du second. Ils sont également directement opérants quel que soit le mode de gestion de la prairie temporaire. Or, la présente étude montre l'impact majeur du mode de gestion des prairies sur la rapidité et l'ampleur du développement de la carence minérale suite à un arrêt ou une forte réduction de fertilisation.

Ces indices de nutrition sont des indicateurs quantitatifs, leurs valeurs permettent ainsi de situer précisément toute situation expérimentale, aussi bien sous contrainte plus ou moins forte qu'en situation d'excès, sans préjuger d'objectifs d'intensivité ou d'acceptation de niveaux plus ou moins limitants de fourniture P et K du sol. Dans le cas d'un sol qui a déjà fait l'objet de calage des indices de nutrition sur la végétation et des concentrations dans le sol, l'un par rapport à l'autre, les deux démarches semblent être tout aussi précises l'une que l'autre, au vu de la bonne corrélation obtenue entre les 2 indicateurs. En revanche, lorsque ce calage n'a pas été fait (la grande majorité des situations de terrain), les valeurs seuil de l'indicateur concentration dans le sol doivent être choisis sur la base d'hypothèses concernant la nature du sol (références établies pour des cultures annuelles et non des prairies) et sur la base d'hypothèses concernant « l'exigence » des prairies. Or, ce choix dans « l'exigence » des prairies n'est pas évident, compte tenu de la forte variabilité de l'impact des modes de gestion sur les exportations.

Toutefois, en leur état actuel, les indices de nutrition ne sont pas des outils de pilotage direct de la fertilisation. En effet en l'état, ils ne permettent pas de

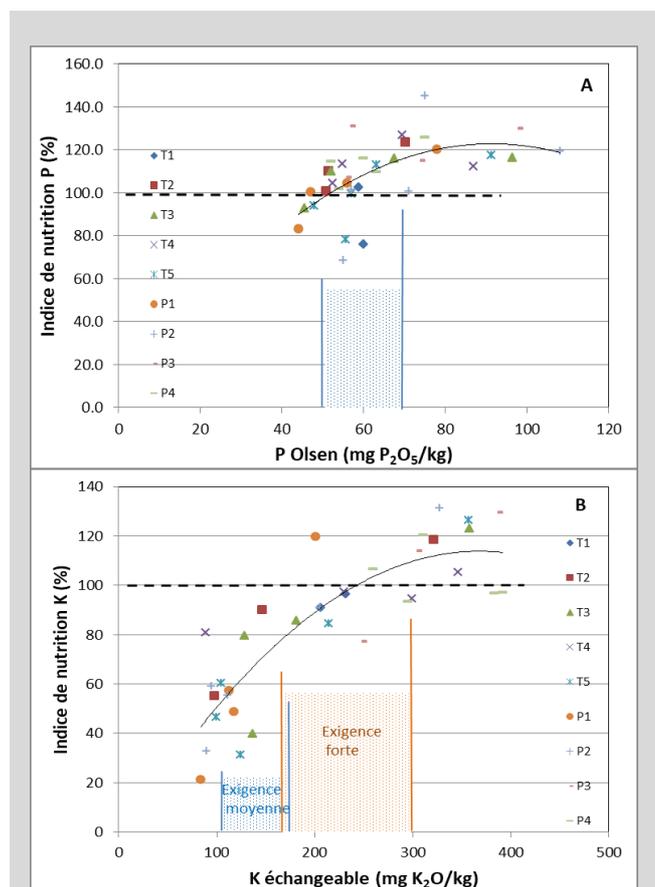


FIGURE 6 : Relation entre concentrations en P Olsen (A), K échangeable (B) et indices de nutrition P et K, respectivement (données triennales sur la période 2008-17).

Figure 6 : Relationship between Olsen P (A), exchangeable K (B) concentrations and P and K nutrition indices, respectively (3-year data for 2008-17).

calculer une dose de fertilisant à apporter. Ils permettent par contre de quantifier les situations et de corriger les fertilisations par rapport aux pratiques antérieures sur la parcelle, ou par rapport aux pratiques sur d'autres parcelles dans un même contexte. Leur utilisation dans un objectif de pilotage quantitatif de la fertilisation nécessiterait un travail de développement supplémentaire.

Une autre limite des indices de nutrition, qui vaut d'ailleurs aussi bien pour les références de concentration du sol, est de savoir si ces valeurs critiques d'IN-P et d'IN-K ou de concentrations dans le sol sont effectivement similaires pour les légumineuses, ou bien si elles peuvent différer pour ces espèces. En effet, les légumineuses ont généralement une exigence plus grande que les autres espèces en P et K. Cela peut être dû à une moindre compétitivité de leur absorption de P et K, à même relation P et K critique (Sinclair *et al.*, 1996 ; Jouany *et al.*, 2005). Mais cela pourrait éventuellement aussi se traduire par des valeurs critiques de P et K plus élevées. Cette question est importante puisque le maintien des fertilités P et K est un élément important pour le bon développement des légumineuses, pour leur pérennité et pour leur maintien dans les mélanges et associations (Théllier-Huché *et al.*, 1996 ; Pochon, 2013).

Enfin, concernant les phases de culture des rotations prairies-cultures annuelles, les références sur certaines espèces, notamment les C₄ comme le maïs, sont actuellement manquantes en ce qui concerne le K.

Conclusion

La pérennité des prairies, envisagée ici sous l'angle du maintien dans le temps de leur productivité au cours des années, peut, dans un certain nombre de situations, être impactée de manière très significative par des impasses ou des insuffisances de fertilisation P-K d'entretien des prairies. De ce fait, les tendances actuelles de réduction de la fertilisation créent un risque de perte de rendement significatif si l'évolution de la fertilité n'est pas suivie lors de ces impasses ou de ces réductions importantes de fertilisation P et K, et ajustée le cas échéant.

Ce risque est difficile à estimer a priori. En effet, la grande variabilité des modes de gestion des prairies (mode d'exploitation fauche ou pâture, fertilité N-P-K, précédents) et des conditions pédo-climatiques de chaque parcelle, importante entre exploitations mais aussi très souvent au sein des exploitations, crée une forte variation des bilans minéraux à l'échelle de la parcelle, et en conséquence une forte variation des besoins quantitatifs d'entretien de la fertilité. Dans ces conditions, la dynamique d'évolution de la fertilité P et K sous prairies est difficile à prévoir à l'échelle de la parcelle.

De ce fait, les indices de nutrition ne se substituent pas à l'analyse de bilans, mais en sont complémentaires.

Ils fournissent une évaluation 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 fournissent une évaluation à l'échelle de la parcelle, qui est l'échelle pertinente et donc à considérer. Enfin, ils fournissent une information quantitative quel que soit l'objectif et sans hypothèse sur le niveau de production, intensif ou plus économe en ressources.

Les indices de nutrition sont mobilisables aussi bien sur prairie temporaire que permanente, et dans certains cas sur cultures fourragères annuelles. Toutefois 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 la cohérence entre le diagnostic basé sur les indices de nutrition et le diagnostic basé sur l'analyse de sol, lorsque les deux démarches peuvent être mises en œuvre. Nos résultats 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.

Remerciements

Les auteurs remercient l'équipe technique (P. Beauclair, J.F. Bouhiron, J. Chargelègue, C. de Berranger, C. Huguet et X. Charrier) pour leur contribution aux expérimentations.

Le dispositif de Lusignan a été soutenu par l'infrastructure de recherche nationale ACBB, par AnaEE France (ANR-11-INBS-0001), AllEnvi, le CNRS-INSU et la Région Nouvelle-Aquitaine.

Claire Jouany est remerciée pour ses discussions sur l'analyse des résultats.

Article accepté pour publication le 30 juin 2022

REFERENCES 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.
- Bullock J. M., Hill B. C., Dale M. P., Silvertown J., (1994). « An experimental study of the effects of sheep grazing on vegetation change in a species-poor grassland and the role of seedling recruitment into gaps ». *Journal of Applied Ecology*, 493-507.
- 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.
- Corpen, (1999). « Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager. Influence de l'alimentation et du niveau de production ».
- Deleau D., (2020). « Prairies : deux approches très différentes pour les apports PK ». <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.
- Farruggia A., Thellier-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.
- Gastal F., Jouany C., (2022). « Les ressources P-K du sol peuvent-elles être des facteurs limitant la pérennité des prairies ? ». *Actes des Journées AFPP de Printemps 2022*.
- Huguenin-Elie O., Mosimann E., Schlegel P., Lüscher A., Kessler W., Jeangros B., (2017). « Fertilisation des herbages ». *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6).
- Jouany C., Cruz P., Petitbon P., Duru M., (2004). « Diagnosing phosphorus status of natural grasslands in the presence of white clover ». *European Journal of Agronomy*, 21, 273-285.
- Jeangros B., Sinaj S., (2018). « Effets du mode d'utilisation sur les besoins en phosphore et en potassium d'une prairie du Jura ». *Recherche Agronomique Suisse* 9, 256-263.
- Jouany C., Cruz P., Theau J.P., Petitbon 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 *et al.*, (2022). Soumis, à paraître.
- Kayser M., Isselstein J., (2005). « Potassium cycling and losses in grassland systems: a review ». *Grass and Forage Science*, 60, 213-224.
- Knoden D., Lambert R., Nihoul P., Stilmant D., Pochet P., Crémer S., Luxen P., (2007). « Fertilisation raisonnée des prairies ». *Les livrets de l'agriculture*, N°15.
- Kunrath T.R., de Berranger C., Charrier X., Gastal F., César de Faccio Carvalho P., Lemaire G., Emile J.C., Durand J.L., (2015). « How much do sod-based rotations reduce nitrate leaching in a cereal cropping system? ». *Agricultural Water Management*, 150, 46-56.
- Lambert R., Cugnon T., Crémer S., Knoden D., (2020). « La moitié des prairies ont manqué de potasse ce printemps ». *La lettre paysanne*, 104, 39.
- 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.
- Lançon 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.
- 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
- Plénet D., Lemaire G., (2000). « Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration ». *Plant Soil* 216:65-82.
- Pochon A., (2013). « De la prairie temporaire à la prairie permanente ». *Fourrages*, 216, 269-274.
- 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 œuvre, 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.
- Schneider A., Castillon P., Pellerin S., (2003). « Relationships between soil potassium supply characteristics based on soil solution concentration and buffer power and field responses of winter wheat and maize ». *Plant and Soil*, 254, 269-278.
- Sinclair A. G., Smith L. C., Morrison J. D., Dodds K. G., (1996). « Effects and interactions of phosphorus and sulphur on a mown white clover/ryegrass sward ». *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 39, 3, 421-433.
- Thellier-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*.
- Thellier-Huché L., Bonischot R., Contat F., Salette J., (1996). « Incidence à long terme d'une absence prolongée de fertilisation phosphatée sur prairie permanente ». *Fourrages*, 145, 53-52.
- Vertès F., Gastal F., Delaby L., Delagarde R., Dieulot R., Falaise D., Woitlock A., Pierre P., (2022). « Trajectoires et déterminants de la pérennité de prairies semées dans le grand-ouest de la France ». *Fourrages*, 25-38
- Voisin A., (1960). « Dynamique des herbages ». *La Maison Rustique*, Paris, 320 pages.
- Whitehead D.C., (2000). « Nutrient elements in grassland. Soil-Plant-Animal Relationships ». CAB International.
- 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.