



HAL
open science

Effets du phosphore et de la chaux sur la multifonctionnalité des prairies de moyenne montagne

Sylvain Mollier

► **To cite this version:**

Sylvain Mollier. Effets du phosphore et de la chaux sur la multifonctionnalité des prairies de moyenne montagne. Biodiversité et Ecologie. 2018. hal-02790928

HAL Id: hal-02790928

<https://hal.inrae.fr/hal-02790928>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE SAVOIE
MASTER ÉCOLOGIE DES MILIEUX DE MONTAGNE

12 juin 2018

Effets du phosphore et de la chaux sur la multifonctionnalité des prairies de moyenne montagne

RAPPORT DE STAGE DE MASTER 2

Sylvain Mollier

Sous la direction de Juliette Bloor

Environnement – Montagne



Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe de l'UREP pour leur accueil au sein de leur unité. Merci notamment à Pascal Carrere pour avoir fait circuler ma candidature spontanée à son équipe. Merci également à Juliette Bloor pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions par son investissement, son accompagnement, sa bienveillance et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier l'équipe de l'UMRH (Aline Le-Morvan, Fabienne Picard et Laurène Salis) pour m'avoir accueillis et formé aux techniques d'analyses en laboratoire.

Merci également aux techniciens qui ont permis le bon déroulement du projet grâce aux données qu'ils ont collectés.

Enfin, merci à mes collègues de bureau pour la bonne ambiance au travail.

Résumé

L'application de processus biologiques aux systèmes de production agricole a le potentiel d'améliorer la durabilité de la gestion de la fertilisation dans les prairies permanentes. Cette étude examine les impacts du chaulage et de la fertilisation au phosphore sur la structure et le fonctionnement d'une prairie de montagne.

Une expérience de terrain a été réalisée sur une prairie permanente du Massif central caractérisée par un sol acide. Des placettes ont été délimitées et les traitements ont été appliqués selon un plan expérimental factoriel : fertilisation au phosphore (zéro, avec fertilisation) et chaulage (zéro, avec chaulage). Des mesures de la biomasse sèche aérienne, de la composition chimique de la végétation et de la composition botanique ont été effectuées pendant trois ans. Cette étude a montré que le chaulage augmentait la productivité en l'absence de fertilisation au phosphore, mais n'avait aucun effet sur la qualité du fourrage. La fertilisation au phosphore a augmenté la teneur en azote des plantes au cours de l'étude, avec ou sans chaulage. Cependant, les traitements expérimentaux n'ont eu aucun effet sur la biodiversité végétale. Au vu de l'interaction antagoniste entre le chaulage et l'addition de phosphore sur la productivité, il ne semble pas approprié de chauler et fertiliser simultanément des prairies permanentes avec du phosphore dans ce système d'étude. La généralisation de ces résultats doit être testée dans d'autres prairies ayant des conditions pédologiques et climatiques différentes.

Abstract

The application of biological processes to agricultural production systems has the potential to improve the sustainability of fertilization management in permanent grasslands. This study examines the impacts of liming and fertilization on the structure and functioning of an upland grassland. A field experiment was set up on a permanent grassland of the Massif central region, characterized by acidic soil. Plots were established and treatments were applied in a factorial experimental design : phosphorus fertilization (zero, with fertilization) and liming (zero, with liming). Measures of aboveground dry biomass, chemical composition of vegetation and botanical composition were carried out for three years. This study founds that liming increased productivity in the absence of phosphorus fertilization, but had no effect on forage quality. Phosphorus fertilization increased plant nitrogen content during the study, both with or without liming. However, experimental treatments had no effect on plant biodiversity. Since the antagonist interaction between liming and P addition on productivity, it does not seem appropriate to simultaneously lime and fertilize permanent grasslands with P in this study system. The generality of these results needs to be tested in other grasslands with different soil and climatic conditions.

Avant propos

Ce stage s'inscrit dans un projet plus conséquent mis en place en 2014 en collaboration avec une entreprise agro-alimentaire. Le protocole consiste à identifier les impacts de différents fertilisants conventionnels et innovants ainsi que leurs interactions sur les écosystèmes prairiaux. Ce présent rapport ne s'intéresse qu'aux effets du phosphore et du Lithothame et se base sur une analyse statistique des données de 2015 à 2017. J'ai cependant participé aux campagnes de terrain de 2018 et effectué des mesures en laboratoire (extraction d'azote, mesures de pH, tri botanique). J'ai également effectué des mesures *in vitro* et des prédictions de digestibilité des fourrages grâce à la technologie du spectre en proche infra-rouge (SPIR) mais ces données ne sont pas encore complètes et ne seront pas incluses dans ce rapport.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes	3
2.1	Description du site d'étude et du design expérimental	3
2.2	Mesures effectuées	4
2.3	Variables étudiées	4
2.4	Analyses statistiques	5
3	Résultats	6
3.1	Impacts du phosphore et de la chaux sur la productivité et la qualité de la végétation	6
3.1.1	Production primaire	6
3.1.2	Composition chimique de la végétation et indices de nutritons	7
3.2	Impacts du phosphore et de la chaux sur la biodiversité	8
3.2.1	Diversité spécifique	8
3.2.2	Diversité fonctionnelle	10
3.3	Impacts du phosphore et de la chaux sur la disponibilité de l'azote dans le sol .	11
3.3.1	Azote minéral total	11
3.3.2	Azote minéral échangeable	12
4	Discussion	13
5	Conclusion	15
	Annexes	I
A	Calculs des indices de nutritons	I
B	Description des types fonctionnels	I

1 Introduction

Le défi qui se présente à l'agriculture dans la décennie prochaine est d'assurer la durabilité des systèmes de production dans un contexte changeant. Cela passe par une évolution de la façon de produire mais également par la prise en compte d'une plus large gamme de services rendus par les agrosystèmes. Ce double enjeu se retrouve dans le paradigme de l'agro-écologie qui cherche à intégrer les principes de l'écologie au service des productions agricoles, avec le souci de s'appuyer davantage sur le fonctionnement des agroécosystèmes et de minimiser les intrants. Cette étude s'intéresse ici à l'application de pratiques agro-écologiques sur un système de production agricole de moyenne montagne.

En France, 17 % de la surface agricole utile (SAU) se trouve en territoire de montagne, c'est-à-dire située à plus de 700 m d'altitude ou présentant une pente d'au moins 20 % (d'après la directive n° 76/401 du 6 avril 1976 de la CEE toujours en vigueur). Elle se répartie entre les Alpes, les Pyrénées, la Corse, les Vosges et le Massif Central et regroupe 16 % des exploitations agricoles françaises. Son système de production étant basé sur l'élevage et la production de lait, la surface cultivée est dominée à 69 % par des prairies permanentes (Dobremez *et al.*, 2015). Ces prairies constituent un enjeu majeur dans le développement local et contribuent au maintien d'un grand nombre de services écosystémiques. Outre les services de production, elles contribuent à la stabilité structurale et à la fertilité des sols, au maintien de la qualité des eaux, au contrôle des bio-agresseurs, à la conservation de la biodiversité, au stockage de carbone et à la valeur paysagère (Amiaud et Carrère, 2012). Cependant, face à l'étalement urbain et aux coûts de productions plus élevés, le nombre d'exploitations agricoles de montagne a tendance à diminuer et les prairies permanentes sont soit abandonnées au profit des prairies temporaires, soit exploitées de plus en plus intensivement, ce qui pourrait nuire à ces services écosystémiques (Sheeren *et al.*, 2015). L'application des pratiques agro-écologiques dans ces agrosystèmes est donc particulièrement pertinent pour limiter les intrants et trouver un compromis entre la production de biomasse, la biodiversité et la qualité des fourrages.

Les sols de montagne, bien que présentant une grande diversité au sein même des massifs, sont généralement moins productifs que les sols de plaine (pH acide, faible profondeur, stock de matière organique important) (GisSol, 2011). La qualité des fourrages peut contribuer à compenser cette plus faible productivité, participer à la bonne santé des troupeaux et conditionner la qualité des produits destinés à la consommation humaine, souvent valorisés par un label de type AOP ou IGP (Farruggia *et al.*, 2008). Elle est donc d'une importance capitale dans les zones de montagne pour maintenir un système compétitif. Elle est conditionnée par l'état nutritif de la végétation mais elle est également liée à la proportion de fabacées présentes dans la ration (Baumont *et al.*, 2008). Le support à la biodiversité est également un service rendu par les prairies permanentes qu'il est nécessaire de préserver et de valoriser dans un système agricole à faible production. En effet, les prairies diversifiées permettent d'assurer une plus grande souplesse d'utilisation du fait d'une valeur alimentaire plus stable dans le temps (Daccord *et al.*, 2006) et présentent une meilleure résilience face aux perturbations (Tilman *et al.*, 2006), ce qui peut constituer un atout majeur face aux changements climatiques.

Pour faire face à la plus faible productivité des prairies en zones de montagnes, celles ci sont communément fertilisées par de la matière organique (fumier, lisier, *etc.*), des fertilisants minéraux et de la chaux (Haynes et Naidu, 1998). Le phosphore constitue l'un des intrants minéraux majoritaire en prairies permanentes. C'est un élément essentiel dans le cycle cellulaire (réplication, métabolisme, structure membranaire, *etc.*) et une carence en phosphore pousse la végétation à allouer plus d'énergie à son absorption (production de biomasse racinaire, exsudation de composés organiques, *etc.*) ou à son recyclage (adoption de voies métaboliques alternatives moins efficaces) qu'à la production de biomasse aérienne, ce qui entraîne un ralentissement ou un arrêt de la croissance végétale et une baisse de la productivité (Shen *et al.*, 2011). L'assimilation du phosphore par la végétation est limitée pas une faible quantité d'ions orthophosphates présents en solution (entre 0.1 et 10 μM), une faible capacité de diffusion (10^{-12} à 10^{-10} m/s) et une forte affinité pour les phases solides organiques et minérales du sol (Bialeski, 1973; Lindsay *et al.*, 1979; Parfitt, 1979). L'apport de phosphore peut pallier a cette faible disponibilité. Un apport de phosphore en grande quantité peut cependant avoir un effet négatif sur l'activité enzymatique des micro-organismes du sol (Haynes et Swift, 1988), contribuer à une perte de biodiversité végétale (Janssens *et al.*, 1998) et sa lixiviation entraîne de graves problèmes d'eutrophisation dans les écosystèmes aquatiques (Schindler, 1974). Il est donc nécessaire de maximiser l'absorption du phosphore par la végétation de manière à augmenter la production agricole, tout en limitant les effets néfastes d'une fertilisation trop importante.

Dans les agroécosystèmes tempérés, il est connu que la gestion du pH du sol peut jouer un rôle important pour la fertilité en milieu acide (Haynes et Naidu, 1998). Le chaulage est une pratique agricole courante destinée à relever le pH des sols naturellement acides ou acidifiés par la fertilisation (Bolan *et al.*, 2003), via l'apport d'ion calcium ou magnésium sous la forme par exemple de carbonate de calcium (CaCO_3) marin ou terrestre ou de calcaire dolomitique (CaCO_3 , MgCO_3). L'ajout de chaux a pour principales conséquences d'augmenter le pH du sol et la capacité d'échange cationique (CEC) (Parfitt, 1980), d'améliorer la structure du sol par floculation des argiles et de précipiter les ions aluminiums sous forme d'hydroxydes d'aluminium, ce qui tend à diminuer la toxicité aluminique. L'augmentation du pH diminue également la capacité d'adsorption des anions (via une diminution de la charge positive des particules amphotères du sol) et la solubilité des phosphates d'aluminium. Le chaulage stimule l'activité microbienne du sol et augmente sa biomasse, ce qui contribue à une meilleure minéralisation de la matière organique (Haynes et Swift, 1988). Ces effets du chaulage peuvent être utiliser pour améliorer l'utilisation du phosphore par la végétation comme l'ont montré sous serre et en laboratoire Smyth et Sanchez (1980) qui ont observé une augmentation de la désorption du phosphore de 80 % et de la production de biomasse végétale. Cependant, ces effets peuvent être limités par une cristallisation incomplète des hydroxydes d'aluminiums en sol humide (Haynes, 1982, 1984), la précipitation du phosphore avec les ions calcium apportés en trop grande quantité (Naidu *et al.*, 1990) ou la nature des cations échangeables du complexe argilo-humique qui rendent imprévisible les équilibres d'adsorption/désorption sur la matrice du sol (Curtin et Syers, 2001).

La littérature montre que de nombreuses études se sont intéressées à l'effet du chaulage et de l'apport en phosphore sur les cultures mais peu ont considéré plus de deux facteurs à la fois. Cette étude vise donc à mettre en évidence les effets potentiels d'amendements de superphosphate et de chaux sur la productivité, la qualité fourragère, ainsi que sur la diversité spécifique et fonctionnelle d'une prairie de moyenne montagne du massif Central.

Cette étude cherche à tester ces 3 hypothèses :

1. L'apport de phosphore augmente la quantité et la qualité du fourrage en améliorant l'état nutritif de la végétation.
2. L'apport de chaux augmente la production de biomasse grâce à une meilleur utilisation des nutriments et augmente la biodiversité en rehaussant le pH de manière à se rapprocher des optimums écologiques de la végétation.
3. L'association de ces deux amendements a des effets synergiques grâce à une meilleure absorption du phosphore amendé.

2 Matériel et méthodes

2.1 Description du site d'étude et du design expérimental

En 2014, un dispositif expérimental a été mis en place en prairie de moyenne montagne dans le massif central (45 ° 38'N, 2 ° 44'E, 1100 m d'altitude). Ce site est caractérisé par un andosol limono-sableux pauvre en carbonates, contenant 19 % de matière organique et présentant un $pH_{(eau)}$ de 5.2. La température moyenne annuelle est de 7 ° C et la pluviométrie de 1200 mm/an. Cette prairie a été semée dans les années 1980 et a été exploitée par un pâturage extensif et deux fauches annuelles par l'agriculteur. Des apports de fumier ont été effectués chaque année durant l'automne jusqu'en 2014. Elle est depuis fauchée 2 fois par ans par l'agriculteur (début juin et fin septembre). La communauté végétale est dominée par les poacées, qui représentent en moyenne 71 % du couvert végétal. En ordre décroissant d'abondance, les principales espèces de poacées sont *Dactylis glomerata*, *Trisetum flavescens*, *Poa pratensis* et *Agrostis capillaris*. En moyenne, les "diverses" (*Chenopodium album*, *Lamium album*, *Taraxacum officinalis*) et les fabacées (*Trifolium repens*) contribuent respectivement à 18 % et 11 % de la composition botanique.

Le protocole suit un design factoriel orthogonal afin d'étudier les effets du traitement au phosphore (Superphosphate en granules à libération lente, 0-45 unité/ha), de la chaux (Lithothame en poudre tamisé, 0-2,5 t/ha) et de l'interaction de ces deux traitements. Chaque traitements ont été appliquées sur 4 placettes (4m × 2m par placette, 20 placettes au total) chaque année à la fin de la période de végétation (début octobre). L'apport de chaux en 2014 et 2015 n'ayant pas été assez conséquent pour mesurer une différence visible du pH, la dose a été rehaussée de 600 kg/ha à 2.5 T/ha à l'automne 2016. Ce traitement a augmenté le pH de 5.19 ± 0.13 à 5.45 ± 0.31 unités en 2017 et les effets sont surtout visible au printemps.

2.2 Mesures effectuées

Des prélèvements de sols ont été effectués à la tarière sur les 10 premiers centimètres au début de la période de végétation, durant le pic de biomasse, à la fin du pic de biomasse et à la fin de la période de végétation. Les échantillons ont ensuite été tamisés à 2 mm et la biomasse racinaire a été enlevée. La teneur en ions NH_4^+ et NO_3^- a été dosée à partir de 5g d'échantillon frais dissous dans 25 mL de solution KCl à 1M. Le pH_{eau} a également été mesuré en laboratoire à l'aide d'un pH-mètre dans une solution contenant 10 g de sol frais dilué dans 20 mL d'eau distillée. L'état azoté du sol a été suivi par l'incubation de résines PRS[®] ("Plant root simulator") commercialisées par Western Ag innovation (Saskatoon, Saskatchewan, Canada). Ces résines sont fixées sur des structures en plastique et plantées par paire (une pour fixer les anions, l'autre les cations) verticalement dans les 10 premiers centimètres du sol et laissées incubées durant 14 jours.

La composition botanique a été déterminée par un relevé de végétation suivant la méthode des points quadrats début juin, durant le pic de biomasse. Un bâton est positionné verticalement dans la placette et chaque espèce végétale touchant le bâton est notée selon un code binaire présence/absence. Ce protocole est répété 18 fois par placette. La présence/absence est ensuite traduite en proportions en divisant le nombre de présences par le nombre total d'individus observés. Deux quadrats de 50 × 50 cm par placettes ont ensuite été coupés à 5 cm de la surface du sol. Un sous échantillon a été constitué où les espèces ont été classées dans les trois groupes suivant : les fabacées, les poacées et les "diverses" (regroupant l'ensemble des dicotylédones n'appartenant pas à la famille des fabacées). La totalité de la biomasse a ensuite été séchée 48h à 60 ° C puis pesée afin de déterminer la quantité de biomasse sèche et les proportions massiques de chaque groupe fonctionnel. L'échantillon a ensuite été broyé à 0.5 mm et les éléments constitutifs ont été dosés par spectrométrie en phase gazeuse (C, N, P, K). La matière minérale totale a été obtenue en pesant les cendres de l'échantillon après combustion à 480 ° C durant deux heures.

2.3 Variables étudiées

La productivité des parcelles a été étudiée en calculant la quantité de biomasse sèche annuelle produite par unité de surface. La qualité du fourrage et la biodiversité ont été étudiées avec les données obtenues au pic de biomasse. La qualité peut être estimée par le calcul du bilan électrolytique (BE) défini comme étant la différence des teneurs en cations et en anions majeurs ($BE = [K^+] + [Na^+] - [Cl^-]$). Il joue un rôle prépondérant dans l'homéostasie des herbivores et contribue à l'augmentation des performances zootechniques. Les vaches en lactation produisent le maximum de lait pour un BE proche de 400 meq/kg de matière sèche (MS) ([Apper-Bossard et al., 2009](#)). Ce paramètre est relié linéairement aux teneurs en phosphore ([P]), à la matière azotée totale (MAT, estimée en multipliant la teneur en azote par 6.25, les protéines contenant en moyenne 16% d'azote ([Agabriel, 2010](#))) et à la quantité de matière minérale totale (MMT) des échantillons d'après la relation établie par [Meschy et Peyraud \(2004\)](#) (Cf Équation (1)) :

$$BE = 63.08 \times [P] + 2.39 \times MMT + 0.37 \times MAT - 19 \quad (1)$$

Ces résultats ont été complétés par le calcul du rapport C/N de la végétation. Un C/N élevé réduit la digestibilité et l'efficacité de la conversion du fourrage ingéré à la croissance ou à la reproduction des ruminants (Huston et Pinchak, 1991). Les éventuels facteurs limitant la production ont été identifiés par le calcul d'un indice d'azote (I_N) (Lemaire et Gastal, 1997), de phosphore (I_P) et de potassium (I_K) (Duru et Théliér Huché, 1997) d'après les formules décrites dans l'annexe A page I. Ces éléments sont considérés comme limitant lorsque l'indice est inférieur à 80, très limitant si l'indice est inférieur à 60 ou excédentaire si l'indice est supérieur à 100 excepté pour le phosphore où l'état nutritif est jugé très bon pour $100 < I_P < 120$.

La diversité spécifique a été étudiée par le nombre d'espèces présentes (S) lors des relevés, le calcul des indices de diversité de Shanon-Weaver ($H' = -\sum p_i \times \log_2(p_i)$) et de dominance de Simpson ($D = \sum p_i^2$) ainsi que l'indice d'équitabilité de Pielou ($J = \frac{H'}{\log_2(S)}$), comme préconisé par Peet (1974). La diversité fonctionnelle a été étudiée à partir des proportions massiques de chaque groupe fonctionnel (poacées, fabacées et "diverses"). Le poids sec n'étant pas forcément représentatif de la quantité d'individus (notamment pour les fabacées riches en eau), les abondances de poacées et de fabacées calculées à partir des relevés botaniques au pic de biomasse ont permis de vérifier ces proportions *in situ*. Les poacées dominantes identifiées lors des relevés ont été catégorisées suivant la typologie fonctionnelle de Cruz (Cruz *et al.*, 2010). Cette typologie classe les poacées en 5 catégories (A, B, b, C, D) en fonction du taux de matière sèche (TMS), de la surface spécifique foliaire (SSF), de la durée de vie foliaire (DVF), de la date de floraison, de la hauteur maximale et de la résistance à la cassure. Les caractéristiques de ces types fonctionnels sont détaillées dans l'annexe B page I.

Le dosage de l'azote au KCl permet d'avoir une estimation des stocks d'azote minéral dans le sol à un instant donné tandis que l'analyse des résines permet d'obtenir une valeur intégrée sur 14 jours de la quantité d'azote minéral dans le sol disponible et potentiellement absorbable par la végétation.

2.4 Analyses statistiques

Pour chaque variable, des analyses de variance (ANOVA) à 3 facteurs ont été utilisées en prenant en compte, l'année, le traitement au phosphore (P), le traitement à la chaux (Ca) et les interactions 2 à 2. Les résultats des résines portent sur 2016 et 2017 uniquement et des données étant manquantes, la somme des carrés de type III a été utilisée pour l'ANOVA (fonction "Anova" de la librairie "car" (Fox et Weisberg, 2011)). Les hypothèses sous-jacentes à l'utilisation de l'ANOVA ont été vérifiées par un test de Bartlett (homoscédasticité) et de Shapiro (normalité des résidus). Une analyse factorielle de correspondance interclasse ("between class analysis", fonction "bca" de la librairie "ade4" (Dray et Dufour, 2007)) a été effectuée pour étudier la diversité spécifique et déterminer la part d'inertie expliquée par les traitements et les années. Un test de Monté-Carlo avec 200 itérations a été utilisé afin de vérifier la significativité de la BCA.

Les données ont été analysées avec le logiciel R v3.4.3 (R Core Team, 2017). Les représentations graphiques ont été obtenues à l'aide du package ggplot2 (Wickham, 2009).

3 Résultats

3.1 Impacts du phosphore et de la chaux sur la productivité et la qualité de la végétation

3.1.1 Production primaire

Le traitement à la chaux augmente la production de biomasse végétale en l'absence d'apport de phosphore (Interaction P :Ca, Tableau 1). Cet effet est surtout due à l'augmentation observée en 2017 (Figure 1) où la chaux augmente les rendements de 365.6 g/m² à 544.3 g/m². La production de biomasse varie avec les années (Effet Année, Tableau 1) et elle a été presque 2 fois plus élevée en 2015 que les années suivantes.

Effet	Df	F	P
P	1	1.37	ns
Ca	1	0.02	ns
P : Ca	1	6.21	*
Année	2	80.89	***
Année : P	2	0.27	ns
Année : Ca	2	0.93	ns
Année : P : Ca	2	2.86	ns
Résidus	36		

Tableau 1 – Résultats de l'ANOVA (ns= non significatif, *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001)

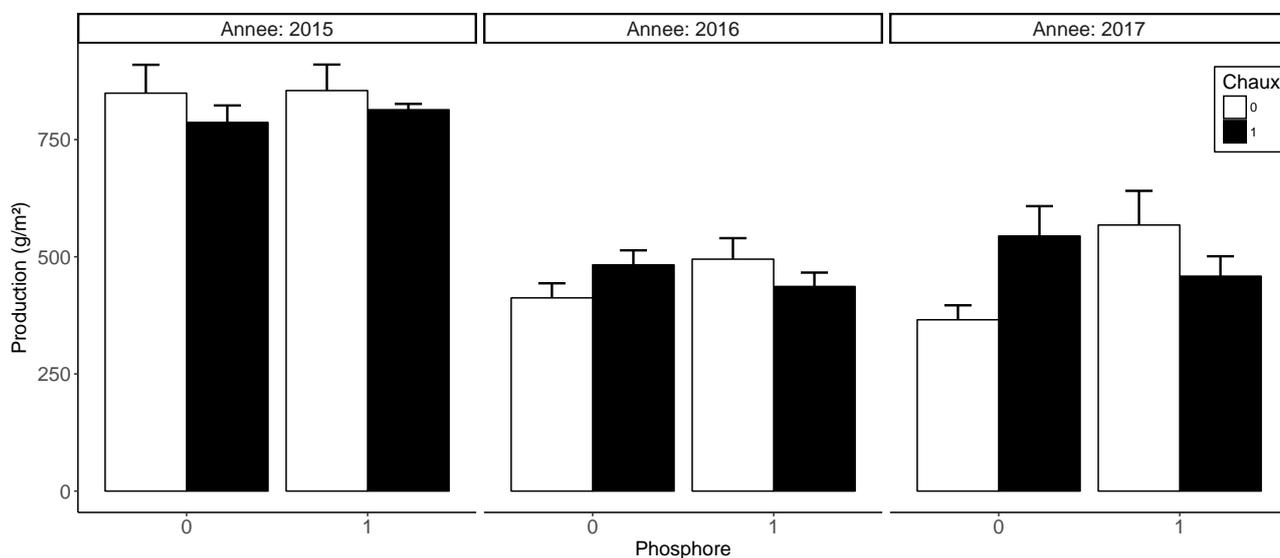


FIGURE 1 – Effet des traitements au phosphore et à la chaux sur la production de biomasse sèche annuelle (moyennes + erreur standard (ES), n=4)

3.1.2 Composition chimique de la végétation et indices de nutritions

Le traitement au phosphore a un impact positif sur les teneurs en azote (+7.1 %), en phosphore (+6.1 %) ainsi que sur l'indice de nutrition azoté (+ 6.7 %, Figure 2 A). Il diminue la teneur en potassium foliaire (-11.4 %) et l'indice de nutrition potassique (-14,1 %, Figure 2 C) ainsi que le rapport C/N (-5.7 %) de la végétation (Effet P, Tableau 2). Le traitement à la chaux a un effet négatif (-5.7 %) sur la teneur en phosphore mais n'influe pas sur les indices de nutritions (Effet Ca, Tableau 2).

Aucun des traitements n'impacte le bilan électrolytique et il n'existe aucun effet des interactions entre les traitements sur aucune des variables étudiées. La composition chimique de la végétation varie entre les années (Effet Année, Tableau 2). La végétation de 2016 contenait globalement plus d'azote et de phosphore, présentait un bilan électrolytique plus élevé et un rapport C/N plus faible que celle des autres années tandis que la teneur en potassium diminue d'année en année.

Effet	Df	[N]		[P]		[K]		C/N	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
P	1	6.22	*	5.33	*	5.55	*	4.57	*
Ca	1	2.32	ns	5.13	*	0.13	ns	1.81	ns
P : Ca	1	0.28	ns	0.42	ns	1.40	ns	0.43	ns
Année	2	23.13	***	12.86	***	17.54	***	21.68	***
Année : P	2	0.29	ns	1.53	ns	0.52	ns	0.11	ns
Année : Ca	2	2.17	ns	0.29	ns	0.31	ns	1.30	ns
Année : P : Ca	2	0.23	ns	0.15	ns	0.008	ns	0.32	ns
Résidus	36								

Effet	Df	BE		I_N		I_P		I_K	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
P	1	1.17	ns	5.12	*	1.60	ns	9.81	**
Ca	1	2.58	ns	1.26	ns	3.45	ns	0.0004	ns
P : Ca	1	0.01	ns	0.20	ns	0.33	ns	2.15	ns
Année	2	11.92	***	13.27	***	2.06	ns	22.27	***
Année : P	2	1.77	ns	0.03	ns	1.94	ns	0.69	ns
Année : Ca	2	1.34	ns	2.13	ns	0.59	ns	0.05	ns
Année : P : Ca	2	0.15	ns	0.21	ns	0.16	ns	0.009	ns
Résidus	36								

Tableau 2 – Résultats de l'ANOVA (ns= non significatif, *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001)

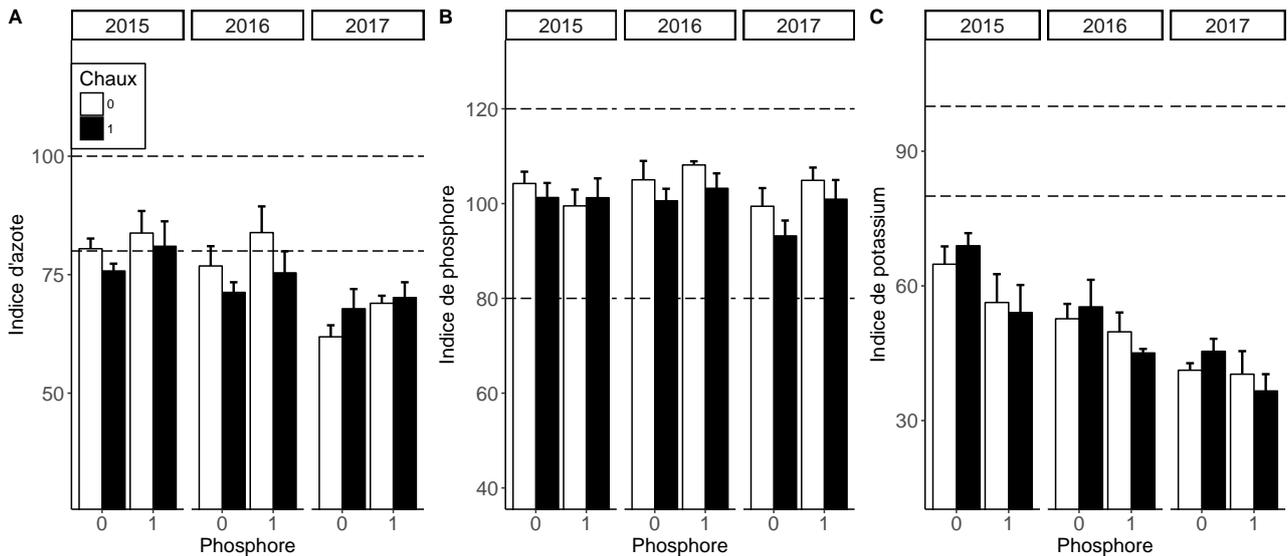


FIGURE 2 – Effet des traitements au phosphore et à la chaux sur les indices de nutriments (moyennes + ES, n=4, les valeurs comprises entre les droites sont jugées satisfaisantes)

3.2 Impacts du phosphore et de la chaux sur la biodiversité

3.2.1 Diversité spécifique

Aucun des traitements n'impacte la diversité spécifique au cours de l'expérimentation. Le nombre d'espèces moyen par placette est de 17.5 ± 0.3 et ne présente pas de variations significatives ni entre les traitements, ni entre les années. L'indice de Shannon moyen est de 3.68 ± 0.03 mais il est descendu à 3.59 ± 0.03 en 2016 (Effet Année= 3.40, $p= 0.0444$) et l'indice de Simpson moyen est de 0.098 ± 0.002 mais il est monté à 0.105 ± 0.002 en 2016 (Effet Année= 5.15, $p= 0.0108$). L'équitabilité moyenne vaut 0.894 ± 0.003 et n'est impactée par aucun des facteurs.

L'analyse factorielle de correspondance permet d'examiner la réponse de la communauté végétale au traitement et présente une inertie totale de 0.54 (Figure 3). La composante 1 et 2 représentent respectivement 22 % et 18 % de l'inertie. Les analyses inter-classes montrent que la variance observées entre les traitements explique 9.4 % de l'inertie ($p = 0.029$). La variance entre les années explique 17.9 % de l'inertie ($p = 0.005$). Les parcelles traitées au phosphore semblent être plus particulièrement dominées par *Trisetum flavescens* et *Holcus mollis* alors que les parcelles traitées à la chaux semblent être plutôt dominée par *Trifolium repens*, *Agrostis capillaris* et *Cerastium fontanum* (Figure 4). L'analyse inter-annuelle montre un phénomène de transition avec l'année 2015 dominée par *Poa trivialis*, *Bromus mollis*, *Lamium album* et *Phleum pratense*, l'année 2017 dominée par *Poa pratensis*, *Cerastium fontanum*, *Trisetum flavescens*, *Holcus mollis* et *Veronica arvensis* et l'année 2016 située entre les deux et présentant une végétation transitoire (Figure 5).

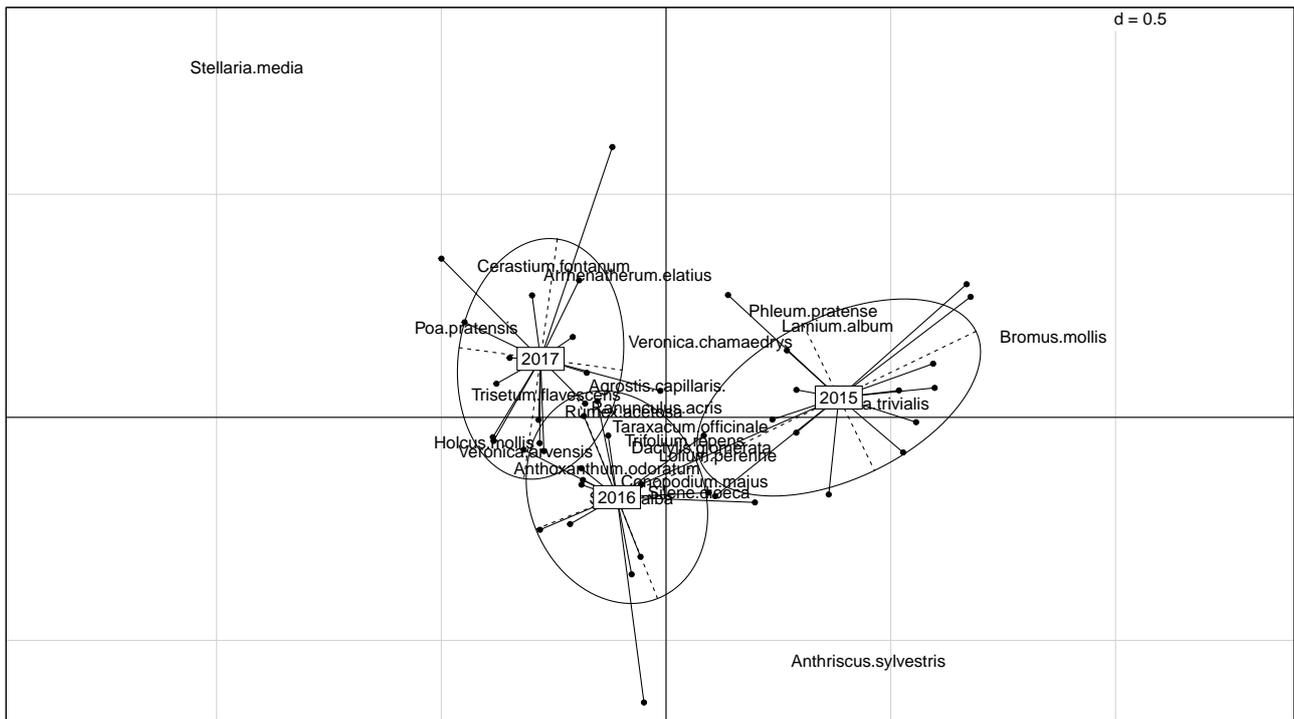


FIGURE 5 – BCA inter-annuelle

3.2.2 Diversité fonctionnelle

L'abondance relative des groupes fonctionnels (basée sur la biomasse) ne montre aucun effet des traitements. Les poacées constituent en moyenne 82 % de la biomasse du fourrage. La proportion de fabacées diminue avec les années en passant de 11 % en 2015 à 3 % de la biomasse sèche en 2017 (Effet Année= 9.47, $p= 0.0005$). La proportion massique des espèces "diverses" augmente avec les années pour atteindre 15 % de la biomasse sèche en 2017 (Effet Année= 5.32, $p= 0.0094$).

Concernant la diversité fonctionnelle sur pied, le traitement au phosphore augmente l'abondance des poacées de 21 % en 2017 (Interaction Année :P= 7.45, $p= 0.0019$) au détriment des "diverses" mais il n'impacte pas la proportion de fabacées. Le traitement à la chaux n'influe pas sur les communautés. La proportion de fabacée varie avec les années et était plus faible en 2017 (Effet Année= 3.86, $p= 0.0303$).

Parmi les poacées, suivant la typologie de [Cruz et al. \(2010\)](#), 3 espèces de type A (*Anthoxanthum odoratum*, *Holcus lanatus*, *Lolium perenne*), 3 de type B (*Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, *Poa pratensis*) et 5 de type b (*Agrostis capillaris*, *Holcus mollis*, *Phleum pratense*, *Poa trivialis*, *Trisetum flavescens*) ont été identifiées lors des relevés. Ces 3 groupes représentent 51 % de la composition floristique des parcelles. Une fois pondéré par les abondances de chaque espèce, le type b représente 53 % des poacées dominantes, le type A 23 % et le type B 24 %. Les proportions de chaque type fonctionnel restent stables et ne sont pas impactées par les traitements.

3.3 Impacts du phosphore et de la chaux sur la disponibilité de l'azote dans le sol

3.3.1 Azote minéral total

Le traitement au phosphore augmente le stock d'azote minéral dans les sols de 15 % en avril (Effet P, Tableau 3, Figure 6). L'ajout de chaux, associé à l'amendement de phosphore permet d'augmenter le stock d'azote du sol de 12 % en juin et de 15 % en septembre (Interaction P :Ca, Tableau 3, Figure 6). Les stocks d'azote étaient plus élevés en avril et juin 2016 qu'en 2017 à la même période (Effet Année, Tableau 3, Figure 6).

Effet	Df	Avril		Juin		Septembre		Novembre	
		F	P	F	P	F	P	F	P
P	1	7.91	**	0.44	ns	0.79	ns	1.31	ns
Ca	1	0.70	ns	1.28	ns	0.10	ns	0.33	ns
P : Ca	1	0.087	ns	5.63	*	5.86	*	0.53	ns
Année	1	75.85	***	53.27	***	0.22	ns	3.10	ns
Année : P	1	1.21	ns	2.15	ns	0.17	ns	0.042	ns
Année : Ca	1	0.48	ns	1.88	ns	2.55	ns	0.45	ns
Année : P : Ca	1	0.0007	ns	0.25	ns	0.06	ns	0.99	ns
Résidus	24								

Tableau 3 – Résultats de l'ANOVA (ns= non significatif, *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001)

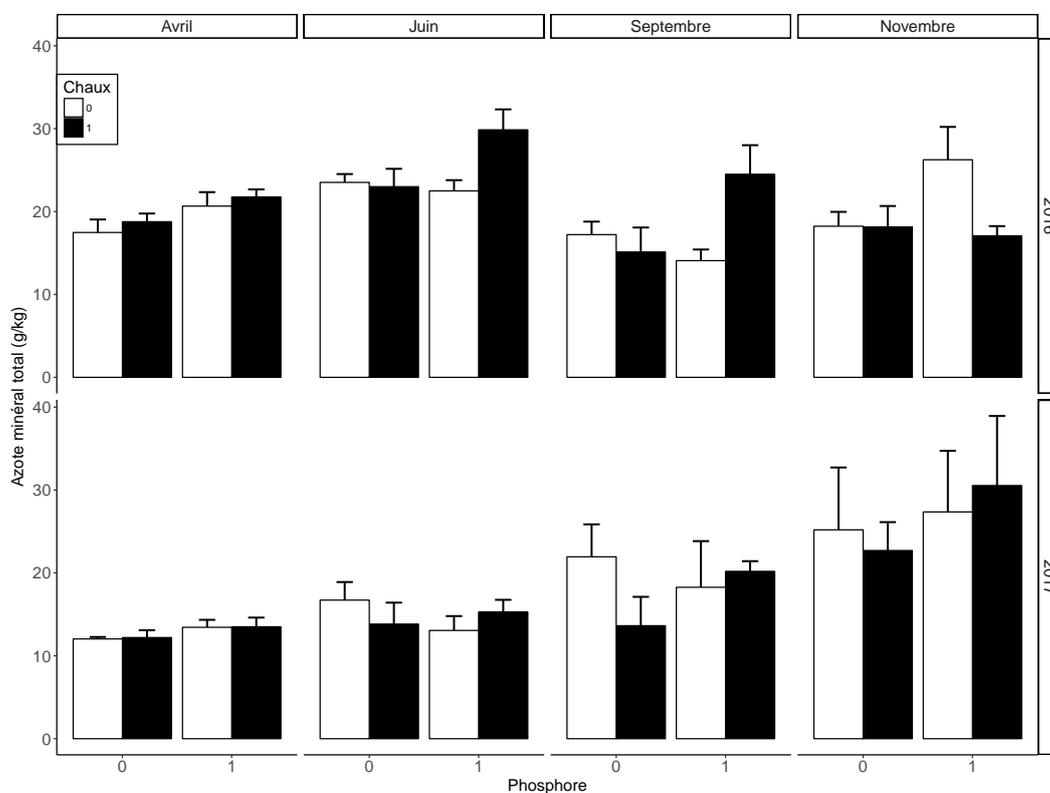


FIGURE 6 – Effet des traitement au phosphore et à la chaux sur le stock d'azote minéral total (moyennes + ES, n=4)

3.3.2 Azote minéral échangeable

Le traitement au phosphore a un impact négatif sur l'azote échangeable (NO_3^- et NH_4^+) en juin 2016 (Interaction Année :P, Tableau 4, Figure 7) tandis que le traitement à la chaux, en l'absence de fertilisation, l'a augmenté en septembre 2017 (Interaction Année :P :Ca, Tableau 4, Figure 7). L'année 2017 présentait une quantité d'azote échangeable inférieure à 2016 (Effet Année, Tableau 4, Figure 7).

Effet	Df	Avril		Juin		Septembre		Novembre	
		F	P	F	P	F	P	F	P
P	1	0.52	ns	0.49	ns	0.002	ns	0.05	ns
Ca	1	0.01	ns	2.65	ns	0.32	ns	0.006	ns
P : Ca	1	0.16	ns	0.01	ns	4.81	*	0.24	ns
Année	1	6.50	*	28.79	***	19.05	***	14.05	**
Année : P	1	1.14	ns	9.86	**	2.54	ns	1.33	ns
Année : Ca	1	0.0002	ns	1.90	ns	3.25	ns	3.89	ns
Année : P : Ca	1	0.48	ns	0.79	ns	4.96	*	2.12	ns
Résidus	23								

Tableau 4 – Résultats de l'ANOVA (ns= non significatif, *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001)

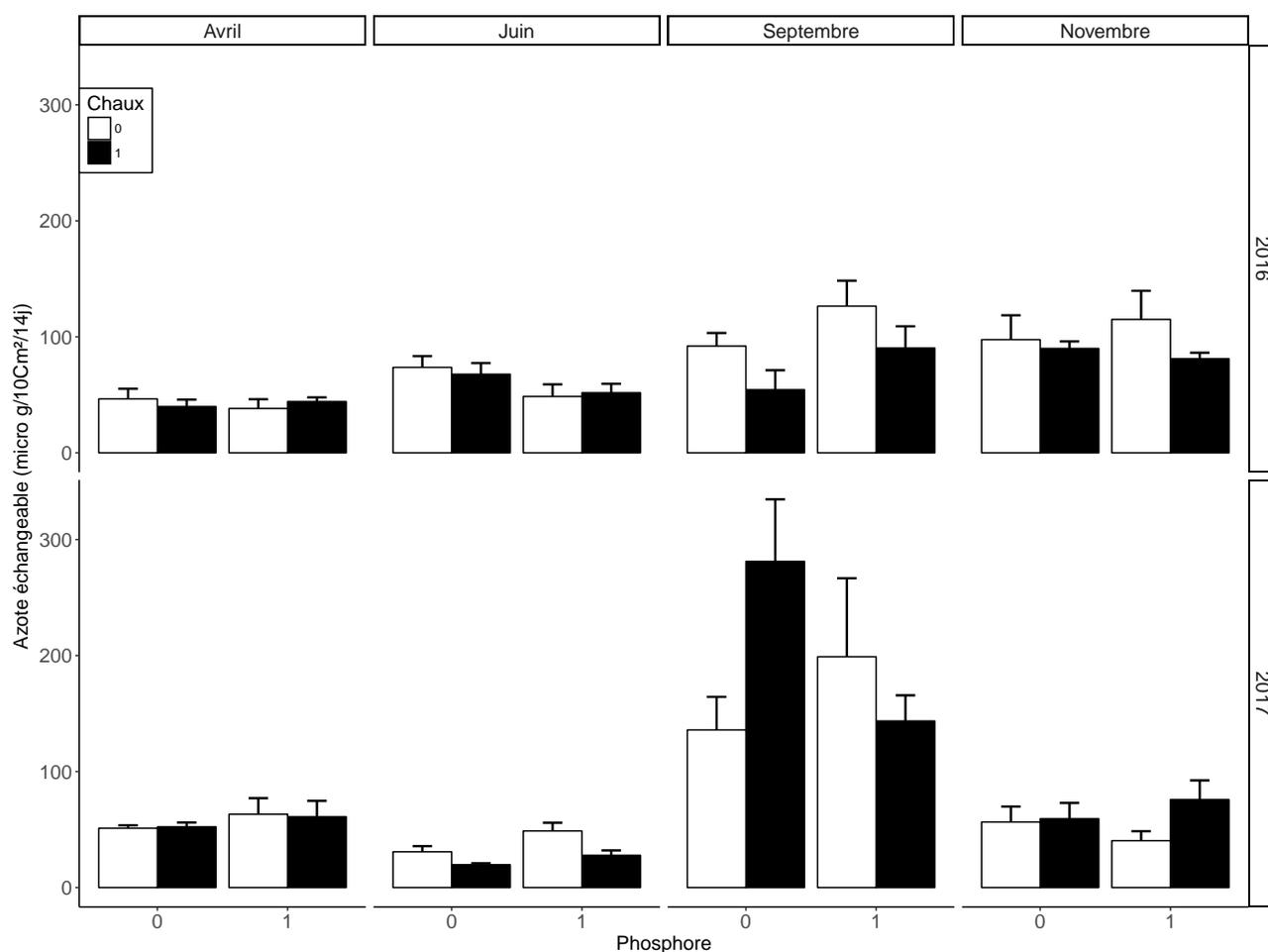


FIGURE 7 – Effet des traitements au phosphore et à la chaux sur la quantité d'azote échangeable sur les résines PRS (moyennes + ES)

4 Discussion

L'optimisation des pratiques de fertilisation en prairies permanentes est un enjeu majeur en agro-écologie. Cette étude visait à mettre en évidence les impacts du chaulage et de la fertilisation au phosphore sur les différentes fonctions des prairies permanentes en moyenne montagne. Les résultats montrent que la productivité des parcelles est augmentée par l'ajout de chaux en l'absence d'apports en phosphore. Cette augmentation n'est pas visible en 2015 suite à l'installation du dispositif mais elle est perceptible en 2016 alors que la dose était faible et n'avait pas permis d'observer d'effets significatifs sur le pH_{eau} du sol. L'effet est plus marqué en 2017, avec une dose de chaux plus importante. L'interaction entre le traitement à la chaux et les années n'est pas ressortie significative comme attendue. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat : soit que la variabilité des données ne permet pas de faire ressortir l'interaction Année : Ca dans l'anova, soit il existe un effet du chaulage indépendant de l'augmentation du pH qui permettrait d'augmenter la production comme le suggèrent [Mijangos *et al.* \(2010\)](#) qui ont observé une augmentation de l'activité des déshydrogénases dans le sol sans augmentation du pH. Cette étude montre que l'effet positif de la chaux sur la productivité est annulé par l'ajout de phosphore. [Pinto *et al.* \(1995\)](#) et [Bertoni *et al.* \(2013\)](#) ont étudié les interactions entre la fertilisation NPK et le chaulage sur la productivité des prairies permanentes et ont également constaté un effet antagoniste, ce qui est cohérent avec nos résultats. Cependant ces études ne permettaient pas d'isoler quel fertilisant interagissait avec la chaux. [Stevens et Laughlin \(1996\)](#) n'ont pas observé d'interactions entre le chaulage et l'apport d'azote seul et au vu de nos résultats, il semblerait que l'apport de phosphore soit responsable de l'effet antagoniste observé. Il est possible que les ions orthophosphates précipitent avec les cations apportés par le chaulage et les rendent indisponibles pour la végétation. Des analyses de sol plus poussées seraient nécessaires afin de mettre en évidence les potentiels réactions de complexations entre les ions et les impacts du chaulage indépendants du pH. L'année 2015 présentait des rendements presque deux fois supérieurs aux années suivantes alors que le printemps était plus sec que les deux autres années. Cette forte productivité peut être expliquée par l'arrêt du pâturage et des apports de fumier en 2014 qui ont contribué à une diminution de la fertilité du sol à partir de 2015.

Les analyses chimiques ont montré une augmentation de la teneur en phosphore et en azote foliaire par le traitement au phosphore. L'indice de nutrition azoté est ainsi augmenté et atteint presque le seuil de 80 indiquant un bon état nutritif tandis que l'indice de nutrition phosphaté ne varie pas et reste supérieur à 100. Cet indice est basé sur le rapport P/N et l'augmentation simultanée des teneurs en azote et en phosphore n'impacte pas ce ratio. Ces résultats suggèrent que l'apport de phosphore augmente l'efficacité d'assimilation de l'azote par la végétation. En effet, ce traitement n'augmente que très légèrement le stock d'azote minéral total dans le sol avant la saison de végétation mais n'influe pas sur l'azote échangeable des résines. La meilleure utilisation de l'azote par la végétation pourrait plus être liée au phénomène de co-limitation en azote et en phosphore et à l'équilibre du ratio N/P de la végétation ([Güsewell, 2004](#); [Elser *et al.*, 2007](#)) que d'une meilleure disponibilité de l'azote dans le sol. Cette facilitation de l'acquisition d'azote ne permet cependant pas d'augmenter la production de biomasse et il semblerait qu'il

existe un autre facteur limitant la production de biomasse aérienne. L'enrichissement en matière azotée par le traitement au phosphore permet d'abaisser le rapport C/N, ce qui améliore l'efficacité d'utilisation par les ruminants. Le bilan électrolytique, (compris entre 300 et 400 meq/kg de MS, permettant une production de lait maximale pour les vaches en lactation) n'est pas impacté par les traitements. La végétation est donc déjà de bonne qualité fourragère mais des mesures de digestibilité *in vitro* seraient nécessaires afin d'étudier plus finement la qualité du fourrage.

L'apport de phosphore diminue cependant la teneur en potassium foliaire. Cet impact, associé à l'augmentation des teneurs en azote, diminue fortement l'indice de nutrition potassique déjà limitant pour la végétation. Cette relation entre la fertilisation phosphatée et la teneur en potassium foliaire n'a pas été étudiée à notre connaissance et des recherches sont à orienter dans ce sens. L'arrivée d'ions orthophosphates dans les cellules racinaires pourrait entraîner un excès de charges négatives intracellulaire par rapport à l'environnement plutôt acide et l'arrivée d'azote chargée positivement dans les feuilles, pourrait pousser la végétation à entraîner le potassium intracellulaire foliaire vers les cellules racinaires afin de maintenir la pression osmotique. Un suivi du potassium intracellulaire serait nécessaire pour tester cette hypothèse.

Le traitement à la chaux a entraîné une légère diminution de la teneur en phosphore des feuilles, cependant, cette diminution ne se répercute pas sur l'indice de nutrition phosphaté. Cette effet est certainement lié à l'augmentation de biomasse observée pour ce traitement, ce qui crée un effet de dilution. Ce traitement ne semble donc pas permettre une meilleure efficacité d'utilisation du phosphore par la végétation.

Les indices de diversité floristique et la composition botanique ne sont pas impactés par les traitements. La variabilité entre traitement n'explique qu'une très faible partie de la variabilité des communautés végétales, majoritairement induite par le changement du mode de gestion en 2015. Dans une prairie acide subalpine, Spiegelberger *et al.* (2010) n'ont pas observé de modifications de la richesse spécifique ou des indices de Shannon et Pielou mais ont observé une modification de la composition floristique sur 15 années de suivi par des traitements à la chaux et aux fertilisants minéraux (NPK). Bertoni *et al.* (2013) et Poozesh *et al.* (2010) ont également observés, sur des expérimentations en prairies pyrénéennes sur 5 et 10 ans respectivement, une augmentation du nombre d'espèces de dicotylédones par le chaulage et une diminution de la richesse spécifique par la fertilisation (NPK). Ces études amendaient cependant le double de chaux que pour notre expérimentation et apportaient de l'azote et du potassium avec le phosphore, ce qui ne permet pas d'isoler son effet sur les communautés végétales. Il est donc possible que l'absence d'effets observés durant notre expérimentation sur la composition floristique soit dû à sa durée plus courte mais également à un apport de chaux plus faible.

Le traitement au phosphore a néanmoins tendance à favoriser les poacées au détriment des "diverses" mais ces impacts ne se répercutent pas sur la biomasse sèche. Cette différence peut s'expliquer par les biais relatifs à chaque méthode. Le tri sur la biomasse sèche s'effectue en effet après une fauche à 5cm du sol, ce qui ne permet pas de prélever les petites espèces et leur abondance sera sous-estimée. De plus, les espèces riches en eau seront sous estimées au profit des poacées à fort taux de matière sèche (TMS). La méthode des points quadrats donne plus de poids aux petites espèces et aux fabacées et correspond plus à la réalité de la prairie.

Cependant, dans une optique d'exploitation, le relevé botanique ne sera pas représentatif de la composition floristique des fourrages secs où de l'herbe ingérée au champs par les ruminants, ceux ci ingérant rarement les espèces rasantes. La répartition des groupes fonctionnels de poacée n'est également pas impactée par les traitements et la prairie est majoritairement composée de poacées de type b à faible TMS et forte surface foliaire spécifique (SSF), présentant une phénologie tardive et permettant un pâturage estival (Cruz *et al.*, 2010). Une étude sur un plus long terme, avec des doses de chaux plus importantes, serait nécessaire pour mettre en évidence de potentielles modifications des communautés végétales.

Les résultats de cette étude montrent des effets limités du chaulage sur notre système d'étude, et peu d'interactions entre le chaulage et les apports en phosphore, mais il est nécessaire d'effectuer une reproduction du protocole dans d'autres conditions. En effet, les conditions environnementales liées à la localisation de la prairie ne permettent pas de généraliser les résultats. La forte teneur en matière organique du sol est en effet une caractéristique typique des andosols et est susceptible d'interagir fortement avec les ions présents en solution. Elle confère notamment un fort pouvoir tampon (Curtin et Trolove, 2013) et une forte capacité d'adsorption, ce qui pourrait expliquer les faibles variations de pH et les faibles effets observés par rapport à d'autres études. La durée de l'expérimentation est également relativement courte au vue du changement de mode de gestion effectué en 2014. Une étude sur un plus long terme, sur d'autres types de sols et dans des conditions climatiques différentes serait nécessaire pour valider ces résultats.

5 Conclusion

Les hypothèses formulées en introduction ne sont pas toutes vérifiées. L'apport de phosphore ne permet pas d'augmenter les rendements comme attendu mais enrichit la végétation en azote. L'utilisation des fourrages par les ruminants est donc maximisée grâce à un rapport C/N plus faible. L'apport de chaux, en l'absence de phosphore, permet d'augmenter les rendements sans modifier la composition chimique de la végétation. La biodiversité spécifique et fonctionnelle n'est également pas impactée par les traitements sur les trois années de suivis. Au vu de ces résultats, dans une optique d'agro-écologie, il apparaît conseillé d'éviter de fertiliser et de chauler des prairies permanentes du massif central simultanément mais d'adapter les traitements en fonction des objectifs de l'exploitation.

Références

- AGABRIEL, J. (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux-Valeurs des aliments : Tables Inra 2010. Édition remaniée*. Quae éditions.
- AMIAUD, B. et CARRÈRE, P. (2012). La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques. *Fourrages*, 211:229–238.
- APPER-BOSSARD, E., PEYRAUD, J. et DOURMAD, J. (2009). Effet du bilan électrolytique de la ration sur l'équilibre acido-basique et les performances zootechniques des animaux domestiques à fort niveau de production. *Productions Animales*, 22(2):117.
- BAUMONT, R., AUFRÈRE, J., NIDERKORN, V., ANDUEZA, D., SURAULT, F., PECCATTE, J.-R., DELABY, L. et PELLETIER, P. (2008). La diversité spécifique dans le fourrage : conséquences sur la valeur alimentaire. *Fourrages*, 194:189–206.
- BERTONI, G., HÉLIAS, R., POZESH, V., CASTILLON, P. et CRUZ, P. (2013). Faut-il chauler et fertiliser les prairies permanentes des sols acides et peu fertiles ? *Fourrages*, (213):55–62.
- BIELESKI, R. (1973). Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual review of plant physiology*, 24(1):225–252.
- BOLAN, N., ADRIANO, D. et CURTIN, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in agronomy*, 78(21):5–272.
- CRUZ, P., THEAU, J. P., LECLoux, E., JOUANY, C. et DURU, M. (2010). Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multi-traités. *Fourrages*, 201:11–17.
- CURTIN, D. et SYERS, J. (2001). Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1):147–152.
- CURTIN, D. et TROLOVE, S. (2013). Predicting ph buffering capacity of new zealand soils from organic matter content and mineral characteristics. *Soil Research*, 6(51):494–502.
- DACCORD, R., WYSS, U., KESSLER, J., ARRIGO, Y., ROUEL, M., LEHMAN, J. et JEANGROS, B. (2006). Valeur nutritive des fourrages. *Apports alimentaires recommandés et tables de la valeur nutritive des aliments pour les ruminants. Valeur nutritive des fourrages, On line publishing, Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux, Posieux*.
- DOBREMEZ, L., BORG, D., GIROUX, G. et LERBOURG, J. (2015). L'agriculture en montagne. évolutions 1988-2010 d'après les recensements agricoles. *Agriste Les dossiers*, (26).
- DRAY, S. et DUFOUR, A. (2007). The ade4 package : implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22(4):1–20.
- DURU, M. et THÉLIER HUCHÉ, L. (1997). N and pk status of herbage : use for diagnosis of grasslands. *Colloques de l'INRA (France)*.
- ELSER, J. J., BRACKEN, M. E., CLELAND, E. E., GRUNER, D. S., HARPOLE, W. S., HILLEBRAND, H., NGAI, J. T., SEABLOOM, E. W., SHURIN, J. B. et SMITH, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 10(12):1135–1142.
- FARRUGGIA, A., MARTIN, B., BAUMONT, R., PRACHE, S., DOREAU, M., HOSTE, H. et DURAND, D. (2008). Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux. *INRA Prod. Anim*, 21(2):181–200.
- FOX, J. et WEISBERG, S. (2011). *An R Companion to Applied Regression*. Sage, Thousand Oaks CA, second édition.
- GIS SOL (2011). L'état des sols de France. *Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*.
- GÜSEWELL, S. (2004). N : P ratios in terrestrial plants : variation and functional significance. *New phytologist*, 164(2):243–266.
- HAYNES, R. (1982). Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant and soil*, 68(3):289–308.
- HAYNES, R. (1984). Lime and phosphate in the soil-plant system. *Advances in agronomy*, 37:249–315.
- HAYNES, R. et SWIFT, R. (1988). Effects of lime and phosphate additions on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur and phosphorus in an acid soil. *Biology and Fertility of Soils*, 6(2):153–158.
- HAYNES, R. J. et NAIDU, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions : a review. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 51(2):123–137.
- HUSTON, J. et PINCHAK, W. (1991). Range animal nutrition. *Grazing management : an ecological perspective*, pages 27–63.
- JANSSENS, F., PEETERS, A., TALLOWIN, J., BAKKER, J., BEKKER, R., FILLAT, F. et OOMES, M. (1998). Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. *Plant and soil*, 202(1):69–78.
- LEMAIRE, G. et GASTAL, F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. *In Diagnosis of the nitrogen status in crops*, pages 3–43. Springer.

- LINDSAY, W. L. *et al.* (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Wiley and Sons Ltd.
- MESCHY, F. et PEYRAUD, J. (2004). Teneurs en ions forts des fourrages et calcul de la valeur de leur bilan alimentaire cations-anions et de leur bilan électrolytique. *Renc. Rech. Rum*, 11:255–258.
- MIJANGOS, I., ALBIZU, I., EPELDE, L., AMEZAGA, I., MENDARTE, S. et GARBISU, C. (2010). Effects of liming on soil properties and plant performance of temperate mountainous grasslands. *Journal of Environmental Management*, 91(10):2066–2074.
- NAIDU, R., SYERSY, J., TILLMAN, R. et KIRKMAN, J. (1990). Effect of liming on phosphate sorption by acid soils. *European Journal of Soil Science*, 41(1):165–175.
- PARFITT, R. (1979). Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in agronomy*, 30:1–50.
- PARFITT, R. (1980). Chemical properties of variable charge soils. *Soil with Variable Charge*, pages 167–294.
- PEET, R. K. (1974). The measurement of species diversity. *Annual review of ecology and systematics*, 5(1):285–307.
- PINTO, M., RODRIGUEZ, M., BESGA, G., BALCAZAR, N. et LOPEZ, F. (1995). Effects of linz-donawitz (ld) slag on soil properties and pasture production in the basque country (northern spain). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 38(1):143–155.
- POOZESH, V., CASTILLON, P., CRUZ, P. et BERTONI, G. (2010). Re-evaluation of the liming-fertilization interaction in grasslands on poor and acid soils. *Grass and forage science*, 2(65):260–272.
- R CORE TEAM (2017). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/>, Vienna, Austria.
- SCHINDLER, D. W. (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes : implications for lake management. *Science*, 184(4139):897–899.
- SHEEREN, D., LEFEBVRE, J., LADET, S., BALENT, G., BRAME, A., BRAY, F., CAPITAIN, M., GIBON, A., LASSEUR, R., LASSEUR, J. *et al.* (2015). Coévolution des paysages et des activités agricoles dans différents territoires d'élevage des montagnes françaises : entre intensification et déprise agricole. *Fourrages*, 222:103–113.
- SHEN, J., YUAN, L., ZHANG, J., LI, H., BAI, Z., CHEN, X., ZHANG, W. et ZHANG, F. (2011). Phosphorus dynamics : from soil to plant. *Plant physiology*, 156(3):997–1005.
- SMYTH, T. J. et SANCHEZ, P. A. (1980). Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an oxisol on phosphorus sorption and ion retention. *Soil Science Society of America Journal*, 44(3):500–505.
- SPIEGELBERGER, T., DELÉGLISE, C., DEDANIELI, S. et BERNARD-BRUNET, C. (2010). Resilience of acid subalpine grassland to short-term liming and fertilisation. *Agriculture, ecosystems & environment*, 137(1-2):158–162.
- STEVENS, R. et LAUGHLIN, R. (1996). Effects of lime and nitrogen fertilizer on two sward types over a 10-year period. *The Journal of Agricultural Science*, 127(4):451–461.
- TILMAN, D., REICH, P. B. et KNOPS, J. M. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 441(7093):629.
- WICKHAM, H. (2009). *ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*, <http://ggplot2.org>. Springer-Verlag New York.

Annexes

A Calculs des indices de nutriments

Les concentrations sont exprimées en pourcentage et la matière sèche (MS) en t/ha.

— Indice d'azote :

$$I_N = 100 \times \frac{N_{actuel}}{N_{critique}}$$

Avec $N_{critique} = 4.8$ (si MS < 1 t/ha), $N_{critique} = 4.8 \times MS^{-0.32}$ (si MS > 1 t/ha)

— Indice de phosphore :

$$I_P = 100 \times \frac{P_{actuel}}{P_{critique}}$$

Avec $P_{critique} = 0.15 + 0.065 \times N_{actuel}$

— Indice de potassium :

$$I_K = 100 \times \frac{K_{actuel}}{K_{critique}}$$

Avec $K_{critique} = 1.6 + 0.525 \times N_{actuel}$

B Description des types fonctionnels

- **Type A** : Espèces de milieux fertiles à faible TMS, fort SSF, plutôt de petites tailles, de phénologie très précoce (floraison avant 900 ° j) et avec une durée de vie des feuilles courte (800 ° j). Elles sont donc aptes à être pâturées précocement et fréquemment. Espèces types : *Lolium perenne*, *Alopecurus pratensis*, *Holcus lanatus*.
- **Type B** : Espèces de milieux fertiles à faible TMS et fort SSF, d'assez grande taille, présentant une phénologie moyennement précoce (floraison à 1 200 ° j) et une durée de vie des feuilles plus longue que le Type A (environ 1 000 ° j). Ces espèces sont aptes à une fauche assez précoce, de qualité (900 ° j), mais leur capacité à accumuler de la biomasse sur pied (haute DVF) leur procure une certaine souplesse d'exploitation en fauche tardive (1 200 ° j, voire plus) lorsque c'est la quantité qui est privilégiée. Espèces types : *Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea*, *Arrhenatherum elatius*.
- **Type b** : Espèces préférant des milieux relativement fertiles mais se différenciant des deux groupes précédents par leur phénologie tardive (floraison moyenne après 1 600 ° j). Il s'agit souvent d'espèces subordonnées de près de fauche ou d'espèces permettant un pâturage plus estival. Espèces types : *Trisetum flavescens* (près de fauche), *Agrostis capillaris* (pacages de fertilité moyenne à bonne), *Phleum pratense*.
- **Type C** : Espèces de petite taille, typiques de pacages maigres (forte TMS et faible SSF), peu adaptées aux pratiques de fauche tant pour leurs caractéristiques de faible production que par les surfaces qu'elles occupent (souvent des pentes). Il s'agit d'espèces ayant une résistance à la cassure faible, caractéristique leur conférant une assez bonne valeur fourragère au stade végétatif. Leur phénologie est assez précoce par rapport aux TFP de type conservation (floraison à 1 300 ° j). Espèces types : *Festuca rubra*, *Cynosurus cristatus*, *Briza media*.
- **Type D** : Espèces de taille moyenne, très tardives (floraison à environ 1 700 ° j) et typiques des estives ou parcours peu fertiles et peu utilisés. Leur grande résistance à la cassure est un indicateur de leur faible valeur fourragère. Espèces types : *Brachypodium pinnatum*, *Helictotrichon sulcatum*, *Deschampsia cespitosa*, *Molinia coerulea*.