



HAL
open science

Faut-il chauler et fertiliser les prairies permanentes des sols acides et peu fertiles ?

Georges Bertoni, R. Helias, V. Poozesh, P. Castillon, Pablo Cruz

► **To cite this version:**

Georges Bertoni, R. Helias, V. Poozesh, P. Castillon, Pablo Cruz. Faut-il chauler et fertiliser les prairies permanentes des sols acides et peu fertiles ?. Fourrages, 2013, 213, pp.55-62. hal-02649558

HAL Id: hal-02649558

<https://hal.inrae.fr/hal-02649558>

Submitted on 29 May 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.

Copyright

Faut-il chauler et fertiliser les prairies permanentes des sols acides et peu fertiles ?

G. Bertoni¹, R. Helias², V. Poozesh³, P. Castillon^{2†}, P. Cruz^{4*}

L'intérêt du chaulage dans les prairies permanentes est assez controversé. Un essai de longue durée (prairie permanente sur sol acide semée ensuite en dactyle) procure des informations sur l'effet du chaulage (gain de production, intérêt économique) et pour l'intensification écologique de ces milieux.

RÉSUMÉ

La réponse au chaulage et à la fertilisation d'une prairie permanente suivie d'une prairie temporaire de dactyle a été étudiée pendant 8 + 4 ans. La production annuelle de la prairie permanente (pH 5) non fertilisée non chaulée est de 1,1 t MS/ha. L'effet du chaulage (+ 0,7 t MS/ha) n'est significatif que sur les parcelles non fertilisées ; l'effet majeur de la fertilisation NPKS (+ 4,0 t MS/ha) est attribué à l'apport de P, limitant dans ce sol. Avec le dactyle (cv. Accord), les effets du chaulage (jusqu'à + 2,7 t MS/ha) et de la fertilisation (jusqu'à + 5,3 t MS/ha) sont supérieurs ; la production du traitement fertilisé et chaulé atteint 9 t MS/ha. Dans ce cas, la fertilisation et le chaulage sont justifiés économiquement et permettent d'utiliser cette parcelle dans un système plus intensif.

SUMMARY

Should soil liming and fertilizers be used in the case of permanent grassland on low fertility acid soil?

The benefits of liming permanent grassland are controversial. A long-term trial (carried out on acid soil for 8 years, then on sown cocksfoot for 4 years) provided information on the effect of liming (increased production, economic benefits) and on the ecological intensification of this type of grassland. Annual production for non-fertilized unlimed grassland was 1.1 t DM/ha. The positive effect of liming (+ 0,7 t DM/ha) was only true for non-fertilized land. The effect of NPKS fertilization (+ 4,0 t DM/ha) was much higher, which may be attributed to soil phosphorus levels. The effects of liming and fertilization were enhanced for sown cocksfoot, where production reached 9 tons. In this case, liming and fertilization are economically beneficial and allow land to be used for intensive farming.

Introduction

Un consensus s'est établi pour considérer que **l'acidité du sol doit être prise en compte dans les pratiques lorsque le pH_{eau} du sol est inférieur à 5,5**. En dessous de ce pH, l'acidité engendre des conditions défavorables pour la croissance des plantes (VON UEXKULL et MUTERT, 1995). Dans les régions tempérées, l'acidité est souvent observée dans les zones de production fourragère ou forestière soumises à une forte pluviosité : en Europe

du nord (TYLER, 1996 ; AUSTRHEIM *et al.*, 2005 ; FYSTRO et BAKKEN, 2005), en Galice (Espagne, ANTUNA *et al.*, 1980), et dans la plupart des massifs montagneux en France (FICHTER *et al.*, 1998 ; BAIZE et ROGUE, 1998). L'acidification du sol est augmentée par l'apport d'engrais acidifiants sous l'effet de différents mécanismes comme la nitrification et la lixiviation de l'ion nitrate et par l'intensification qui augmente l'exportation par les récoltes des équivalents basiques contenus dans la biomasse végétale (MENDEL et KIRKBY, 2001).

* Nous tenons à rendre hommage à notre collègue et ami Pierre Castillon, décédé subitement le 13 septembre 2011, à qui nous devons l'existence de cette expérimentation à long terme.

AUTEURS

1 : UMR 1201 DYNAFOR, Inra, ENSAT, Avenue de l'Agrobiopole, BP 32607, F-31326 Castanet-Tolosan cedex ; georges.bertoni@ensat.fr

2 : ARVALIS-Institut du Végétal, F-81600 Montans

3 : Damghan University, Damghan (Iran)

4 : UMR 1248 AGIR, Inra, F-31000 Castanet-Tolosan

MOTS CLÉS : Aluminium, amendement basique calcique, aspect économique, dactyle, évolution, expérimentation longue durée, fertilisation, fertilité du sol, nutrition de la plante, nutrition phosphatée, prairie permanente, production fourragère, sol, végétation.

KEY-WORDS : Aluminium, basic calcic fertilizer, change in time, cocksfoot, economic aspect, fertilisation, forage production, long duration experiments, permanent pasture, phosphatic nutrition, plant nutrition, soil, soil fertility, vegetation.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Bertoni G., Helias R., Poozesh V., Castillon P., Cruz P. (2013) : "Faut-il chauler et fertiliser les prairies permanentes des sols acides et peu fertiles ?", *Fourrages*, 213, 55-62.

Dans les sols acides, la **toxicité de l'aluminium**, qui pénalise la croissance des racines de la plupart des espèces végétales (KOCHIAN *et al.*, 2005), et la faible fertilité, notamment en P (HOCKING, 2001), sont généralement considérées comme les principaux facteurs de diminution de la croissance des végétaux. En effet, les concentrations en aluminium et en manganèse dans la solution du sol augmentent fortement en dessous de pH 5,5 et ces sols montrent à la fois une faible disponibilité de l'azote et du phosphore, mais aussi fréquemment d'autres éléments (Mo, B, K, Mg, etc. ; MARSCHNER, 1995). Cette situation est bien connue des éleveurs. De plus, du fait de la sélection des meilleures terres pour d'autres productions, les sols acides et pauvres des versants sont de plus en plus réservés aux prairies (MARRIOTT *et al.*, 2004). L'ensemble de ces critères fait que la végétation semi-naturelle des prairies acides est composée de graminées présentant une faible vitesse de croissance relative (< 210 g/kg/j), une forte teneur en matière sèche du limbe (> 310 g/kg) et une forte résistance à la toxicité de Al (POOZESH *et al.*, 2007) : la canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa* L.), la fétuque rouge (*Festuca rubra* L.), la molinie (*Molinia caerulea* L.) et la danthonie (*Sieglingia decumbens* L.).

Les techniques culturales permettent une adaptation de la production fourragère aux besoins de l'élevage. La fertilisation permet aux prairies d'atteindre un niveau de production supérieur mais pose des questions en termes d'impacts environnementaux, de durabilité et de réduction de la biodiversité (PLANTUREUX *et al.*, 2005). Le chaulage des prairies permanentes est en général un **chaulage de surface** sans travail du sol. Cette technique est **recommandée sur le plan agronomique mais controversée vis-à-vis de son intérêt pour la production fourragère**, notamment lorsque le pH_{eau} du sol est voisin de 5,5 (voir FABRE et KOCKMAN, 2006, synthèse bibliographique). Même pour un pH_{eau} inférieur à 5,5, l'augmentation de la production d'herbe par chaulage de surface n'a été obtenue que dans des prairies semées à base de ray-grass, une espèce productive mais très sensible à la toxicité de l'aluminium. Dans ce cas, la production

totale d'herbe peut être d'autant plus augmentée que le pH initial était bas. Des augmentations de 45 % (8,1 vs 5,6 t MS/ha/an) ont par exemple été observées en Euskadie (Espagne) sur des sols dont le pH_{eau} initial était de 4,8 (PINTO *et al.*, 1995) et de 13 % (10,9 vs 9,6 t MS/ha/an) en Irlande, pour des sols dont le pH_{eau} initial était compris entre 5,1 et 5,5 (STEVENS et LAUGHLIN, 1996). En revanche, dans des prairies fertilisées à flore semi-naturelle complexe, le chaulage de surface est souvent sans effet sur la production (PINTO *et al.*, 1995) ou à effet si limité (+ 0,4 à + 0,8 t MS/ha/an ; STEVENS et LAUGHLIN, 1996) qu'il n'est pas forcément économiquement rentable.

Le travail présenté ici avait pour objectif d'évaluer les effets directs et indirects du chaulage et de la fertilisation sur la production des prairies des Pyrénées situées dans des sols acides et présentant une faible fertilité chimique.

1. Matériel et méthodes

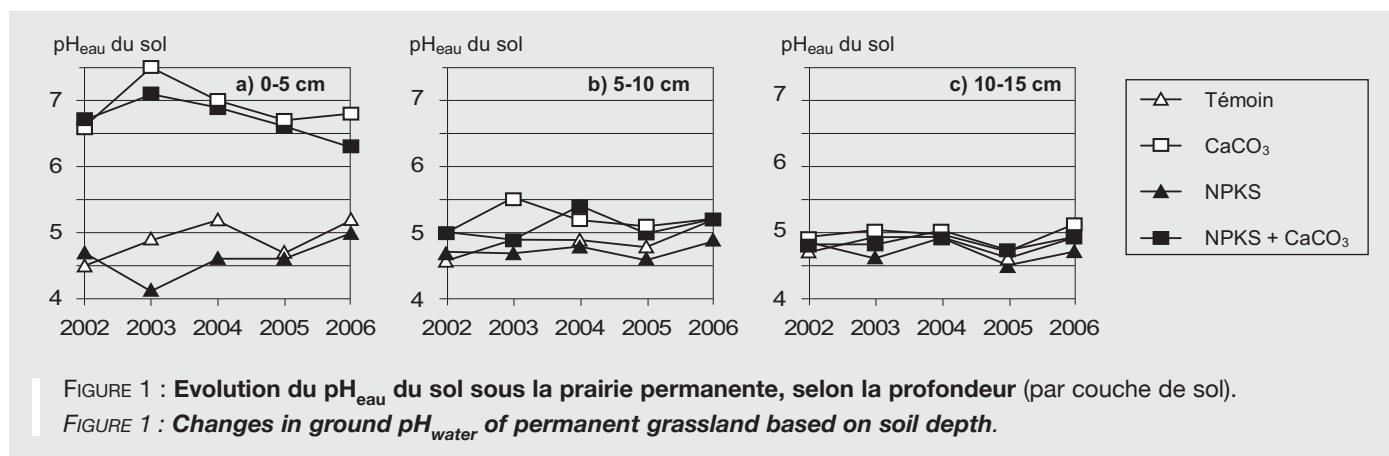
Partant de l'hypothèse que la végétation semi-naturelle est peu sensible à la modification du pH du sol, plusieurs études complémentaires ont été réalisées sur la base d'une **prairie permanente très peu productive, non fertilisée de 1968 à 1988**, puis occasionnellement pâturée. **Différents niveaux de fertilisation et d'amendements** ont d'abord été **appliqués à partir de 1998**, sur cette prairie dont le sol était acide et la flore semi-naturelle, plurispécifique, à dominante de graminées. Pendant cinq ans, **de 2002 à 2006**, la production d'herbe et ses caractéristiques (biomasse selon les coupes, composition botanique, indices de nutrition de la prairie) ont été mesurées sur toutes les variantes du dispositif. En août - septembre 2006, la prairie permanente a été détruite au moyen d'un herbicide total (glyphosate) et le sol a été travaillé au rotavator sur environ 7-8 cm de profondeur. En septembre, du dactyle (*Dactylis glomerata* L.), une espèce modérément tolérante à la toxicité de Al (WHEELER *et al.*, 1992), a été semé. Le choix du cultivar s'est porté sur Accord, pour son aptitude à produire en période de sécheresse estivale. Dans les années suivantes, le dactyle

	Témoïn	CaCO ₃	NPKS	NPKS + CaCO ₃
Prairie permanente				
- Apports NPKS (moyenne 2002-2006, kg/ha) ^(1,3)	0	0	N 254, P 35, K 167, S 43	N 254, P 35, K 167, S 43
- Apports de CaCO ₃ (kmol(-)/ha)	0	80 en 1998 et 2000 40 en 2002	0	80 en 1998 et 2000 40 en 2002
- Exportations NPK du traitement le plus productif (kg/ha)			N 128, P 30, K 176	
Prairie temporaire				
- Apports de NK (moyenne 2008-2010, kg/ha) ^(2,3)	NK N 447, K 160	NK + CaCO ₃ N 447, K 160	NK + P N 447, K 160	NK + P + CaCO ₃ N 447, K 160
- Apports de P (moyenne 2008-2010, kg/ha)	0	0	39	39
- Apports de CaCO ₃ (kmol(-)/ha)	0	40 en 2008	0	40 en 2008
- Exportations NPK du traitement le plus productif (kg/ha)			N 304, P 68, K 318	

- 1 : N apporté sous forme de nitrate d'ammonium en 3 apports sensiblement égaux : 2 apports (mi-mars et fin avril) avant la 1^{re} fauche, le 3^e (mai-juin), après la 1^{re} fauche
 2 : L'azote apporté en 2008 sous forme de nitrate d'ammonium a été fractionné en 5 apports dont 2 en mars, puis 1 après les 3 premières fauches. En 2009 et 2010, pour faciliter la gestion de l'essai, l'azote a été apporté sous forme d'engrais retard de type uréique (Coten), en 1 seul apport (mi-mars).
 3 : Le potassium a été apporté sous forme de chlorure et sulfate de potassium (167 kg K, 43 kg S en moyenne) sur la prairie permanente et en 2008 sur la prairie temporaire de dactyle ; il a ensuite été apporté sous forme de chlorure de potassium

TABLEAU 1 : Traitements de fertilisation appliqués sur la prairie permanente et la prairie temporaire de dactyle.

TABLE 1 : Fertilizers applied to permanent grassland and to sown cocksfoot.



a permis de réaliser entre 3 et 4 coupes de foin, au stade début épiaison des principales graminées. Le protocole de fertilisation de ce deuxième essai a été adapté pour tester l'effet de la fertilisation phosphatée et de l'amendement calcique (tableau 1) et **la production du dactyle a été suivie pendant 4 ans**, de 2007 à 2010.

■ Le dispositif expérimental

L'expérimentation de plein champ a été réalisée sur une prairie permanente des Pyrénées centrales (commune de Massat, Ariège, 1°19' E, 42°54' N, altitude : 640 m). Les conditions expérimentales ont été précisées par ailleurs (POOZESH *et al.*, 2010). Depuis le début de l'expérimentation en 1998 et d'après les données des stations de Saint-Girons (avant 2006) et Massat (depuis 2006), **le climat** a été relativement humide avec des précipitations de l'ordre de 750 à 1 325 mm/an et une température moyenne annuelle entre 10 et 13°C. Depuis 2003, une sécheresse d'été peut intervenir sur deux mois, en juin - juillet ou en août - septembre selon l'année. Les précipitations mensuelles des mois les plus secs varient entre 16 et 53 mm. Les températures moyennes mensuelles des mois d'été secs varient entre 19 et 24°C.

Le sol brun acide, sur schistes gréseux, est relativement profond (> 75 cm) et acide avec un pH_{eau} voisin de 5,0, même en profondeur (figure 1). Outre son acidité, les principales caractéristiques de ce sol sont un fort taux de matière organique en surface décroissant rapidement vers la profondeur (0-5 cm : 9,5 % ; 5-10 cm : 4,1 %), un fort taux d'aluminium (Al) échangeable à la cobaltihexamine par rapport à la capacité d'échange de cations (CEC) mesurée à la cobaltihexamine, avec des valeurs Al/CEC de 32 % et 54 %, à 0-5 et 5-10 cm de profondeur, respectivement, et une faible disponibilité du phosphore (P_{Olsen} de 7,2 et 3,8 mg/kg de sol, à 0-5 et 5-10 cm de profondeur, respectivement).

■ Les traitements de fertilisation et chaulage appliqués

Chaque unité expérimentale du dispositif mesure 5 m x 2 m. Différents traitements de fertilisation et chaulage (CaCO_3) disposés en 3 blocs ont été testés (tableau 1).

Le mot **chaulage** est employé ici pour définir un apport d'amendement calcique entre octobre et janvier sous forme de carbonate de calcium broyé exprimé en kilomoles de charges négatives : 80 kmol(-)/ha de CaCO_3 granulé concassé (Recalcit) en 1998 et 2000, puis 40 kmol(-)/ha en 2002 (prairie permanente) et en 2008 (prairie temporaire de dactyle).

La **fertilisation azotée** a été adaptée au potentiel de production de biomasse de chaque type de prairie et à la satisfaction des besoins du traitement le plus productif (tableau 1). Sur la prairie permanente, la dose d'azote moyenne (de 2002 à 2006) a été de 254 kg N/ha/an. Sur la prairie temporaire de dactyle, l'apport d'azote total est de 447 kg N/ha/an (moyenne 2008-2010) pour 4 coupes/an.

La **fertilisation annuelle en P** (superphosphate triple) **et K** (chlorure et sulfate de potassium) était apportée en fin d'hiver en un seul apport. La fertilisation PK moyenne de la prairie permanente compense presque exactement les exportations du traitement le plus productif (tableau 1). A partir de 2009, l'effet du soufre n'étant pas démontré, le potassium a été apporté sous forme de KCl exclusivement. Sur la prairie temporaire de dactyle, dont les exportations moyennes calculées sont plus élevées (68 kg P, 318 kg K), le niveau de fertilisation PK a été maintenu au même niveau après avoir observé qu'un niveau supérieur de fertilisation PK n'apportait pas d'amélioration significative de la nutrition (cf. tableau 6) ni de la production du dactyle (CASTILLON et PROTIN, 2011).

■ Observations réalisées

Du fait d'une situation géologique particulière, le sol acide de l'essai est voisin d'autres sols moins acides, et la prairie semi-naturelle étudiée contient une certaine diversité d'espèces. Sa **composition botanique** a été déterminée en 2004 en utilisant la méthode de DAGET et POISSONNET (1971) sur chacune des 3 répétitions des traitements.

La **biomasse produite** sur le dispositif a été évaluée par la coupe (à la motofaucheuse) d'une surface de 5,75 m² sur chaque répétition, juste avant le stade épiaison des graminées. La biomasse fraîche a été pesée et un

sous-échantillon de 10 poignées par répétition a été séché à l'étuve pour en déduire la production de matière sèche sur chaque répétition.

Pour réduire les coûts d'analyses, les mesures indicatives répétées chaque année ont été réalisées sur des échantillons moyens obtenus par le mélange des sous-échantillons issus des 3 répétitions de chaque traitement. Ceci concerne le **suivi du pH du sol à 3 profondeurs** (0-5, 5-10, 10-15 cm ; 3 prélèvements à la tarière, sur chaque répétition, mélangés ensuite par traitement), la mesure de la **concentration en N, P et K des fourrages à la première coupe** et le calcul des indices de nutrition qui sont représentés par une valeur unique par traitement et par an.

Les **indices de nutrition azotée, phosphatée et potassique** ont été calculés selon les méthodes standard :

$INN = (N_{\text{actuel}}/N_{\text{critique}})$, où $N_{\text{critique}} = 4,8 \times (MS)^{0,32}$ (LEMAIRE *et al.*, 1989) avec MS, la matière sèche (en t/ha)

$INP = (P_{\text{actuel}}/P_{\text{critique}})$, avec $P_{\text{critique}} = 0,15 + 0,065 N_{\text{actuel}}$

$INK = (K_{\text{actuel}}/K_{\text{critique}})$, avec $K_{\text{critique}} = 1,6 + 0,525 N_{\text{actuel}}$ (DURU et THELIER-HUCHÉ, 1997)

Pour l'interprétation du niveau de nutrition, les valeurs d'indices supérieures à 0,8 et inférieures à 1 (INN : DURU *et al.*, 1997 ; FARRUGLIA *et al.*, 2004 ; INP et INK : DURU et THELIER-HUCHÉ, 1997) indiquent des nutriments en N, P et K optimales pour la croissance.

■ Analyse statistique

Le nombre d'espèces et la production de biomasse ont été analysés statistiquement selon un plan factoriel chaulage (chaulage ou rien) x fertilisation (fertilisation ou rien). La comparaison statistique des moyennes des traitements a été réalisée à l'aide du test de Newman Keuls, après analyse de la variance, en utilisant le logiciel STATBOX 2.0 (Grimmersoft, Paris, France).

2. Résultats et discussion

■ L'effet du chaulage et de la fertilisation sur le pH du sol sous prairie permanente

La mesure du pH des échantillons de sol prélevés chaque année de 2002 à 2006 permet de suivre l'évolution de ce paramètre en fonction des traitements étudiés (figure 1). **La différence de pH, nette en surface, disparaît en dessous de 10 cm de profondeur.**

■ Effets sur la composition botanique de la prairie permanente

Les résultats ont été exprimés ici en nombre d'espèces herbacées. Dans le témoin, non chaulé et non fertilisé (nombre d'espèces total moyen de 9,7), les monocotylédones étaient représentées par une Cyperacée (*Carex caryophyllea*) et par des graminées adaptées à des sols pauvres (*Brachypodium pinnatum*, *Festuca rubra*,

	Témoin	CaCO ₃	NPKS	NPKS + CaCO ₃	Signif.
Monocotylédones	6,0 ^{a(1)}	5,7 ^a	3,7 ^b	3,0 ^b	**
Dicotylédones	3,0 ^b	5,7 ^a	2,0 ^b	4,3 ^a	*
Total ⁽²⁾	9,7 ^b	11,7 ^a	6,3 ^c	8,0 ^b	**

1 : Les lettres indiquent les différences significatives entre traitements à $P < 0,05$ (Signif. *) ou à $P < 0,01$ (Signif. **)
2 : Le total inclut Bryophytes et Ptéridophytes

TABLEAU 2 : Nombre moyen d'espèces spontanées dans la prairie permanente en 2004, 6 ans après le début des traitements.

TABLE 2 : Average number of native species in permanent grassland in 2004, 6 years after the beginning of liming and fertilization.

Helictotrichon sulcatum, *Molinia caerulea*, *Sieglingia decumbens*) ou à des sols de productivité intermédiaire (*Agrostis capillaris*).

Globalement, le traitement le plus riche en espèces est le traitement chaulé non fertilisé (tableau 2). La fertilisation, seule ou accompagnée du chaulage, réduit la diversité végétale comme souligné antérieurement par PLANTUREUX *et al.* (2005).

L'effet des traitements peut être résumé comme suit (POOZESH *et al.*, 2010) :

- **chez les monocotylédones**, l'effet du chaulage sur la production de fourrage a été faible. En revanche, **la fertilisation a modifié la composition botanique**. Elle a augmenté l'abondance de *Carex caryophyllea* et *Molinia caerulea* et a diminué l'abondance de *Brachypodium pinnatum* et *Festuca rubra*. Les graminées productives présentant un intérêt fourrager étaient limitées à *Agrostis capillaris* et *Holcus lanatus*.

- **chez les dicotylédones, à l'inverse, l'effet le plus important a été celui du chaulage** : celui-ci a augmenté le nombre d'espèces dicotylédones et l'abondance de l'ensemble des dicotylédones.

■ Effets sur la production d'herbe de la prairie permanente

En moyenne sur 5 ans, la fertilisation N-P-K-S (254-35-167-43 unités/ha/an) a augmenté la production en matière sèche de + 4,0 t/ha par rapport au témoin non fertilisé (tableau 3). Des essais complémentaires (POOZESH, 2007 ; POOZESH *et al.*, 2010) ont permis de montrer que l'essentiel de cet effet « fertilisation » est dû à la fertilisation phosphatée.

Le chaulage en l'absence de fertilisation a amélioré la production de + 0,7 t/ha par rapport au témoin. **En présence de fertilisation, le chaulage n'améliore pas la production**, confirmant les résultats obtenus dans d'autres conditions par PINTO *et al.* (1995) et STEVENS et LAUGHLIN (1996).

Traitements	Témoin	CaCO ₃	NPKS	NPKS + CaCO ₃
Biomasse en 1 ^{re} coupe (t MS/ha)	0,8 ^{c(1)}	1,3 ^b	4,4 ^a	4,2 ^a
Biomasse totale (t MS/ha)	1,1 ^c	1,8 ^b	5,1 ^a	5,0 ^a

1 : les lettres indiquent les différences significatives entre traitements à $P < 0,05$

TABLEAU 3 : Effet des traitements sur la production annuelle de la prairie permanente (moyenne sur 5 ans : 2002 - 2006).

TABLE 3 : Effect of liming and fertilization on the annual production of permanent grassland (average over a period of 5 years: 2002 - 2006).

■ Effets sur la nutrition minérale de la prairie permanente

Les valeurs d'indices de nutrition obtenues sur la première coupe en dernière année d'essai sur la prairie permanente montrent la **faiblesse de la nutrition en N, P et K du témoin** (tableau 4). La fertilisation seule (NPKS) ou associée au chaulage (NPKS + CaCO₃) **améliore la nutrition en P et K** et l'amène à des niveaux presque satisfaisants pour P et satisfaisants pour K. Pour N, malgré un apport d'azote conséquent (160 kg/ha avant la première coupe), **les valeurs des indices INN**, bien qu'augmentant fortement en valeur relative, **restent inférieures à 0,8** ce qui suggère que la quantité d'azote apportée n'a pas été suffisante pour atteindre un niveau de disponibilité en azote non limitant pour la croissance ou que cet azote apporté a été mal valorisé par la prairie permanente.

	Témoin	CaCO ₃	NPKS	NPKS + CaCO ₃
INN	0,27	0,36	0,55	0,62
INP	0,50	0,66	0,63	0,82
INK	0,71	0,79	0,98	1,07

TABLEAU 4 : Indices de nutrition NPK de la prairie permanente mesurés à la 1^{re} coupe en 2006.

TABLE 4 : NPK nutritional values for permanent grassland measured at 1st cutting in 2006.

■ Effets du chaulage et de la fertilisation sur la prairie temporaire de dactyle

Le suivi de la production de biomasse du dactyle, selon les différentes modalités de l'essai montre (tableau 5) :

- une **augmentation de la production annuelle**, celle-ci atteignant les 9 t/ha ;
- l'absence d'effet des fertilisations N et K en l'absence de P ;
- un **fort effet du phosphore** (+ 5,3 t MS/ha) en présence de N, K et CaCO₃ ;
- un **effet additif du chaulage** qui varie de 0,2 à 0,7 t/ha par coupe, augmentant en valeur relative avec le

	1 ^{re} coupe	Autres coupes	Total
Production de biomasse aérienne (t MS/ha)			
NK	0,82 ^a	1,31 ^c	2,14 ^d
NK + CaCO ₃	1,06 ^a	2,65 ^b	3,71 ^c
NK + P	4,10 ^b	2,23 ^b	6,33 ^b
NK + P + CaCO ₃	4,68 ^b	4,32 ^a	9,00 ^a
Effet des traitements (t MS/ha)			
Effet CaCO ₃	0,41 ns	1,71 ***	1,57 * - 2,67 *
Effet P	3,45 ***	1,29 ***	4,19* - 5,29 *
Interaction CaCO ₃ x P	ns	ns	*

Fertilisation : N 400, K 149, P 39 kg/ha en 2010
Chaulage : dernier apport de CaCO₃, 40 kmol/ha en décembre 2008
Les lettres indiquent les différences significatives entre traitements à $P < 0,05$
Signification des effets (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$)
Interaction : fourchette des effets selon le niveau de l'autre facteur

TABLEAU 5 : Production de biomasse de la prairie temporaire de dactyle (année 2010).

TABLE 5 : Biomass production for sown cocksfoot (year 2010).

numéro de la coupe et dont le cumul fait apparaître un effet significatif du chaulage (+ 2,7 t MS/ha) en présence de N, K, et P sur la prairie de dactyle. Ceci est en accord avec les résultats obtenus avec du ray-grass par PINTO *et al.* (1995) et STEVENS et LAUGHLIN (1996).

■ Effets sur la nutrition minérale du dactyle semé

Les indices de nutrition phosphatée (INP) des traitements ne recevant pas de phosphore (traitements NK et NK + CaCO₃) sont très faibles (INP = 0,34 et 0,31 respectivement) et confirment le manque de phosphore (tableau 6). Malgré l'apport d'azote réalisé avant la première coupe, l'indice de nutrition azotée (INN) reste inférieur dans ces traitements (INN = 0,71 et 0,76 respectivement). Il est possible que l'azote apporté soit mal absorbé dans ces traitements. Les valeurs de l'indice de nutrition potassique (INK) sont satisfaisantes quel que soit le traitement.

■ Rentabilité et durabilité des choix culturaux et des traitements

Des indicateurs de la production, de la diversité végétale et un indicateur économique ont été regroupés pour caractériser les itinéraires techniques sur les deux types de prairie et approcher leur rentabilité (tableau 7). Dans le calcul des coûts de production par tonne de matière sèche, le prix du poste fertilisation correspond au

	NK	NK + CaCO ₃	NK + P	NK + P + CaCO ₃
INN	71	76	113	94
INP	34	31	82	78
INK	90	90	103	97

TABLEAU 6 : Indices de nutrition NPK du dactyle mesurés à la 1^{re} coupe en 2010.

TABLE 6 : NPK nutritional values for sown cocksfoot measured at 1st cutting in 2010.

	Nombre total d'espèces	Minimum ⁽¹⁾ observé du pH _{eau}	Production (t MS/ha/an)	Mode de récolte ⁽²⁾	Coût (€/t MS) de production ⁽³⁾
Prairie permanente					
Témoin	10	4,5	1,1	pp	0
CaCO ₃	12	6,6	1,8	pp	16
NPKS	6	4,1	5,1	fp	131
NPKS + CaCO ₃	8	6,3	5,0	fp	139
Prairie temporaire de dactyle					
NK + P	1	4,4	6,3	fppp	131 ⁽⁴⁾
NK + P + CaCO ₃	1	5,7	9,0	fppp	95 ⁽⁵⁾

1 : couche 0-5 cm de profondeur, valeur minimum du pH_{eau} observée après traitement
2 : f : fauche, p : pâturage, pour prise en compte dans le calcul du coût de production
3 : coût du semis inclus mais hors main d'œuvre et hors clôtures
4 et 5 : coût calculé sur une pérennité du dactyle de respectivement 5 ans et 8 ans

TABLEAU 7 : Synthèse des indicateurs botaniques, agronomiques et économiques pour les différents traitements de fertilisation.

TABLE 7: Comparative figures showing botanical, agronomic and economic benefits for the different types of tested fertilizers.

coût des engrais minéraux utilisés dans le cadre de l'essai. Le recours aux engrais organiques disponibles sur les exploitations d'élevage peut abaisser considérablement le poste fertilisation et, de fait, diminuer les coûts de production.

Pour la prairie permanente, l'absence de fertilisation rend le coût de production de la tonne de matière sèche très faible. Cependant, avec une production aussi faible (moins de 2 t MS/ha), il n'est pas envisageable de constituer des stocks de fourrage pour les besoins hivernaux des animaux. Le seul moyen de valoriser cette production est le pâturage avec un chargement faible. La fertilisation en phosphore permet une augmentation significative de la production en première coupe (NPKS : 4,4 t/ha et NPKS + CaCO₃ : 4,2 t/ha ; tableau 3). Ce système fourrager est envisageable en système d'élevage extensif. Il permet en outre une conservation d'une partie de la diversité des espèces prairiales.

La prairie temporaire de dactyle fertilisée a un coût de production par tonne de MS proche de celui de la prairie permanente fertilisée avec 1,2 t MS/ha supplémentaire. **Pour le dactyle fertilisé et chaulé, le gain de production acquis par le chaulage permet de réduire de 27 % le coût de la tonne de MS et d'assurer de meilleures productions de regain** (+ 2,1 t MS/ha). De plus, le chaulage s'est avéré nécessaire pour pérenniser le dactyle cv. Accord qui ne se maintient bien selon les observations les plus récentes (2012, données non présentées) que dans les traitements chaulés. La prairie de dactyle fertilisée et chaulée convient mieux aux systèmes d'élevage plus intensifs au détriment d'un maintien de la biodiversité dans les parcelles.

Synthèse et perspectives

La fertilisation minérale diminue le nombre d'espèces végétales de la prairie permanente. Il faut donc probablement éviter toute fertilisation en phosphore ou en azote et phosphore dans les zones où l'on souhaite conserver une importante diversité végétale, ce qui est conforme aux observations de ELISSEOU *et al.* (1995) et SCHELLBERG *et al.* (1999) sur l'effet conjoint de l'azote et du phosphore, et à celles de JANSSENS *et al.* (1998) sur la

diminution de la diversité végétale lorsque la disponibilité du phosphore augmente. Au contraire, un chaulage modéré augmente le nombre d'espèces, ce qui est en accord avec l'effet négatif de l'acidification constaté par ROEM *et al.* (2002). **Dans le cas de la protection d'une flore patrimoniale**, et lorsque le pH_{eau} est inférieur ou égal à 5,0, nos résultats montrent qu'**un chaulage de surface modéré, sans fertilisation associée, peut permettre une intensification limitée sans perte de la diversité d'espèces**.

En termes agronomiques, la réponse à la fertilisation de la prairie permanente est beaucoup plus forte (+ 4,0 t MS/ha/an) que la réponse au chaulage (de 0 à 0,8 t MS/ha/an). La réponse de la prairie temporaire de dactyle semée sur les mêmes parcelles montre un effet fertilisation de l'ordre de + 5,3 t MS/ha/an et un effet chaulage de 2,7 t MS/ha/an. Globalement, ces réponses confirment les résultats de PINTO *et al.* (1995) et STEVENS et LAUGHLIN (1996) sur prairie permanente et prairie semée à base de ray-grass : **l'effet du chaulage est plus net avec les espèces productives de la prairie temporaire qu'avec les espèces de la prairie permanente**. La raison de la faible réponse au chaulage de la prairie permanente se trouve dans sa composition botanique : elle contient des espèces qui ne répondent pas positivement au chaulage, comme la molinie et la danthonie par exemple (POOZESH *et al.*, 2010) et des espèces qui ont une faible capacité de repousse estivale. La forte réponse au chaulage de la prairie semée de dactyle provient des phénomènes inverses : une seule espèce, avec un bon potentiel de production (ARVALIS, 2009), répondant bien au chaulage et une croissance permettant plusieurs coupes estivales, dans lesquelles le faible effet du chaulage peut se cumuler. Avec **le cultivar de dactyle Accord**, l'effet du chaulage s'exprime quel que soit le niveau de fertilisation, ce qui suggère que ce cultivar de dactyle **n'est pas complètement adapté à l'acidité du sol et à la toxicité de l'aluminium**. Malheureusement, il n'y a pas d'information disponible sur la tolérance à l'aluminium des variétés fourragères commercialisées en France.

C'est le manque de phosphore qui limite la production dans ce sol acide (tableau 5), L'indice de nutrition en phosphore (INP) a permis d'identifier ce

manque de P mais sans souligner son caractère prioritaire par rapport à l'azote dans la conception du programme de fertilisation (tableau 4). Dans la pratique de la fertilisation des prairies acides, il y a ainsi le risque que les apports d'azote et de potassium soient mal valorisés en production de biomasse, par insuffisance d'apport de phosphates comme le montre par exemple le traitement NK (tableau 5). Soulignons que, pour les besoins de l'expérimentation, la fertilisation NPK a été apportée ici sous forme minérale. Dans les systèmes d'élevage, il est préférable d'utiliser des apports réguliers d'effluents d'élevage qui permettent de couvrir les besoins en phosphore et potassium et assurent aussi la couverture partielle des besoins en azote. Ces apports organiques ont plusieurs avantages : la diminution du coût de production de la tonne de MS et la diminution de la toxicité de Al par complexation de Al avec la matière organique. Enfin, au contraire des engrais minéraux, les fumiers et lisiers de bovins sont généralement neutres ou peu acidifiants (BODET *et al.*, 2001).

D'un point de vue économique, les coûts de production de la tonne de matière sèche de fourrage sont peu différents pour les prairies permanentes fertilisées (131 €) ou fertilisées et chaulées (139 €) et pour les prairies temporaires fertilisées (131 €). **Le chaulage de la prairie temporaire de dactyle permet d'abaisser significativement ce coût de production** (95 €). En sol acide, dans un système extensif conservant des prairies permanentes pâturées peu productives mais à forte diversité d'espèces, il faut soit importer des fourrages pour les besoins hivernaux des animaux, soit compléter les stocks par la production de biomasse nécessaire sur des prairies temporaires intensives basées sur des cultivars productifs, dans un système fertilisé et chaulé.

Accepté pour publication,
le 18 octobre 2012.

Remerciements : Nous remercions J.-P. Cohan (ARVALIS-Institut du Végétal) pour sa relecture et E. Lecloux pour le travail de terrain et l'aide au laboratoire. Nous remercions Y. Rauzy (Chambre d'Agriculture de l'Ariège) pour la mise en place de l'essai et pour sa maintenance et Mme P. Sablé, la propriétaire du champ. V. Poozesh a reçu une bourse du ministère iranien de la Science, de la Recherche et de la Technologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTUNA A., ALVAREZ M.A., MOREY M. (1980) : "Comportamiento de gramíneas pratenses frente al pH y los carbonatos del suelo en la cuenca del Piguena - Narcea (Asturias)", *Pastos*, 10, 58-70.
- ARVALIS (2009) : *Catalogue des variétés des plantes fourragères*, Paris, ARVALIS, 72 p.
- AUSTRHEIM G., EVJU M., MYSTERUD A. (2005) : "Herb abundance and life-history traits in two contrasting alpine habitats in southern Norway", *Plant Ecology*, 179, 217-229.
- BAIZE D., ROQUE J. (1998) : "The soils of high pastures in Beaufortin (French Alps). Mapping and peculiarities", *Ecologie*, 29, 43-48.
- BODET J.M., HACALA S., AUBERT C., TEXIER C. (2001) : *Fertiliser avec les engrais de ferme*, IDE, ITAVI, ITCF, ITP, Paris, 104 p.

- CASTILLON P., PROTIN P.V. (2011) : "Faut-il adapter la fertilisation P et K de la prairie en fonction des objectifs de production qui lui sont assignés ?", Poster présenté aux *Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse*, 10^e Rencontres COMIFER, Reims, 23-24 novembre 2011 ; http://www.comifer.asso.fr/images/stories/pdf/10emes_rencontres/posters/protin.
- DAGET P., POISSONNET P. (1971) : "Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. Critères d'application", *Annales Agronomiques*, 22, 5-41.
- DURU M., THELIER-HUCHE L. (1997) : "N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands", *Diagnostic procedures for crop N management and decision making*, Lemaire G., Gastal F. (éd.), *Les colloques*, INRA, 124-128.
- DURU M., LEMAIRE G., CRUZ P. (1997) : "The nitrogen requirement of major agricultural crops. Grasslands", Lemaire G. (éd.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Heidelberg (Germany), Springer Verlag, 59-72.
- ELISSEOU G.C., VERESOGLOU D.S., MAMOLOS A.P. (1995) : "Vegetation productivity and diversity of acid grasslands in Northern Greece as influenced by winter rainfall and limiting nutrients", *Acta oecologica*, 16, 687-702.
- FABRE B., KOCKMANN F. (2006) : "Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique", *Fourrages*, 185, 103-122.
- FARRUGIA A., GASTAL F., SCHOLEFIELD D. (2004) : "Assessment of the nitrogen status of grassland", *Grass and Forage Sci.*, 59, 113-120.
- FICHTER J., TURPAULT M.P., DAMBRINE E., RANGER J. (1998) : "Mineral evolution of acid forest soils in the Strengbach catchment (Vosges mountains, N-E France)", *Geoderma*, 82, 4, 315-340.
- FYSTRO G., BAKKEN A.K. (2005) : "Soil reaction, yields and herbage element content as affected by lime applied on established leys in a multi-site field trial", *J. Agric. Sci.*, 143, 407-420.
- HOCKING P.J. (2001) : "Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminium tolerance of plants in acid soils", *Advances in Agronomy*, 74, 63-97.
- JANSSENS F., PEETERS A., TALLOWIN J.R.B., BAKKER J.P., BEKKER R.M., FILLAT F., OOMES M.J.M. (1998) : "Relationship between soil chemical factors and grassland diversity", *Plant and Soil*, 202, 69-78.
- KOCHIAN L.V., PINEROS M.A., HOEKENGA O.A. (2005) : "The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminium resistance and toxicity", *Plant and Soil*, 274, 175-195.
- LEMAIRE G., GASTAL F., SALETTE J. (1989) : "Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content", *Proc. XVIth Int. Grassland Congr.*, Nice, 179-180.
- MARRIOTT C.A., FOTHERGILL M., JEANGROS B., SCOTTON M., LOUAULT F. (2004) : "Long-term impacts of extensification of grassland management on biodiversity and productivity in upland areas. A review", *Agronomie*, 24, 447-462.
- MARSCHNER H. (1995) : *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd ed., London, Academic Press, 889 p.
- MENGEL K., KIRKBY E.A. (2001) : *Principles of plant nutrition*, 5th ed., Kluwer, Dordrecht, 849 p.
- PINTO M., RODRIGUEZ M., BESGA G. (1995) : "Effects of Linz-Donawitz (LD) slag on soil properties and pasture production in the Basque country (Northern Spain)", *New Zealand J. of Agric. Res.*, 38, 143-155.
- PLANTUREUX S., PEETERS A., MCCracken D. (2005) : "Biodiversity in intensive grasslands: effects of management, improvement and challenges", *Agronomy Research*, 3, 153-164.
- POOZESH V. (2007) : *Réponse des graminées des prairies permanentes à l'acidité, à l'aluminium et à la fertilisation (N, P) : relation avec les traits fonctionnels*, Institut National Polytechnique, Toulouse, thesis n° 2492, 138 p.

- POOZESH V., CRUZ P., CHOLER P., BERTONI G. (2007) : "Relationship between the Al resistance of grasses and their adaptation to an infertile habitat", *Annals of Botany*, 99, 947-954.
- POOZESH V., CASTILLON P., CRUZ P., BERTONI G. (2010) : "Re-evaluation of the liming-fertilization interaction in grasslands on poor and acid soils", *Grass and Forage Sci.*, 65, 260-272.
- ROEM W.J., KLEES H., BERENDSE F. (2002) : "Effects of nutrient addition and acidification on plant species diversity and seed germination in heathland", *J. Applied Ecology*, 39, 937-948.
- SHELLBERG J., MÖSELER B.M., KÜHBAUCH W., RADEMACHER I.F. (1999) : "Long-term effects of fertilizer on soil nutrient concentration, yield, forage quality and floristic composition of a hay meadow in the Eifel mountains, Germany", *Grass and Forage Sci.*, 54, 195-207.
- STEVENS R.J., LAUGHLIN R.J. (1996) : "Effects of lime and nitrogen fertilizer on two sward types over a 10-year period", *J. Agricultural Sci.*, 127, 451-461.
- TYLER G. (1996) : "Cover distribution of vascular plants in relation to soil chemistry and soil depth in a granite rock ecosystem", *Vegetatio*, 127, 215-223.
- VON UEXKÜLL H.R., MUTERT E. (1995) : "Global extent, development and economic impact of acid soils", *Plant and Soil*, 171, 1-15.
- WHEELER D.M., EDMEADES D.C., CHRISTIE R.A., GARDNER R. (1992) : "Effect of aluminium on the growth of 34 plant species: a summary of results obtained in low ionic strength solution culture", *Plant and Soil*, 146, 61-66.