

Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique

B. Fabre¹, F. Kockmann²

La diversité des réponses de la prairie aux apports d'amendements basiques calciques laisse supposer que leurs effets directs sur le pH et sur la concentration en calcium ont de très nombreuses conséquences sur le complexe sol-plante et le fonctionnement du peuplement végétal. Une importante revue bibliographique permet de faire le point.

RÉSUMÉ

Après un rappel agronomique du fonctionnement d'un couvert prairial, la revue bibliographique montre les divers types d'effets du chaulage : i) une augmentation de l'absorption de l'azote, due à une plus grande disponibilité de la matière organique aux micro-organismes, ce qui augmente sa minéralisation ; ii) une meilleure biodisponibilité et une meilleure absorption du phosphore ; iii) une évolution favorable de la composition botanique, qui conduit à une augmentation de la production et de sa qualité ; iv) une accélération du ressuyage du sol et une amélioration des conditions de fonctionnement racinaire. L'effet du chaulage ne se limite pas au seul effet sur le pH ; son extériorisation, notamment sur la production, peut être masquée par la fertilisation azotée. Il dépend également de l'état initial du sol, de son histoire acido-basique et des pratiques de fertilisation. Des pistes sont proposées pour formaliser une démarche de conseil et d'élaboration de références en matière de chaulage.

MOTS CLÉS

Amendement basique calcique, fertilisation, matière organique, nutrition azotée, nutrition phosphatée, prairie permanente, production fourragère, sol, végétation

KEY-WORDS

Basic calcic fertilizer, fertilization, nitrogen nutrition, organic matter, permanent pasture, phosphatic nutrition, soil, vegetation

AUTEURS

1 : ISARA, 31, place Bellecour, F-69288 Lyon cedex 02 ; bfabre@isara.fr

2 : Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 59, rue du 19 mars 1962, BP 522, F-71010 Mâcon cedex

Les éleveurs ont toujours été très sensibles à l'utilisation sur les prairies des scories, voire des amendements basiques. Mais dans le contexte de l'activité sidérurgique française et de la réduction des coûts de production, leur utilisation a sensiblement diminué depuis 20 ans : les ventes en France sont passées de 3,3 millions de tonnes (scories et scories potassiques) en 1972 à 1 en 1984-1985, puis à 0,1 pour les amendements sidérurgiques phosphatés et engrais composés à base de scories en 2004-2005. L'extensification entraîne ainsi fréquemment l'abandon du chaulage et, de ce fait, les pH des sols peuvent diminuer fortement, pour passer en dessous de 5,5, voire même de 5,0 comme l'indiquent GOULDING et BLAKE (1998). Par ailleurs, l'acidification, due pour partie au fonctionnement biologique du sol et à l'absorption racinaire, peut être accélérée par l'acidité des précipitations, l'augmentation des exportations et l'utilisation de formes d'engrais acidifiantes (JULIEN *et al.*, 2005).

La prairie de longue durée est un peuplement complexe qui réagit aux modifications du milieu sur le court et le moyen terme. Les pratiques d'entretien ou d'amélioration de la "fertilité" du milieu ainsi que les modes d'utilisation du couvert végétal conduisent à des évolutions de la production, de sa qualité et de la composition botanique de la prairie. Le chaulage a-t-il lui aussi un effet sur ces peuplements et comment peut-on l'analyser ?

Dans cet article, à partir de la bibliographie, nous faisons le constat de la **variabilité des réponses de la prairie au chaulage** et introduisons ainsi la question d'indicateurs pertinents. En nous référant aux connaissances agronomiques acquises en grandes cultures, nous proposons un schéma d'interprétation des effets du chaulage sur les prairies puis explicitons les principaux mécanismes de base.

Les prairies résistant bien à l'acidité des sols, l'effet du chaulage sur la production serait généralement peu marqué lorsque le pH est supérieur à 5 ou 5,5 (de MONTARD, 1986). Cependant, dès la mise en place en 1856, de l'expérimentation de Park Grass sur l'effet des engrais et amendements, LAWES et GILBERT, cités par JOHNSTON (1997) notent les rapides changements des proportions des différentes espèces dans la prairie et concluent que le seul niveau de production n'est pas une mesure satisfaisante de la valeur de la prairie.

L'apport d'un amendement basique calcique ou "chaulage" a des effets particulièrement complexes sur le sol et donc sur le fonctionnement du couvert végétal. En effet, il joue sur le pH du sol par l'apport d'une base (OH^- ou CO_3^{2-}) et sur la garniture ionique de la CEC (Capacité d'Echange Cationique), deux actions qui interviennent sur les composantes de la fertilité du milieu. Nous l'illustrons en rassemblant les différents travaux scientifiques disponibles, finalisés sur la pratique du chaulage et les comportements des sols prairiaux. Toutefois, nous n'aborderons pas les effets sur la toxicité aluminique qui se manifeste pour des pH inférieurs à 5, conditions qui existent très rarement dans les conditions pédoclimatiques et agricoles européennes et qu'il faut éviter d'atteindre par une dégradation du milieu.

1. Des réponses variables de la prairie au chaulage

Une première approche bibliographique sur le chaulage des prairies permet de bien identifier sur quels aspects le chaulage a des répercussions et de nuancer sensiblement l'affirmation de l'indifférence des prairies au pH :

- Selon la dose de carbonate de calcium apportée, MERIAUX (1968) observe, trois ans après l'apport, que la production de la fétuque progresse de 0,6 à 1,5 t MS (tableau 1), malgré une faible évolution des pH, alors que la teneur en calcium échangeable croît fortement : la question de **la pertinence des indicateurs du statut acido-basique du sol sous prairie paraît posée**.

TABLEAU 1 : Effets d'un apport d'amendement calcique sur la production d'une fétuque et l'acidité du sol (MERIAUX, 1968).

Apport d'amendement (t CaCO ₃ /ha)	0	2	5	ppds
Production (t MS/ha/an)	9,7	10,4	11,3	0,486
Teneur en Ca de la 1 ^{re} coupe (%)	0,74	0,74	0,70	N.S.
pH H ₂ O	5,35	5,60	5,75	
pH KCl	4,28	4,45	4,50	
Ca échangeable du sol (cmol/kg)	4,55	5,24	5,44	

TABLE 1 : Effects of a lime dressing on the production of a fescue sward and on soil acidity (MERIAUX, 1968).

- BONISCHOT (1986) note que les prairies les plus productives ont des pH compris entre 6 et 7 et il relève un lien important entre la composition botanique et l'évolution du pH : légumineuses et bonnes graminées prairiales sont plus abondantes quand le pH passe de 5,3 à 6,8. La réponse au chaulage ne peut donc manifestement se limiter au seul niveau de production de la prairie. Encore faut-il intégrer ses effets sur la composition botanique, extériorisés sur un pas de temps plus long. En outre, BONISCHOT (1986) montre que l'apport annuel d'amendement permet, dès la deuxième année, une meilleure efficacité d'un apport de superphosphate : la question des **répercussions du chaulage sur la nutrition minérale de la prairie** se trouve ainsi suggérée.

- GUEYDON (1992) obtient des résultats très variables sur trois prairies permanentes de la Loire au cours d'un essai de 5 ans (tableau 2). Le chaulage a été réalisé sous la forme d'un apport annuel de chaux, sur la base de 350 unités de valeur neutralisante¹.

TABLEAU 2 : Effets du chaulage sur la production annuelle moyenne et le pH de différentes prairies de la Loire (GUEYDON, 1992).

		Burdignes	Croizet	Noailly
Fumure (kg/ha)	N	130	80	80
	P	85	45	65
	K	325	245	260
Production (t MS/ha)				
Témoin		4,8	4,6	5,9
Fumure		8,4	6	7,6
Fumure + chaulage		+ 0,9	0	0
PH eau				
Témoin – année 0		6,1	6,1	6,7
Témoin – après 5 ans		5,4	5,4	6,1
Chaulé – après 5 ans		5,8	6,1	6,9

TABLE 2 : Effects of a lime dressing on the mean annual production and the pH of various pastures in Loire (GUEYDON, 1992).

¹ : La valeur neutralisante (VN) d'un amendement basique s'exprime par la masse (en kg) d'oxyde de calcium (CaO) qui a la même capacité de neutralisation que 100 kg du produit. On la mesure par attaque d'un acide fort (HCl). On parle de VN pour enlever les ambiguïtés liées à la mesure par CaO.

Alors que sur la prairie de Burdignes, caractérisée par un pH initial de 6,1 et située à 900 m d'altitude, le chaulage procure une augmentation moyenne de production de 0,9 t MS/ha, sur les deux autres prairies localisées en plaine, caractérisées respectivement par un pH de 6,1 et 6,7, le chaulage reste sans effet. Parallèlement, les pratiques de fertilisation, différentes entre les sites car adaptées aux sols et à l'objectif de production, ont des effets toujours sensibles sur la production.

Les productions sont très variables selon les années, mais **seule la prairie de Burdignes extériorise chaque année un effet du chaulage**. Ce dernier varie de 0,5 t MS/ha à 1,45 t MS/ha, pour une production moyenne de 9 t MS/ha. La productivité de la parcelle de Croizet, sur un sol séchant, est limitée par l'alimentation hydrique.

L'examen des résultats annuels sur l'essai de Burdignes montre que le chaulage cumulé avec la fertilisation NPK provoque un accroissement de la production, comparativement au seul traitement NPK (tableau 3). En régime de surfertilisation azotée, N(2) PK Ca, les résultats sont comparables, parfois même inférieurs. L'absence de traitement "chaulage sans fertilisation" ne permet pas de conclure sur l'impact du seul amendement sur la prairie : c'est une limite de l'essai.

	1986	1987	1988	1989	1990	Moyenne
NPK	5,44	8,51	8,22	5,22	7,92	7,06
NPK Ca	5,57	9,65	8,70	6,67	9,20	7,96
N(2) PK Ca	5,08	9,13	8,13	7,46	9,36	7,83

Pour vérifier les états de nutrition des prairies, les **indices de nutrition** azotée, phosphatée et potassique ont été mesurés sur chacune des coupes (tableau 4). Ils sont très variables selon les années. Cependant, en moyenne sur les 5 années, on constate un effet des apports de fertilisants, sauf pour Burdignes (IP) ; l'effet est même significatif à 10% pour les apports combinés NPKCa à Noailly (IP et IK) et Croizet (IP). Les sols sont riches en P et K, sauf celui de Noailly, particulièrement en dessous de 10 cm.

En outre, les différentes politiques de fertilisation ont joué sur la composition botanique. En particulier, la proportion des graminées à forte valeur pastorale a augmenté dans les 3 prairies.

	Traitement	IN	IP	IK
Noailly	Témoin	45 a	92 a	64 a
	NPK	68 b	108 b	91 b
	NPKCa	63 b	111 c	100 c
Croizet	Témoin	57 a	103 a	75 a
	NPK	74 b	107 b	90 b
	NPKCa	70 b	112 c	92 b
Burdignes	Témoin	61 a	97 a	91 a
	NPK	83 b	102 a	105 b
	NPKCa	84 b	100 a	107 b

Pour un même lieu et un même indice, les résultats non statistiquement différents sont indexés par la même lettre

TABLEAU 3 : Effets du chaulage sur la production annuelle (en t MS/ha/an) de l'essai de Burdignes (GUEYDON, 1992).

TABLE 3 : Effects of a lime dressing on the annual production (t DM/ha/year) in the trial at Burdignes (GUEYDON, 1992).

TABLEAU 4 : Effets du chaulage et de la fertilisation sur les indices de nutrition N, P, K en première coupe des prairies ensilées de l'essai de la Loire (moyenne sur 5 années ; GUEYDON, 1992).

TABLE 4 : Effects of liming and mineral fertilizer dressing on the N, P, K nutrition indices in the first cuts of pastures used for silage in the Loire trial (mean of 5 years ; GUEYDON, 1992).

- Enfin, CASTILLON (1998), réalisant une synthèse sur 12 essais récents, montre que **l'effet moyen du chaulage est faible** (0,23 t MS/ha/an) **et très variable** puisque les résultats varient de - 0,5 t MS/ha à plus de 2 t MS/ha selon les lieux.

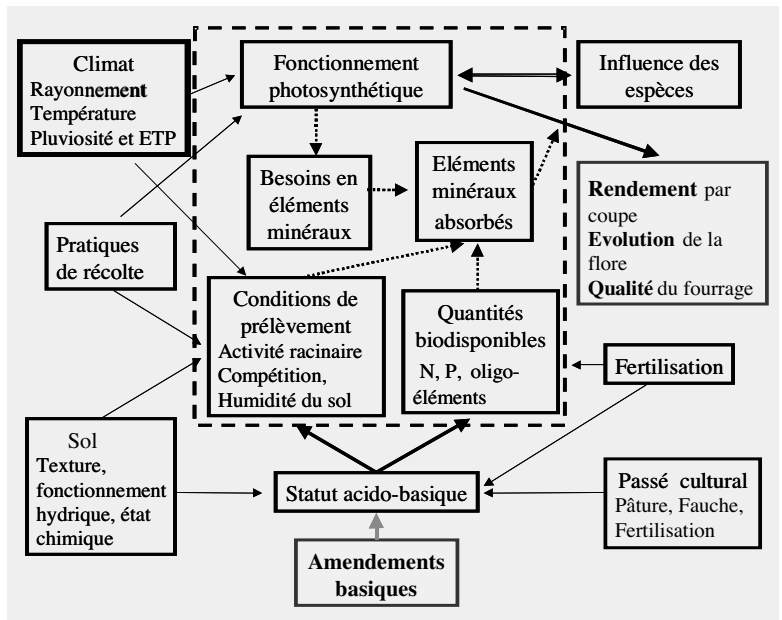
Ces différents constats et réflexions critiques montrent qu'**il est fondamental de comprendre l'origine de la variabilité des effets du chaulage ; la pertinence du conseil passe par une approche agronomique de la diversité des réponses à cette pratique.** En effet, un rapprochement de résultats moyens occulte les multiples effets, voire les interactions, du chaulage sur les fonctionnements physiques, chimiques et biologiques du sol et donc sur l'élaboration de la production.

2. Rappel des mécanismes de fonctionnement d'un couvert végétal

La prise en compte des mécanismes complexes qui régissent le fonctionnement photosynthétique du peuplement (SEBILLOTTE, 1986) est indispensable pour situer les "lieux" d'intervention du chaulage (figure 1).

FIGURE 1 : Schéma de fonctionnement d'un couvert prairial et effets du chaulage.

FIGURE 1 : Diagram showing the workings of a pasture sward, and effects of liming.



- Le fonctionnement photosynthétique de la prairie, largement déterminé par l'énergie lumineuse interceptée par le couvert, fixe les besoins en éléments minéraux. Les éléments minéraux absorbés résultent des quantités disponibles présentes et des conditions de prélèvement (DURU, 1992).

- Le passé cultural de la parcelle (régime d'exploitation et pratiques de fertilisation) et le sol (texture, fonctionnement hydrique, état chimique...) expliquent et déterminent la quantité offerte par le milieu pour chacun des éléments minéraux (LOISEAU, 1990).

- Les pratiques de récolte, mécaniques ou par l'animal, en relation avec l'état hydrique du sol, interfèrent sur le profil cultural et donc sur la colonisation et le fonctionnement racinaire ; les pluies et les températures durant la période d'absorption par la prairie ont un rôle également important sur les conditions de la nutrition (MORLON, 1983).

- Les besoins nutritionnels et la capacité d'absorption racinaire sont probablement variables selon les espèces et les éléments considérés, expliquant en particulier le caractère "pionnier" de certaines plantes (DURU et CALVIÈRE, 1996).

Le chaulage, ou plus rigoureusement l'apport d'un amendement basique calcique, **modifie le statut acido-basique du sol et a des effets sur la nutrition minérale** (conditions de prélèvement des éléments minéraux et quantités mise à disposition de la plante). Le schéma du fonctionnement d'un couvert prairial que nous proposons (figure 1) indique que le chaulage agit indirectement sur les **conditions de prélèvement et les quantités d'éléments disponibles**. Il convient donc d'abandonner toute recherche de liaison directe entre une technique, le chaulage, et le rendement final.

3. Les effets directs du chaulage et leurs répercussions sur le sol et les cultures

Les effets directs d'un amendement basique sont : une augmentation (i) du pH, (ii) de la CEC effective par ionisation des groupements hydroxyles et carboxyliques de la matière organique (R-COH et R-COOH), (iii) de la concentration en calcium (échangeable et en solution) et (iv) une baisse de la concentration en aluminium (échangeable et en solution) (Comifer - Groupe Chaulage, 2000). Sous prairies, du fait de la forte teneur en matières organiques et du fort pouvoir tampon du sol vis-à-vis du pH, un apport d'amendement basique calcique se traduit généralement par une faible augmentation du pH, une forte augmentation du calcium échangeable et de la CEC au pH du sol² et par une diminution de la concentration de l'aluminium échangeable (qui devient négligeable dès pH 5,5, seuil variable selon le type de sol).

Différentes modifications des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dues à ces effets directs du chaulage ont été observées dans le cadre d'études effectuées principalement sur sols cultivés ou forestiers :

- **Une amélioration de la structure et de la circulation de l'eau dans le sol** (KOCKMANN *et al.*, 1990). Les parcelles basiques retiennent plus d'eau à saturation et ont une vitesse d'humectation, donc de circulation de l'eau, plus rapide que les parcelles acides, abstraction faite de l'influence de l'organisation du sol *in situ* (PERNES et TESSIER, 2002). Le calcium joue un rôle majeur sur les propriétés

² : La CEC Metson est évaluée à pH 7. Elle ne permet pas de montrer l'augmentation de la CEC effective, mesurée au pH du sol. Celle-ci peut être mesurée par la méthode au chlorure de cobaltihexamine (CESIELSKI et STERCKEMAN, 1997)

physiques du sol ; il est l'objet d'attractions fortes par les sites chargés, à l'échelle des particules d'argile (TESSIER, 2002). De même, BORTOLUZZI et TESSIER (2002) constatent que le chaulage (2 t/ha de CaCO_3) engendre une plus grande porosité et une rétention d'eau plus forte.

- **Une réduction du pouvoir fixateur du sol pour les ions phosphates.** L'augmentation de la biodisponibilité du phosphore, suite à des apports de lisier ou d'amendements sidérurgiques, s'explique aussi pour partie par l'augmentation du pH pour des terres dont le pH initial est compris entre 4,5 et 7,3 (FARDEAU et STAIMESSE, 1995 ; FARDEAU et MARTINEZ, 1996). Cependant, dans certaines situations, l'apport de calcium peut, à l'opposé, conduire à la précipitation de phosphates de calcium, entraînant une baisse de la biodisponibilité du phosphore.

- **Les changements positifs ou négatifs de concentrations en éléments minéraux dans les plantes** peuvent être attribués à plusieurs causes : (i) le changement de biodisponibilité lié à la variation de pH, (ii) la dilution des éléments prélevés du fait de l'accroissement de biomasse, (iii) l'augmentation de l'activité et de la biomasse racinaire et (iv) les interactions entre éléments. Par exemple, en cas de chaulage, la disponibilité du zinc (Zn) ou du manganèse (Mn) diminue jusqu'à conduire à des déficiences manganiques, alors que celle de molybdène (Mo) augmente. Ces modifications de la solubilité des éléments minéraux dans le sol peuvent entraîner des modifications de concentration dans les fourrages (Al, Cd, Pb, par exemple) qui deviennent supérieures aux maximums tolérables par les animaux.

- **Une accélération de l'activité de la biomasse microbienne** (KOCKMANN *et al.*, 1990) qui entraîne une évolution de la matière organique du sol. TOUTAIN *et al.* (1987) indiquent, sous forêt, une évolution d'un moder vers un mull avec une diminution du rapport C/N et une plus faible accumulation de litière. Cela conduit à une accélération des cycles biologiques extériorisée par une augmentation de la minéralisation du carbone et de l'azote.

- **L'amélioration de la disponibilité de la matière organique aux micro-organismes** par le chaulage permet une augmentation de la quantité d'azote minéralisé (JULIEN et PELTIER, 1998 ; PELTIER, 2001). Cette augmentation pourrait alors favoriser l'évolution de la matière organique grossière, comme LOISEAU et GRIGNANI (1991) le suggèrent pour l'utilisation de l'azote minéral apporté sur prairies pauvres de moyenne montagne.

- **L'utilisation des engrais azotés conduit à une accélération de la baisse du pH** et peut mener par là même plus rapidement à des insuffisances de nutrition en molybdène, à une éventuelle toxicité de l'aluminium et du manganèse (GEMBAZEWSKI et SIENKIEWICZ, 1989 ; MALHI *et al.*, 1998), susceptibles d'être corrigées par le chaulage. Les effets du chaulage peuvent donc être variables selon les types de fertilisants utilisés comme le montrent les résultats de LAISSUS et MARTY (1973) et ADAMS (1986).

Parallèlement à ces différents effets du chaulage, on observe généralement **des augmentations de productivité**, dont les causes diffèrent selon les conditions initiales, ce qui rend difficile leur hiérarchisation. De plus, comme nous l'avons souligné dans la figure 1, **l'extériorisation des effets du chaulage dépend aussi du climat, de l'état initial du sol et des pratiques culturales et de fertilisation** (FABRE, 2001).

Développons maintenant certains de ces effets qui concernent plus particulièrement les prairies permanentes : les répercussions du chaulage sur la dynamique de l'azote et du phosphore ainsi que sur la composition botanique.

4. Chaulage et dynamique de l'azote sous prairie

■ Effet du chaulage sur la matière organique du sol et l'activité de la biomasse microbienne

La teneur élevée en matière organique des sols **sous prairie** leur confère **un pouvoir tampon fort vis-à-vis du pH**. JOHNSTON (1991) démontre que le chaulage accroît le pH des trois horizons (H1, H2, H3) uniquement si on enlève préalablement le mat. En présence de résidus organiques en surface, partiellement décomposés, le pH augmente peu, après trois apports de craie (tableau 5).

	pH en Novembre 1959				pH en Novembre 1971			
	Mat	H ₁	H ₂	H ₃	Mat	H ₁	H ₂	H ₃
Parcelle témoin	5,5	4,2	4,1	4,4	6,4	4,9	4,6	4,6
Parcelle A*		5,8	5,5	5,3	6,4	6,1	5,6	
Parcelle B*	5,2	4,7	4,5	4,8	6,5	6,2	5,6	

* On a supprimé le mat au début de l'expérimentation dans la parcelle A, et avant les chaulages (en 1965, 1967 et 1968) dans la parcelle B

TABLEAU 5 : Evolution du pH dans différents horizons après 3 apports de craie à Park Grass (JOHNSTON, 1991).

TABLE 5 : Changes in the pH values of different horizons after 3 dressings of chalk at Park Grass (JOHNSTON, 1991).

Ce pouvoir tampon est dû en grande partie à la déprotonation des groupements hydroxyles et carboxyles qui consomme les bases apportées par l'amendement ; le calcium s'adsorbe sur les sites négatifs ainsi créés. Ceci explique la faible augmentation du pH après chaulage sous les sols de prairies. De plus, dans les sols fortement acides, la neutralisation de Al³⁺ consomme également des bases, ce qui limite aussi l'augmentation du pH après chaulage ; en outre, la forte teneur en matières organiques complexe les ions aluminium, ce qui diminue leur toxicité.

L'augmentation des charges négatives de la **matière organique** la rend **plus accessible aux micro-organismes** : KOCKMANN *et al.* (1990) mettent en évidence une augmentation de la biomasse microbienne après chaulage. Ils vérifient que le chaulage augmente la CEC effective, la biomasse microbienne et sa respiration, donc son activité. CHAUSSOD *et al.* (1992) montrent que la CEC et ses variations agissent sur le fonctionnement de la biomasse microbienne. La variation du pH de 5,7 à 7,3 augmente les teneurs en matières organiques dissoutes et le chaulage stimule l'activité microbienne (KALBITZ *et al.*, 2000). La respiration du sol

augmente après chaulage indiquant que les matières organiques dissoutes sont particulièrement biodégradables (CHANTIGNY, 2003). Le chaulage accroît donc la quantité de matières organiques solubles qui peuvent être plus facilement minéralisées. Cependant, une trop forte teneur en cation (Ca^{++}) peut amener une précipitation de ces matières organiques, en particulier les grosses molécules.

D'après JOHNSON *et al.* (2002), le chaulage affecte l'activité et la structure des micro-organismes et **stimule l'abondance des mycorhizes** ; il induit donc un **recyclage du carbone plus rapide** et une diminution du stockage de cet élément dans le sol. L'activité des vers de terre (SPRINGETT et SYERS, 1984) est elle aussi stimulée par le chaulage et la production de turricules augmente quand la teneur en Ca et le pH augmentent.

■ Chaulage et minéralisation de la matière organique

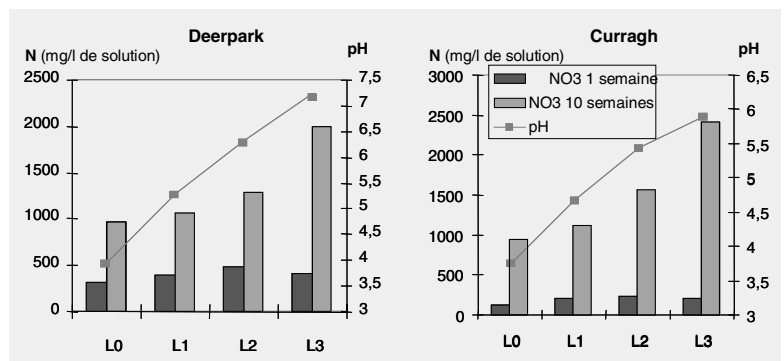
Le taux de minéralisation de la matière organique diminue quand l'acidité augmente ; **le chaulage, à long terme, l'augmente**. Certains auteurs ont constaté que le chaulage fait diminuer les teneurs en matière organique des sols, augmenter la production d'azote minéral et de gaz carbonique. Cependant, d'autres ont pu faire les constatations inverses. Il est donc nécessaire d'approfondir l'analyse.

NYBORG et HOYT (1978) observent, par incubation de 40 sols, un doublement des quantités d'azote minéralisé par le chaulage, et les prélèvements s'accroissent de 15 à 42 kg N/ha la première année, et de 7 à 10 kg N/ha, la troisième année. Les pH de départ sont entre 4 et 5,6 et le pH final après chaulage est 6,7. **Il semble que ce soit le changement de pH plus que le pH initial qui marque**. Le chaulage établit de meilleures conditions de nitrification et la part de l'azote nitrique passe de 41% à 85% de l'azote minéral du sol. Bien que l'augmentation de la minéralisation de l'azote organique par le chaulage soit temporaire, les quantités d'azote minéralisé devraient être prises en compte.

CURTIN et SMILLIE (1986a) font incubé 10 semaines deux sols de prairies, après chaulage à trois niveaux d'apports, et mesurent les quantités d'azote minéralisé. Ils constatent que la minéralisation de l'azote est supérieure dans les sols chaulés (figure 2). Pour eux, ces variations de concentration en azote minéral sont liées à une

FIGURE 2 : Effets du chaulage de 2 prairies (3 niveaux d'apports L1, L2, L3) sur le pH et sur la concentration en NO_3 de la solution du sol après incubation (CURTIN et SMILLIE, 1986a).

FIGURE 2 : Effects of the liming of 2 pastures (three levels: L1, L2, L3) on the pH and on the NO_3 content of the soil solution after incubation (CURTIN and SMILLIE, 1986a).



augmentation de la CEC effective, à la précipitation de Mn et Al et à une augmentation des complexes Al-matières organiques. Ils constatent au champ les mêmes évolutions, avec une forte diminution de la matière organique peu décomposée à la surface du sol.

CURTIN *et al.* (1998) modélisent la minéralisation sur la base de l'équation suivante :

$$C \text{ ou } N \text{ minéralisé} = (C_0 \text{ ou } N_0)(1 - e^{-kt})$$

C_0 ou N_0 : carbone ou azote potentiellement minéralisable ;

t : durée d'incubation ;

k : coefficient de minéralisation.

Ils constatent, dans une étude sur 61 sols, que le pH tend, en moyenne, à faire diminuer k .

Le chaulage réalisé sur deux sols de prairies (Swinton et Melford : pH initial 5,8 et 5,7 respectivement), augmente très significativement la minéralisation de l'azote, avec toutefois une intensité variable selon les sols (figure 3). Le pH augmente de 1,6 points et double la valeur de k et celle de la matière organique soluble. Ceci montre bien que **c'est l'augmentation de la disponibilité de la matière organique aux micro-organismes qui est le principal facteur de l'augmentation des quantités de carbone et d'azote minéralisés. Seule une partie de la matière organique serait concernée.** Un modèle à deux compartiments permet d'améliorer l'estimation de la minéralisation : un compartiment de matières organiques stables et un pool de matières organiques rapidement minéralisables. **Du fait de cette augmentation de l'azote minéralisé, les plantes répondent au chaulage même quand l'acidité n'est pas directement un facteur limitant.** Cependant, cette augmentation de la capacité minéralisatrice de la matière organique du sol est de **durée limitée.**

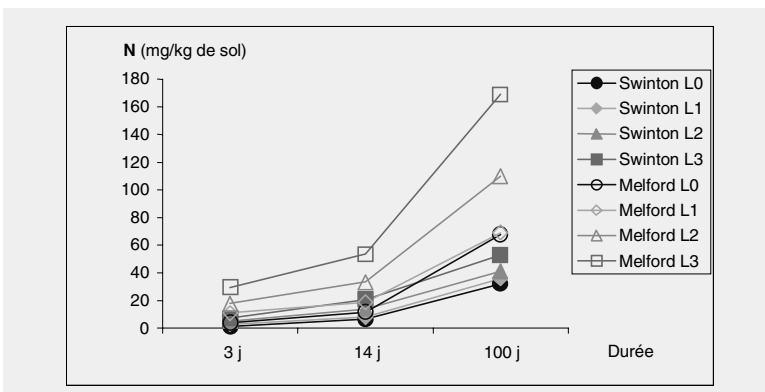


FIGURE 3 : Effet du chaulage de 2 prairies sur la quantité d'azote du sol minéralisée par incubation (L0 à L3 : doses d'apports ; CURTIN *et al.*, 1998).

FIGURE 3 : Effect of the liming of 2 pastures on the amount of mineralized nitrogen per kg of soil after incubation (L0 to L3 : levels of input ; CURTIN *et al.*, 1998).

■ Minéralisation, fertilisation et production de la prairie

EDMEADES *et al.* (1981) constatent que, sur ray-grass, le chaulage augmente la productivité. De plus, ils vérifient une relation négative entre chaulage et fertilisation azotée (tableau 6), même si celle-ci

accroît la production totale. La concentration en azote des plantes du témoin non chaulé indique que seul l'azote est limitant (passage de 1,87% à 2,87% avec la fertilisation azotée). Les bactéries nitrificatrices sont elles aussi sensibles au pH, même si l'on trouve des activités nitrifiantes à des pH bas.

TABLEAU 6 : Productivité du ray-grass (g MS/pot) sur 2 sols avec 2 doses d'azote (EDMEADES, 1981).

TABLE 6 : Yields of ryegrass (g DM/pot) on 2 soils with 2 levels of nitrogen (EDMEADES, 1981).

Chaulage	Mahoenui		Waingaro	
	Non chaulé	Chaulé	Non chaulé	Chaulé
pH	5,28	7	5,1	6,8
Apports d'azote (mg N/pot)	0	6,7	8,6	18
	270	17,6	15,5	20,7

CURTIN et SMILLIE (1986b) montrent sur les essais de Deerpark et Curragh que la réponse au chaulage en termes de productivité, pour les premières doses, est bien due à la levée de la toxicité aluminique. Pour les doses les plus fortes, ils concluent que c'est bien la disponibilité en azote sur Deerpark qui en est la cause. Sur Curragh, la réponse est due, selon eux, en l'absence de fertilisation phosphatée, à l'augmentation de la disponibilité en phosphore et ils font l'hypothèse d'une plus forte minéralisation du P organique.

BAILEY (1995) montre que l'augmentation de prélèvement de l'azote et de productivité est moindre quand la fertilisation est élevée. L'accroissement de la biodisponibilité du calcium améliore la capacité de la plante à prélever l'azote (prélèvements de NH_4^+ et stimulation des transporteurs de NO_3^-). Ceci aide les plantes dans leur compétition avec la biomasse microbienne pour l'azote minéral quand celui-ci devient limitant. STEVENS et LAUGLIN (1966), sur sols basaltiques argileux à pH 5,1 et 5,5, montrent que le chaulage procure une plus forte augmentation de production dans les parcelles moins fertilisées en azote, où les pH passent à 6,3 et 6,6, les pH du témoin étant restés au-dessus de 5 ou 5,5.

Le niveau de fertilisation azotée peut donc masquer l'extériorisation sur la production de cet effet du chaulage sur la minéralisation. Cependant, certains résultats montrent qu'au-dessus de pH 5, le chaulage reste sans effet. Ceci peut s'expliquer par les pratiques de fertilisation retenues dans les essais. **Une fertilisation azotée importante ou, au contraire, trop limitante masque l'effet du chaulage sur le rendement**, comme nous l'avons constaté sur céréales (KOCKMANN et FABRE, 1988).

Mais cette augmentation de la minéralisation de l'azote peut avoir des conséquences négatives sur les fuites en nitrates. En effet, MRKVICKA *et al.* (1991) constatent sur parcelles régénérées par le labour de l'ancienne prairie une forte augmentation des teneurs en nitrates dans les percolats après chaulage (6,7; 25,5 et 50,6 mg/l, respectivement pour les sols témoin, chaulé au carbonate, chaulé à la chaux).

Ces différents résultats montrent que **le chaulage joue bien sur la minéralisation de l'azote et sa mise à disposition de la plante** (figure 1). Cet effet sur l'amélioration de la nutrition azotée est

plus dû au chaulage qu'au pH lui-même ; c'est pourquoi on peut s'attendre à des réponses même à des pH qui pourraient paraître élevés pour des prairies. C'est ce que l'on retrouve dans les résultats de JULIEN et PELTIER (1998) et PELTIER (2001) qui obtiennent en moyenne une augmentation de production de l'ordre de 10% qui diminue après la deuxième année. C'est donc bien les quantités d'azote disponible qui augmentent (mécanisme principal les premières années), de même que leur interception par le système racinaire (plus durable).

5. Chaulage et disponibilité du phosphore

L'assimilabilité du phosphore est en partie sous la dépendance du pH. **Les pH acides, inférieurs à 5, conduisent à la formation de combinaisons insolubles de phosphore** avec le fer et l'aluminium libres dans la solution du sol. Toute augmentation du pH favorise la solubilisation des minéraux phosphatés de fer et d'aluminium et devrait amener une augmentation du phosphore assimilable. **Cependant, la présence de calcium dans la solution du sol conduit à une immobilisation du phosphore** (HAYNES, 1982). Ceci est particulièrement vrai **pour des pH voisins de la neutralité ou basiques**.

En absence d'apports de P, l'effet du chaulage sur la nutrition phosphatée est le fait d'une meilleure efficacité racinaire, d'une plus grande désorption et d'une amélioration de la disponibilité du phosphore du sol comme l'ont constaté CURTIN et SMILLIE (1986b).

HOLFORD et CROCKER (1994) retrouvent les résultats de HAYNES et LUDECKE (1981) et MANSELL *et al.* (1984). Ils indiquent que le chaulage augmente la solubilité du phosphore du sol, ainsi que la concentration et le prélèvement du P par les plantes. Cependant, ils montrent que **les effets du chaulage et de la fertilisation phosphatée sur des pâtures à base de trèfle peuvent être différents selon les lieux** (figure 4). Ils indiquent que le chaulage tend à accroître les prélèvements en phosphore du sol et que la dose la plus élevée donne, en général, la plus grande production. L'effet a lieu avec et sans fertilisation phosphatée. Le chaulage induit cependant une plus faible réponse à la fertilisation phosphatée. Sur huit sols testés, sept

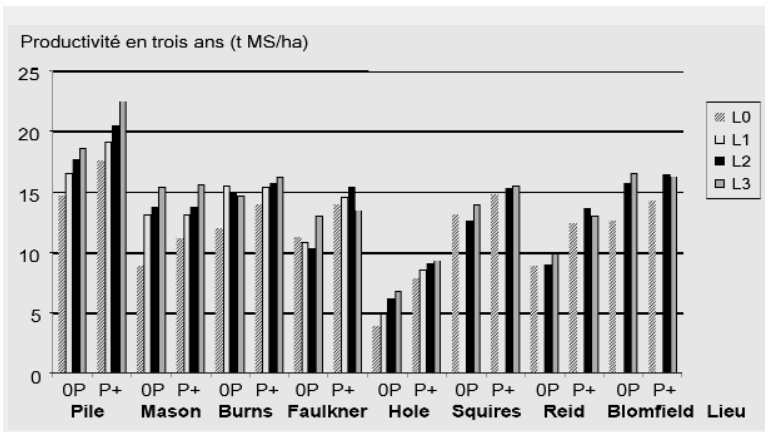


FIGURE 4 : **Variabilité des interactions entre chaulage** (4 niveaux d'apports, croissants de L1 à L4) **et fertilisation phosphatée** (avec et sans apport de P) **sur 11 sols de prairies** (HOLFORD et CROCKER, 1994).

FIGURE 4 : **Variability of the interactions between liming** (4 levels, increasing from L1 to L4) **and phosphate fertilization** (with and without input of P) **on 11 pasture soils** (HOLFORD and CROCKER, 1994).

répondent au chaulage ; l'augmentation de production observée la première année est liée à celle du P isotopiquement échangeable ou soluble du sol. Sur trois de ces sols, cette réponse s'explique par une levée des toxicités aluminique ou manganique. Dans les cas d'interactions négatives entre chaulage et fertilisation phosphatée, la formation, à partir de l'engrais phosphaté, de phosphates de calcium insolubles explique une réponse plus faible à la fertilisation phosphatée s'il y a chaulage.

Devant la variabilité des résultats et les contradictions entre ces expérimentations en pots et au champ, ces auteurs estiment **nécessaire pour étudier les effets du chaulage de prendre en compte ces variations des états phosphatés du sol et les prélèvements en phosphore**, afin de préciser si l'accroissement des prélèvements en phosphore dû au chaulage est lié à l'offre en P du sol, ou à l'efficacité des engrais.

Cependant, on manque d'explications précises sur les phénomènes à l'origine de cette variabilité pour typer les réponses et affiner les conseils, mis à part le cas des pH inférieurs à 5,5. Deux **premiers éléments d'explication** peuvent être avancés :

- HAYNES et LUDECKE (1981), SORN-SRIVICHAI *et al.* (1984), et CURTIN et SYERS (2001) montrent que les mesures du P assimilable par la méthode Olsen ne varient pas, voire diminuent, après chaulage alors que les prélèvements de phosphore par les plantes augmentent. De plus, l'assimilation du P par du ray-grass, de même que le P isotopiquement échangeable, augmentent quand le pH passe de 5 à près de 6,5 (SORN-SRIVICHAI *et al.*, 1984) ; ces auteurs concluent que la diminution du P Olsen après chaulage est le résultat d'un artéfact. Dans la **méthode Olsen**, la terre analysée est soumise à une forte augmentation de pH (8,5). La présence de calcium, dans ces conditions, induit des précipitations sous la forme de phosphate de calcium, qui entraîne une diminution des quantités de P assimilables mesurées. Ceci implique une attention particulière dans l'interprétation du P Olsen, sur sols chaulés.

- Un autre élément d'explication peut être **l'histoire longue de la parcelle**. En effet, un suivi du P sur l'expérimentation de Park Grass (MC DOWELL *et al.*, 2002) montre que le pouvoir tampon du sol pour le phosphore est modifié par l'histoire culturale ancienne de la parcelle. A pH actuel identique, les sols n'ont pas le même comportement vis-à-vis du phosphore selon que le pH du sol est descendu ou non au-dessous de 5,8 pendant une période suffisamment longue (plusieurs décennies) : après un pH très acide, le retour à des pH supérieurs n'empêche pas la formation de complexes aluminiques qui rendent le P insoluble et qui limitent la solubilité des phosphates.

Le chaulage induit donc des modifications des états du P dans le sol, améliore la disponibilité de phosphore et, par là, la nutrition phosphatée des prairies. Ces effets dépendent des états initiaux du sol et de son histoire acido-basique.

6. Chaulage et évolution de la composition botanique

HOPKINS (1990) indique que, sur un sol tourbeux, le chaulage augmente la production des légumineuses jusqu'à ce que soit atteint un pH de 6,8 ; pour les autres espèces, ce seuil est à pH 6,1. Les quantités d'éléments prélevés et les teneurs en éléments du fourrage se stabilisent vers pH 6,1.

Des essais d'utilisation de scories faiblement phosphatées, sur prairie permanente, indiquent que le pH passe de 4,8 à 6,6 en moyenne en trois ans pour les plus forts apports (7 t/ha), avec une augmentation plus forte sur les parcelles non fertilisées en azote (RODRIGUEZ *et al.*, 1994 ; PINTO *et al.*, 1995). La teneur en Al échangeable passe rapidement sous le seuil de toxicité (de 24,9% à 10,6% de la CEC) pour 3 t/ha apportées. La production augmente de 41%, jusqu'à pH 6,1. Passée cette valeur, la production reste stable, mais il y a régression des espèces comme la houlque laineuse et l'agrostis commun. La contribution de la fétuque rouge augmente sur une parcelle et celle du trèfle blanc sur une autre.

Pour TZIALA *et al.* (2002), après une expérimentation sur prairies (différentes utilisations, fertilisation azotée et chaulage) de quatre ans, le seul effet constaté du chaulage est une augmentation du pH. Cependant, si l'apport d'azote favorise les graminées et pénalise les légumineuses, l'effet du chaulage est opposé. De plus, il y a une interaction avec les systèmes d'utilisation de la prairie.

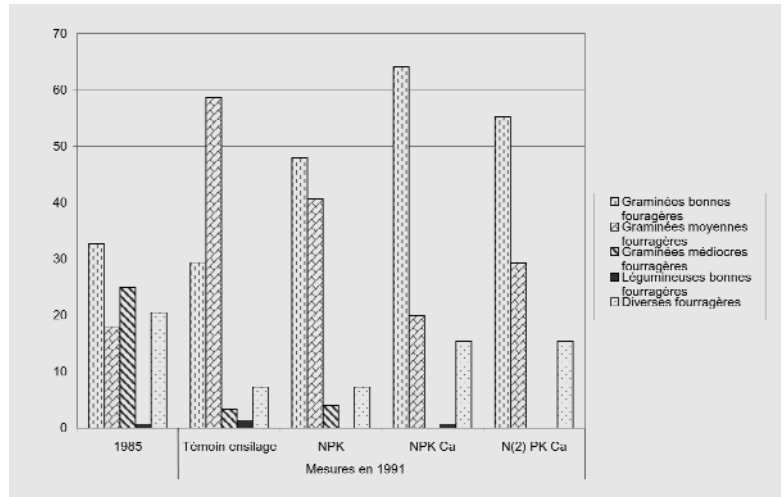
STEVENS et LAUGHLIN (1966) montrent que le chaulage sur prairie permanente permet une diminution de la part (en poids) de l'agrostis dans la récolte et une augmentation du ray-grass pérenne et de la fétuque rouge.

Sur la prairie de Burdignes (42), GUEYDON (1992) constate, après 5 années d'apports annuels de 350 unités de VN (valeur neutralisante) par hectare, un fort effet des pratiques de fertilisation sur la composition botanique. Parmi les nombreuses graminées observées en début d'expérimentation, le ray-grass, la fétuque des prés et le fromental se développent (figure 5). C'est ce dernier qui montre la plus forte augmentation de production. On constate de plus une régression de la fétuque ovine et de l'agrostis sous l'effet de l'amendement. Les légumineuses, peu présentes en 1986, disparaissent complètement avec les traitements sans chaulage.

Ces effets du chaulage sur la végétation de la prairie ont déjà été décrits par REBISCHUNG (1956), KERGUELEN (1960), COPPENET (1956) ou BONISCHOT (1986), en particulier la **présence accrue des bonnes graminées et des légumineuses**. Ces faits sont confirmés par l'expérience des éleveurs en région Charolaise : ils chaulent en priorité les prairies à leur implantation, pour mieux faire démarrer le trèfle, ainsi que les prairies humides pour restaurer la qualité de la flore (diminution des espèces hygrophiles à mésohygrophiles) ; d'ailleurs, l'observation de la végétation constitue leur premier indicateur pour prendre la décision de chauler (KOCKMANN et LOISY, 1995).

FIGURE 5 : Evolution de la composition botanique à Burdignes (Loire) sous l'effet de l'apports de fertilisants (NPK et chaulage) durant 5 ans (GUEYDON, 1992).

FIGURE 5 : *Changes in the botanical make-up at Burdignes (Loire département) after fertilizer dressings (NPK and lime) during 5 years (GUEYDON, 1992).*



Conclusion

Présumer des effets du chaulage sur les prairies permanentes par la seule augmentation du pH est trompeur ! Le mat racinaire tamponne très fortement le pH, si bien qu'un diagnostic en laboratoire basé sur la Capacité d'Echange Effective et la diminution de l'aluminium échangeable paraît plus pertinent.

De plus, il est impossible d'établir une corrélation entre le développement optimal des plantes et le pH des sols (CHARLES, 1968). On ne peut donc pas définir un pH optimum. De ce fait, il faut prendre en compte la diversité des effets positifs et négatifs du chaulage sur l'ensemble des composantes du système sol-plante, pour juger de l'intérêt de la technique. Les différents travaux et publications recensés, spécifiques au chaulage sur prairies, confortent l'absence de relation directe entre une technique, le chaulage, et la production de matière sèche de la prairie, la qualité du fourrage et l'évolution de la flore, en dehors des situations caractérisées par un pH inférieur à 5, voire 5,5, avec risques de toxicité aluminique.

Au champ, la diversité des réponses des prairies permanentes (ou de longue durée) au chaulage fait écho à la complexité des repercussions du chaulage sur le système "sol-prairies". L'apport d'un amendement basique modifie le statut acido-basique du sol, améliore son aptitude au ressuyage et, ainsi, interfère sur les conditions de la nutrition minérale. L'extériorisation des effets du chaulage dépend par ailleurs du climat, de l'état initial du sol et des techniques employées. Ces acquis méthodologiques, éprouvés en situations labourées, sont transférables aux prairies permanentes pour bâtir des protocoles d'essais ou/et pour en interpréter les résultats.

Le chaulage modifie la dynamique de l'azote : une variation de pH provoque une accélération de l'activité de la biomasse microbienne, ainsi qu'une amélioration de la mise à disposition de la matière organique aux micro-organismes et, par-là, une minéralisation accrue de l'azote. Ces effets sur l'alimentation azotée se retrouvent sur

l'alimentation phosphatée. Toutefois, les pratiques de fertilisation azotée (JULIEN et PELTIER, 1998) et plus généralement de fertilisation peuvent, selon le niveau des apports, masquer l'extériorisation de certains effets du chaulage. En outre, il semble que c'est plus le changement de pH induit par le chaulage que le pH lui-même qui produise un effet.

Dans l'analyse d'un essai chaulage, **de nombreux indicateurs**, outre ceux liés au statut acido-basique, sont à prendre en compte, comme l'histoire de la parcelle, les teneurs du sol en éléments minéraux, les indices de nutrition du fourrage... Le tableau 7 indique aussi les différents indicateurs de réponse du peuplement au chaulage et les implications au niveau des pratiques (sur les parcelles) qui pourraient être évaluées dans des recherches de références sur cette technique.

De plus, les effets du chaulage sont plus ou moins pérennes et rapides (durée de l'augmentation du pH, lenteur de l'évolution de la flore) ce qui, avec la variabilité du climat, impose la mise en place d'essais pluriannuels.

Les références actuellement disponibles sur le chaulage des prairies permanentes apparaissent certes composites : des travaux expérimentaux spécifiques, des faits d'expériences, des transferts issus des comportements en sols labourés... Toutefois, ainsi structurées, ces connaissances donnent les bases pour élaborer une grille de préconisations à visée opérationnelle.

Quels sont les éléments les plus importants à retenir pour construire une telle grille de préconisation ? Ces différents points sont abordés dans la brochure "*Le chaulage, des bases pour le raisonnement*" publiée par le Comifer (2005) :

- Faire un diagnostic des risques liés à l'acidification et des effets du chaulage (on a vu que le seul pH n'est pas suffisant pour prévoir les effets sur la production : figure 1 et tableau 7). La priorité est la

Effets sur les propriétés du sol	Effets sur le peuplement	Effets sur les pratiques et les stratégies
Propriétés physiques	Augmentation de la croissance	Dates et souplesse d'intervention
Activité biologique	Colonisation et fonctionnement racinaire	Durée du pâturage
	Alimentation hydrique	Stratégies d'équipement et d'aménagement
	Diminution du feutrage	Doses de fertilisants et meilleure efficacité des apports
	Amélioration de la flore et augmentation du % de légumineuses	Amélioration de la qualité du fourrage
Propriétés chimiques	Nutrition minérale et composition du fourrage	Complémentation de l'alimentation du bétail
	Rendement	Choix de culture
	Parcelle	Coûts de production
		Exploitation agricole Parcelle

TABEAU 7 : Les indicateurs d'effets du chaulage sur le peuplement prairial, les pratiques et les stratégies.

TABLE 7 : Indicators of the effects of liming on plant population, on practices, and on strategies.

suppression de tout risque de toxicité aluminique, dont les seuils sont variables selon les types de sols (valeur du pH comme valeur de la teneur en Al échangeable). Cependant, au-delà de ces seuils, d'autres effets positifs du chaulage sur la nutrition minérale, la dynamique de l'eau et la composition botanique sont visibles. Cela montre qu'il est intéressant d'entretenir un statut acido-basique à des niveaux supérieurs au seuil d'apparition de la toxicité aluminique.

- La nature des opérations culturales (mode de récolte, niveaux de rendement atteints et fertilisation pratiquée) sont à prendre en compte pour définir les politiques d'entretien du statut acido-basique. Il faut aussi retenir que la variation de pH induite par le chaulage est aussi importante que le niveau de pH lui-même.

Préciser les seuils d'intervention et les doses à apporter est un travail à conduire et à adapter localement, tant le fonctionnement du sol et des prairies, comme les opérations techniques, sont variables.

Accepté pour publication, le 20 décembre 2005.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS S.N. (1986) : "The interaction between liming and forms of nitrogen fertilizer on established grassland", *J. Agric.Sci., Camb.*, 106, 509-513.
- BAILEY J.S. (1995) : "Liming and nitrogen efficiency : some effects of increased calcium supply and increased soil pH on nitrogen recovery by perennial ryegrass", *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 26, 7et 8, 1233-1246.
- BONISCHOT R. (1986) : "Faut-il chauler les prairies permanentes ?", *Etat calcique des sols et fertilité ; Le chaulage*, Acta, 130-137.
- BORTOLUZZI E.C., TESSIER D. (2002) : "La pratique du chaulage en système de semis direct : une expérience au Sud du Brésil (Rio grande do sul)", *EGS*, Vol 9, 3, 187-196.
- CASTILLON P. (1998) : *Résultats de 13 essais de chaulage des prairies*, document interne, Comifer-Chaulage, 9 pages.
- CHANTIGNY M.H. (2003) : "Dissolved and water extractable organic matter in soils : a review on the influence of land use and management practices", *Geoderma*, 113, 357-380.
- CHARLES G. (1968) : "Le pH du sol et les bases d'utilisation des amendements calciques", *BTI*, n° 231, 553-558.
- CHAUSSOD *et al.* (1992) : *Résultats des observations de la campagne 1991, observatoire Agriculture-Environnement en Saône-et-Loire*, Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire.
- CESIELSKI H., STERCKEMAN T. (1997) : "A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils", *Agronomie*, 17, 6-16.
- Comifer - Groupe Chaulage (2000) : *Du laboratoire au champ, question vive sur le chaulage*, 9 pages.
- Comifer (2005) : *Le chaulage, des bases pour le raisonner*, Fabre B. (Coord.), Comifer, Paris, 70 pages.
- COPPENET M. (1956) : *Le problème du chaulage à la lumière de la science agronomique moderne*, CELAC, 32 pages.
- CURTIN D., SMILLIE G.W. (1986a) : "Effects of liming an soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils I. Soil chemistry", *Plant and soil*, 95, 15-22.
- CURTIN D., SMILLIE G.W. (1986b) : "Effects of liming an soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils II. Growth of Italian Ryegrass and bent grass", *Plant and soil*, 95, 23-31.
- CURTIN D., SYERS J.K. (2001) : "Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 147-152,

- CURTIN D., CAMPBELL C.A., JALIL A. (1998) : "Effects of acidity on mineralization : pH dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils", *Soil Biol. Biochem.*, 30, 1, 57-74.
- DURU M. (1992) : "Bases agronomiques pour gérer les ressources fourragères selon différents objectifs de production et d'utilisation", *Fourrages hors-série*, décembre, 77-87.
- DURU M., CALVIÈRE I. (1996) : "Effets des niveaux de nutrition en phosphore et en azote et de la composition botanique de communautés prairiales sur l'accumulation de biomasse au printemps", *Agronomie*, 16, 217-229.
- EDMEADES D.C., JUDD M., SARATHCHANDRA S.U. (1981) : "The effect of lime on nitrogen mineralization as measured by grass growth", *Plant and soil*, 60, 177-186.
- FABRE B. (2001) : "Le chaulage : Répercussions à différentes échelles", *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*, Comifer-Gemas, Thévenet et Joubert édés, 221-230.
- FARDEAU J.C., STAIMESSE J.P. (1995) : "Fertilisation phosphatée ; efficacité du phosphore d'un amendement calcique phosphaté sidérurgique", *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 81, n°1, 189-202.
- FARDEAU J.C., MARTINEZ J. (1996) : "Epandage de lisiers : conséquences sur le phosphore biodisponible et sur la concentration de quelques cations dans la solution du sol", *Agronomie*, 18, 153-166.
- GEMBAZEWSKI H., SIENKIEWICZ U. (1989) : "Lowering cocksfoot yields caused by manganese toxicity and molybdenum deficiency caused by acidifying effect of ammonium nitrate application", *XVth Int. Grassl. Congr.*, Nice, France, 7-8.
- GOULDING K.W.T., BLAKE L. (1998) : "Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 67, 135-144.
- GUEYDON C. (1992) : *Prairies permanentes : Comment améliorer leur rentabilité*, Journée technique, Chambre d'Agriculture de la Loire, 14 avril 1992, 22 pages.
- HAYNES R.J. (1982) : "Effects of liming on phosphate availability in acid soils", *Plant and Soil*, 68, 289-308.
- HAYNES R.J., LUDECKE T.E. (1981) : "Effect of lime and phosphorus applications on concentrations of available nutrients and on P, Al, and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil", *Plant and soil*, 62, 117-128.
- HOLFORD I.C.R., CROCKER G.J. (1994) : "Long term Effects of Lime on pasture yields and response to phosphates fertilizers on eight acidic soils", *Aust. J. Res.*, 45, 1051-1062.
- HOPKINS D.W., SHIEL R.S., O'DONNELL A.G. (1990) : "Yield and nitrogen utilization by *Lolium perenne* and *Trifolium repens* on a limed stagnohumic-gley soil in a pot experiment", *Grass and forage science*, 45, 107-112.
- JOHNSON D., LEAKE J.R., OSTLE N., INESON P., READ D.J. (2002) : "In situ ¹³CO₂ pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil", *Phytologist*, 153, 327-334.
- JOHNSTON A.E. (1991) : "Benefits from long-term ecosystem research : some examples from Rothamsted", <http://www.iscu-scope/downloadpubs/scope47/chap06.htm>.
- JOHNSTON A.E. (1997) : "The value of long-term field experiments in agricultural, ecological, and environmental research", *Advances in agronomy*, 59, 291-333.
- JULIEN J.-L., PELTIER O. (1998) : *Effet d'un apport d'amendement basique sur l'azote absorbée par un peuplement prairial*, document interne Comifer-Chaulage, 13 pages.
- JULIEN J.-L. et al. (2005) : "L'acidification des sols", *Sols et environnement*, Dunod, Paris, 516-537.
- KALBITZ F., SOLINGER S., PARK J.H., MICHALZIK B., MATZNER E. (2000) : "Controls on the dynamics of dissolved OM in soils : a review", *Soil science*, vol. 165, 04 277-304.
- KERGUELEN M. (1960) : "Quelques aspects de la fertilisation des prairies temporaires", *Fourrages*, 3, 50-89.
- KOCKMANN F., FABRE B. (1988) : "Chaulage sur limons en Bresse, expérimentation et développement", *3^e Forum du Comifer*, 131-134.

- KOCKMANN F., LOISY C. (1995) : "La pratique du chaulage : diversité des modèles d'action", *Analyser et fertiliser en toutes connaissances, 2^e Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre* (Gemmas et Comifer), Blois, éd. Ignazi J.C. et Riou P., 67-76.
- KOCKMANN F., FABRE B., CHAUSSOD R. (1990) : *Le chaulage en limons battants*, Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, CEREF-ISARA, INRA Dijon, *Perspectives Agricoles*, n° 144, 12 p.
- LAISSUS R., MARTY J. (1973) : "Evolution de la flore et du rendement d'une prairie permanente durant quinze années d'exploitation", *Fourrages*, 53, 47-66.
- LOISEAU P. (1990) : "Le concept de système de culture en prairie permanente : intervention du mode d'exploitation", *Les Systèmes de culture*, INRA, 125-150.
- LOISEAU P., GRIGNANI C. (1991) : "Etats de l'azote organique et devenir de l'azote apporté sous les prairies de moyenne montagne", *Agronomie*, 11, 143-150.
- MALHI S.S., NYBORG M., HARAPIAK J.T. (1998) : "Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in brome grass hay", *Soil and tillage research*, 48, 91-101.
- MANSELL, G.P., PRINGLE R.M., EDMEADES D.C., SHANNON P.W. (1984) : "Effects of lime on pasture production on soils in the North Island of New-Zealand", *New Zealand J. of Agric. Res.*, 27, 363-369.
- MC DOWELL R.W., BROOKES P.C., MAHIEU N., POULTON P.R., JOHNSTON A.E., SHARPLEY A.N. (2002) : "The effect of soil acidity on potentially mobile P in a grassland soil", *J. of agricultural science*, 139, 27-36.
- MERIAUX S. (1968) : "La fertilisation des prairies", *BTI*, 231, 649-658.
- DE MONTARD F.-X. (1986) : "Raisonnement de la fertilisation des prairies et du plan de fumure dans les exploitations d'élevage", *Forum Fourrages Auvergne*, 85-110.
- MORLON P. (1983) : *Notes bibliographiques préliminaires sur le piétinement des prairies pâturées par les animaux domestiques*, document de travail, INRA SAD, 81 pages.
- MRKVICKA J., VELICH J., HNR CIR M. (1992) : "Nitrate nitrogen leaching in fast regeneration of permanent grassland on gleyic fluvisol", *Rostl. Vyr.*, 38 (12) : 1039-1043.
- NYBORG N., HOYT P. B. (1978) : "Effects of soil acidity and liming on mineralization of soil nitrogen", *Can. J. Soil Sci.*, 58 : 331-338.
- PELTIER O. (2001) : "Raisonnement de l'apport d'amendements minéraux basiques sur les prairies permanentes et temporaire de longue durée : influence sur la production et la qualité du fourrage", *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*, Gemmas-Comifer, 231-236.
- PERNES, A., TESSIER D. (2002) : "Influence des matières fertilisantes sur les propriétés des sols : cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles", *EGS*, vol 9, 3, 177-186.
- PINTO M., RODRIGUEZ M., BESCA G., BALCAZAR N., LOPEZ F.A. (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.
- REBISCHUNG J. (1956) : "Aspects de la fumure des prairies", *BTI*, 115, 901-911.
- RODRIGUEZ M., LOPEZ F.A., PINTO M., BALCAZAR N., BESGA G. (1994) : "Basic Linz-Donawitz slag as a liming agent for pastureland", *Agronomy J.*, 86, 904-909.
- SEBILLOTTE M. (1986) : *Introduction à l'analyse du peuplement végétal. Cours de Relance de l'Agronomie*, INAPG.
- SORN-SRIVICHAI P., R.W. TILLMAN, J.K. SYERS, I.S. CORNFORTH (1984) : "The effect of soil pH on Olsen bicarbonate phosphate value", *J. Sci. Food Agric.*, 35, 257-264.
- SPRINGETT J.A., SYERS J.K. (1984) : "Effect of pH and calcium content of soil on earthworm cast production in the laboratory", *Soil Biol. Biochem.*, 16, 185-189.
- STEVENS R.J., LAUGHLIN R.J. (1966) : "Effects of lime and nitrogen fertilizer on two sward types over a 10-year period, *Journal of agricultural science*", Cambridge, 127, 541-46.

- TESSIER D. (2002) : "Influence des charges superficielles sur les propriétés physiques des sols", *L'acidification des sols*, AFES, 4 et 5 avril 2001 à Versailles.
- TOUTAIN F., DIAGNE A., LE TACON F. (1987) : "Effets d'apports d'éléments minéraux sur le fonctionnement d'un écosystème forestier de l'Est de la France", *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 24 (3), 283-300.
- TZIALLA C.E., PAPAOKOSTA D., VERESOGLOU D.S. (2002) : "Effects on liming and N addition on vegetation productivity and species composition in three management systems in Europe, Multi-function grasslands : quality forages, animal products and landscapes", *Grassland Science in Europe*, 7, 856-857.

SUMMARY

Effects of liming on permanent pastures and on long-duration pastures. A bibliographical review

The diversity of responses of pastures to basic calcic fertilizer dressings is due to the complexity of the underlying mechanisms involved in the workings of a plant population. The agronomical aspects of the workings of a pasture sward are explained, followed by a bibliographical review showing the various kinds of effects of liming :

- an increased uptake of nitrogen, due to a greater availability to micro-organisms of the organic matter, which enhances its mineralization ;
- a better bio-availability and uptake of phosphorus ;
- a positive evolution of the botanical make-up, leading to an improved productivity and quality ;
- an accelerated disappearance of excess soil water, and improved conditions for the workings of the roots.

The effect is rather due to the input of calcium than to the pH increase ; it can be concealed by the level of nitrogen fertilization. The effect of liming on a soil depends on its initial state, its acidic/basic history, and the fertilization practices. Suggestions are put forward on formalizing an advice strategy and on the setting-up of references regarding liming.