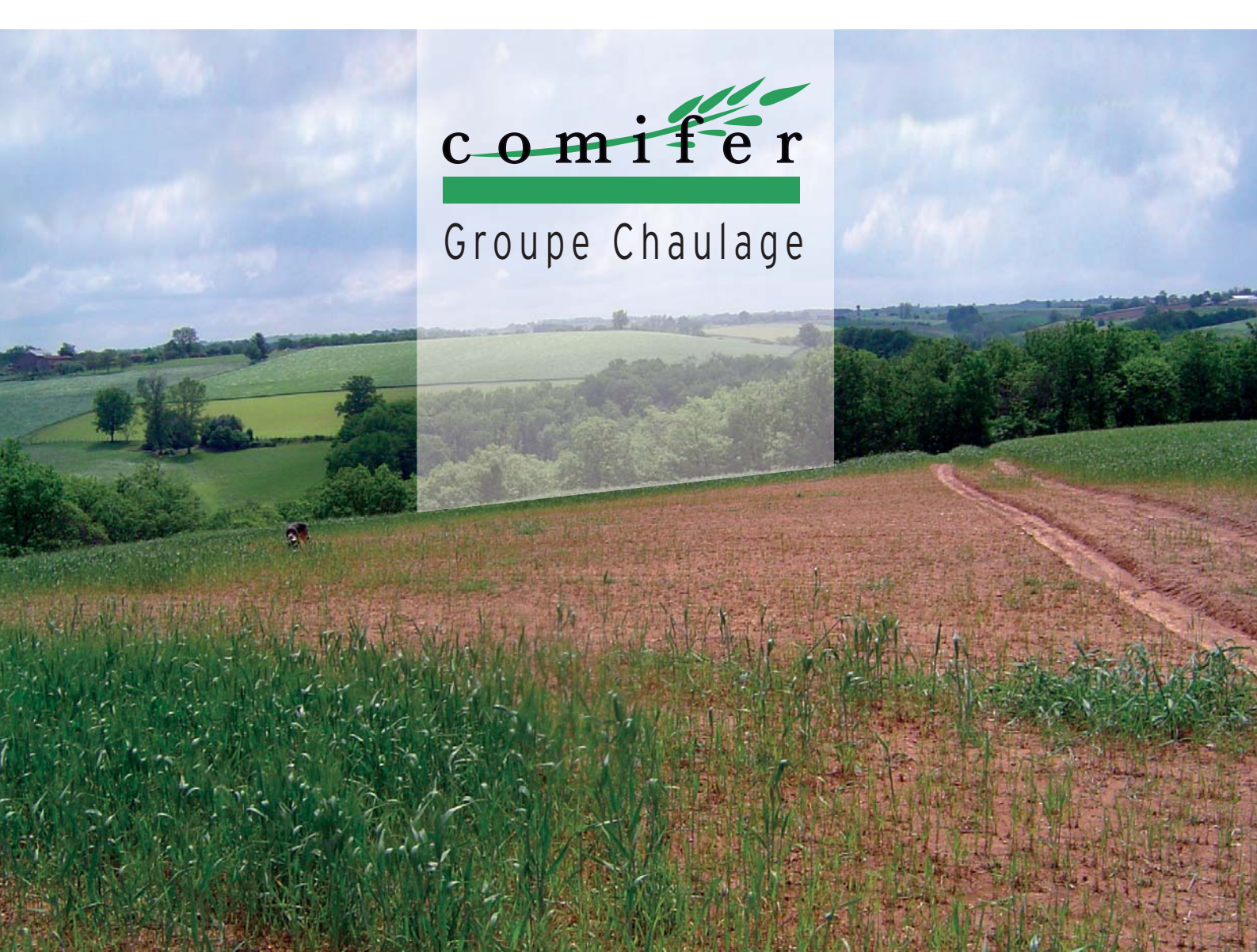




c o m i f e r
Groupe Chaulage

Le chaulage

Des bases
pour le raisonner

Édition 2009/2010

LE CHAULAGE

Brochure éditée par le



Le Diamant A

92909 Paris La Défense Cedex

Tél. : 01 46 53 10 75

Réalisation BOOK EMISSAIRE

2 Rue Evariste Gallois

91420 Morangis

Courriel : book-emissaire.editions@orange.fr

Dépôt légal : 4^e semestre 2009

ISBN : 978-235253-0442

Maquette et infographie : Idée Graphic, François Le Moël

Courriel : idee.graphic@free.fr

<http://infographie.maquette.free.fr>

Achevé d'imprimer en Europe, en novembre 2009, par FERRE OLSINA.



Le chaulage

Des bases
pour le raisonner

Animation du Comité de rédaction :

Bernard Fabre (ISARA Lyon) pour la version 1
Bruno Félix Faure (Eurofins-LARA) pour la version 2

Le contenu des chapitres a fait l'objet de discussions collectives.

La finalisation des contenus a été assurée par :

Alain Bouthier et Pierre Castillon
(ARVALIS Institut du Végétal),
Jean Yves Cahurel (IFV),
Nathalie Damay et Jean-Luc Julien
(LDAR, Station agronomique de l'Aisne),
Rémy Duval (ITB),
Alain Fabre puis Sébastien Kalt
(Laboratoires de conseils et d'analyses, (LCA),
François-Xavier Gaumont (MEAC),
Olivier Peltier (ABC),
Jean-François Steinmann (AGRIVA, Groupe ROULLIER),
Cécile Tessier et François Ponchon (CARMEUSE),
Jérôme Thibierge (IN VIVO),
Matthieu Valé (SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes).

Nous avons bénéficié de la relecture attentive et constructive de :

Jean-Pierre Cachon, (FDCETA de l'Aisne)
Jacques Decroux,
François Kockmann (CA 71),
Raymond Reau (CETIOM),
André Turpin (ESAT).

*Photo de couverture : Dégâts dus à l'acidité sur culture de blé dans le Sud-Ouest.
Crédit photos et iconographie : COMIFER*

Préambule

Depuis la publication de "*État calcique des sols et fertilité : le chaulage*" en 1986, le groupe chaulage du COMIFER a détaillé et tenté d'expliquer les différents effets d'un apport d'amendement minéral basique. Il a publié les principaux résultats de ses travaux dans "*Questions vives sur le chaulage*" en 2000, puis dans des publications aux colloques de Blois en 1995, 2001, 2005 et 2007.

En 1997, est paru "*Chaulage et fertilisation magnésienne*", édité par l'ITCF, devenu depuis ARVALIS Institut du végétal, reprenant pour partie les acquis du groupe.

En 2001, l'Association Française pour l'Etude des Sols (AFES) organisait un colloque sur l'acidification, au cours duquel de nombreux membres du groupe sont intervenus. Certaines interventions ont été publiées dans Etude et Gestion des Sols (EGS).

Nous avons publié en 2005 la version initiale de la présente brochure. Quatre ans après, d'autres avancées permettent de l'actualiser. Il nous semblait important de reprendre les différents écrits en les finalisant par des éléments de stratégie et de conseil, en respectant le mode de travail du COMIFER, basé sur la confrontation, la discussion et l'élaboration de compromis. C'est pourquoi, le présent ouvrage est divisé en trois parties. Nous abordons dans la première partie des aspects plus théoriques qui supportent le raisonnement du chaulage.

Dans la seconde partie, on trouvera des fiches traitant d'une manière plus concrète le raisonnement de la politique de chaulage, dans des situations différentes, basé sur l'identification des risques et l'utilisation d'indicateurs, notamment l'analyse de terre dont le prélèvement doit être particulièrement soigné.

Enfin, la troisième partie, qui fait suite à une demande formulée lors du colloque de Blois, propose des éléments pratiques comme la normalisation des produits, des éléments pour le raisonnement du choix des produits et un aide mémoire destiné à faciliter certains calculs.

Les lecteurs pourront avoir des centres d'intérêt différents :

- L'enseignant sera plus sensible aux premiers chapitres, donnant une assise scientifique à la problématique, ainsi qu'au glossaire et à la bibliographie;
- Le conseiller ira assez rapidement aux chapitres portant sur le prélèvement, les besoins en bases, les fiches opérationnelles, voire la normalisation ;
- L'agronome, en charge par exemple du référentiel régional et de l'interprétation des données sera intéressé par l'ensemble.

Le groupe chaulage espère que ce document contribuera à la mise en place de nouvelles recherches de références sur des bases mieux comprises. *Les différents tableaux et figures sont accessibles sur le site du COMIFER : <http://www.comifer.asso.fr/> à la rubrique Supports pédagogiques.*

Bruno Félix Faure,
animateur du groupe Chaulage du Comifer.



Dégâts dus à l'acidité.

Sommaire

Première partie : Apports théoriques10

Chapitre 1	Les causes de l'acidification	11
Chapitre 2	L'acidification : modifications des états du sol	17
Chapitre 3	Les toxicités aluminique et manganique	25
Chapitre 4	Le chaulage : différents effets	29
Chapitre 5	La gestion du chaulage basée sur l'analyse de terre	43
Chapitre 6	Le Besoin En Bases et les stratégies de chaulage	53
Chapitre 7	La spécificité des prairies	61

Deuxième partie : Fiches techniques par système sol et / ou culture.....65

Chapitre 8	Mode d'emploi des fiches	66
Chapitre 9	Cas des grandes cultures et prairies temporaires	67
Chapitre 10	Cas des systèmes de cultures betteraviers et endiviers	73
Chapitre 11	Cas des prairies de longue durée	79
Chapitre 12	Cas des sols sableux à forte teneur en matière organique	83
Chapitre 13	Cas des sols sableux à faible teneur en matière organique	87
Chapitre 14	Cas des vignes	89

Troisième partie : Éléments pratiques sur les produits93

Chapitre 15	Normalisation des produits utilisables	95
Chapitre 16	Principes de raisonnement pour le choix des produits	99
Chapitre 17	Aides au calcul :	
	Du besoin en bases à la quantité de produit	103
	Coefficients de conversion	103

Glossaire105

Bibliographie et Normes109

Introduction

L'acidification : un phénomène inéluctable

L'acidification des sols affecte de nombreux sols à travers le monde, principalement là où les précipitations sont globalement supérieures à l'évapotranspiration. Elle est le résultat d'une évolution lente, dominée par trois processus majeurs : l'activité biologique productrice d'acidité, l'altération des roches productrice d'alcalinité, le drainage qui élimine ou non de l'acidité ou de l'alcalinité. Il en est ainsi dans les régions tempérées et tropicales.

Dans les espaces naturels où l'Homme est peu intervenu, le pH du sol peut descendre jusqu'à des valeurs très basses, proches de 4 sous forêt, et un peu plus élevées sous prairie.

L'acidification provoque la dissolution lente et partielle de composés minéraux des sols, libérant des éléments minéraux, dont certains comme l'aluminium, sont toxiques pour les plantes.

La plupart des plantes cultivées ne peuvent supporter des conditions très acides. Si l'on prend pour exemple les terres conquises sur la forêt dans les régions chaudes, le chaulage est une nécessité absolue et préalable à toute mise en culture. La remontée du pH n'a pas seulement pour objectif de lutter contre la toxicité aluminique. Elle permet d'augmenter la dimension du réservoir chimique qu'est le sol et ainsi sa fertilité globale.

Sur ce point, une des caractéristiques principales des sols est de présenter à la surface des minéraux et des matières organiques des sites chargés électriquement qui retiennent de manière transitoire des éléments majeurs et en trace. L'évolution de la charge des surfaces est associée aux cycles biologiques, notamment à la dégradation des résidus organiques et à l'oxydation des minéraux par les microorganismes des sols. Il en résulte d'importants flux de protons qui modifient les propriétés des minéraux et des matières organiques des sols.

Les travaux réalisés sur le sujet servent de cadre pour comprendre la mobilité et la biodisponibilité des éléments en traces, métalliques ou xénobiotiques (pesticides, médicaments, détergents) potentiellement toxiques et de leurs effets sur la contamination des plantes et des microorganismes des sols.

Dans le dernier projet de directive cadre sur la protection des sols (2008), la Commission Européenne a retenu l'acidification comme une des grandes menaces. Cette décision est logique dans la mesure où les données sur un siècle s'accordent pour évaluer la baisse du pH à environ une unité sur de nombreux sols d'Europe septentrionale.

Des questions en lien avec l'évolution des pratiques

Outre les apports atmosphériques, on doit aujourd'hui se poser la question de l'impact sur les sols des changements de pratiques et d'utilisation. Ainsi, la réduction du travail du sol a comme conséquence principale de positionner les engrais, amendements et résidus de récolte en surface. Une des difficultés est donc de maîtriser la diffusion de l'amendement et des éléments nutritifs en profondeur. Des travaux brésiliens ont montré que les carbonates apportés en surface migrent dans les sols très lentement, de sorte que des gradients d'acidification peuvent se produire. Il en résulte des phénomènes de toxicité localisés, aussi bien en profondeur (rejets racinaires acides, prélèvements d'ions), qu'en surface (minéralisation des engrais ammoniacaux, activité fongique). On comprend alors l'importance de chauler préalablement à la mise en place du semis direct. Ces travaux ont aussi montré l'influence de la plante de couverture hivernale sur le statut acido-basique des sols à moyen terme. Se posent aussi des questions quant au devenir du statut organique des sols et sa relation avec le statut acido-basique. Les travaux sur le sujet

démontrent que la présence de matières organiques joue un rôle déterminant sur le pouvoir tampon. On note ainsi une forte corrélation entre la teneur en matières organiques et la valeur du pH sur des essais de longue durée. Avec l'utilisation probable de la biomasse comme combustible, la quantité de résidus organiques incorporée au sol pourrait dans le futur diminuer fortement. Étant donné l'influence des matières organiques sur le statut acido-basique des sols et leur pouvoir tampon, la question risque de se poser, et la recherche sur cette thématique devrait se développer fortement. La protection de la matière organique fait aussi partie du projet de directive européenne sur les sols.

Des conséquences sur la qualité des sols

Enfin, jusqu'à aujourd'hui, la relation propriétés physiques - propriétés chimiques a été peu prise en compte dans le chaulage. Pourtant des publications ont montré que la stabilité de la structure du sol en place et le maintien de conditions d'infiltration satisfaisantes sont fortement liés au statut acido-basique.

Plus généralement, la réflexion devrait porter sur la signification des analyses de sols et leur intégration dans des outils de prévisions des propriétés sur le long terme, ce qui inclut les propriétés physiques, chimiques et biologiques.

Cette réflexion ne doit pas se limiter à la technique analytique elle-même, mais doit aussi prendre en compte les conditions d'échantillonnage, ce qui inclut la profondeur du prélèvement, la densité, la période et le conditionnement du prélèvement.

Aujourd'hui l'agriculteur doit être attentif aux évolutions induites par les pratiques. A l'heure où on lui demande de gérer au plus juste les intrants, le chaulage, en permettant de meilleures conditions de fonctionnement tant du sol que du peuplement végétal, n'est pas à négliger. La recherche doit permettre de développer des outils d'intégration de données sur la qualité des sols. Ceci implique certainement une caractérisation plus complète du milieu que par le passé, ceci à l'aide d'informations fiables. La politique européenne de protection des sols insiste sur la multifonctionnalité des sols et leur impact sur la qualité des produits et la qualité des eaux. Il faut souhaiter que sur ces différents points, et dans une perspective de maîtrise de la qualité des sols et de développement de l'agriculture, des synergies fortes existent entre la recherche et le Groupe Chaulage du COMIFER.

*Daniel TESSIER
Directeur de Recherche
en Sciences du Sol, INRA
Président de l'AFES
Novembre 2005,
Mise à jour par
le Groupe Chaulage
en juin 2009*



*Les 42 parcelles de Versailles :
Effet des types de matières
fertilisantes sur la stabilité
de la structure.*

Partie I

Apports théoriques

Les causes de l'acidification

Introduction

L'acidification (*) est un phénomène naturel. Elle est due à un bilan positif de protons dans le sol. L'ensemble des molécules du sol susceptibles de neutraliser les protons, constitue l'alcalinité (*) ou la capacité à neutraliser les acides. L'acidification (*) est égale au solde positif du bilan de protons, lui-même égal à la variation de l'alcalinité. La baisse du pH qui peut en résulter dépend du pouvoir tampon du sol : si le pouvoir tampon (*) est fort, la baisse de pH est faible, voire nulle ; inversement, si le pouvoir tampon est faible, la baisse du pH est importante et rapide.

Dans les écosystèmes naturels, un bilan positif de protons provient d'une production nette de protons dans le sol et de l'apport d'acidité par les précipitations.

Dans les écosystèmes cultivés, agricoles ou forestiers, l'Homme est susceptible d'accélérer ou de ralentir le processus d'acidification par ses pratiques culturales.

Dans une première partie, les causes de l'acidification des sols des écosystèmes naturels sont succinctement présentées. Dans une deuxième partie, sont abordées les spécificités des écosystèmes cultivés.

(*) (Les termes suivis d'un astérisque sont explicités dans le glossaire)

Cas des écosystèmes naturels

Le cycle de la matière organique

La production de protons dans le sol est liée pour une large part aux cycles de l'azote, du carbone et du soufre. Ces cycles mettent en jeu de très grandes quantités de protons, d'autant plus grandes que le climat est chaud et humide, c'est à dire favorable à la croissance de la biomasse microbienne ou végétale.

Lorsque l'absorption de cations par la plante est supérieure à l'absorption d'anions, elle engendre une acidification d'autant plus élevée que la biomasse produite est importante.

Ceci est particulièrement vrai pour les légumineuses dont l'alimentation azotée est assurée par la fixation de N_2 de l'atmosphère après l'installation des nodosités et non par l'absorption de nitrate.

L'azote

Au cours du cycle de l'azote, la phase la plus critique vis à vis de l'acidification est liée à la production de nitrate suite aux processus de minéralisation de la matière organique et de nitrification.

En simplifiant et globalisant les réactions (Figure 1.1 : Mécanisme de l'acidification et flux de protons), on constate que :

- la nitrification produit des protons ;
- l'absorption de nitrates par les racines s'accompagne de l'absorption de protons ;
- selon la nature de l'ion concerné, les pertes par voies gazeuses consomment (nitrate) ou produisent (ammonium) des protons.

Si les ions nitrate produits par la nitrification de NH_4^+ sont absorbés ou perdus par dénitrification, le bilan de proton est nul. Si par contre ils sont entraînés hors du sol par lixiviation, ils pérennisent l'effet acidifiant de la nitrification.

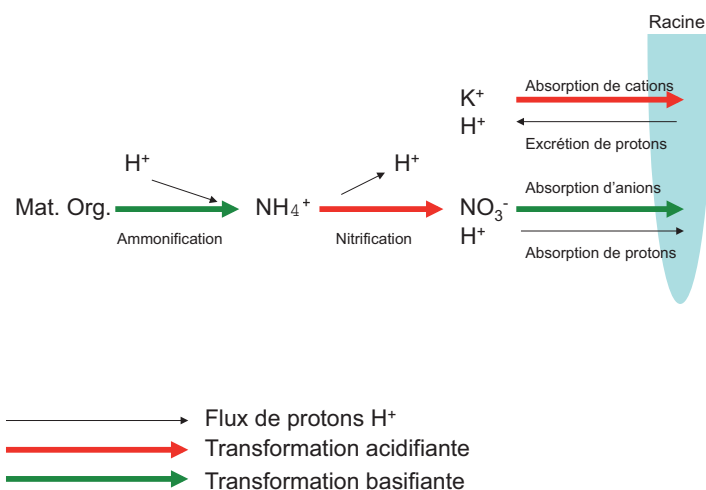
Mécanismes de l'acidification et flux de protons H^+ 

Figure 1.1

Mécanisme
de l'acidification
et flux de protons.

Le carbone

Au cours du cycle du carbone, plusieurs mécanismes sont à l'origine de l'acidification. Tout d'abord, la respiration des organismes vivant dans le sol (racines et autres organismes) produit du dioxyde de carbone (CO_2). Une partie du CO_2 se dissout dans la solution du sol et donne de l'acide carbonique (H_2CO_3). Ce dernier se dissocie en hydrogène-carbonate (HCO_3^-) et H^+ . Si des ions HCO_3^- sont lixiviés, ils ne peuvent plus neutraliser des H^+ , et ces derniers contribuent à l'acidification.

Les racines et les organismes vivants produisent des acides organiques (acides malique, citrique, oxalique...) qui contribuent à l'acidification des sols.

Les légumineuses sont les espèces parmi celles qui contribuent le plus à l'acidification car leur différentiel d'absorption cations anions est plus important (Figure 1.4). Pour maintenir la neutralité électrique dans la plante, les racines absorbent des HO^- ou excrètent des H^+ dans la solution du sol. Il en résulte une accumulation équivalente d'alcalinité dans la plante. Dans les écosys-

tèmes naturels, la matière organique retourne au sol et restitue les éléments minéraux. S'il n'y a pas de perte, le bilan de protons est nul et le statut acido-basique du sol demeure inchangé.

Au final :

- La réutilisation intégrale (sans pertes) des éléments issus de la minéralisation de la matière organique est sans effet sur l'acidification.
- La nitrification est acidifiante (Figure 1.1) : $NH_4^+ + 2 O_2 \rightarrow NO_3^- + 2 H^+ + H_2O$
1 N- NH_4^+ produit 2 H^+ qui nécessiteront 1 CaO ou 1 VN pour les neutraliser, soit en masse : 14 unités de N pour 56 unités de VN
soit 1 unité N ammoniacal pour 4 unités de VN
- L'absorption de nitrate par la plante consomme des protons (Figure 1.1)
- La lixiviation des nitrates non absorbés pérennise l'acidification résultant de la nitrification (Figure 1.2)
- Les pertes d'azote par volatilisation sont acidifiantes (Figure 1.2)
- Les pertes d'azote par dénitrification sont alcalinisantes (Figure 1.2).

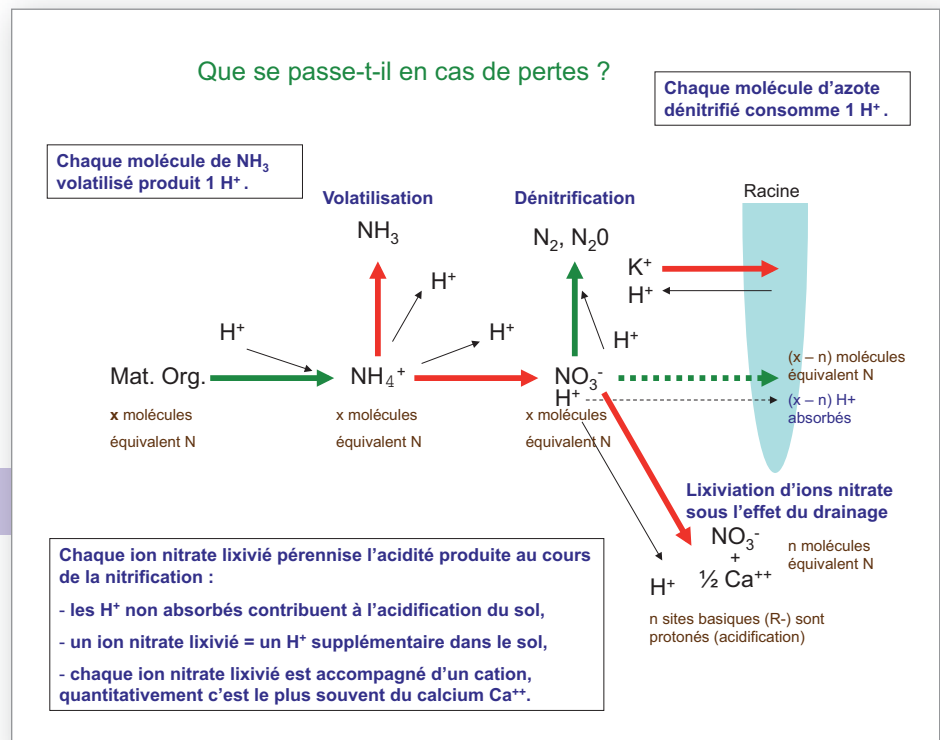


Figure 1.2

Que se passe-t-il en cas de pertes ? (Lixiviation d'azote par drainage, volatilisation, dénitrification).

Autres mécanismes liés au fonctionnement des écosystèmes naturels

Le cycle du soufre est analogue au cycle de l'azote. C'est l'oxydation du soufre organique ou élémentaire en sulfate qui est cause de l'acidification.

Cependant, bien d'autres réactions liées à ces cycles sont susceptibles de produire ou de consommer des protons.

Les pluies

Les précipitations sont naturellement acides en raison de l'équilibre avec le CO_2 de l'air : leur pH est proche de 5,6.

Toutes les émissions gazeuses d'oxydes de soufre (SO_x) ou d'azote (NO_x) accentuent l'acidité de l'eau de pluie :

- le volcanisme
- les incendies
- les émissions gazeuses industrielles...

Dans les régions d'élevage, la dissolution du NH_3 émis par volatilisation diminue l'acidité des pluies ($\text{NH}_3 + \text{H}^+$ donne NH_4^+). Ces

pluies provoqueront néanmoins une acidification du sol lors de la transformation de l'ammonium en nitrate.

L'altération des roches

Les roches mères contiennent en général plus d'alcalinité (calcaires) que d'acidité. Leur altération limite, non pas l'acidification, mais la baisse du pH. En effet, l'attaque par les protons libère des bases qui les neutralisent.

Le cas des roches carbonatées est bien connu. Il en est de même, à des degrés variables, pour pratiquement toutes les roches mères : elles constituent un réservoir d'alcalinité. Dans ces conditions, l'altération des roches mères contribue au pouvoir tampon des sols.

Cas des écosystèmes cultivés

Ils sont soumis aux mêmes mécanismes que les systèmes naturels. Cependant, certaines pratiques modifient le rythme naturel de l'acidification.

Le carbone

Certaines parties du végétal accumulent beaucoup d'alcalinité (associée aux cations K^+ , Mg^{++} , ...). Si on les exporte, elles ne contribuent plus à la neutralisation de l'acidité contenue dans le sol. Par contre la restitution de ces résidus de culture limite l'acidification (pailles et autres résidus de récolte). Ainsi, une céréale dont les pailles sont exportées sera plus acidifiante qu'une céréale dont les pailles sont enfouies. De ce point de vue, le brûlage des pailles, même s'il n'est pas recommandé, maximise l'effet alcalinisant des résidus végétaux.

En règle générale, les résidus des légumineuses sont plus acidifiants que ceux des graminées.

L'azote

Selon leur forme chimique, les engrais azotés acidifient plus ou moins les sols.

- S'il s'agit de nitrate (de calcium ou de potassium), on admet qu'un proton est

neutralisé pour chaque nitrate absorbé (cf. systèmes naturels).

- S'il s'agit de formes ammoniacales, leur nitrification ou leur absorption conduit à une production nette de protons.
- Si tout l'azote minéral issu des formes uréiques ou organiques est absorbé, il n'y a pas d'effet, sauf dans les premières semaines de l'apport (alcalinisation puis acidification).

Tout ion nitrate issu de la minéralisation de matières organiques ou apporté par des engrais azotés ammoniacaux et perdu par lixiviation correspond à une acidification du volume de terre prospecté par les racines équivalente à la quantité de nitrate lixivié.

Le même raisonnement permet de comprendre le rôle des « CIPAN » (Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates) : elles sont par nature des pièges à nitrates et protons, puisque la plante absorbe en même temps un nitrate et un proton ! Les CIPAN limitent donc l'acidification en réduisant les pertes de nitrate par lixiviation.

Que se passe-t-il en cas d'apports d'engrais azotés ?

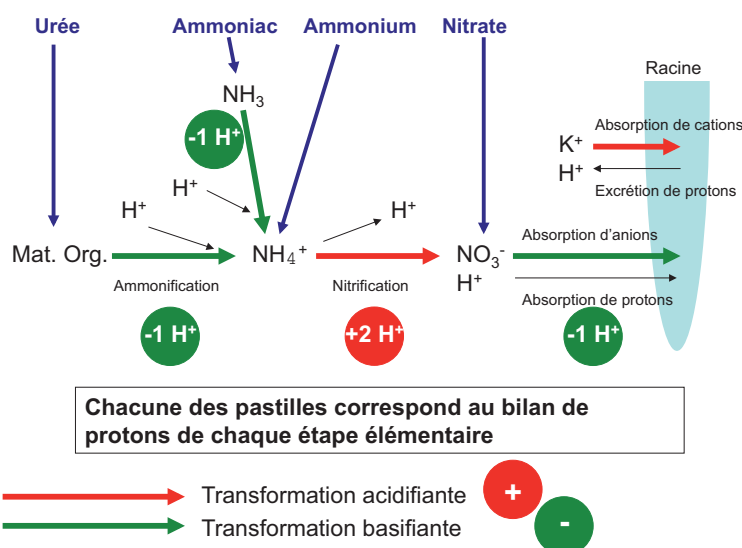


Figure 1.3

Cas des apports d'engrais.

Que se passe-t-il dans le cas des légumineuses ?

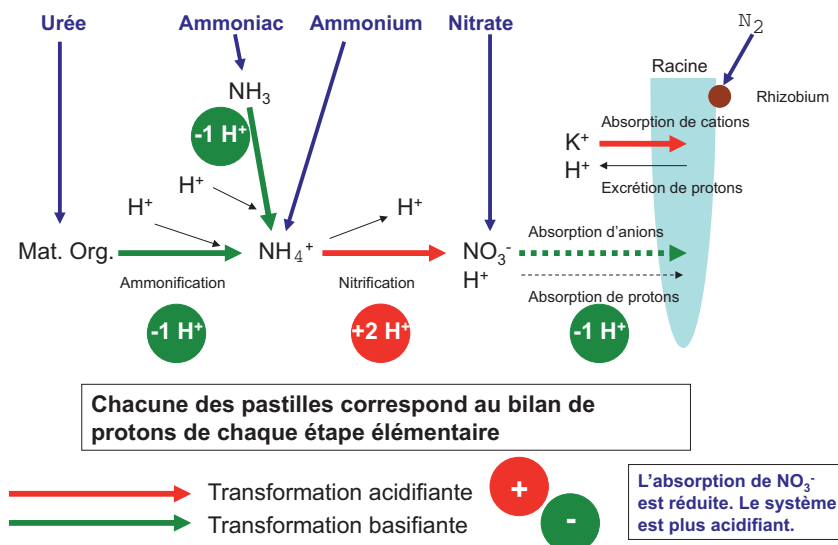


Figure 1.4

Cas des
légumineuses.

Bilan d'acidification en H^+ pour 1 N apporté

Bilan	Au stade NH_4^+	Au stade NO_3^-	Après absorption
Urée ($1/2 \text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	-1	+1	0
Ammoniac (NH_3)	-1	+1	0
Ammonium (NH_4^+)	-	+2	+1
Nitrate (NO_3^-)	-	-	-1
Ammonitrate ($1/2 \text{NH}_4\text{NO}_3$)	-	+1	0

Ce bilan est calculé en faisant la somme des étapes élémentaires.

Attention, le résultat du bilan dépend du stade final considéré.

Pour un bilan de production de protons utilisant le différentiel d'absorption cations moins anions, on s'arrêtera au stade NO_3^- . Si l'on fait un bilan global utilisant l'ensemble du processus, de la minéralisation à l'absorption par le végétal, il suffira d'ajouter la production de protons liée à la consommation de cations.

Tableau 1.1

Que se passe-t-il
en cas d'apport
d'engrais azoté ?

L'irrigation

L'irrigation est susceptible également de modifier le statut acido basique. Selon la composition de l'eau d'irrigation, il peut se

produire une acidification ou une alcalinisation du sol. Par ailleurs, une irrigation qui augmente le flux de la lame drainante conduit à une acidification.

Les techniques culturales simplifiées

Les techniques culturales sans labour (TCSL) ne modifient pas en elles-mêmes l'acidification. En revanche, elles concentrent l'acidité dans la couche de terre superficielle travaillée dont le pH peut s'abaisser rapidement. Le pouvoir tampon

du sol susceptible de s'opposer à la baisse de pH se trouve alors localisé dans cette couche où s'accumule la matière organique. Il est très important dans ces systèmes en non labour continu de suivre l'évolution du statut acido-basique de la couche de surface comme des couches plus profondes.

En conclusion

Les mécanismes à l'origine de l'acidification sont très variés : la figure 1.5 les synthétise. Il faut retenir que l'acidification est d'autant plus forte que :

- Les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration (lessivage de nitrate, sulfate),
- La forme des engrais est acidifiante (forme ammoniacale ou uréique) ;
- Les systèmes de culture exportent beaucoup d'alcalinité (enlèvement de résidus de culture) ;
- Les légumineuses sont fréquentes dans la rotation.

Dans ces situations, l'évolution du statut acido-basique du sol doit être particulièrement surveillée ■

Les principales références bibliographiques sont citées dans l'article suivant :

JULIEN JL et al, 2005. L'acidification des sols (pages 516 à 537).

In Sols et Environnement, M.C. Girard, Ed. Dunod, France.

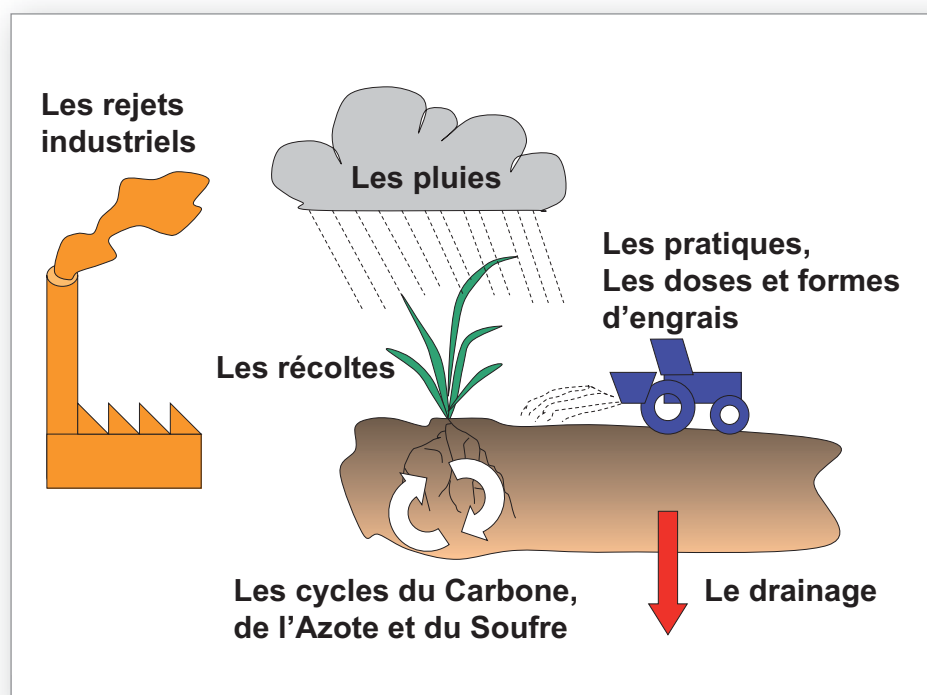


Figure 1.5

Les causes de l'acidification.

Acidification et modifications des états du sol

Introduction

L'acidification est un phénomène naturel, lié à la production nette de protons. Les effets de l'acidification sur le sol et sur ses propriétés sont détaillés dans ce chapitre.

Cependant, la production de protons (*) n'engendre pas toujours une variation de pH en raison du pouvoir tampon (*) du sol vis-à-vis du pH. Le pouvoir tampon se définit comme la capacité de la phase solide du sol à maintenir le pH constant en cas d'apports ou de pertes de bases ou de protons (figure 2.1).

Dans les sols carbonatés dont le pH est élevé, le pouvoir tampon est lié aux carbonates, qui permettent de maintenir le pH eau du sol entre 8,2 et 8,5 lorsque la teneur en CO_2 du sol est en équilibre avec celle de l'atmosphère.

Dans les sols très acides, c'est l'altération

des minéraux constitutifs du sol, en particulier des aluminosilicates, qui s'oppose aux variations du pH.

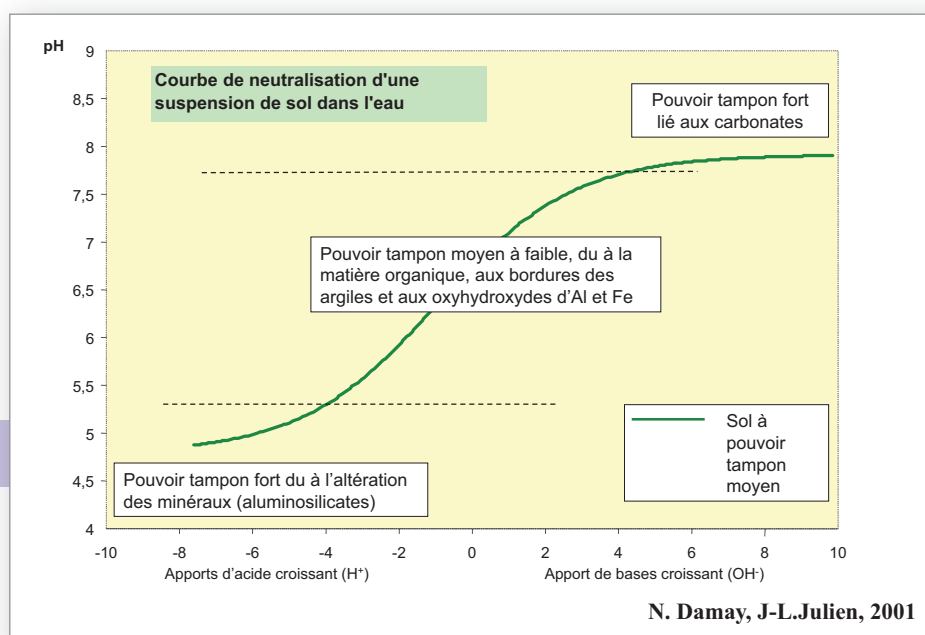
Entre ces extrêmes, c'est-à-dire lorsque le pH est compris entre 5 et 7, le pouvoir tampon est généralement plus faible et dépend de la quantité de sites présents sur les particules minérales (bordures des argiles), la matière organique et les oxydes de fer et d'aluminium, susceptibles de fixer ou de libérer des protons (sites amphotères *).

$\text{LH} \rightleftharpoons \text{L}^- + \text{H}^+$, Equation 1

où « L » représente les surfaces d'échange de la phase solide du sol.

L'équilibre entre les deux termes de la réaction dépend du pH.

Figure 2.1
Courbe de neutralisation d'un sol illustrant les différentes zones tampon.



C'est le système tampon du aux charges variables.

La plus grosse part de ce pouvoir tampon est liée à la matière organique analytiquement caractérisée avec la teneur en carbone du sol (figure 2.5).

Du fait de la multiplicité des composés en jeu, on est conduit à estimer un pouvoir

tampon du sol global pour les gammes de variation du pH entre les deux traits pointillés de la figure 2.1.

La courbe de variation du pH après un apport d'acide ou de base révèle ces variations de pouvoir tampon selon le pH (figure 2.1). Le pH n'est pas une fonction linéaire de la quantité de base ou d'acide apportée.

Quelles sont les modifications des états du sol lors de l'acidification ?

Outre la variation de pH, la production nette de protons engendre des effets directs (composition de la solution du sol, modification de la Capacité d'Echange des Cations (CEC) (*)) qui induisent des modifications de certaines propriétés du sol.

Les effets directs de l'acidification

Les figures 2.2 à 2.4 montrent l'évolution des états d'un sol initialement calcaire, sous l'effet de l'acidification sous climat tempéré à excédent pluviométrique hivernal : à droite, la zone de pH du sol, au centre les

différents mécanismes, et à gauche les cations adsorbés sur la CEC et leurs concentrations relatives. La taille de la CEC est schématisée par les tirets noirs. Les flèches en pointillé indiquent l'absence de l'élément et des équilibres correspondants et l'épaisseur de la flèche, l'intensité du déplacement de l'équilibre.

Les trois types de pouvoir tampon correspondent à trois mécanismes particuliers de l'effet de la production nette de protons : la décarbonatation, l'acidification - décalcification et enfin l'aluminisation.

.....
D0carbonatation (*) : le pH ne change pas

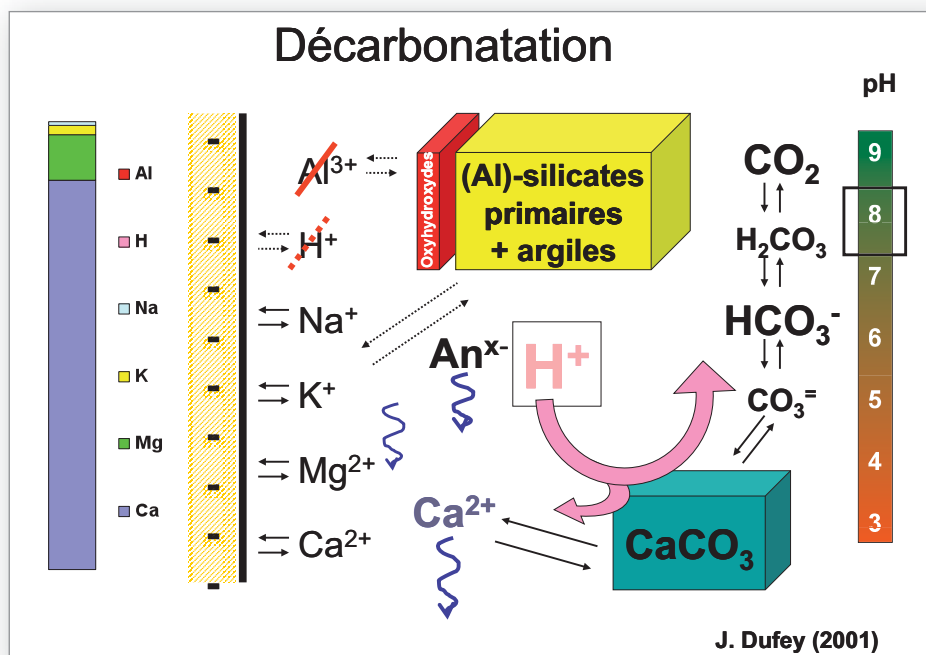


Figure 2.2

Décarbonatation.

Dans un sol carbonaté (sols calcaires en général), à fort pouvoir tampon lié à la présence de carbonates de calcium et de magnésium, la production de protons n'abaisse pas durablement le pH tant que des carbonates sont présents dans le sol. Les protons produits sont consommés selon la réaction :



La capacité d'échange est saturée par les cations d'acidité négligeable. La production de Ca^{2+} et de Mg^{2+} augmente leurs concen-

trations dans la solution du sol. Les cations excédentaires sont lixiviés (*) avec des anions comme (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-).

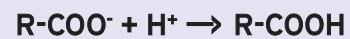
Tant qu'il y a des carbonates dans le sol, les variations du pH de la solution du sol sont temporaires et dues principalement à la pression partielle du CO_2 dans l'atmosphère du sol. La plupart des sites amphotères comme les bordures des feuillets des argiles et la matière organique ont libéré leurs protons.

L'équilibre $\text{LH} \rightleftharpoons \text{L}^- + \text{H}^+$ est totalement déplacé vers la droite (figure 2.2).

Acidification - Décalcification (*)

Quand la presque totalité des carbonates est dissoute, le pH varie en fonction du bilan net de protons et du pouvoir tampon des charges variables du sol. Les sites négatifs fixent les protons par une liaison très énergétique et libèrent les cations adsorbés (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) qui sont par la suite susceptibles d'être lixiviés. Du fait de son abondance dans le sol, le calcium est lixivié en plus grande quantité. L'équilibre $\text{LH} \rightleftharpoons \text{L}^- + \text{H}^+$ est déplacé vers la gauche.

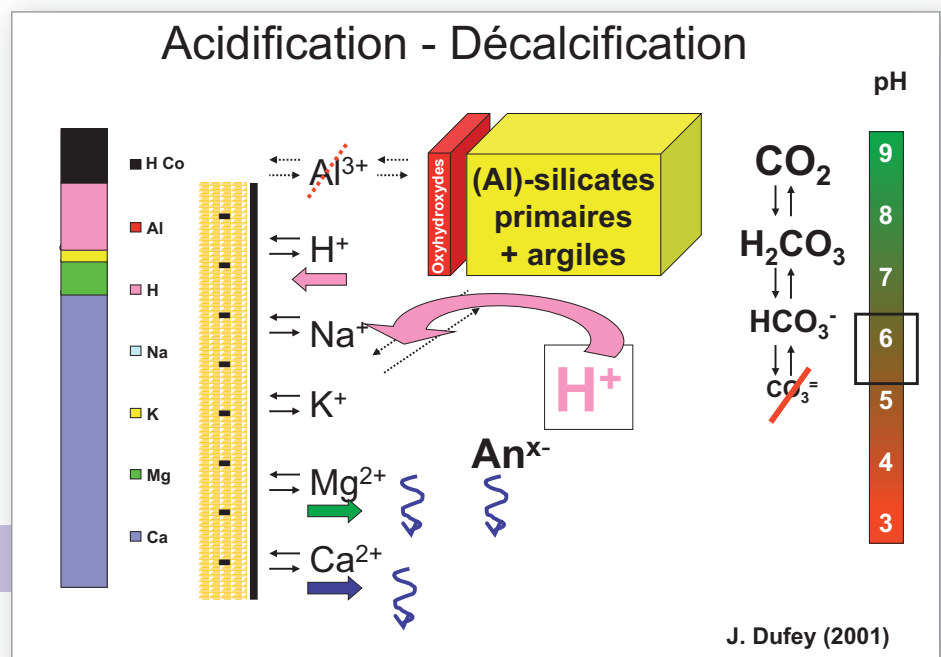
Pour la matière organique le phénomène peut être schématisé comme suit (avec R : radical organique) :



Comme H^+ est lié par une liaison forte, il y a diminution du nombre de sites négatifs, lieux d'échanges de cations et donc une diminution de la CEC effective (*). Même si celle-ci demeure saturée par les cations échangeables d'acidité négligeable jusqu'à un pH voisin de 5,8, la quantité totale de cations qu'elle peut retenir diminue. C'est dans cette phase de décalcification que le pouvoir tampon est le plus faible et que le pH peut évoluer rapidement (figure 2.3).

Figure 2.3

Acidification et Décalcification.

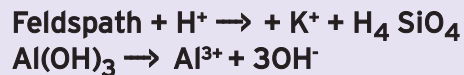


Du fait de la production de protons, le pH continue à baisser, jusqu'à des valeurs plus acides correspondant au domaine pour lequel intervient le pouvoir tampon lié à l'al-

tération des minéraux silicatés et au passage de l'aluminium sous formes ioniques (Al^{3+} , ...) qui devient alors dominant.

L'aluminisation

Dès que le pH_{eau} est inférieur à 5,8 environ, l'acidification entraîne le remplacement progressif des cations d'acidité négligeable par de l'aluminium (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$) issu de la dissolution des formes précipitées de cet élément. Les cations déplacés peuvent être lixiviiés avec des anions. Le système adsorbant s'appauvrit en cations d'acidité négligeable. L'augmentation de l'acidité conduit à l'altération des silicates qui libèrent de l'aluminium et d'autres cations comme le potassium des micas ou des feldspaths.



Le pH atteint un niveau d'équilibre dépendant des systèmes tampon. Au dessous d'un pH_{eau} de 5,8 à 5 (seuil variable selon les types de sol), la teneur en aluminium Al^{3+} augmente et peut devenir toxique. La teneur en cations d'acidité négligeable est fortement diminuée, comme la CEC qui tend vers son minimum (Figure 2.4).

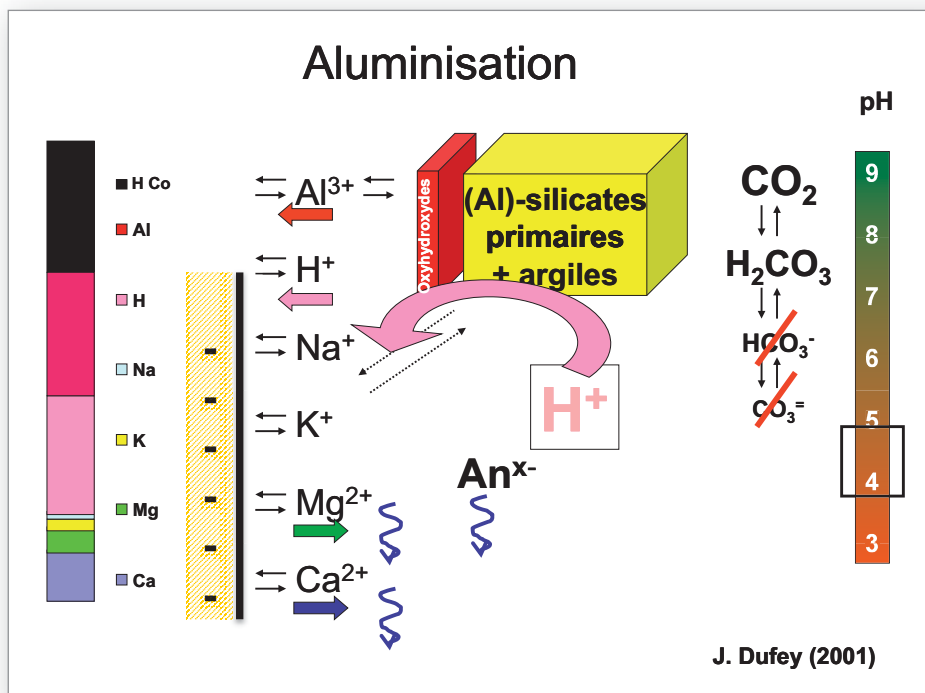


Figure 2.4

Aluminisation.

L'essentiel

Le pH du sol (*) est une caractéristique majeure contrôlant les propriétés des surfaces du système adsorbant, en particulier la taille de la CEC.

Lorsque le pH s'abaisse, la diminution de la CEC effective (au pH du sol) peut être importante notamment pour la part due aux charges négatives portées par la matière organique (jusqu'à la moitié) (figure 2.5).

Le pH agit également sur les équilibres entre sol et solution du sol. Les proportions d'éléments adsorbés, de même que la forme chimique de certains éléments (Aluminium, Fer, Calcium, Phosphore...), sont modifiées.

Origines des charges négatives de la capacité d'échange

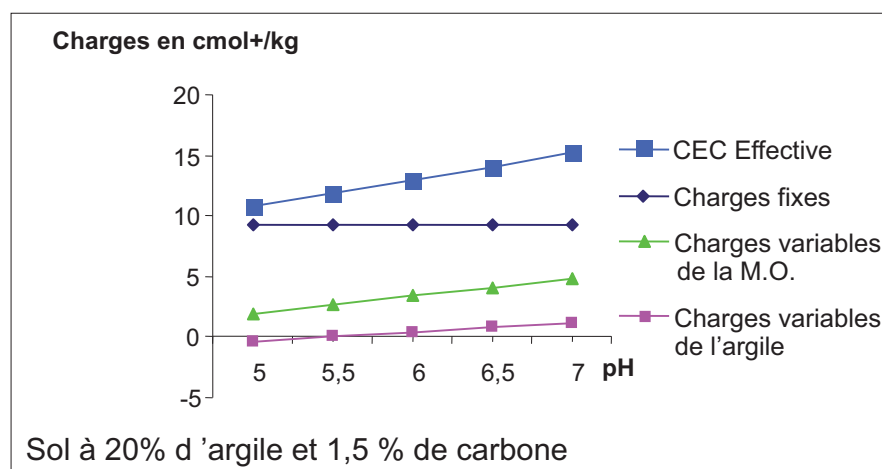


Figure 2.5

Origine des charges négatives de la capacité d'échange.

J.-L. Julien 2002.

Effets indirects de la baisse du pH sur certaines composantes et propriétés du sol

Les conséquences de ces modifications sont les effets indirects. Ils se manifestent sur toutes les composantes de la fertilité des sols, chimiques, physiques et biologiques.

Sur les composantes chimiques :

Les éléments comme le cuivre, le manganèse, le bore, le zinc, le cadmium, l'aluminium deviennent plus solubles, leur conférant une plus grande disponibilité pour les végétaux. Il peut en résulter une diminution des risques de carence pour ceux qui sont indispensables aux végétaux (B, Mn, Zn, Cu).

Cette augmentation de concentration peut entraîner à des pH bas, des risques de toxicités des éléments les plus abondants (Cu, Zn, Cd, Al et Mn). Elle conduit aussi à une augmentation des quantités lixiviées, donc à une baisse importante des quantités de métaux dans les sols et à des dispersions dans le milieu (augmentations de teneurs dans les eaux).

De 7 à 5,5, la diminution du pH affecte la solubilité des phosphates. En sol acide, le phosphore est moins disponible et est for-

tement retenu par les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium à pH inférieur à 5,5. L'augmentation du pH améliore la disponibilité du phosphore, mais l'apport de calcium atténue l'effet du fait de la formation de phosphates de calcium dont l'insolubilité augmente avec le pH.

Sur les composantes physiques

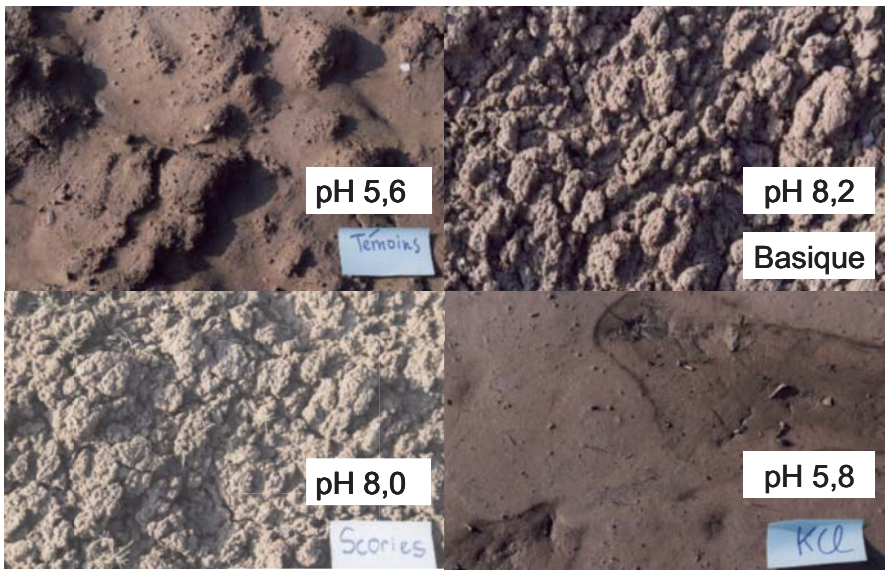
Les pH bas et les faibles teneurs en calcium amplifient les problèmes des sols hydromorphes. En effet :

- la capacité d'infiltration de l'eau est plus faible et le risque de battance augmente dans les sols sensibles (figure 2.6),
- l'eau circule moins bien et la terre s'humecte plus difficilement (tableau 2.1).

Le sol est plus sensible aux dégradations structurales par les pluies (battance, prise en masse, figure 2.6), qui peut nuire aux levées et affecter la nutrition minérale. Ces conséquences de l'acidité dépendent aussi des systèmes de cultures.

La diminution de la capacité d'échange effective et la lixiviation de calcium Ca^{2+} diminuent la stabilité de la structure. Cependant, la forte présence de Al^{3+} permet à pH très acide une augmentation de la stabilité de la floculation du complexe organo-minéral.

Essai 42 parcelles - INRA Versailles



Surface du sol après l'hiver A. Pernes, 2003

Figure 2.6
États de surface et pH.

Sur les composantes biologiques

Le pH influence la composition de la microflore (bactéries, champignons) du sol. Par exemple dans les sols très acides, les champignons assurent pour l'essentiel la décomposition des matières organiques. Dans ces conditions, les bactéries assurant la nitrification de l'ammonium sont peu actives et ce processus est ralenti, (tableau 2.2).

Les bactéries fixatrices d'azote ont une activité différente selon le pH. Leur pH d'activité optimale dépend de l'espèce considérée. *Rhizobium lupini* est plus actif à pH voisin de 5,5 alors que *Rhizobium meliloti* (présent dans les nodosités de la luzerne) est plus actif à pH voisin de 7, en particulier à l'implantation. La fixation de l'azote dépend aussi de la disponibilité du molybdène qui diminue si le pH diminue.

Les populations de certains vers de terre et leur activité diminuent (nombre de galeries et quantités de turricules) en sols acides (tableau 2.2).

L'acidification des prairies modifie leur composition botanique : les graminées moins productives sont plus nombreuses, des légumineuses disparaissent, les ray grass disparaissent, en particulier quand la toxicité

Importance de la CEC sur la vitesse d'humectation d'agrégats de sols						
	Jeu les bois		Abilly		Neuil	
CaCO ₃	0	20	0	50	0	37
pH	4,9	7,1	5,1	7,8	5,4	7,8
CEC _E	1,6	3,9	4,2	7,8	6,5	8,3
	150'	20'	45'	12'	12'	10'
Temps nécessaire pour obtenir la saturation des agrégats (minutes)						

Tableau 2.1 : pH et vitesse de réhumectation. (V. Garros, 2000)

aluminique apparaît. Dans le cas de prairies peu hydromorphes, les plantes tolérantes à l'humidité, comme les renoncules, augmentent en fréquence. Cependant, la modification de la composition botanique n'induit pas systématiquement une baisse de valeur fourragère.

Certains pathogènes sont sensibles au pH, tels la Hernie du chou, fréquente dans les sols acides dont le pH est inférieur à 6,1, alors que le piétin échaudage ou la galle de la pomme de terre y sont peu fréquents. Des travaux récents montrent que le potentiel infectieux de la Hernie du chou sur colza est très fort dans les parcelles à pH inférieur à 6,1 (Figure 2.7).

Evolution de la matière organique et statut acido- basique

pH $\leq$ 4,5 S/CEC $\leq$ 20	Protection chimique de la matière organique par Al et Fe, Enrobage par les oxyhydroxydes d'Al, Turn over faible	Pas de vers de terre C/N = 12-15
4,5 < pH $\leq$ 5,8 20% < S/CEC $\leq$ 70%	Baisse de Al ⁺⁺⁺ , diminution de la protection de la matière organique, faible augmentation de la biomasse et du turn over	Peu de vers de terre C/N = 12-15
5,8 < pH $\leq$ 6,5 70% < S/CEC $\leq$ 90%	Augmentation de la capacité d'échange effective, de la biomasse microbienne, de la respiration spécifique et du turn over	Vers de terre C/N = 10-15
6,5 < pH $\leq$ 7 90% < S/CEC $\leq$ 100%	Turn over élevé Biomasse et respiration spécifique élevées	Vers de terre C/N = 10
pH > 7 S/CEC > 100 % Présence de calcaire total	Augmentation de la protection chimique par Ca ⁺⁺ Enrobage par la calcite Diminution de l'activité de la biomasse microbienne et de son turn over Ralentissement du turn over de la matière organique	Vers de terre C/N = 12

Tableau 2.2 : Évolution de la matière organique et statut acido basique. (B. Fabre, 2001)

Baisse de l'indice pathologique avec l'augmentation du pH eau un an après l'application de chaux (expérimentation en serre)

Source : CETIOM Grignon

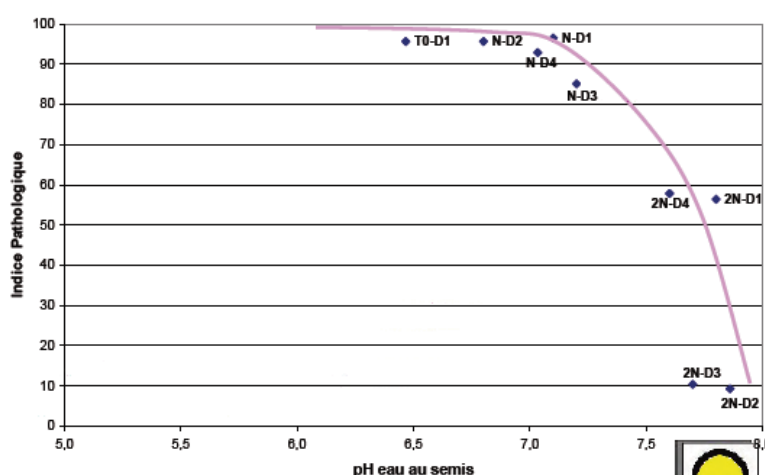


Figure 2.7 : pH et Indice pathologique de la Hernie du chou



Figure 2.8

Symptômes
d'attaque de
hernie du chou
sur colza.

Bibliographie

- Fardeau JC, Staimesse JP, 1995 : *Fertilisation phosphatée ; efficacité du phosphore d'un amendement calcique phosphaté sidérurgique*, C. R. Acad. Agric. Fr., 1995,81, n°1, 189-202.
- Deneux-Mustin et al., 2003 : *Mobilité et transferts racinaire des éléments traces : Influence des micro-organismes du sol*, Tec Doc, Lavoisier, paris, 280 pages
- Giller K. et al., 1998 : *Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soil : a review*, soil Biol. Biochem., 30, 10/11, 1389-1414.
- Houot S. et al., 2000 : *Dependence of accelerated degradation of atrazine on soil pH in French and Canadian soils*, Soil biology and biochemistry, 32,615-625.
- Mathieu C., Pieltain F., 1998 : *Analyse physique des sols*, Lavoisier, Paris, 275 pages
- Pernes-Debuyser A., 2003 : *Différenciation des propriétés du sol par des apports d'engrais et d'amendements, cas de l'essai de longue durée des 42 parcelles (Versailles)*, Thèse Univ Bourgogne, 150 pages
- Springett J.A., Syers J.K., 1984 : *Effect of pH and calcium content of soil on earthworm cats production in laboratory*, Soil Biology Biochemistry, 16, 2, pp 185-189.
- Tessier D, 2001 : *Influence des charges superficielles sur les propriétés physiques des sols*, , in «Colloque l'acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise», Ed. Afes, Inra, Versailles, 4-5 avril, 58 pages.

Pour aller plus loin :

- Programme et résumé du Colloque l'acidification des sols : *Origine, approche, enjeux et maîtrise*, 2001 : AFES, INRA, Versailles, 4 et 5 avril 2001, 57 pages
- Acidification des sols : *origine, suivi et maîtrise*, 2002 : Etude et gestion des sols, 2002 : Numéro spécial, 9, 3, 75 pages
- Davet P., 1996 : *Vie microbienne du sol et production végétale*, INRA, Paris, 383 pages
- Groupe Chaulage du COMIFER, 2000 : *Du laboratoire au champ, questions vives sur le chaulage*, Comifer, 9 pages
- Groupe Chaulage du COMIFER, 1995 : *Comment bien fertiliser en grandes cultures*, in *Analyser et fertiliser en toutes connaissances*, Ignazi (Comifer)et Riou (Gemas) eds, 135-148
- A. Bouthier, C. Le Souder, P. Castillon, 1997 : *Chaulage et fertilisation magnésienne*, ITCF, 44 pages.
- Girard M-C et al., 2005 : *Sols et environnement*, Dunod, 816 pages ■

Les toxicités aluminique et manganique

Introduction

La toxicité de certaines formes de l'aluminium dans le sol, constitue la principale cause des pertes de production des cultures dans les sols acides. La toxicité du manganèse (forme ionique Mn^{2+}) est moins fréquente.

Susceptible de se manifester sur tous les types de sols lorsque le pH_{eau} du sol est égal ou inférieur à 5,5, la toxicité aluminique intervient en réalité à partir d'un « seuil critique » variable selon le type de sol et s'exprime avec une intensité variable selon l'espèce et la variété cultivée. Ainsi, la première fonction du chaulage est d'élever ou maintenir le pH du sol au dessus de ce seuil afin que la toxicité de l'aluminium ne puisse s'exprimer.

L'évaluation du risque de toxicité aluminique, repose de manière courante sur la mesure du pH. Toutefois la variabilité des seuils critiques, imputable pour une part à la nature des sols, incite à rechercher d'autres critères de diagnostic telle par exemple la mesure de la teneur en « aluminium échangeable » extrait dans une solution molaire de chlorure de potassium (KCl).

Mécanismes impliqués dans la phytotoxicité de l'aluminium

Dans les sols très acides, le principal facteur limitant la croissance des cultures est la phytotoxicité de l'aluminium et plus rarement celle du manganèse. En effet, dans les sols très acides, la dissolution de certains composés aluminiques (phyllosilicates d'aluminium ou argiles, oxydes et hydroxydes...) libère dans la solution du sol différentes formes ioniques de l'aluminium.

De bénéfiques pour la croissance des plantes lorsque leur concentration demeure très faible (Juste 1965, Clune et al 1999), certaines formes d'aluminium deviennent toxiques à des concentrations élevées, lorsque le pH_{eau} du sol devient égal ou inférieur à 5,5.

Il est admis que ces formes toxiques sont des monomères (formes ioniques simples

telles que Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$...) de l'aluminium, mais leur toxicité ne se manifeste qu'au dessus d'un certain seuil de concentration en aluminium dans la solution du sol.

Les effets de la toxicité aluminique apparaissent lorsque le pH du sol est inférieur à un seuil, variable selon le type de sol. Au dessus d'un pH_{eau} de 5,5, tout risque semble écarté quel que soit le type de sol ou de culture.

Modalités d'expression des toxicités aluminique et manganique

Les symptômes de toxicité aluminique ne sont pas facilement identifiables sur les parties aériennes. La croissance est affectée et les symptômes peuvent, dans cer-



pHeau = 4,7
 pH KCl = 4,3
 Ca/CEC = 18 %
 Al échangeable = 74,4 mg/Kg.
 Lara Europe Analyses

Figure 3.1

Symptômes de toxicité aluminique sur blé.

tains cas, ressembler à ceux d'une déficience en phosphore.

Les symptômes les plus caractéristiques sont observables au niveau des racines. En présence de toxicité aluminique, la croissance des racines est réduite, celles-ci sont peu ramifiées et les extrémités sont renflées et de couleur brune (Figure 3.1).

La toxicité aluminique altère un certain nombre de processus physiologiques au niveau des racines : division cellulaire, respiration, absorption et transport d'éléments tels que le phosphore, le magnésium, le potassium, le calcium.

Dans les sols où la teneur excessive en aluminium échangeable concerne les horizons situés en dessous de la couche labourée, l'expression de la toxicité est moins visible. Cependant l'exploration racinaire limitée a pour conséquence une apparition plus rapide du stress hydrique en cas de sécheresse.

La toxicité manganique, liée à la forme Mn^{2+} , semble moins fréquente que la toxicité aluminique. Elle a été observée principalement sur betterave dans les limons du nord de la France (Colomb, 1989). La toxicité

manganique est souvent associée à des conditions d'excès d'eau créant un milieu réducteur.

Contrairement à la toxicité aluminique, les symptômes de toxicité manganique sont surtout visibles sur les parties aériennes : jaunissement des jeunes feuilles avec taches nécrotiques, épaississement des limbes avec bordures gaufrées.

Des pertes de production significatives pour des pH_{eau} inférieurs à 5.5

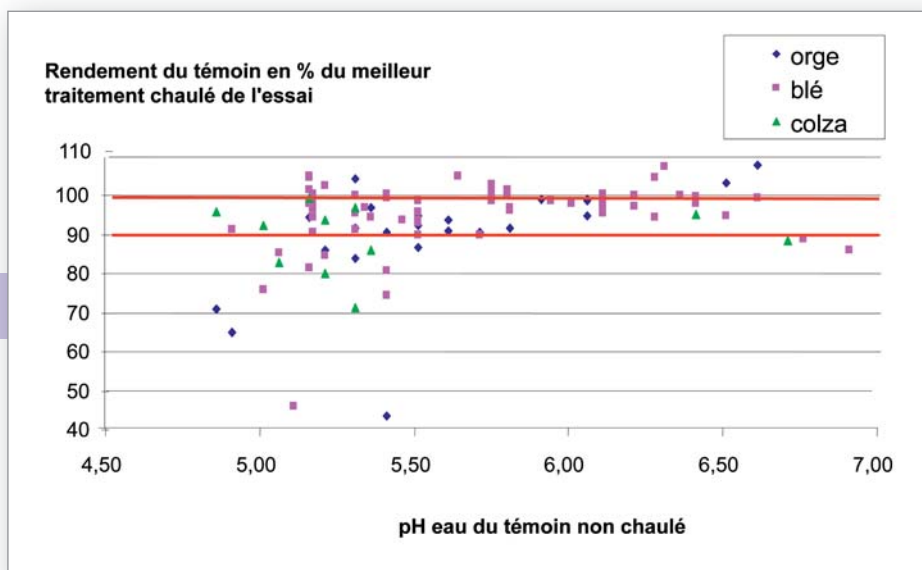
Les expérimentations réalisées en France depuis 1980 (Paillard, 1994) sur des sols dont la gamme des pH_{eau} initiaux variait de 4,5 à 6,5 ont permis d'évaluer les conséquences de l'acidité pour la production de quelques espèces de cultures annuelles.

La figure 3.2 présente les résultats de cette synthèse pour les 3 espèces les plus étudiées.

L'ensemble de ces essais, mis en place par différents organismes dans les années 1980, était conduit selon un protocole commun : apport d'amendement basique réalisé à plusieurs doses lors de l'année d'implantation.

Figure 3.2

Indice de production et pH_{eau} des témoins non chaulés dans des essais chaulage sols divers dans l'Ouest, le Centre et le Sud-Ouest de la France.



Des pertes de production supérieures à 10 % ont été observées dans les cas où le pH_{eau} du témoin était inférieur à 5,5. Elles étaient systématiques pour des pH inférieurs à 5,0.

Pour des pH_{eau} compris entre 5 et 5,5, le risque de perte de rendement dépend du type de sol, de l'espèce, de la variété. Néanmoins, cette information n'est pas disponible chez les sélectionneurs européens.

La variabilité intra annuelle du pH, variable selon les sols devra être prise en compte pour prévenir ce risque

La teneur en aluminium échangeable, pour mieux évaluer le risque dans les sols concernés

Les travaux de Justes (1966) dans les sables des Landes ont montré que le risque de toxicité de l'aluminium pour le maïs pouvait être apprécié par la teneur en aluminium échangeable (extrait par une solution molaire de chlorure de potassium).

Une teneur de 50 mg d'aluminium échangeable par kg était alors proposée comme seuil à partir duquel la toxicité devenait possible pour le maïs. La mesure de cet indicateur dans les expérimentations a montré l'existence d'une relation étroite entre

le pH et la teneur en aluminium échangeable, différente toutefois d'un sol à l'autre (figure 3.3). Ainsi le pH_{eau} correspondant à une teneur de 50 mg Al / kg peut varier selon les sols de 4,5 à 5,5.

La teneur en aluminium échangeable du sol semble mieux discriminer les situations avec pertes de production que le pH_{eau} (figure 3.3).

Cependant la teneur au dessus de laquelle les pertes de production dépassent 10 % variait selon les sites d'expérimentation de 30 à 100 mg Al / kg. Cela tient principalement à deux raisons :

1. Le chlorure de potassium (KCl) molaire utilisé extrait des formes diverses de l'aluminium dont certaines ne sont pas toxiques. C'est en particulier le cas pour les sols riches en matière organique dans lesquels de l'aluminium complexé par la matière organique, et non toxique pour les plantes, est néanmoins extrait et dosé.

La tolérance à la toxicité de l'aluminium varie fortement d'une espèce à l'autre et en fonction de la variété. La faible tolérance de l'orge est bien connue, mais la hiérarchie des principales espèces cultivées est mal établie. Elle est par ailleurs susceptible d'évoluer avec le progrès génétique.

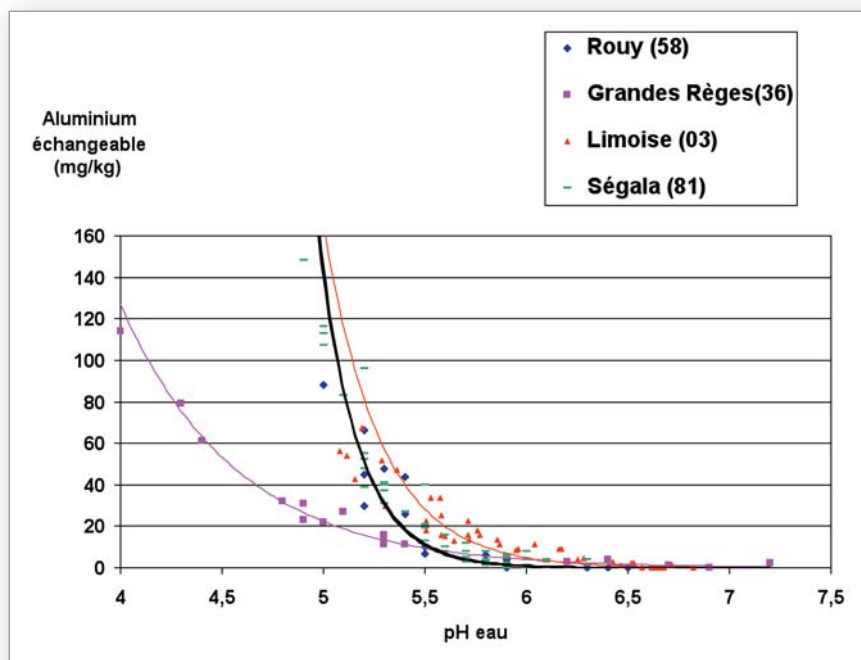


Figure 3.3

Relation entre pH_{eau} et aluminium échangeable sur plusieurs sites expérimentaux.

2. L'interaction possible dans certains sols avec la toxicité manganique. Celle-ci n'a pas fait l'objet de diagnostic particulier dans la mesure où la teneur en manganèse quelle que soit la méthode, n'est

pas un bon indicateur du risque de toxicité. Il est donc possible dans certains cas, qu'à la toxicité aluminique s'ajoute la toxicité manganique dans certains sols acides hydromorphes.

Conclusion

Les études réalisées en France ont permis de vérifier que le principal enjeu du chaulage pour les systèmes de grandes cultures est la maîtrise de la toxicité aluminique qui n'intervient qu'en dessous du « pH eau critique » de 5,5 quelle que soit l'espèce cultivée et le type de sol. Maintenir le pH des sols au dessus de ce seuil garantit par conséquent tout risque de cette nature. La mesure de la teneur en aluminium échangeable du sol peut fournir un indicateur utile pour affiner l'estimation du risque de toxicité de l'aluminium selon le type de sol ■

Bibliographie

- Adams F., 1984 : *Soil acidity and liming*, Agronomy sciences 12., American society of Agronomy, 57-86
- Clune TS, Copeland L, 1999. : *Effects of aluminium on canola roots*. Plant and Soil 216: 27-33
- Colomb B., 1989 : *Toxicité du manganèse chez la betterave sucrière en sols de limons*, Perspectives agricoles, 136, 40-48
- Juste C, 1965 : *Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur*. Thèse faculté des sciences de Nancy
- Justes C., 1966 : *Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest Atlantique : application à leur mise en valeur*, Annales agronomiques, 17, (2), 157-187, 17, (3), 251-341.
- Paillard... 1994 : *Synthèse des essais recalcifcation du Centre Ouest*, ITCF - CETIOM - Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charentes
- Rout G.R., Samantaray S., Das P., 2001 : *Aluminium toxicity in plant: a review*, Agronomie 21 (2001) 3-21.

Le chaulage : différents effets

Les effets du chaulage

Une première publication du Groupe Chaulage COMIFER (1995) structure les types d'effets du chaulage : amélioration de la flocculation des colloïdes du sol, accroissement de la capacité d'échange et des cations adsorbés, modification du pH et de la composition de la solution du sol et distingue les effets directs des effets indirects.

Les effets directs

L'amendement apporte un cation et un anion. Le rôle de chacun doit être précisé :

- l'anion, (OH^- , CO_3^{2-} ou O^{2-}) par ses propriétés basiques, joue sur l'augmentation du pH par neutralisation des H^+ , dégageant ainsi des sites négatifs et augmentant la CEC effective ;
- le cation, (calcium ou/et magnésium), d'acidité négligeable, modifie la composition de la solution du sol et la garniture ionique du complexe adsorbant, (figure 4.1).

Une vérité souvent oubliée : Ce n'est pas le calcium qui chaule

Le pH mesure la concentration des protons (H^+) dans une solution.

Le calcium ajouté ne peut pas défaire les liaisons fortes qui lient H^+ aux surfaces d'échange du sol. Il peut au plus déplacer les équilibres des cations échangeables, dont H^+ , qui sature en général une très faible part de la capacité d'échange.

C'est l'anion basique accompagnateur du calcium qui a le pouvoir d'augmenter le pH.

Après la dissolution de l'amendement dans le sol, les protons sont neutralisés par une base apportée (HO^- , CO_3^{2-} , O^{2-}) selon les réactions simplifiées suivantes :

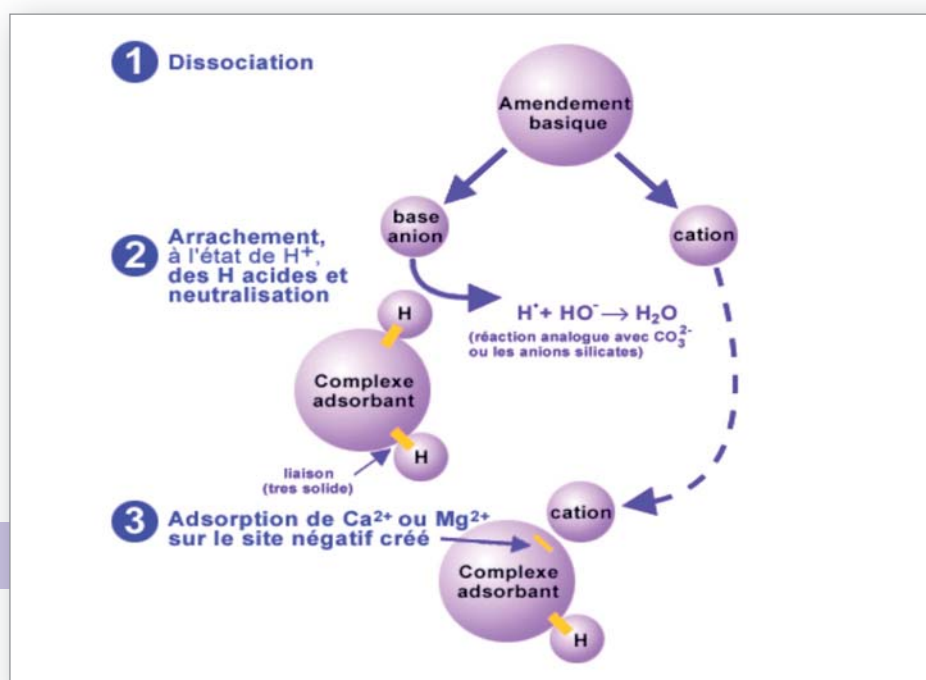
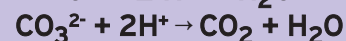
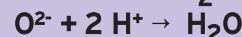
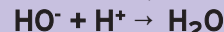


Figure 4.1

Mode d'action
d'un amendement
basique.

Les effets directs de l'amendement basique sont :

- une augmentation du pH qui entraîne celle de la CEC effective par ionisation des groupements carboxyliques de la matière organique ($R-COOH \rightarrow R-COO^- + H^+$);
- une augmentation de la concentration en calcium (échangeable et en solution) et une baisse de la concentration en aluminium (échangeable et en solution).

Le premier effet, lorsque que le pH initial est suffisamment bas, est la baisse de la

concentration en Al^{3+} (figure 4.2). Puis le pH augmente, entraînant l'augmentation de la CEC effective qui se sature en calcium, plus ou moins selon la concentration en calcium de la solution du sol (figure 4.3).

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 se traduit en général par une faible augmentation du pH, une forte augmentation de la CEC au pH du sol et du calcium échangeable et par une diminution de la concentration de l'aluminium échangeable (qui devient négligeable dès pH 5,5).

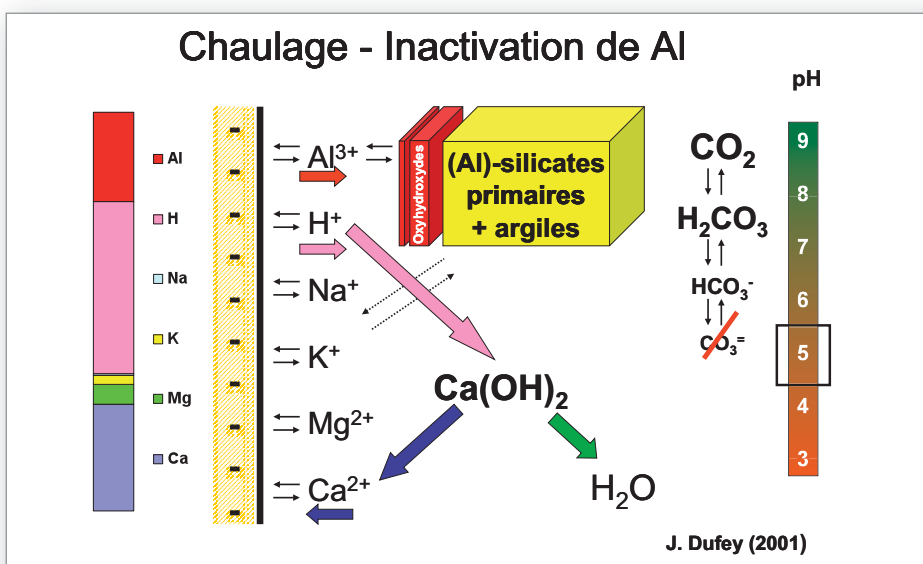


Figure 4.2

Inactivation de l'aluminium.

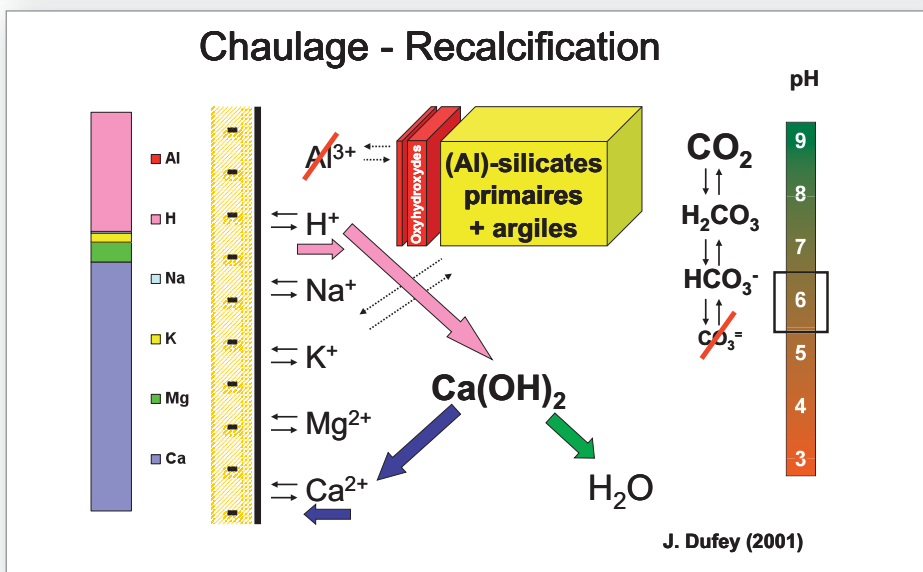


Figure 4.3

Recalcification.

Les effets indirects

Le chaulage permet d'améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol au travers de son effet sur l'acidité du sol, et aussi par des effets indirects sur la mobilisation des éléments nutritifs, l'immobilisation des éléments métalliques toxiques et l'amélioration de la stabilité structurale et des capacités d'infiltration de l'eau. Pour faciliter la compréhension du schéma, nous avons séparé les trois composantes physique, chimique et biologique des propriétés du sol, sans préciser les multiples interactions entre elles. Cependant, il est souvent difficile d'isoler les effets respectifs de la base et du calcium (figure 4.4).

Sur la composition chimique de la solution et du sol

Le chaulage permet une réduction du pouvoir fixateur du sol pour les ions phosphates (Fardeau, Staimesse, 1995). L'augmentation de la biodisponibilité du phosphore d'amendements sidérurgiques s'explique pour partie par l'augmentation du pH pour des terres dont le pH initial est compris entre 4,5 et 7,3.

L'élévation du pH par le chaulage permet la précipitation de l'aluminium échangeable

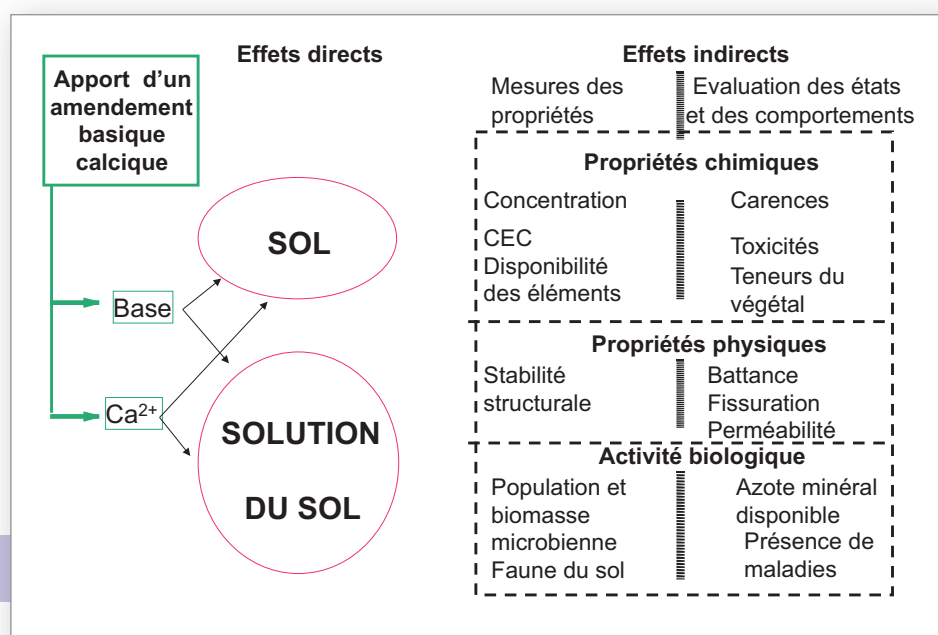
et la diminution des concentrations en Al^{3+} et Mn^{2+} qui sont toxiques. Cette diminution de la concentration en aluminium permet d'augmenter la disponibilité du phosphore. Cependant, la forte augmentation de la CEC saturée principalement par le calcium, peut entraîner des diminutions relatives des concentrations en K^+ et Mg^{2+} et donc des problèmes de nutrition en ces éléments.

De même, on peut craindre une augmentation de certaines carences en oligo-éléments (Cu, Fe, Zn), en particulier si le chaulage intervient sur un sol resté longtemps à l'état acide. En effet, un pH acide permet la mise en solution des éléments métalliques qui sont lixiviés. Les quantités restantes peuvent être ensuite bloquées après chaulage (augmentation de la complexation avec la matière organique plus réactive et précipitation d'hydroxydes ou des sels minéraux). Les éléments traces métalliques ont une disponibilité fortement limitée, à l'exception du molybdène, et leur toxicité est réduite.

Pour ce qui est de l'azote, le chaulage améliore la minéralisation de l'azote organique, en particulier la nitrification, et favorise la fixation symbiotique.

Figure 4.4

Effets du chaulage.



Cela se traduit par des prélèvements d'azote par les plantes plus élevés, sur les parcelles chaulées, en particulier en condition de nutrition azotée limitante. Cependant, l'augmentation de la concentration en NO_3^- peut conduire à une augmentation de lixiviation en période d'interculture. De plus, les pertes par volatilisation de l'ammoniac sont augmentées localement dès que le pH est basique (en particulier au voisinage des particules d'amendements).

De plus, en sol acide, Cu, Cd, Zn et Pb peuvent, selon les teneurs et la spéciation du métal, ralentir voire inhiber la minéralisation de l'azote (Deneu-Mustin et al, 2003), la fixation symbiotique (Giller K. et al, 1998), la dénitrification et diverses activités enzymatiques. La diminution de la concentration de ces éléments dans la solution du sol due au chaulage permet une réactivation des activités microbiennes et contribue à augmenter la minéralisation de l'humus.

Sur les propriétés physiques

La dispersion ou la floculation des colloïdes du sol est une manifestation des modifications des charges variables et de leur densité dans le sol. Les facteurs qui affectent ces charges de surface d'échange et qui

déterminent l'intensité de la dispersion sont :

- la concentration de la solution du sol en électrolytes,
- la valence du cation occupant les sites d'échange
- le pH qui joue sur la CEC effective, donc le nombre de charges négatives.

L'augmentation de la quantité de charges négatives sur le complexe d'échange augmente le caractère hydrophile de la terre (Pernes Debuyser, 2003). Celle-ci attire plus fortement les molécules d'eau, elles ont tendance à s'étaler à la surface interne de la porosité. La sensibilité de la perméabilité (estimée par Ks, coefficient de percolation en milieu saturé) au chaulage dépend donc de la CEC effective.

Le calcium, en augmentant la floculation des argiles, joue aussi un rôle majeur sur les propriétés physiques du sol, à l'échelle des particules (Tessier, 2001). Il renforce la cohésion du sol et la porosité reste efficace plus longtemps. Le chaulage améliore la stabilité de la structure surtout mise en évidence par le Ks et la microstructure du sol (Bolan et al 2003).

(figure 4.5) Fabre non publié.

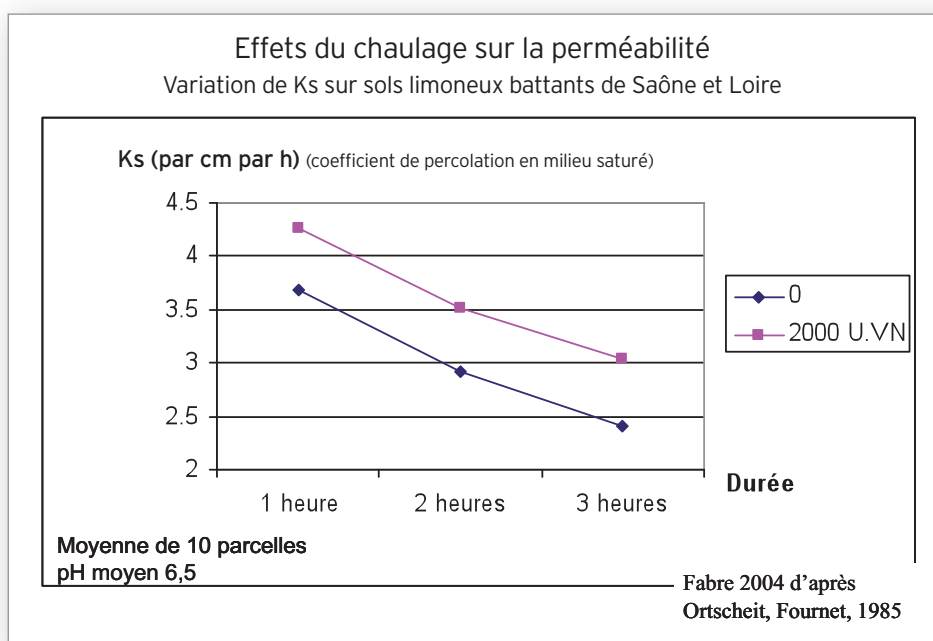


Figure 4.5

Effet du chaulage sur la perméabilité.

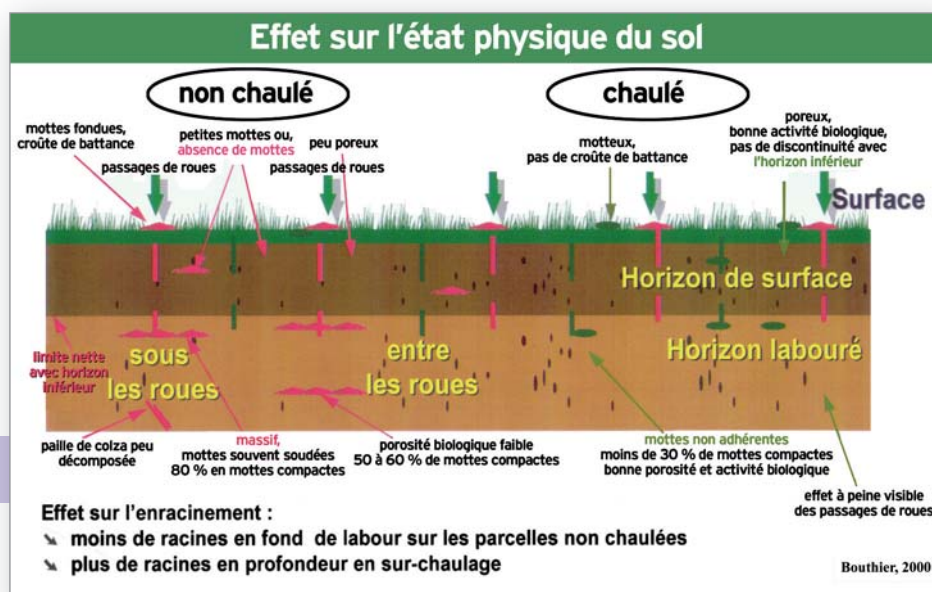


Figure 4.6

Effet du chaulage sur l'état physique du sol.

Les effets positifs du chaulage sur la stabilité structurale, viennent donc d'une part de l'augmentation du pH jouant sur la densité de charges négatives et d'autre part de la concentration de la solution du sol en calcium qui aide à la floculation du complexe d'échange (*) et à la formation des agrégats. La diminution de la battance qui en résulte en particulier, améliore la réussite de la phase germination - levée. En outre, le maintien de la porosité (diminution de la prise en masse) permet une augmentation de l'exploration et de l'activité racinaire et donc une amélioration de la nutrition en eau et en éléments minéraux.

On constate donc une amélioration globale de la structure et de la circulation de l'eau dans le sol en profondeur et en surface (figure 4.6). Les parcelles neutres ou basiques retiennent plus d'eau à saturation et ont une vitesse d'humectation plus rapide que les parcelles acides, abstraction faite de l'influence de l'organisation du sol *in situ*. Cette modification de la dynamique de l'eau par modification de la mouillabilité et de la structure peut réduire le ruissellement et donc limiter le risque d'érosion.

Sur l'aspect biologique

Le chaulage modifie la composante biologique de la qualité du sol. Il joue sur trois

types de mécanismes intéressant l'élaboration du rendement : la disponibilité des éléments minéraux, l'amélioration des transferts vers la plante et la capacité du peuplement végétal à les utiliser.

Il conditionne l'activité de nombreux organismes de natures très diverses, en interaction avec le type de plante cultivée et avec le sol, en particulier son statut acido-basique (taux de saturation de la capacité d'échange cationique, teneurs en Ca^{2+} et Al^{3+} échangeables, pH, teneur en CaCO_3). Les principaux organismes influencés et influençant ces trois mécanismes sont les bactéries, les champignons (dont les mycorhizes) et les vers de terre.

- L'augmentation du pH (de 5,9 à 7,3, Springett et Syers, 1984) et de la teneur en calcium augmente la densité des vers de terre et donc améliore la décomposition des résidus végétaux. En effet, les molécules organiques ayant transité dans le ver de terre sont plus facilement attaquées par les bactéries minéralisatrices. Les turricules sont généralement plus riches en éléments nutritifs et en polysaccharides qui sont des agents importants de la stabilité des agrégats.

- L'élévation du pH jusqu'à 5,5, supprimant vraisemblablement une toxicité

aluminique, conduit à un accroissement de la biomasse microbienne qui stimule la minéralisation de l'azote et une modification des équilibres entre populations (augmentation du rapport bactéries/champignons). À un pH plus élevé, la dissociation des groupements carboxyliques et phénoliques des matières organiques facilite leur attaque et provoque une stimulation vigoureuse de la minéralisation. Ceci est le cas pour les sols acides chaulés de manière importante comme pour les sols peu acides soumis à un chaulage d'entretien. Le chaulage annihile donc l'effet stabilisateur de l'acidité vis à vis de la matière organique du sol.

Il est intéressant de noter que l'augmentation de la biomasse microbienne et de son activité va de pair avec une augmentation pouvant aller du simple au triple de la capacité d'échange effective. Cela conduit à une accélération des cycles biologiques extériorisée par une augmentation de la minéralisation du carbone, de l'azote et du phosphore. Le calcium sature les charges négatives de la matière organique et permet sa floculation.

- Une évolution de la flore, avec présence accrue des bonnes graminées et des légumineuses dans les prairies.
- Selon les maladies, on constate une augmentation ou une diminution des symptômes sur les végétaux (diminution des effets de la Hernie du chou sur colza, augmentation des effets du piétin échaudage sur blé et apparition des symptômes de pourriture sèche de la pomme de terre).
- L'augmentation de l'activité de la biomasse microbienne joue aussi sur les molécules organiques d'origine anthropique (*). (figure 4.9, Houot et al. (2000)) montrent que le pH est la variable la plus explicative de la minéralisation par incubation de l'atrazine. Elle

augmente rapidement à partir de pH 6 jusqu'à un plateau à pH 7-7,5. Ceci permet une forte diminution des résidus de ce dés herbant dans les sols.

La réactivation de l'activité biologique du sol et l'amélioration du fonctionnement de la biomasse du sol, suite à un chaulage se traduit par une modification de l'évolution des matières organiques. En outre, la colonisation des sols par les vers de terres et leur activité dans le sol est augmentée améliorant la porosité des horizons de surface.

En résumé

Un amendement basique calcique :

- modifie le pH facteur de régulation des activités des organismes vivants du sol (en particulier vers de terre et bactéries) ;
- diminue les risques de toxicité de l'aluminium et parfois du manganèse ou d'autres éléments traces métalliques, et améliore de façon concomitante la biodisponibilité du phosphore et du magnésium ;
- peut entraîner des carences en oligo-éléments du fait de leur insolubilisation trop importante ;
- améliore la stabilité structurale en modifiant la dynamique de l'eau et provoquant la floculation des colloïdes ;
- augmente l'activité de la biomasse microbienne avec des répercussions sur le turn-over de la matière organique.

Les indicateurs d'effet du chaulage

Coppenet (1957) identifie quatre actions de la « chaux » : « sur la chimie du sol, sur les propriétés physiques du sol, sur la microflore des sols, et sur les plantes elles-mêmes ». Cette complexité des effets du chaulage et les difficultés éprouvées pour les étudier, sont accrues par la spécialisation des chercheurs : chimistes, physiciens du sol, microbiologistes, naturalistes, agronomes.

Rarement les liens ont été faits au champ pour appréhender d'une manière globale les trois composantes (physique, chimique et biologique) du sol et leurs effets sur les cultures et évaluer l'évolution des aptitudes culturales du milieu.

Ces dernières ont pour révélateurs, d'une part le niveau et la régularité des rendements obtenus, et d'autre part les coûts et conditions d'emploi des techniques de production (Boiffin, Sebillotte, 1982).

Il convient donc de dissocier les effets du chaulage sur les propriétés du sol mesurées au laboratoire des conséquences sur les aptitudes du sol évaluées au champ.

Le chaulage modifie les qualités physiques, chimiques et biologiques du sol, ce qui se traduit par une modification des aptitudes culturales du milieu à différentes échelles. Cette multiplicité des effets du chaulage sur le sol et sur les cultures nécessite l'établissement de nombreux indicateurs pour mesurer l'intensité des risques liés à l'acidification ou des améliorations liées au chaulage.

La connaissance de ces indicateurs peut être utile à l'expérimentateur pour bien prendre en compte l'ensemble des propriétés du sol modifiées par le chaulage, et aussi à l'utilisateur pour déterminer les changements à faire dans ses pratiques culturales.

Comment choisir les indicateurs d'effets du chaulage ?

Le peuplement cultivé

On ne peut établir de relation directe entre chaulage et rendement des cultures que dans le cas où le chaulage améliore nettement un état défavorable comme la levée d'une toxicité aluminique ou manganique.

Sinon, le rendement est rarement un révélateur suffisant et pertinent, car l'effet du chaulage sur le rendement est indirect.

Les amendements basiques et/ou calciques ne sont pas des facteurs de production.

Distinguer Facteurs de production et Conditions de production

On a coutume de faire le lien entre les quantités d'éléments apportés et le rendement, en bâtissant des corrélations entre ces deux données. Un **facteur de production** est un élément constitutif d'une production et contribuant à son élaboration (Henin et al, 1969). Il se définit **en quantité, en relation directe avec le rendement**, et son action peut s'exprimer par **une fonction**.

Par opposition, on définit une **condition de production** comme un élément qui n'a

pas d'effet direct sur le rendement. Son action fait intervenir de **nombreuses interactions** et joue sur l'expression de nombreux facteurs. Elle peut agir par effet de seuil.

Il faut donc distinguer les intrants qui sont des facteurs de production et ceux qui sont des conditions de production. Les propriétés du milieu modifiées par les intrants « condition » modifient l'utilisation et l'efficacité des intrants « facteurs ».

Un intrant « facteur de production » joue directement sur le rendement, alors qu'un intrant « condition de production » joue en modifiant l'utilisation et l'efficacité des facteurs de production.

- Exemple d'intrant « facteur » : le rayonnement incident ou la disponibilité de l'azote,
- Exemple d'intrant « condition » : les traitements antiparasitaires ou le travail du sol qui permettent la plus ou moins bonne valorisation du facteur.

Le chaulage, qui modifie les conditions de production, ne peut pas être traité

comme un facteur de production, même si les plantes prélèvent du calcium dans le sol pour leur nutrition calcique car ce n'est pas un facteur limitant.

Le rendement ne peut pas être considéré comme un résultat **direct** des effets du chaulage, même si, in fine, le rendement est bien le résultat global de l'effet des facteurs et des conditions, en interaction. L'analyse des effets du chaulage doit passer par celle des modifications des conditions de milieu et de leurs conséquences sur l'élaboration du rendement.

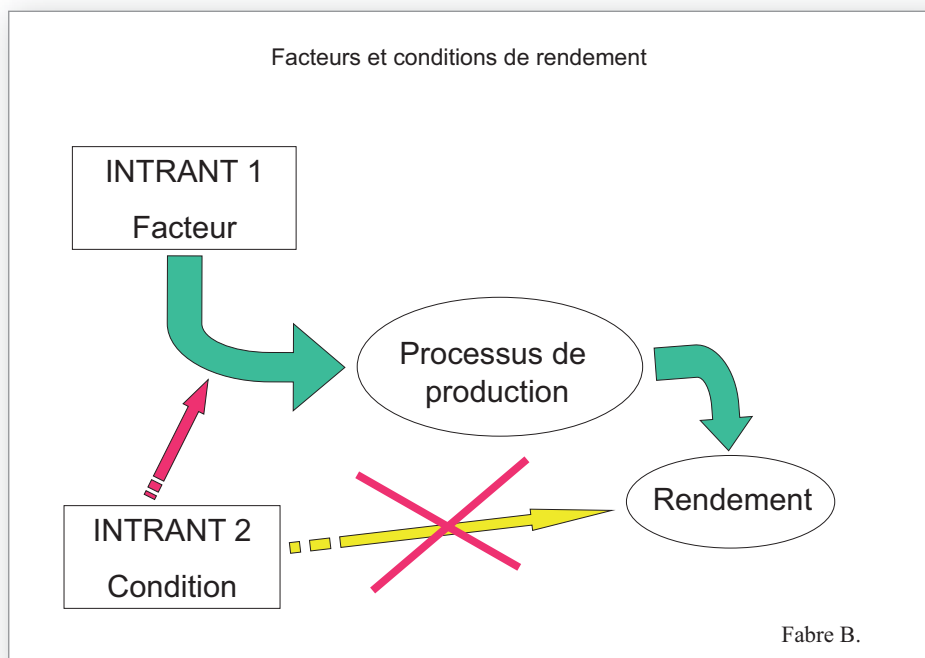


Figure 4.7

*Facteurs
et conditions
de production.*

D'où l'intérêt de rechercher des révélateurs des effets de l'acidité des sols, ou à l'inverse de ceux du chaulage. On peut par exemple prendre comme indicateurs :

- la levée, souvent sensible à la battance, estimée par des comptages successifs du nombre de pieds par mètre carré, liée à l'évolution des états de surface ;
- la nutrition hydrique et minérale estimée par exemple pour cette dernière par les indices de nutrition ;
- l'évaluation de la colonisation racinaire ;
- la mesure de la disponibilité des élé-

ments minéraux par analyse chimique ;

- l'état sanitaire, les zones de carence ou de toxicité ;
- l'état de ressuyage en surface : en effet l'infiltration et la circulation de l'eau peuvent être ralenties par réduction de la porosité. Les drains marquent dans les parcelles acides drainées ;
- la porosité due à l'activité biologique (vers de terre, ...) et à l'évolution des débris végétaux, plus rapide ;
- la nature des adventices ou la composition botanique des prairies.

Certaines de ces observations sont primordiales (développement racinaire, évolution de la structure (battance et prise en masse) dans les situations à risques (sols acides sableux, sols limoneux sujets

à dégradation de structure, sols hydromorphes ou non...).

Mais les conditions climatiques peuvent masquer les manifestations des effets du chaulage.

Les effets du chaulage ne sont pas toujours visibles

Les répercussions du chaulage sur les comportements du système sol-plante, au champ, sont très dépendantes des conditions de production.

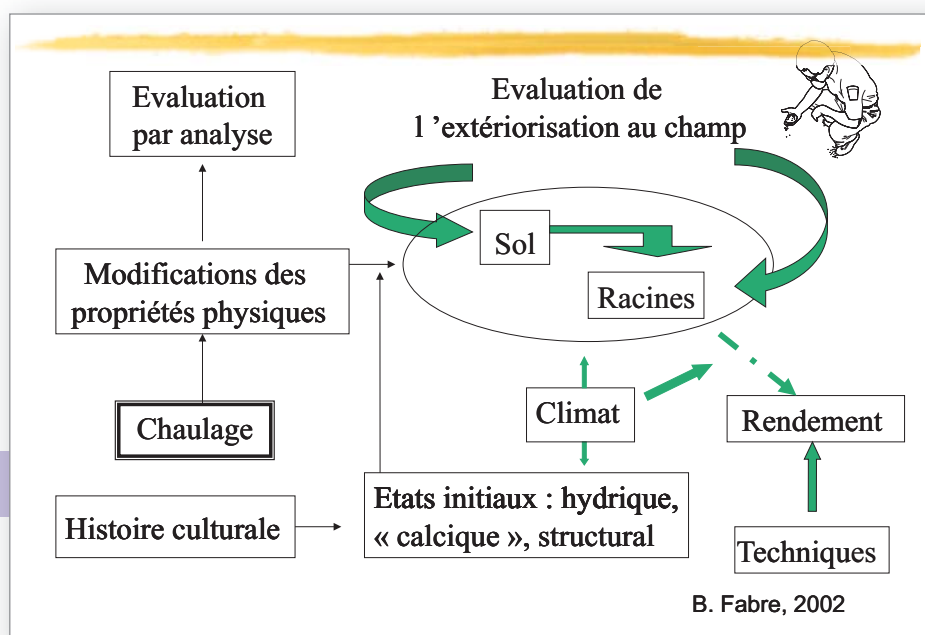
Fabre et Kockmann (1987) ont mis en évidence que l'impact du chaulage sur la battance, la prise en masse et la praticabilité du terrain varie en amplitude selon la pluviosité, le fonctionnement hydrique du sol et l'état du profil cultural au semis.

Ainsi, les effets indirects du chaulage ne se manifestent au champ que dans cer-

taines conditions (Fabre 2001), en particulier :

- le climat : selon que la pluviosité est forte ou faible, le chaulage aura une influence sur la battance ;
- l'état structural initial : un lit de semences trop affiné subira plus rapidement des excès d'eau s'il n'est pas chaulé ;
- l'état hydrique du sol ;
- le statut acido-basique initial ;
- les conduites des autres techniques comme la fertilisation azotée.

Figure 4.8
Conditions d'extériorisation des effets physiques.



Les symptômes de déficience du fonctionnement du peuplement liés à l'acidification apparaissent souvent par taches plus ou moins grandes dans les parcelles. Ces révélateurs des effets du chaulage peuvent devenir des indicateurs sur la nécessité de chauler, au même titre que le marquage des drains sur la culture, indiquant des difficultés de percolation de l'eau.

Par exemple, l'amélioration de la flore des prairies constitue le premier élément de décision d'éleveurs du Charolais.

Ils chaulent donc en priorité les implantations de prairie, pour mieux faire démarrer le trèfle et les prairies humides pour restaurer la qualité de la flore (diminution des espèces de milieux humides moins productives).

Les coûts et la facilité de mise en œuvre des techniques

Les modifications des conditions de nutrition minérale et hydrique permettent des ajustements de la fertilisation ou de l'irrigation. De même, le développement de certaines maladies peut être modifié par l'acidité du sol et donc conduire à des politiques de protection adaptées (désherbage, hernie des crucifères, ...).

Par ailleurs, l'amélioration de la perméabilité du sol joue sur la praticabilité du terrain et augmente le nombre de jours disponibles pour réaliser les travaux aratoires sans gêner la structure. Ceci aura aussi une influence sur l'organisation du travail dans l'exploitation et sur le choix des équipements. La modélisation des effets du chaulage sur les états hydriques du sol en particulier, pourrait être très utile.

La prise en compte de cet aspect des effets du chaulage est encore difficile du fait d'un manque de références.

Les conséquences sur l'environnement

Aujourd'hui, l'évaluation des conséquences du chaulage sur l'environnement n'est pas faite.

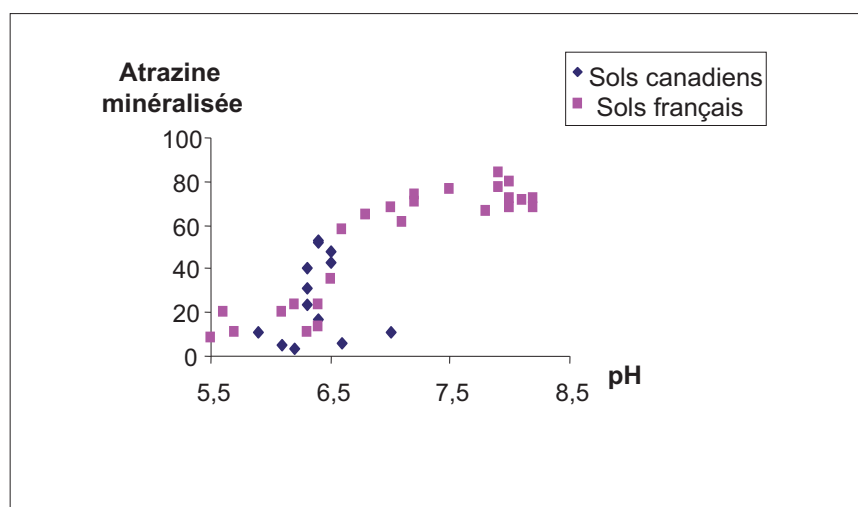
Pourtant,

- Le chaulage diminue la solubilité de la plupart des éléments, donc leur transfert vers les eaux de surface et de profondeur. L'insolubilisation de l'aluminium et des éléments traces métalliques tels Cd, Zn, Cu peut limiter les effets négatifs sur les eaux, avec des conséquences fortes sur la faune en particulier. L'apport d'amendements basiques calciques peut permettre la réhabilitation des sols pollués.
- La dégradation des molécules organiques d'origine anthropique peut être influencée par le pH du sol. Houot et al., (2000) ont montré que celui-ci était la variable la plus liée à la minéralisation de l'atrazine au cours de tests d'incubation (figure 4.9).

Les impacts du chaulage sur l'érosion (figure 4.10), la dynamique de l'eau et de l'azote, l'insolubilisation des éléments traces métalliques peuvent modifier les répercussions des pratiques agricoles sur l'environnement.

Leurs conséquences mériteraient d'être évaluées à l'échelle soit de la parcelle, soit d'un bassin versant.

Minéralisation de l'atrazine en fonction du pH



Houot et al. 2000

Figure 4.9

Minéralisation de l'atrazine en fonction du pH.

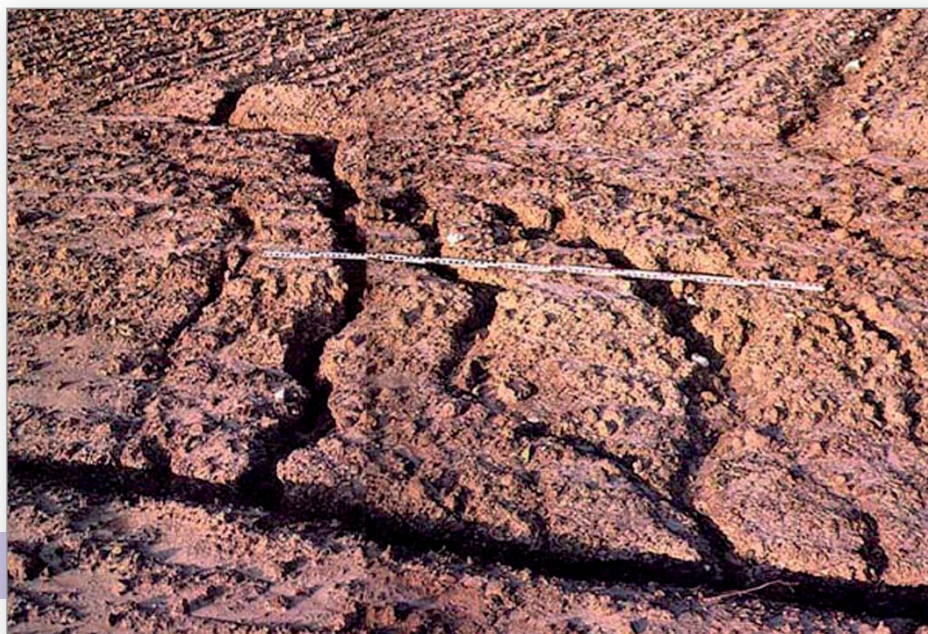


Figure 4.10

Dégâts d'érosion.

Le chaulage intervient sur l'état du sol dans de nombreux processus de la production agricole.

La mesure de ces effets est difficile car elle est en interaction avec les techniques culturales et le fonctionnement du sol. Il conviendrait donc que le statut acido-basique et ses modifications par le chaulage soient intégrés dans l'interprétation du

fonctionnement du sol, touchant l'azote, le phosphore, ou la dynamique de ressuyage des terres, comme dans l'analyse des risques de maladies ou la mise au point d'une stratégie de protection intégrée. Les cahiers des charges liés à la protection de l'environnement, ou à l'agriculture raisonnée par exemple, devraient mentionner le chaulage comme une pratique d'amélioration et de conservation du sol.

Quelles sont les observations et mesures utiles ?

On ne peut pas se contenter de mesures analytiques ou de rendement pour interpréter un essai chaulage, ni se passer d'hypothèses, variables selon les risques que l'on veut éviter. Il est nécessaire que les indicateurs soient hiérarchisés selon les situations et les types de sol, ce qui demande un effort de théorisation.

Dans les sols limoneux, on privilégiera l'observation des états du sol en surface et en profondeur qui ont des conséquences sur l'installation du peuplement, le fonctionnement racinaire et la nutrition minérale.

Dans les sols hydromorphes, c'est la dyna-

mique de l'eau et ses conséquences qui seront les révélateurs prioritaires.

Après le chaulage de redressement d'un sol très acide, le suivi de la nutrition minérale (particulièrement P et oligo éléments) est primordial.

Selon les hypothèses formulées pour étudier les effets du chaulage, les mesures et observations différeront.

Du fait de la variabilité climatique et des fluctuations de l'état acido-basique du sol, les expérimentations sur le chaulage doivent avoir un caractère pluriannuel.

Des indicateurs d'effets à établir

L'approche des effets du chaulage doit se faire d'une manière globale, en distinguant les effets directs (sur le sol et la solution du sol) des effets indirects (sur les propriétés).

Il faut prendre en compte les interactions avec les autres techniques culturales.

L'étude de l'élaboration du rendement, en particulier la phase germination-levée, peut mettre en évidence le rôle du chaulage dans l'amélioration des propriétés physiques du sol.

Ces approches ont des conséquences pratiques :

- Pour les expérimentations, observer les états intermédiaires. Par exemple, le nombre de pieds par m², l'indice pa-

thologique de la hernie dans les dispositifs avec colza, le système racinaire, etc.

- Pour le conseil et l'aide à la décision, communiquer sur les états qui sont favorables ou défavorables à la production. Par exemple, un pH inférieur à 6 favorise le développement de la hernie du chou dans les rotations courtes avec colza ou chou-fleur.

Les systèmes de culture plus ou moins dégradants améliorent ou détériorent les états du sol.

Préciser le domaine de validité des résultats obtenus avec différents amendements basiques. Leur efficacité est liée à des sols, climats et systèmes de cultures bien déterminés.

Répercussions d'un apport d'amendement basique.

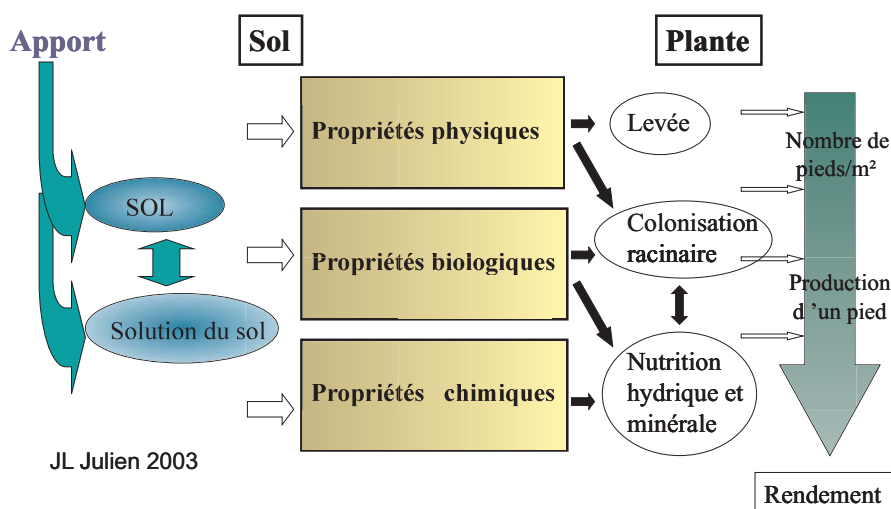


Figure 1.5

Répercussions d'un apport de bases.

Nous donnons ci-après, une liste non exhaustive de différentes mesures utiles pour analyser les effets du chaulage et caler des références ;

Sur le sol :**Physique du sol***Propriétés :*

- Test de percolation (Hénin et al, 1969)
- Vitesse de ressuyage (mesures d'humidité ou changement de couleur des crêtes de labour) (Cerf et al, 1998)

Effets sur la structure

- Profil cultural, (entre autres, % de mottes Delta dans les zones du profil cultural en dehors des passages de roues, (H5L3), modes d'assemblage des mottes en L3). Pour plus de détails, voir Gautronneau, Manichon, 1987, Le guide méthodique du profil cultural,
- Indice de battance, Dmin (Diamètre de la plus petite motte discernable) (Boiffin, 1990)
- Test de perméabilité

Chimie du sol

CEC Metson et effective, teneurs en Al, Ca, Mg, K, Na échangeables, pH (eau, KCl)
 P_2O_5 disponible (méthodes diverses), Oligo-éléments

Biologie du sol

Vers de terre, (protocole Fayolle Gautronneau, 1998 + NF ISO 236 11-1, juin 2006)
 Biomasse microbienne par fumigation, (Chaussod, 1993, + NF ISO 14240-2, 1997)

Respiration microbienne

Potentiel infectieux Mycorhizes, (protocole Plenchette, 1989)

Test de minéralisation du C et de N, (Chaussod, 1993).

Norme minéralisation du C et de N (NF X 44-163).

Indices pathologiques et Potentiel infectieux des maladies telluriques (Davet, 1996)

Sur les cultures

Nombre de pieds par m^2 ,

Enracinement sur une grille (de maille 1 cm^2) en notant présence et absence sur 2 m de large et la profondeur d'enracinement,

Rendement et ses composantes,

Teneurs en N, P, K et carences ou toxicités éventuelles en oligo-éléments,

Calcul des indices de nutrition N, P; K,

Types d'adventices,

Composition botanique.

Sur le système de culture et d'exploitation

Succession de cultures, mode de travail du sol,

Dates d'intervention selon l'état hydrique du sol,

Doses et produits utilisés,

Marges prenant en compte tous les effets liés au chaulage.

Conclusion

Pour construire un conseil de chaulage, il faut hiérarchiser les risques encourus et choisir les bons indicateurs d'effets.

Les effets d'un apport d'amendement calcique basique dépendent étroitement du milieu (sol et climat), de l'histoire culturale et du système de culture. Dans la plupart des cas, les effets attendus sont indirects et jouent plus sur les conditions d'élaborations du rendement.

L'interprétation des résultats en termes de

variation du rendement est difficile du fait de la multiplicité des effets d'un apport d'amendement basique calcique (base et Calcium) et des interactions existantes. Une réflexion agronomique globale sur le choix des indicateurs les plus pertinents permettra de valoriser au mieux les études entreprises

Le chaulage est en interaction avec les systèmes de cultures et les différentes techniques appliquées sur la parcelle qui ont une incidence sur l'organisation du tra-

vail comme l'augmentation des jours disponibles. Mettre en place un conseil demandera donc d'avoir une bonne idée du fonctionnement de l'exploitation et du milieu afin de prévoir la gestion des techniques de production et chiffrer les gains liés au chaulage.

Les différents fertilisants utilisés entraînent une acidification et par conséquent des pertes de bases variables. **Les politiques d'entretien du statut acido-basique seront adaptées selon les pratiques de fertilisation et les systèmes de culture.**

Dans les protocoles à mettre en place pour la recherche de références à partir d'études pluriannuelles, les conduites des parcelles chaulées et non chaulées doivent éventuellement être adaptées. En effet la conduite des cultures dans ces essais ne peut être, toutes choses égales par ailleurs, réduite à la suppression de tous les facteurs limitants autres que celui étudié.

Les effets du chaulage qui se manifestent sur un ensemble de conditions du milieu ne

peuvent pas être mis en évidence si par ailleurs des techniques qui suppléent aux conditions défavorables que le chaulage est susceptible d'améliorer sont utilisées sur les parcelles non chaulées.

L'amélioration de la nutrition azotée par le chaulage ne peut être mesurée que si la fertilisation pratiquée est sub-limitante.

La modification de la vitesse de ressuyage peut jouer sur les dates d'intervention dans les parcelles.

Des suivis de **parcelles-guide** dans des exploitations, doivent être mis en œuvre pour évaluer l'intérêt du chaulage allant jusqu'à son aspect économique.

Enfin des **modèles** intégrant les modifications liées à la pratique du chaulage pourraient être utiles à la généralisation de résultats obtenus dans des conditions particulières. Ils pourraient impacter par exemple le fonctionnement hydrique du sol, le nombre de jours disponibles, la dynamique de l'azote dans le système sol plante, etc. ■

Bibliographie

- Cerf M., Papy F., Angevin F., 1998 : *Are farmers expert at identifying workable days for tillage ?*, Agronomie, 18, 45-59.
- Chaussod R., Houot S., 1993 : *La biomasse microbienne des sols : Perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols.*, in *Matières organiques et agriculture*, 5^{ème} forum de la fertilisation raisonnée, Decroux et Ignazi éditeurs., 17-26.
- Delannoy I., 1996 : *Approche méthodologique pour une synthèse des essais chaulage*, MFE ISARA, 58 pages + annexes.
- Deneux-Mustin et al., 2003 : *Mobilité et transferts racinaire des éléments en traces : Influence des micro-organismes du sol*, Tec Doc, Lavoisier, paris, 280 pages
- Duval Y., Boiffin J., 1993 : *La dynamique de formation des croûtes de battance*, in *L'implantation de la betterave industrielle*, Colloque n°67, Inra., 67-85.
- Fabre B., Kockmann F., 1987 : *Relance du chaulage en Bresse Chalonnaise : mise en place d'un protocole d'étude et premiers résultats*, Bulletin technique d'information, n°416, 3-19.
- Fardeau JC, Staimesse JP, 1995 : *Fertilisation phosphatée ; efficacité du phosphore d'un amendement calcique phosphaté sidérurgique*, C. R. Acad. Agric. Fr., 1995,81, n°1, 189-202.
- Fayolle L., Gautronneau Y., 1998 : *Détermination des peuplements et de l'activité lombricienne en grandes cultures à l'aide du profil cultural*, Echo MO n°14, 3-4.
- Gautronneau Y., Manichon H., 1987 : *Guide méthodique du profil cultural*, ISARA-CEREF, Lyon, 71 pages.
- Giller K. et al., 1998 : *Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soil : a review*, Soil Biol. Biochem., 30, 10/11, 1389-1414.
- Hénin S., Gras R., Monnier G., 1969 : *Le profil cultural*, 2^{de} édition, Masson, Paris, 332 pages.
- Houot S. et al., 2000 : *Dependence of accelerated degradation of atrazine on soil pH in French and Canadian soils*, Soil biology and biochemistry, 32,615-625.
- Mathieu C., Pielain F., 1998 : *Analyse physique des sols*, Lavoisier, Paris, 275 pages
- Plenchette C., 1989 : *Potentiel infectieux mycorhizogène du sol des parcelles du dispositif DEHERAIN*, Cr. Acad. Agric. Fr., vol.75, n°4, 23-29.

La gestion du chaulage basée sur l'analyse de terre

Prélèvements, Indicateurs et Variabilité

Introduction

Toute analyse de terre doit respecter certaines règles de prélèvements, mais l'évaluation du statut acido basique nécessite de bien respecter la méthodologie de prélèvement du fait de la grande variabilité du pH des sols.

La détermination du pH est normalisée (NF ISO 10 390).

Le présent document fait toujours référence au pH_{eau} dont la mesure se fait dans une suspension d'un volume minimum de terre de 5 ml pour 5 fois son volume d'eau déminéralisée.

Règles à respecter pour le prélèvement de terre

Les recommandations à suivre¹, dans le cas des grandes cultures, sont :

- Échantillonner sur une **zone homogène**, correspondant à l'unité de sol la plus représentée en surface dans la parcelle (si la parcelle est grande avec des unités de sol supérieures à 5 ha, il est conseillé de réaliser un prélèvement par unité de sol).
- Sur cette unité de sol à priori homogène, **l'échantillon sera constitué d'une quinzaine de carottes**. En effet Beaux et Plet (1980) ont montré que la variabilité des résultats augmente du simple au double quand on passe de 16 à 4 carottes par échantillon (Figure 5.1).
- **Le prélèvement doit être localisé** (schéma parcellaire ou repérage GPS) pour permettre de revenir au même endroit dans un objectif de suivi analytique pluriannuel. Cela permet de limiter l'impact de la variabilité spatiale sur le suivi du pH.
- **La profondeur de prélèvement doit être maîtrisée** car le pH peut varier fortement avec la profondeur. C'est notamment le fait des situations avec travail du sol

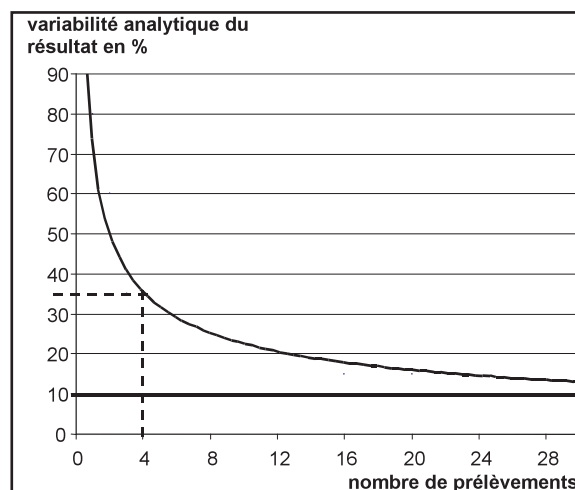


Figure 5.1 : Variation du résultat selon le nombre de prélèvements élémentaires.

sans labour ou en semis direct. Dans ce cas, il semble judicieux de limiter la profondeur des prélèvements à la couche de surface (0-10), la plus influencée par les facteurs d'acidification ou d'alcalinisation. La connaissance du pH dans les couches sous-jacentes demeure toutefois une information utile.

- La valeur du pH étant soumise à des variations interannuelles pouvant aller jusqu'à un point de pH, la **période de prélèvement doit si possible être toujours la même** afin de pouvoir comparer les analyses dans le temps.

¹On pourra se référer à la norme NF X 31-100 ou NF ISO FDIS 10381-1 ou à l'arrêté sur l'épandage des boues de station d'épuration des eaux usées (STEP) du 8/01/98 concernant le prélèvement de terre et l'échantillonnage.

Dans le cas des prairies permanentes ou de longue durée, il est préconisé de prélever sur 0-10 cm, voire moins (0-5 cm), couche dans laquelle se situe l'essentiel des racines des plantes lors du redémarrage de la végétation en fin d'hiver.

La méthode de prélèvement a également son importance. Les 15 carottes nécessaires à la constitution d'un échantillon représentatif doivent être réalisées dans un cercle d'environ 15 mètres de diamètre (environ 200 m²), dont le centre est géo-référencé, (protocole mis au point par Beaux et Plet, 1980). Sur des parcelles très hétérogènes, les prélèvements de terre réalisés à partir de carottages effectués diagonalement dans la parcelle risquent de mélanger dans un même échantillon de terre des types de sol différents. Cette méthode est donc à éviter si possible.

Les paramètres analytiques (pH_{eau}, CEC, Cations échangeables, Calcaire total s'il y a lieu) qui permettent de déterminer le SAB d'un sol doivent nécessairement être mesurés sur un échantillon prélevé dans le respect de ces règles, garantissant ainsi la qualité du conseil final.

En plus de la technique de prélèvement permettant de garantir la représentativité de l'échantillon, la fiabilité des résultats dépend également de la précision du labora-

toire d'analyses. Pour la mesure du SAB, il est recommandé de confier l'échantillon à un laboratoire accrédité COFRAC ou agréé par le Ministère de l'Agriculture (France).

Cas particuliers :

Le prélèvement du sous-sol (30-60 cm)

En grande culture, ce prélèvement apporte des informations intéressantes pour adapter les pratiques culturales.

Dans certains sols, la teneur en magnésium apparaît faible sur l'horizon labouré alors qu'en sous-sol la teneur en cet élément est satisfaisante. En cas de nécessité de chaulage, le choix du type d'amendement basique s'orientera alors préférentiellement sur un produit non magnésien.

Parcelles présentant des zones à problèmes

Dans ce type de situation, l'idéal est de réaliser deux prélèvements : un prélèvement dans la (ou les) zone(s) à problèmes, un autre dans la (ou les) zones saines avoisinantes.

Le prélèvement différentiel est un bon moyen de s'affranchir de la variabilité naturelle importante de beaucoup de parcelles pour diagnostiquer un problème qu'une analyse unique ne révélerait pas.



Figure 5.2

À gauche, vue générale de la zone à problèmes, à droite, pied de blé à racines atrophiées.

Tableau 5.1

Résultats des
deux analyses
de terre,
(EUROPE SOLS
avril 2000).

Analyse de terre	Zone saine	Zone problème
Argile en %	18,2	16,1
CEC _{Metson} en cmol ⁺ /kg	9,3	7,4
pH _{eau}	6,7	5,2
pH _{KCl}	5,7	4,1
CaO échangeable en mg/kg	1661	665
Ca / CEC en %	64	32
Cu échangeable en mg/kg Extractif : oxalate d'ammonium	17	39
Mn échangeable en mg/kg Extractif : oxalate d'ammonium	7,7	24,1

Tableau 5.2

Résultats des
deux analyses
de teneurs en
minéraux de
plantes entières.

Analyse de végétaux (blé dur stade 2 nœuds)		
	Zone saine	Zone problème
Fer (Fe en mg/kg)	60	204
Manganèse (Mn en mg/kg)	<u>70</u>	<u>232</u>
Zinc (Zn en mg/kg)	42	73
Cuivre (Cu en mg/kg)	<u>5,6</u>	<u>22,4</u>

Prenons l'exemple d'une parcelle de blé dur sur un sol limoneux battant de la région toulousaine, dans laquelle nous avons observé une zone où le blé jaunit au stade 2 nœuds et ne se développe pas début avril (Figure 5.2).

Deux prélèvements de terre ont été réalisés, l'un en zone saine, l'autre en zone « malade » (Tableau 5.1). Des prélèvements de plantes pour analyse minérale ont été réalisés le même jour dans les deux zones (Tableau 5.2).

Une partie de la parcelle correspond à une ancienne vigne (plus de 50 ans).

Les résultats analytiques font apparaître que le problème observé sur blé dur est lié à une toxicité multiple :

Celle très probable de l'aluminium, du manganèse, peut-être du cuivre dont les disponibilités ont été accrues par l'acidité du sol dans la zone à problème.

Ce cuivre en excès provient des traitements phytosanitaires opérés dans le passé sur la vigne.

Les teneurs élevées en minéraux des plantes dans la zone « malade » sont dues à leur plus grande disponibilité dans le sol en raison de son acidité, et surtout à la forte réduction de la croissance des plantes, probablement due à la toxicité de l'aluminium.

Les indicateurs du statut acido basique (SAB)

Le pH avec la CEC et la teneur en aluminium échangeable du sol constituent les indicateurs de base pour caractériser l'état acido-basique d'un sol et permettre la définition d'une stratégie de correction.

D'autres indicateurs qui leur sont plus ou moins liés (Taux de saturation de la CEC par les cations d'acidité négligeable, taux de saturation par le calcium, CEC effective...) complètent le diagnostic (Tableau 5.3).

Le pH a l'inconvénient de présenter des variations intra annuelles importantes (voir la variabilité des indicateurs et la figure 5.3) qui sont un handicap pour l'interprétation.

L'indicateur S/CEC est plus stable, même s'il est analytiquement plus éloigné de l'acidité que la mesure du pH_{eau} .

Le pH_{eau} mesuré au laboratoire est une mesure conventionnelle qui, du fait des conditions de détermination, donne un résultat supérieur au pH de la solution du sol in situ.

Les normes d'interprétation des analyses en tiennent compte.

D'autres critères déduits de l'observation de la parcelle (composition botanique, circulation de l'eau et état structural tant en surface qu'en profondeur, ...), peuvent être également utilisés.

Indicateur	Description	Avantages	Limites	Explications agronomiques
pH_{eau}	Mesure de l'acidité d'une suspension de terre dans de l'eau (rapport terre/eau normalisé 1/5 en volume)	Mesure simple, peu onéreuse ; Nombreuses références agronomiques	Fortes variations dans l'année ; Plus élevé l'hiver que l'été (1)	Plus le pH est bas, plus la concentration des ions H^+ et aluminium dans la solution du sol est élevée (risques de toxicité...)
pH_{KCl}	Idem pH_{eau} mais avec une solution molaire de chlorure de potassium	Mesure simple, peu onéreuse	Fortes variations dans l'année comme le pH_{eau}	Les ions K^+ déplacent H^+ et Al^{3+} échangeables vers la solution du sol : c'est une image de l'acidité d'échange (2)
$pH_{\text{eau}} - pH_{KCl}$	Simple écart	Peut indiquer l'urgence du chaulage (3)	Attention aux variations des déterminations des 2 pH de base	Peut indiquer la part, sur le complexe adsorbant, des ions responsables de l'acidité (3)
CEC_{Metson}	Capacité d'Echange de Cations, extraction à pH 7 par l'acétate d'ammonium	Méthode de référence en France	C'est une CEC potentielle, rarement la CEC réelle	Mesure les charges négatives du sol disponibles à pH=7
S/CEC ou taux de saturation	$\frac{(Ca + Mg + K + Na) \times 100}{CEC_{\text{Metson}}}$ (5)	Corrélié avec le pH_{eau} (6).	Entretient l'idée fausse de l'effet basique de ces 4 cations (acides de force négligeable)	Mesure la part des charges négatives (à pH=7) occupée par les cations d'acidité négligeable
Ca/CEC ou taux de saturation en calcium	$\frac{Ca \times 100}{CEC_{\text{Metson}}}$ (5)	Idem S/CEC, mais limité au calcium.	Idem ci-dessus	Mesure la part occupée par le calcium, très « flocculant »
CEC effective (Cobaltihexamine ou $BaCl_2$)	Capacité d'Echange de Cations déterminée au pH du sol	Méthode simple	La CEC effective varie avec le pH (4) Elle ne peut pas servir au calcul du besoin en bases	Mesure la charge négative utile pour l'échange de cations (CEC effective)
Aluminium échangeable	Mesure conventionnelle de l'aluminium échangeable	Un des indicateurs du risque de toxicité aluminique	Ne permet pas de quantifier le besoin en unités de valeur neutralisante (6)	Reflète la teneur des ions Al^{3+} en solution qui peuvent conduire à une toxicité
Acidité d'échange	Somme des ions aluminium échangeables et des H^+	Applications surtout pédogénétiques	Peu pratiqué par les laboratoires	Mesure de la quantité d'ions échangeables d'acidité notable.

Tableau 5.3 : Indicateurs analytiques du statut acido-basique des sols.

(1) Variations dépendant de l'activité biologique, des précipitations, de la fertilisation...

(2) Dans le cas de sols acides ayant une CEC effective supérieure à la Capacité d'Echange d'Anions.

(3) Sauf sols très dégradés ou très acides.

(4) Il est possible de ramener les résultats d'une méthode de mesure de la CEC à une autre ou à un pH donné.

(5) Cations et CEC exprimés en centimoles de charge par kg (même valeur numérique que meq/100g utilisé auparavant).

(6) Anciennement on parlait de Besoin en « chaux ».

Le tableau 5.4 donne quelques descripteurs et leurs valeurs selon le statut acido-basique du sol.

Ces différents paramètres seront utilisés plus loin pour le raisonnement du chaulage selon les différents systèmes de culture.

Dans la deuxième partie du tableau, on indique les questions spécifiques importantes que pose le statut acido-basique du sol sur les différentes caractéristiques de la fertilité.

Indicateurs et caractéristiques <i>Les bornes indiquées sont des valeurs indicatives.</i>														
Domaine	très acide		acide		peu acide		neutre							
pH _{eau} (1)		5,5		5,8		6,5		7,2						
S/CEC _{Metson} (2)		55		70		100		150						
Ca/CEC _{Metson} (*)		45		55		85		130						
S/CEC effective (2)		80		100		100		100						
Ca/CEC effective (*)		70		80		90		>90						
Garniture ionique de la CEC effective	Ions de l'aluminium dominants		Ca Mg K Na dominants. Al surtout complexé		Saturé par Ca Mg K et Na Aluminium complexé et précipité									
Solution du sol cations dominants	Aluminium dominant (Ca Mg K)		Ca Mg K Na Peu d'aluminium		Ca Mg K Na (Ca très variable). Absence d'aluminium									
Calcaire total	Absence					Présence								
Questions spécifiques posées par le statut acido-basique du sol	Sensibilité des espèces, voire des cultivars, au pH, aux carences...													
	Toxicité aluminique Carence Ca (voire Mg)													
	Complexation de l'aluminium par la M.O.													
	Micro faune et flore du sol													
	Propriétés physiques du sol (stabilité structurale...)													
	Propriétés chimiques du sol (K Mg Cu B...)													
							Stabilité structurale de l'horizon de surface							

Tableau 5.4 : Statut acido-basique des sols et exemples de valeur de différents indicateurs.

* : hors sol particulier (magnésien...).

(1) pH_{eau} : pH normalisé de la suspension terre/eau.

(2) S : Somme des cations Ca Mg K Na, extraits par la même méthode que la CEC, expressions en cmol/kg.

CEC effective : CEC au pH du sol (cobaltihexamine ou BaCl₂).

CEC_{Metson} : CEC standardisée à pH 7.

Les variabilités du pH

Variabilité saisonnière

Il faut noter que le pH d'un sol peut varier fortement dans l'année, les conditions pédoclimatiques jouant sur l'amplitude de cette variation. L'abaissement saisonnier

du pH d'un sol correspond aux périodes à forte activité biologique. Ainsi, le pH est souvent plus élevé en hiver qu'au printemps et en été, l'écart pouvant parfois dépasser un point (tableau 5.5, figure 5.3). L'amplitude des extrêmes est d'autant plus forte que le pouvoir tampon du sol est faible.

pH eau	Hiver	Print.	Été	Autom.	Écart
Moyenne de sols légers (2001) ($CEC_{Metson} < 7,0 \text{ cmol}^+ / \text{kg}$) (nombre d'échantillons)	6,72 (13)	6,10 (6)	5,70 (5)	5,90 (22)	1,02
Moyenne de sols « intermédiaires » (2001) $7 \text{ cmol}^+/\text{kg} < CEC_{Metson} < 20 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ (nombre d'échantillons)	6,14 (54)	5,72 (28)	5,42 (10)	6,04 (39)	0,72
Moyenne de sols lourds (1992 à 2003) ($CEC_{Metson} > 20 \text{ cmol}^+/\text{kg}$) (nombre d'échantillons)	6,48 (54)	6,41 (28)	6,01 (41)	6,30 (119)	0,47

Tableau 5.5 : Exemples de variations du pH pour différents types de sols (données MEAC).

La variabilité saisonnière du pH est à mettre en parallèle avec les conditions climatiques (température, (figure 5.3) et pluviométrie) qui conditionnent les mécanismes générant de l'acidité.

Les pratiques culturales influent également sur le pH (apport d'engrais et amendements organiques), tout comme la présence des

cultures (effet acidifiant des engrais ammoniacaux et uréiques).

Ces quelques données montrent que la variabilité saisonnière du pH mesurée sur des essais correspond à une tendance générale. On constate que l'amplitude été - hiver est la plus élevée pour les sols légers à faible pouvoir tampon.

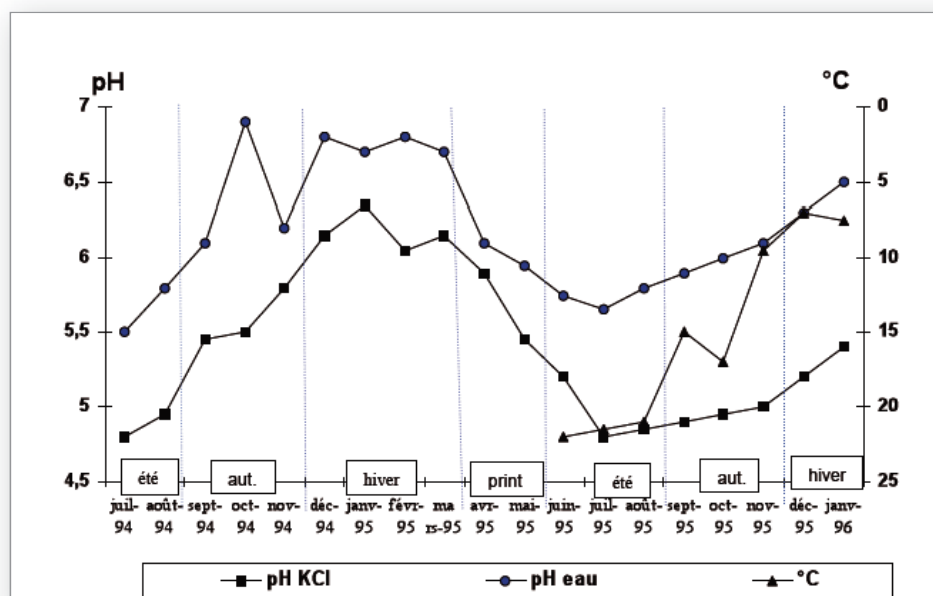


Figure 5.3

Variations saisonnières du pH et température en sol léger (Charente Maritime).

Du fait de la variabilité saisonnière du pH, il convient, pour un suivi du SAB d'une parcelle sur plusieurs années, de prélever sur la même zone (cercle de 15 m de diamètre) et à la même époque.

Pour une comparaison fiable, il est même recommandé de pratiquer les prélèvements après la même culture de la rotation, comme dans le cas d'un suivi de fertilité chimique (P_2O_5 , K_2O ,...).

L'interprétation de la valeur du pH doit aussi prendre en compte ces variations saisonnières : pour une même valeur de pH de 6, le conseil ne pourra pas être le même pour une mesure réalisée en fin d'hiver ou au début de l'été.

Variabilité du pH et risque de toxicité aluminique

La toxicité aluminique apparaît lorsque les valeurs de pH descendent en dessous de 5,5, valeur variable selon les types de sols et de culture (par exemple 5,8 pour l'orge), et selon la date de prélèvement.

La période de plus grande sensibilité des plantes à la toxicité de l'aluminium se situant au cours des phases juvéniles de leur développement, c'est donc le pH du sol au moment de l'implantation de la culture qu'il faudrait contrôler pour faire face à ce risque (figure 5.4).

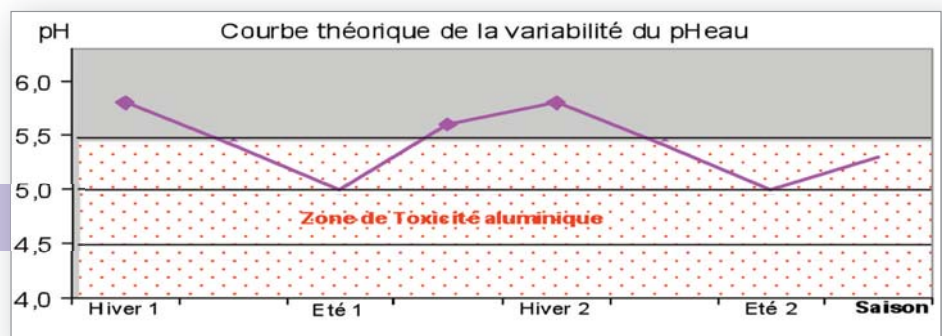


Figure 5.4

Variation du pH et toxicité aluminique.

Avant de décider qu'un chaulage n'est pas nécessaire, il faut intégrer la variation saisonnière et prendre une certaine marge de sécurité par rapport à la valeur seuil. Pour limiter les risques de cette toxicité qui entraîne généralement une mortalité des plantules à la levée, la connaissance régionale des sols (notamment la teneur en aluminium échangeable) est à prendre en considération.

Un pH_{eau} de 5,8 en fin d'hiver peut descendre en été au voisinage de 5,0, valeur qui peut entraîner une toxicité aluminique.

Variabilités spatiales du pH

La technique de prélèvement doit intégrer au mieux la variabilité spatiale du pH. Il faut différencier variabilité horizontale (à petite et grande échelle) et variabilité verticale (suivant la profondeur des carottages).

● Variabilité horizontale du pH

- Sur une petite surface (400 m²)

Sur un sol de CEC faible (CEC Metson = 7 cmol⁺ / kg), dans un carré de 20 m sur 20 m, dans une expérimentation, la Sté MEAC a mesuré à la même date le pH sur une maille de 5 m de côté, en n'effectuant qu'un seul carottage sur la profondeur de labour. Le pH varie de 5,1 à 6,3.

- Sur une grande surface (40 ha)

La figure 5.5 (*Europe-Sols / Géosys, 1998*) représente les courbes iso-pH d'une parcelle de 43 ha dans le Cher (18). Chacun des prélèvements réalisés (soit 3 prélèvements par ha), est constitué de 16 carottages sur une profondeur de 0-20 cm effectués au hasard dans un cercle de 7,5 m de rayon, (le centre de ce cercle étant géo-référencé au DGPS) ; le pH varie de 6,0 à 8,0.

● Variabilité verticale du pH

- Dans un sol labouré régulièrement :
Les gradients verticaux de pH au sein de la couche travaillée sont peu importants (Tableau 5.6).

EC _{Metson} Données	0-5 cm	0-10 cm	0-30 cm	
6 à 8 cmol ⁺ /kg	Essai 1 LCA	5,7	5,6	5,8
	Essai 2 LCA	5,2	5,3	5,4
10 à 15 cmol ⁺ /kg	LDAR 1	7,9	7,8	7,9
	LDAR 2	8,2	8,3	8,3

LCA : Laboratoire Centre Atlantique
LDAR : Station Agronomique de Laon

Tableau 5.6 : Gradients verticaux de pH dans des sols labourés.

Cependant, on peut observer une acidification de surface sur de courtes périodes qui peut induire des difficultés de fonctionnement du peuplement cultivé, en particulier la levée et la croissance de la plantule (voir Chapitre 10, Systèmes betteraviers).

Cette variabilité peut être due à l'activité microbienne et racinaire, mais aussi aux pratiques culturales.

L'apport d'engrais ammoniacaux en surface (Tableau 5.7) provoque une acidification.

	Apport d'Azote avant semis	Prélèvement le 7/06/03	
		0-10 cm	10-25 cm
pH _{eau}	0 N / ha	7,3	6,8
	120 N / ha	6,8	7,3
pH _{KCl}	0 N / ha	6,7	6,5
	120 N / ha	6,2	6,6

Tableau 5.7 : Effet d'un apport d'ammonitrate au semis de la betterave le 20/03/2003 sur la baisse du pH d'un sol limoneux (CEC_{Metson} = 8,2 cmol⁺ / kg) dans le Pas-de-Calais.

Europe-Sols/Sucrierie des Hauts de France.

Ces résultats montrent l'effet acidifiant d'un apport d'engrais azoté en surface (type ammonitrate) qui passe dans les couches plus profondes.

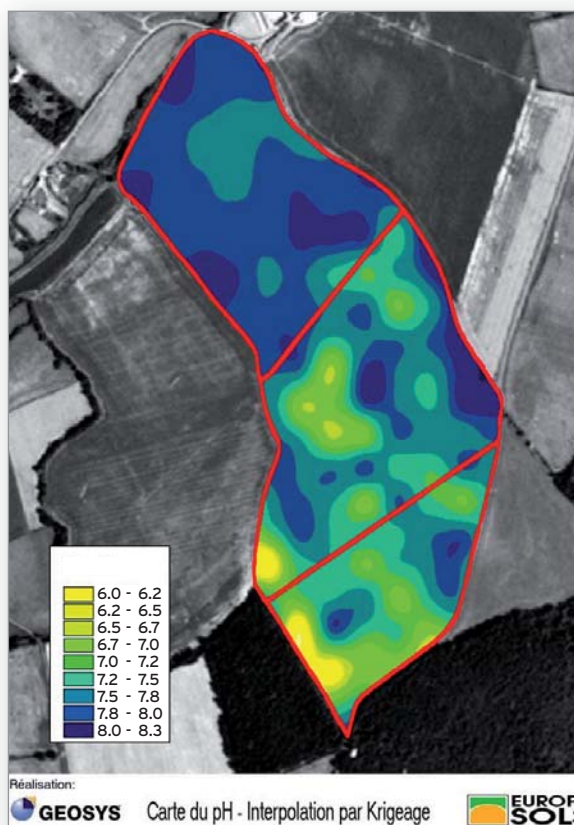


Figure 5.5 : Variabilité horizontale du pH.

- Et pour les techniques culturales sans labour ?

Le pH varie selon un gradient vertical déterminé principalement par les apports d'engrais, d'amendements et la restitution des résidus de cultures qui s'effectuent à la surface du sol. S'y rajoutent les effets induits par l'activité microbienne, importante surtout là où est localisée la matière organique fraîche, et celle imputable aux racines. Leurs effets conjugués peuvent influencer diversement le pH du sol dans la couche inférieure.

Par exemple, la nitrification d'un engrais ammoniacal à la surface du sol contribue à acidifier celle-ci, alors que l'absorption du nitrate en profondeur après son entraînement par lixiviation contribuera au contraire à alcaliniser le sol à ce niveau (tableau 5.8).

	Année 1999 (t+1)		Année 2003 (t+5)	
Profondeur de prélèvement (cm)	0-15	15-30	0-15	15-30
Argile en %	27	29	28	30
Matière organique en %	2,7	2,0	2,6	1,7
pH _{eau}	8,2	8,1	7,4	8,2
pH _{KCl}	7,4	7,3	6,8	7,6

Europe-Sols - Verfeil (31)

Tableau 5.8 : Évolution des caractéristiques du sol selon la profondeur en 4 ans de non labour.

Ces observations sont issues d'une parcelle en monoculture de blé dur avec une inter culture de sarrasin conduite sans labour depuis 1998. Dans ce sol carbonaté, en 4 ans, on constate une acidification de l'horizon 0-15 cm, alors que le pH de l'horizon 15-30 cm reste stable.

Pour ce type de situation, il est intéressant de réaliser un prélèvement sur deux profondeurs (0-15 cm et 15-30 cm) et de suivre attentivement l'évolution du SAB de l'horizon de surface.

Dans le cas de semis direct, sans brassage superficiel du sol, il est intéressant de réaliser un prélèvement de l'horizon 0-5 cm, cet horizon pouvant être plus particulièrement sujet à l'acidification.

- Et dans les sols de prairie ?

L'évolution du pH est fonction de la profondeur du sol et des apports d'amendements ou d'engrais azotés (Figure 5.6) dans une prairie temporaire de longue durée.

On constate que la surface s'acidifie beaucoup et d'autant plus que :

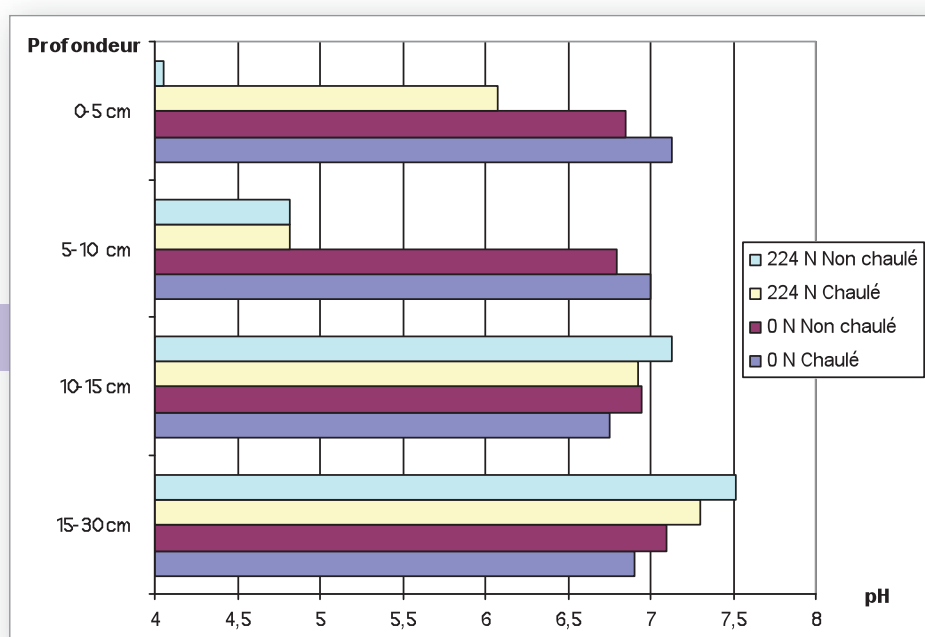
- la fertilisation azotée est élevée sur une longue durée ;

- le chaulage a une action de surface (prairie de brome).

Ces graphiques montrent que l'horizon de surface subit des variations de pH plus prononcées qu'en profondeur.

Figure 5.6

Variabilité verticale du pH mesuré en automne 1994, Parcelle sous Brome, ayant reçu 0 ou 224 kg N/ha, chaulée en 1991.



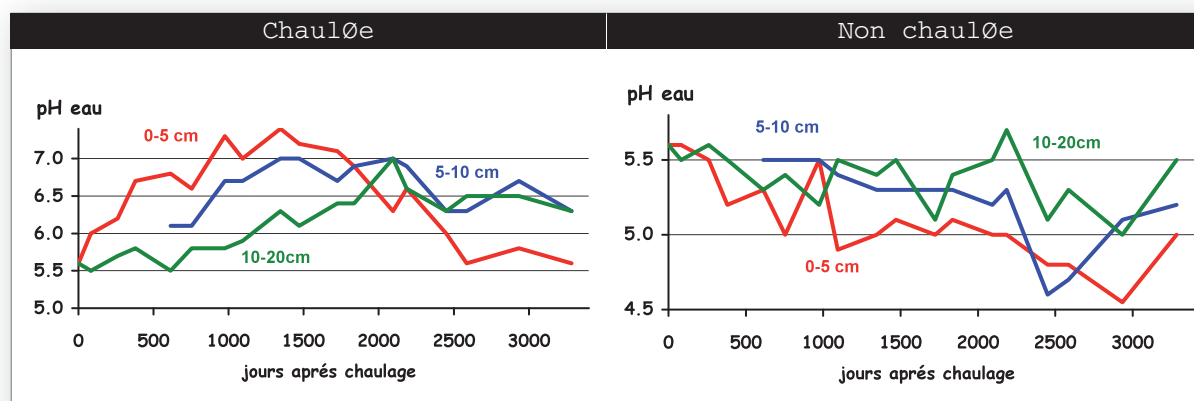


Figure 5.7

Évolution du pH sous prairie permanente chaulée et non chaulée : prairie ayant reçu 346 kg N/ha par an pendant 9 ans, Essai de Padiès (81).

Pour les sols de prairie permanente dont les apports se font en surface, le pH_{eau} présente un gradient vertical en fonction des apports d'amendements et d'azote (Figure 5.7).

Ces graphiques montrent que l'horizon de surface subit des variations de pH plus prononcées qu'en profondeur.

Dans le cas de chaulage, l'horizon 0-5 cm réagit plus rapidement à l'élévation de pH, mais au fil des ans, le pH des horizons inférieurs rattrape celui de l'horizon de surface, qui a tendance à décroître également plus rapidement sous l'effet acidifiant des apports d'azote.

En l'absence de chaulage, l'acidification liée principalement aux apports d'engrais azotés, est importante pour la couche 0-10 cm et peu marquée dans la couche 10-20 cm.

- Peut-on mesurer le pH au champ ?

Il est possible de mesurer le pH des sols au champ avec un pH-mètre, avec une précision inférieure à celle du laboratoire. Celle-ci n'est acceptable et comparable aux valeurs obtenues en laboratoire qu'à condition de respecter le même protocole de mesure (échantillonnage, séchage, broyage, dilution, ...) et d'effectuer un étalonnage des appareils à partir de dosages dans un laboratoire. C'est une approche qui peut être intéressante pour évaluer les variations intra-parcellaires.

Il existe d'autres méthodes de mesures du pH, mais seuls le pH_{eau} et dans une moindre mesure, le pH_{KCl} ont été référencés pour leur interprétation agronomique.

En général, $pH_{\text{eau}} > pH_{\text{CaCl}_2} > pH_{\text{KCl}}$, et les écarts entre ces pH ne sont pas constants.

Conclusion

Le pH n'est pas une valeur stable au cours de l'année.

Ses variations peuvent être importantes tant en surface qu'en profondeur.

Cette variabilité doit être prise en compte quand on interprète des résultats d'analyse de terre, pour un conseil ou pour suivre les évolutions.

De même, l'interprétation du pH doit nécessairement faire intervenir l'époque de prélèvement.

Malgré cette variabilité, le pH est un paramètre analytique essentiel de l'analyse de terre traduisant l'ambiance chimique du sol au moment du prélèvement ■

Besoin En Bases (BEB)

Présentation de la démarche

La détermination du Besoin en Bases (BEB*) résulte d'une démarche rationnelle d'évaluation des besoins à partir d'une analyse de la situation existante et en fonction des objectifs souhaités.

On évalue la situation avec le Statut Acido-Basique (SAB*) du sol en prenant en compte les risques liés à l'acidification.

Ce diagnostic peut être fait à partir des résultats de l'analyse de terre et des observations sur le terrain.

Les risques sont en général liés :

- au système de culture envisagé.
- aux conséquences directes ou indirectes de l'acidité sur la fertilité du sol (toxicité aluminique, état physique du sol, nutrition minérale, activité biologique, maladies telluriques...).

Un statut acido-basique souhaitable est déterminé en fonction de ces risques.

Puis les besoins en bases sont calculés en unités de VN*.

En fonction du SAB, une stratégie de chaulage (choix du produit (chapitre 16) et de ses modalités d'apport) est choisie avec l'agriculteur.

Compte tenu des contraintes de mise en œuvre associées aux critères économiques, l'application des amendements minéraux basiques demande la mise en place d'une optimisation à l'échelle de l'exploitation agricole notamment avec hiérarchisation des risques et identification des parcelles prioritaires.

Une vision dynamique du statut acido basique

Traditionnellement, les notions de redressement ou d'entretien expliquées plus loin sont utilisées pour faciliter les calculs de doses à partir de différents modèles de calcul :

- En redressement, écart entre le statut acido-basique (SAB) souhaité et le SAB actuel, pondéré en général par la masse de terre et son pouvoir tampon.
- En entretien, compensation de l'évolution progressive du SAB suite à différents phénomènes acidifiants.

Aujourd'hui, la meilleure compréhension que l'on a du statut acido basique et de son évolution permet de considérer les choses d'un œil différent avec une vision plus dynamique :

Le SAB résulte d'un équilibre dans le sol entre les flux acidifiants (gain en protons H^+) et les flux alcalinisants (neutralisation des protons H^+ par apport de bases).

On peut donc faire le solde sur une période donnée (l'année par exemple), entre les flux acidifiants et les flux alcalinisants (apports de valeur neutralisante principalement due à la dissolution des amendements basiques).

Si le solde est positif (plus de bases libérées que de H^+ produits), le sol s'alcalinise (son pH augmente).

Si le solde est négatif (plus de H^+ produits que de bases libérées), le sol s'acidifie (son pH diminue).

La valeur neutralisante des produits, mesurée dans l'acide chlorhydrique concentré à chaud à un pH proche de 0 représente une capacité de neutralisation potentielle. Selon le pH du milieu in situ et la réactivité des produits (corrélée à la finesse et l'origine pour les carbonates) ce potentiel s'exprime plus ou moins à une échelle de temps donnée.

Dans un sol acide, la vitesse initiale de dissolution des particules d'amendement est élevée, puis elle décroît au fur et à mesure que le SAB s'élève.

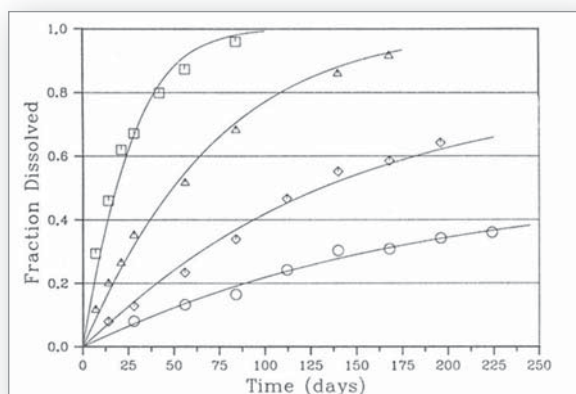


Figure 6.1 : Taux de dissolution des particules en fonction du temps et de la taille des particules :
 ○ = 1.28 mm △ = 0.28 mm
 ◇ = 0.60 mm □ = 0.14 mm

(Figure 6.1, extraite de *Warfinge and Sverdrup, 1989, Modeling limestone dissolution in soils*, données de Elphick, 1955).

Ainsi la question à se poser pour le choix d'un amendement n'est pas seulement de savoir combien de valeur neutralisante (VN) il peut apporter, mais aussi de savoir si dans les conditions de pH du milieu, la quantité de bases apportée et la vitesse de dissolution seront suffisantes pour neutraliser l'acidité initiale et les flux de protons produits par le système cultural dans l'année.

Si la vitesse de dissolution du produit est faible, le flux de protons peut être supérieur

à la libération de VN. Le pH in situ diminue. Mais quand le pH diminue, la vitesse de dissolution augmente. On arrive ainsi à un équilibre auto régulé des flux.

Ainsi, la question est de savoir quel est le statut acido basique d'équilibre permis par la vitesse de dissolution d'un amendement, même si à terme, l'ensemble de l'amendement finit par se dissoudre.

Stratégie d'apport : Redressement ou entretien

(Figure 6.2)

On distingue conventionnellement deux situations de chaulage selon le différentiel entre le SAB du sol et le SAB souhaité.

Redressement :

Apport d'amendement basique nécessaire pour atteindre un SAB suffisant pour éliminer les risques liés à l'acidité excessive des sols.

Entretien :

Apport d'amendement basique régulier pour maintenir un SAB satisfaisant compte tenu des pertes de bases.

Le choix de l'une ou l'autre de ces stratégies impose l'évaluation d'un Besoin en Bases dont le principe est décrit dans ce chapitre.

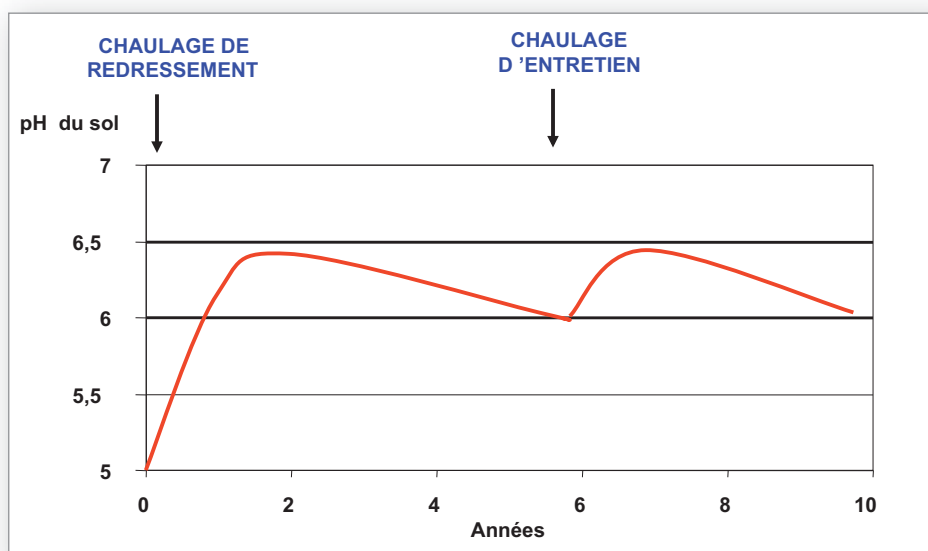


Figure 6.2

Schéma général de l'évolution du pH d'un sol cultivé au cours du temps d'après Coppenet (1980) et Bussières (1978) : exemple théorique de stratégie pour maintenir un pH entre 6 et 6,5.

Besoin En Bases et Valeur neutralisante d'un amendement basique

Le Besoin En Bases est exprimé en unités de Valeur Neutralisante (VN) par ha.

Pour les types d'amendements minéraux basiques définis dans la norme NF U 44-001, le calcium ou le magnésium sont toujours associés à un anion basique qui détermine le pouvoir chaulant.

La valeur neutralisante correspond à la quantité de bases contenue dans 1 kg d'oxyde de calcium (CaO).

Elle se mesure au laboratoire (NF EN 12945).

Pour ces produits et seulement ceux là, la VN du produit peut être estimée par la formule : % CaO + 1,4 % MgO.

Pour les autres produits (effluents animaux, boues, ...) la VN ne peut-être déduite du taux de Calcium et de Magnésium, ces deux éléments n'étant plus systématiquement associés à une base. La VN doit-être mesurée dans ce cas par des méthodes adaptées (tests d'incubation en conditions contrôlées, NF EN 14984).

Il faut distinguer :

- La Valeur Neutralisante : Elle correspond à la quantité d'acide que le produit est potentiellement susceptible de neutraliser.
- La Vitesse de réaction du produit : Elle dépend, pour un pH donné, de l'amendement utilisé et des conditions d'emploi.
- La durée d'action du chaulage : C'est le délai nécessaire à la consommation des bases apportées.

Attention ! Si les doses apportées ne permettent pas de libérer les bases plus rapidement qu'elles ne sont consommées, on n'observera pas d'amélioration du pH, du SAB ni d'effet du chaulage.

Principes de calcul du Besoin En Bases

Redressement

La détermination du Besoin en Bases pour le redressement (BEB_{red}) prend en compte les éléments suivants (figure 6.4) :

- Différentiel de statut acido-basique ($SAB_{souhaitable} - SAB_{actuel}$) **(1)**
- Pouvoir tampon du sol **(2)**
- Quantité de terre concernée **(3)**

Avec :

(1) - pour le pH :

$(pH_{souhaitable} - pH_{actuel})$

ou

$(e^{pH_{souhaitable}/1,5} - e^{pH_{actuel}/1,5})$

- pour S/CEC_{Metson} :

$(S/CEC_M)_{souhaité} - (S/CEC_M)_{actuel}$

uniquement si $pH < 6,8$

(2) mesuré par différentes méthodes ou estimé par la CEC, l'argile, la matière organique voire l'aluminium échangeable.

(3) dépend du type de sol (densité apparente, teneur en cailloux) et de la profondeur de sol travaillé.

La figure 6.3 illustre les courbes de neutralisation de deux sols ayant un pouvoir tampon différent avec la même quantité de bases apportées. La différence de pouvoir tampon entre les deux sols est surtout visible au voisinage de la neutralité.

Exemples de formules mathématiques :

- utilisant le pouvoir tampon :

$BEB_{red} = \text{Pouvoir tampon} \times (pH_{souhaitable} - pH_{actuel}) \times \text{Poids de terre fine.}$

Il est donc nécessaire d'avoir une mesure ou une estimation du pouvoir tampon.

Ce modèle ne s'applique pas aux sols très acides du fait du pouvoir tampon lié à l'aluminium qui ralentit la remontée du pH.

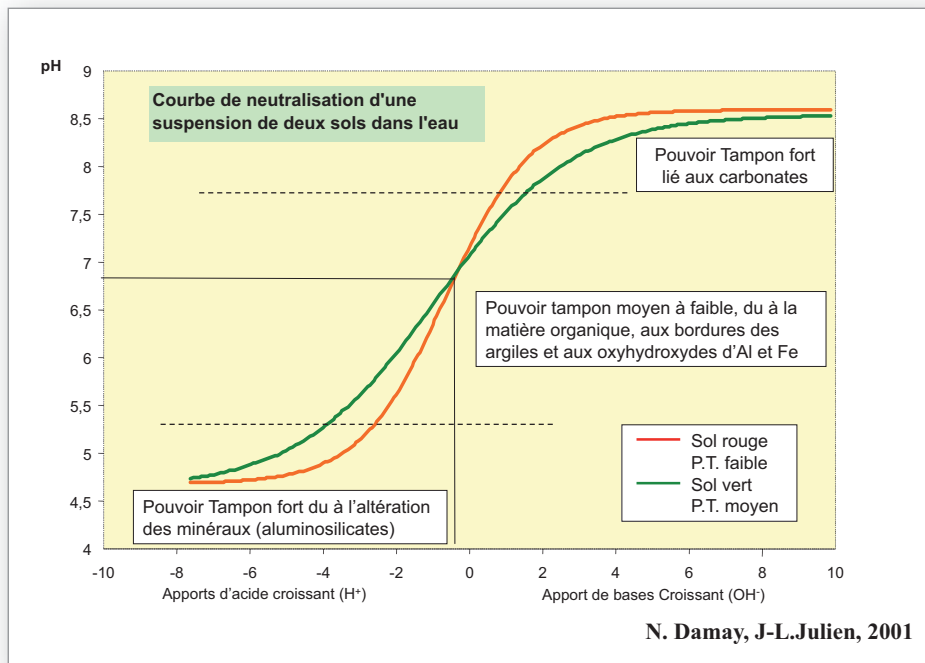


Figure 6.3

Évolution du pH de deux sols ayant un pouvoir tampon différent.

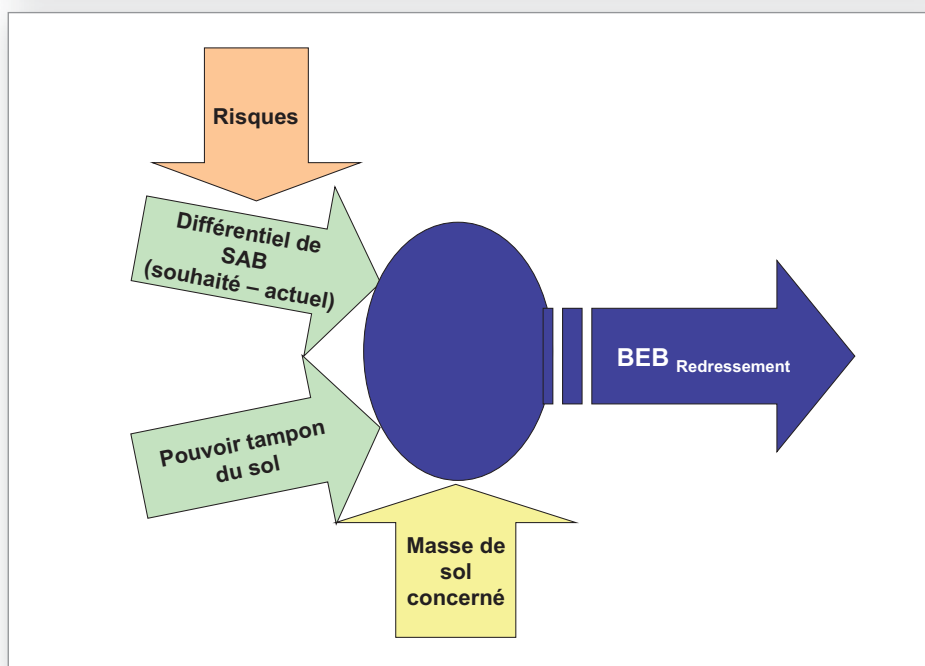


Figure 6.4

Raisonnement du besoin en bases pour le redressement.

Pour les sols de l'Aisne, deux formules ont été proposées :

Modèle linéaire :

$$BEB_{red} = [0,035 \times (0,04 \times ARG + 0,205 \times M.O.) \times (pH_s - pH_a) + 0,4] \times P.T.F./1000$$

Modèle non linéaire

(Rémy et Marin Laflèche, 1974) :

$$BEB_{red} = [0,055 \times (ARG + 5 \times M.O.) \times (\exp^{pH_s/1,5} - \exp^{pH_a/1,5})] \times P.T.F./1000$$

● utilisant le taux de saturation :

$$BEB_{red} = CEC \times (S/CEC_s - S/CEC_a) \times 280 \times P.F.T./100.000$$

Avec :

BEB_{red} = Besoin En Bases de redressement en unités de VN/ha.

ARG = Teneur en argile en ‰

M.O. = Teneur en matière organique en ‰

P.T.F. = Poids de terre fine en tonnes/ha = densité x profondeur en cm x % de terre fine

CEC = Capacité d'échange cationique en $\text{Cmole}^+ / \text{kg}$

pH_s = pH_{eau} souhaitable

pH_a = pH_{eau} actuel

S/CEC_s = Taux de saturation souhaitable en %

S/CEC_a = Taux de saturation actuel en %

280 = Coefficient de conversion $\text{Cmole}^+/\text{kg} \rightarrow \text{ppm}$.

NB : Ce raisonnement peut s'appliquer aussi aux sols lourds, mais reste à moduler par des expérimentations ultérieures. Il ne concerne pas les sols sodiques (basiques).

Entretien

L'apport de bases pour maintenir un état souhaitable du statut acido-basique du sol dépend de l'importance des facteurs d'acidification et d'alcalinisation dans le milieu considéré (Figure 6.5).

Les facteurs connus (cf. chapitre 1) qui jouent sur la consommation de bases en l'augmentant (et vice versa) résultent de la production nette de protons résultant principalement :

- des apports d'engrais acidifiants, essentiellement azotés,
- de la consommation de cations et

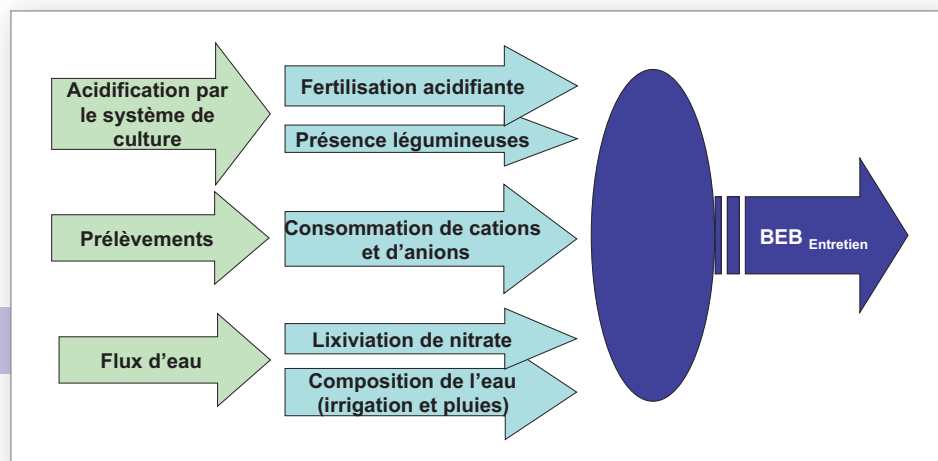


Figure 6.5

Raisonnement du Besoin En Bases pour l'entretien.

- d'anions par les plantes,
- de la minéralisation de la matière organique,
- des flux d'eau drainants qui entraînent avec eux des anions (lixiviation de nitrate, ...),
- des apports extérieurs acidifiants ou alcalinisants (eaux de pluie, eau d'irrigation).

Toutes les formules basées sur le suivi du calcium sont à revoir et à ré-exprimer en termes de production de protons à neutraliser (consommation de bases). Ces formules historiques découlent de relations statistiques qui conservent leur signification bien qu'elles se basent à tort sur des mécanismes dont l'élément actif était le calcium.

Ceci ne remet donc pas en cause les ordres

de grandeur que l'on avait coutume d'utiliser jusqu'à présent.

En attendant de pouvoir finaliser le bilan de protons avec un modèle utilisant les anions et cations absorbés calculés à partir de la composition des exportations des plantes, on se sert des références expérimentales acquises antérieurement. Selon celles-ci, la consommation annuelle de bases en sol non calcaire peut varier dans une plage de 0 à 400 unités de VN/ha/an.

Dans les sols non calcaires, elle est de l'ordre de 200 à 300 unités de VN / ha / an. On peut se baser sur cet ordre de grandeur et raisonner le moment d'un apport en contrôlant régulièrement l'évolution du SAB par l'analyse du pH de la terre.

Il est possible de quantifier l'ordre de gran-

deur des BEB pour l'entretien par des modèles mathématiques qui tiennent compte d'un ou plusieurs facteurs connus responsables de l'acidification. On peut citer entre autres :

- la formule utilisée par la Station Agronomique de l'Aisne pour estimer le « lessivage » (en fait, pertes en bases) :

$$\text{BEB}_{\text{ent}} = (\text{pH}_{\text{actuel}} - 3)^2 \times 30$$

avec :

BEB_{ent} exprimé en unités de VN ha/an.

- la formule utilisée auparavant par MEAC donnant une estimation de la consommation annuelle de bases établie notamment à partir des résultats expérimentaux obtenus dans le Calvados et qui donne une priorité forte à la pluviosité et au type de sol :

$$\text{BEB}_{\text{ent}} = [\log_{10}(280 \times \text{Ca} \times \text{P.T.F./1000})] \times [\log_{10}(\text{N}+100)]/2 \times [P/1500 \times 10/(\text{CEC}+10)],$$

avec :

BEB_{ent} = Besoin En Bases d'entretien en unités de VN/ha/an,

CEC = $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ en Cmol^+/kg ,

Ca = Quantité de calcium en Cmol^+/kg ,

P.T.F. = Poids de terre fine en tonnes/ha,

N = Quantité d'azote en unités apportées/ha/an,

P = Précipitations annuelles en mm.

- la formule de Chambers et Garwood (1998) obtenue sur 9 sites en Grande Bretagne allant de 5 à 35 % d'argile :

$$\text{BEB}_{\text{ent}} = -1029 + 313 \text{ pH}_{\text{eau}} - 50,4 \text{ M.O.}$$

ou avec un terme lié à la fertilisation azotée :

$$\text{BEB}_{\text{ent}} = -1300 + 324 \text{ pH}_{\text{eau}} - 90,1 \text{ M.O.} + 0,553 \text{ N}$$

avec :

BEB_{ent} = Besoin En Bases d'entretien en unités de VN / ha / an,

M.O. = Teneur en matière organique exprimée en %

N = Quantité d'azote exprimé en unités/ha/an

La formulation des modèles existants est perfectible. L'ensemble des paramètres qu'il faudrait prendre en compte est trop

important pour élaborer un modèle explicatif plus complet.

Perte de Bases ou perte de Calcium ?

En toute rigueur, la variation du statut acido-basique du sol devrait être évaluée à partir d'un modèle de consommation de bases du fait de la production de protons (H^+).

On remplace la comptabilité Calcium (en « CaO ») de l'ancien raisonnement par une comptabilité des H^+ pour déterminer la quantité de bases à apporter.

En conséquence, cela conduit à dissocier et établir deux bilans :

- Le besoin en bases (BEB)
- Le besoin en calcium des sols et des cultures.

Sous climat tempéré, les besoins de calcium des cultures sont en général largement satisfaits par le calcium initialement présent dans les sols, y compris les plus acides.

Les apports d'amendements basiques calcaïques contribuent aussi à accroître la réserve de cet élément dans le sol.

Dans la pratique, on peut se dispenser de faire le bilan du calcium, car cet élément est souvent excédentaire sauf dans le cas de sols déséquilibrés tels que les sols sodiques.

L'effet acidifiant des engrais ne s'exprime pas avec la même amplitude selon les conditions du système sol plante (quantité d'eau drainante, quantité et nature des éléments lixiviés).

Les quantités de calcium lixivié mesurées en cases lysimétriques ont souvent été à tort interprétées comme une cause de l'acidification (perte de calcium), alors qu'elles n'en sont que la conséquence. Ce n'est pas une perte d'amendement à compenser, c'est un traceur de l'acidification.

La mesure des pertes en calcium permet de donner un ordre de grandeur réaliste des arrivées de protons dans le système.

Modalités d'apport

Fractionnement des quantités

L'apport de toute la quantité calculée est indispensable à l'obtention des effets recherchés.

Pour le redressement, le fractionnement n'a de sens que si l'objectif de pH visé dépasse largement le seuil minimal qu'il est indispensable de franchir pour supprimer les effets néfastes liés à l'acidité excessive (toxicité Al, maladies telluriques, seuil minimum pour installer une luzerne...).

En effet, sauf cas exceptionnel, et dans la limite des effets induits (mobilité des oligo-éléments, perturbation de l'activité biologique des sols, ...), la justification de la pratique du fractionnement est plus économique qu'agronomique.

Toutefois, le fractionnement peut être rendu nécessaire pour différentes raisons :

- l'acceptabilité économique du conseil ;
- la gestion des hétérogénéités d'épandage ;
- éviter le blocage de certains oligo-éléments dans le cas où le pH visé est supérieur à 6.5.

En apportant une quantité inférieure à la dose nécessaire, tout l'effet recherché ne sera pas obtenu. Au mieux, il sera moindre, Au pire, on n'observera pas d'effet.

L'amélioration du statut acido-basique d'un sol ne pourra être obtenue qu'en apportant une quantité de bases au moins supérieure à la production annuelle de protons.

Pour gérer une contrainte budgétaire à l'échelle de l'exploitation, il est préférable d'appliquer l'intégralité de la dose calculée sur les parcelles à plus haut risque, quitte à différer les apports quand le risque est moins élevé pour obtenir le meilleur retour sur investissement.

Dans certains milieux sensibles à une déficience en Manganèse (sols sableux aérés), un chaulage excessif peut accroître le risque de carence manganique induite.

Pour l'entretien, les faibles apports impliquent que ceux-ci soient plus fréquents et couvrent au moins la production de protons entre deux apports, (Figure 6.6).

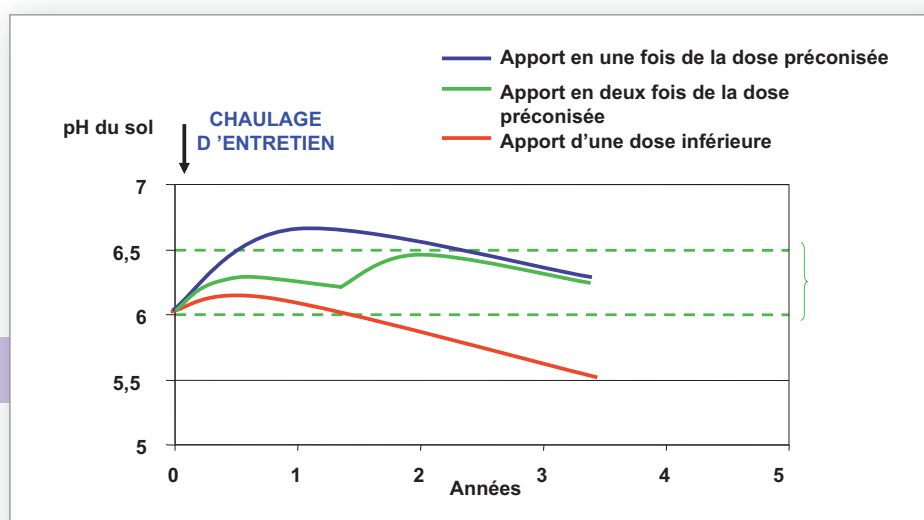
Incorporation au sol

L'efficacité des amendements basiques dépend des caractéristiques des produits et de leur répartition dans le sol. A ce titre, l'incorporation, par un labour ou un travail du sol superficiel (déchaumage par exemple), est essentielle.

Ne pas le faire limite l'action du produit à la surface du sol et expose à un possible entraînement des particules fines du produit par ruissellement, voire à une réaggrégation diminuant la vitesse d'action ou à une recarbonatation dans le cas des chaux.

Figure 6.6

Exemple théorique de stratégie pour maintenir un pH entre 6 et 6,5.



Apports rapprochés d'amendement basique et d'effluent organique

Il n'y a pas de contre indication formelle à appliquer au même moment un amendement basique et un amendement organique. Le contact direct entre l'effluent et l'amendement basique peut toutefois augmenter les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac issu de l'amendement organique si au point d'impact, le pH dépasse 9.

Pour limiter la volatilisation, l'enfouissement rapide de l'effluent organique est recommandé.

Sur prairie, il est préférable, pour limiter ces pertes, d'apporter d'abord l'amendement basique, puis ensuite l'effluent organique ■

Bibliographie

- Chambers B. J. et Garwood T. W. D., 1998 : *Lime losses rates from arable and grassland soils*, Journal of Agricultural science, Cambridge, 131, 455-464.
- Coppenet M., 1956 : *Dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, Thèse INA PG 1956.
- Julien J-L, Turpin A., 1999 : *Surfaces réactives et raisonnement de quelques propriétés chimiques des sols acides*, C.R. Acad. Agric. Fr., 1999, 85 n°2, 25-25.
- Warfingue Peter and Sverdrup Harald, 1989 : *Modeling limestone dissolution in soils*, American Journal of soil science Society, vol 53, n°1, (53 :44-51), January - February 1989.



Figure 6.7

Épandeur d'amendement basique sous forme granulée.



Figure 6.8

Épandeur d'amendement basique sous forme pulvérulente.

La spécificité du raisonnement du chaulage en prairie permanente ou temporaire de longue durée

Introduction

La prairie permanente est un couvert végétal complexe susceptible de valoriser le chaulage. Une acidité importante a une influence sur la nature des espèces végétales qui la composent et par voie de conséquence sur la production d'herbe et sa qualité. Elle interfère avec le mode de conduite de la prairie comme le niveau de fertilisation azotée, l'apport des effluents d'élevage ou la disparition des scories Thomas.

Les prairies temporaires de courte durée, dont le problème de l'acidité est habituellement résolu par le chaulage des cultures qui leur sont associées dans la succession, ne sont pas traitées dans ce chapitre.

Conséquences d'un apport d'amendement basique

Les sols sous prairies permanentes ou temporaires de longue durée présentent généralement des gradients verticaux très prononcés de la concentration de la plupart des éléments nutritifs, du pH et de la matière organique.

La teneur élevée en matière organique dans les premiers centimètres de sol induit la formation de complexes avec l'aluminium et peut en réduire la toxicité. De ce fait la toxicité de l'aluminium ne se manifeste généralement que lorsque le pH est inférieur à 5,5, voire 5 dans la couche de surface. Il en résulte aussi un fort pouvoir tampon vis-à-vis du pH qui implique des apports conséquents pour corriger l'acidité des sols trop acides.

Effets du chaulage sur le fonctionnement des prairies :

- Suppression de la toxicité aluminique, néfaste pour l'implantation de la prairie et la croissance des racines. Le ray grass, la fétuque et le dactyle présents dans cer-

taines prairies permanentes ou semés dans de nombreuses prairies temporaires y sont particulièrement sensibles.

1 Accroissement momentané de la minéralisation de l'azote organique. Cet effet, d'autant plus intense que le sol est acide avant chaulage et que l'élévation du pH est importante, s'estompe avec le temps. Du à la dispersion d'une fraction de la matière organique au voisinage des granules d'amendement, cet effet disparaît plus ou moins rapidement selon la nature et la quantité d'amendement apporté. Des effets significatifs pendant au moins 3 ans ont été observés consécutivement à l'apport de fortes doses d'amendement (Stevens et al 1996) :

- Amélioration du fonctionnement du système racinaire qui exploite mieux la réserve d'eau du sol

- Une modification progressive de la flore permettant l'obtention d'une herbe de meilleure qualité, à condition que les espèces soient encore présentes dans l'environnement ou semées (baisse des espèces de milieu humide ou acidophiles et développement des espèces productives.

● Une amélioration de la biodisponibilité du phosphore dans le sol au moins jusqu'à pH 6,3. Au delà, l'élévation du pH et la présence de calcium diminuent sa disponibilité.

**Effets du chaulage
sur l'augmentation de la production
et de la qualité de la prairie :**

Dans les prairies très acides sont présentes des espèces adaptées aux conditions de ce milieu mais généralement peu productive et de faible qualité. Le chaulage n'influe pas ou que très peu sur la croissance des plantes dont la production peut par contre être augmentée par la fertilisation N, P et K. Il n'est toutefois pas possible d'espérer des niveaux de production très élevés et une qualité de l'herbe permettant de satisfaire les besoins d'animaux à fort niveau de production de lait ou viande.

Il est par ailleurs vain d'espérer une modification rapide de la composition botanique de ces prairies par le simple chaulage. Le recrutement d'espèces productives et de qualité souhaitée n'est d'ailleurs possible que si ces espèces sont présentes dans le milieu.

Les espèces productives et de bonne qualité s'avèrent aussi les plus sensibles à la toxicité de l'aluminium. Dans les prairies acides où elles ont été semées ou sont naturellement présentes, le chaulage permet d'une part leur maintien voire l'accroissement de leur abondance, et contribue de ce fait à augmenter la production d'herbe pendant la période de redressement du pH.

Hopkins et al (1990) ont par exemple observé dans des cultures en pots avec un sol tourbeux chaulé de façon à faire varier le pH de 3,8 à 6,8, que la production maximale était obtenue à pH 6,1 pour l'association ray grass anglais et trèfle blanc et à pH 6,8 pour le ray grass anglais seul. La minéralisation de l'azote organique du sol était en partie responsable de ces accroissements de production. Rodriguez et al, (1994) et Pinto et al., (1995) ont observé suite à l'application de quantités croissantes

(0 à 7,5 t /ha) que les scories faiblement phosphatées (0,5% P) augmentaient fortement la production de la prairie semée avec du ray-grass anglais, du dactyle et du trèfle blanc sur un sol dont le pH_{eau} initial était de 4,8, mais étaient sans effet sur une prairie naturelle moins acide (pH_{eau} = 5,6) composée principalement de houlque laineuse, agrostis commun, ray-grass anglais et fétuque rouge.

Sur une prairie de Burdignes (Loire), Gueydon (1992), a constaté un fort effet des pratiques de fertilisation sur la composition botanique. Les graminées, nombreuses en début d'expérimentation, ont évolué avec une augmentation du ray-grass, de la fétuque des prés et du fromental et une diminution 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.

Bonischot (1986), a montré l'intérêt du chaulage sur le rendement sur des prairies permanentes, en traitant les données de 106 essais. Les prairies sur des sols à pH inférieurs à 5,5, avaient des rendements significativement plus faibles que celles dont les sols présentaient des pH supérieurs à cette valeur. La fertilisation azotée diminuait l'écart entre les groupes de parcelles. Sur d'autres essais avec chaulage annuel de 350 kg de VN/ha, il constatait un faible effet sur le rendement la première année, mais une augmentation ultérieurement avec une évolution du pH de 5,4 à 6,2 au bout des cinq années d'essais. Il recommandait un chaulage d'entretien de l'ordre de 300 à 400 kg de VN par ha.

Résultats d'expérimentations récentes

L'analyse de résultats de suivis de parcelles réalisés par l'INRA, l'Institut de l'Elevage et les Chambres d'Agriculture dans le cadre de la rénovation du raisonnement de la fertilisation P et K des prairies, a montré que des apports d'azote (100 kg N / ha) accrois-

Variation IN100 - INagri

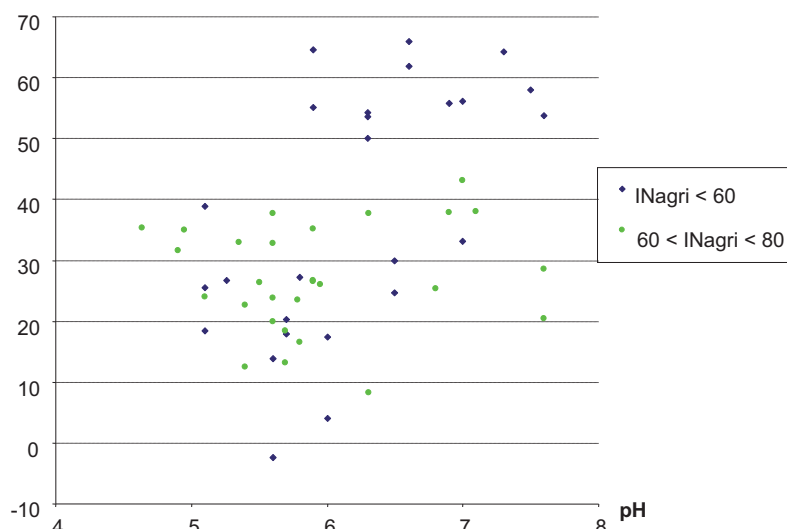


Figure 7.1

*Effet du pH initial
sur la variation
de l'indice
de nutrition
azotée.*

sent d'autant plus les indices de nutrition azotée des plantes à la récolte lorsque le pH était supérieur à 6 et que l'indice de nutrition des plantes était faible (INN<60) dans le traitement de référence (figure 7.1).

Outre un enracinement plus abondant et plus profond induit par la suppression de la toxicité de l'aluminium, permettant ainsi une meilleure utilisation par les plantes de l'azote présent dans le sol, l'amélioration de la nutrition azotée due au chaulage peut

résulter de son effet sur la minéralisation de l'azote organique évoqué plus haut.

Peltier (2001) a constaté que pour l'ensemble des essais réalisés par les Chambres d'Agriculture dans le Massif central pour ABC, l'apport d'un amendement basique a amélioré en moyenne la productivité de la prairie de 5,7 %. Cette amélioration atteignait 9,8 % lorsque la fertilisation azotée était limitante et conduisait à des INN < 80, (Figure 7.2).

Rendement MS en tonnes par ha du traitement chaulé

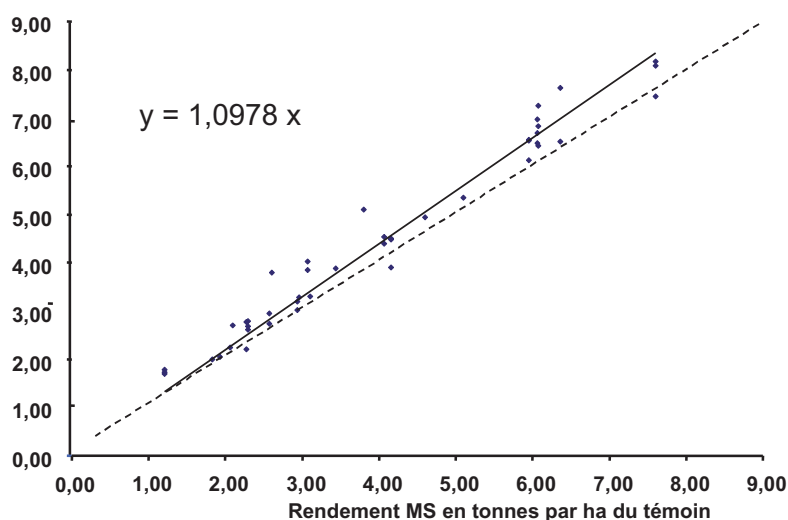


Figure 7.2

*Effet du chaulage
sur la production
des prairies
du réseau
d'expérimentation
ABC lorsque
l'indice de
nutrition azotée
des plantes est
inférieur à 0,80
à la récolte.*

Le gain moyen de rendement par coupe a été de 0,26 tonne de matière sèche pour l'ensemble des cas, et de 0,46 tonne lorsque l'INN était inférieur à 80.

L'interaction entre le chaulage et l'état de nutrition azotée des plantes dépendait du temps écoulé après le chaulage, du pH_{eau}

initial et la nature de l'amendement (tableau 7.1).

Pour tous les essais, l'amélioration du rendement a été légèrement plus élevée pour la 3ème coupe :

+ 8,4 % contre + 5,6 % pour la 1ère coupe et + 4,7 % pour la 2ème coupe.

Pourcentage d'augmentation des rendements		
	Tous INN confondus	INN < 80
Première année	6,4	10,6
Années suivantes	5,5	8,7
$\text{pH}_{\text{eau}} < 5,5$	5,1	9,7
$\text{pH}_{\text{eau}} > 5,5$	7,8	11,5
Apport de CaO	12,2	13,6
Apport de CaCO_3	5,4	8,6

Tableau 7.1

Variations de rendement selon les indices de nutrition.

Résumé

L'amendement minéral basique agit sur la croissance des plantes par le biais d'actions multiples :

- La levée de la toxicité aluminique.
- Une minéralisation accrue de l'azote liée à la dissolution d'une fraction de la matière organique. Les gains de productivité sont en relation avec l'augmentation de la quantité

d'azote absorbé et dépendent du niveau de pH_{eau} initial. Cet effet sur l'alimentation azotée se manifeste surtout si les apports d'azote minéral sont faibles.

- la modification de la composition botanique lorsque il y a possibilité de recrutement dans le milieu d'espèces productives mais sensibles à la toxicité aluminique ■

Partie II

Fiches par systèmes

Mode d'emploi des fiches

Contenu des fiches

Le conseil agronomique en matière de chaulage doit être adapté en fonction du type de sol, de la culture envisagée, du mode de production et des risques à court et moyen terme s'y rattachant. Nous avons formalisé la démarche de conseil suivante en trois points :

1. Le diagnostic :

- La liste des risques identifiés pouvant avoir une conséquence sur les composants physique, chimique ou biologique de la fertilité du sol et de son fonctionnement.
- Les indicateurs analytiques issus de l'analyse de terre à prendre en compte.

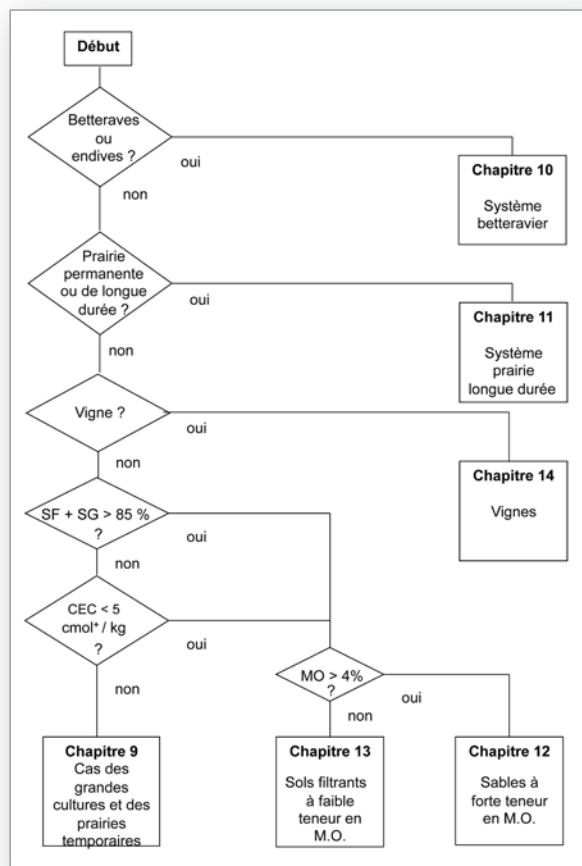


Figure 8.1 : Identification des cas traités dans les fiches.

2. La stratégie d'apport : impasse, redressement et/ou entretien suivant le diagnostic.

- Le besoin en base : mode de calcul et paramètre à prendre en compte pour le calcul.
- La fréquence des apports d'entretien : en fonction du type de produit utilisé, de l'intensité du risque et des caractéristiques du sol.

3. Les fractionnements du redressement :

- La justification du fractionnement en fonction de critères technico-économiques.

Nous avons repris les trois thèmes ci-dessus, dans des fiches, chacune correspondant à un système « sol-plante », pour lequel nous disposons de références suffisantes :

- Les systèmes de culture avec betteraves et endives,
- Les prairies permanentes (ou temporaires de longue durée),
- La vigne,
- Les sols sableux à faible CEC, différenciés par la teneur en matière organique,
- Les autres situations de grandes cultures relèvent du cas général.

Ces fiches ne couvrent pas l'ensemble des situations françaises et les références demandent à être affinées selon les conditions locales. Les cas choisis représentent les conditions pour lesquelles nous disposons de plus de références en France et qui permettent donc d'apporter une préconisation adaptée.

La figure 8.1 permet d'identifier la fiche correspondant à chaque cas ■

Cas des grandes cultures et prairies temporaires

Diagnostic

Identification des risques liés à l'acidification :

● Fertilité chimique

Risques	Conséquences en sol acide
Apparition de la toxicité aluminique ou manganique	Réduction de croissance, voire mort de la plante (enjeu prioritaire en dessous de pH 5,5)
Diminution de la CEC effective	Baisse des capacités de stockage de cations, diminution du pouvoir tampon du sol vis-à-vis du pH et du potassium, lixiviation d'éléments nutritifs
Diminution de la disponibilité des éléments nutritifs	Chute des indices de nutrition pour les éléments nutritifs majeurs, voire possibilité de carences, en particulier pour le molybdène
Mobilité des éléments trace métalliques	Absorption par les plantes ou lixiviation

Tableau 9.1 : Altération de la fertilité chimique des sols acides.

● Fertilité physique

Risques	Conséquences en sol acide
Battance (éventuellement)	Levée perturbée, moins d'oxygénation du système racinaire
Prise en masse, mauvaise structure	Développement racinaire moins dense et diminution de la porosité des mottes
Diminution de la mobilité de l'eau due à une porosité totale réduite	Ressuyage et ré-humectation du profil plus lents Disponibilité de l'eau plus limitée
Diminution de la praticabilité	Diminution du nombre de jours disponibles
Erosion	Rigoles, dépôts, pertes de terre

Tableau 9.2 : Altération de la fertilité physique des sols acides.

● Fertilité biologique

Risques	Conséquences en sol acide
Modification de l'activité biologique	Matière organique libre moins vite dégradée Réduction de la nitrification Diminution du nombre de vers de terre
Développement ou réduction de certaines maladies transmises par le sol	Développement de la hernie du chou Réduction de la gale argentée de la pomme de terre, voire du piétin échaudage

Tableau 9.3 : Altération de la fertilité biologique des sols acides.

Indicateurs analytiques à prendre en compte :

● pH_{eau} et pouvoir tampon du sol

Le pH_{eau} est très variable dans le temps, plus élevé en hiver qu'en été.

Pour le suivi de l'indicateur, il est préférable de prélever toujours à la même époque et à la même profondeur.

Pour déterminer la stratégie à appliquer, bien prendre en compte l'époque de prélèvement. Si l'analyse est faite en hiver, intégrer le fait que le pH peut baisser de 0,3 (argiles) à 1 point (sables) dans les mois qui suivent.

Le pouvoir tampon dépend de la teneur et de la nature des composés argileux et organiques présents dans le sol.

Le pH est un critère simple et très accessible pour le diagnostic. La somme des cations d'acidité négligeable (Ca, Mg, K, Na) et la CEC effective permet une approche plus précise et plus facile du calcul du BEB.

● Taux de saturation

S/CEC = somme des charges ioniques des 4 cations échangeables d'acidité négligeable x 100 et divisée par la CEC Metson
 $= (Ca + Mg + K + Na) \times 100 / CEC_{\text{Metson}}$

Avec : Ca, Mg, K, Na et CEC exprimés en $\text{cmol}^+ / \text{kg}$

Si la teneur en sodium n'est pas mesurée, on peut la compter pour zéro, sauf dans les sols salés ou les sols recevant des effluents salés (laiteries).

Le terme S/T, équivalent de S/CEC, ne devrait plus être utilisé.

Seule la CEC Metson, réalisée dans un milieu tamponné à pH 7 peut être utilisée pour évaluer le Besoin En Bases.

La CEC effective (ou au pH du sol ou cobaltihexamine, termes de signification équivalente) ne peut pas être utilisée pour cela.

La prise en compte des deux indicateurs, pH et taux de saturation, permet de sécuriser le diagnostic et d'avoir un conseil plus fiable.

Pour un même type de sol, entre 5.0 et 6.8, le pH_{eau} et le taux de saturation S/CEC_{Metson} sont statistiquement liés de façon presque linéaire.

L'examen simultané des deux indicateurs pH_{eau} et S/CEC est préférable pour définir la stratégie à appliquer.

● **Indicateur de risque de dégradation des propriétés physiques des sols limoneux instables**

L'indice de battance $IB = (1.5 LF + 0.75 LG) / (A + 10 M.O.)$ est inférieur de 0,2 lorsque le pH_{eau} est supérieur à 7,2 par rapport à un même sol dont le pH est inférieur à 7,2. Avec :

IB	Indice de sensibilité à la battance
LF	% de limon fin
LG	% de limon grossier
A	% d'argile
M.O.	% de matière organique

Cet indicateur permet d'identifier les sols où l'objectif d'amélioration des propriétés physiques est important.

● **Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques pour supprimer les risques liés à l'excès d'acidité :**

Valeurs du pH_{eau} du S / CEC	
Seuil minimal	Seuil maximal
pH_{eau} 5,8 à 6,0 (S / CEC 70 à 80 %) quelles que soient les cultures	pH_{eau} 6,5 à 6,8 (S / CEC 100 à 120 %) selon les sols et les cultures (la correspondance entre pH et S/CEC n'est plus fiable au-delà de 6,8. À pH 6,5, S/CEC 100 %)

Tableau 9.4 : Valeurs souhaitables de pH eau et de S / CEC (*) pour supprimer les risques liés à l'excès d'acidité, l'un confortant l'autre.

● **Aluminium et Manganèse échangeables**

À utiliser uniquement pour les sols très acides, en dessous d'un pH_{eau} de 5,5.

Le seuil minimal de taux de saturation est déduit du seuil de pH et de la relation entre pH et S/CEC établie par type de sol. Une teneur en Al échangeable à 40 ppm est un seuil à ne pas dépasser. La notion de seuil minimal est basée sur la suppression du risque de toxicité aluminique, d'un fonctionnement biologique correct des sols, de la maîtrise de certains pathogènes (hernie du chou), de l'installation du rhizobium (luzerne), etc.

(*) Pour la sécurité de l'utilisateur, et compte tenu des variations annuelles du

pH, il est prudent de sécuriser les indicateurs sur les deux critères pH et S / CEC.

La notion de seuil maximal s'appuie sur la limitation du risque de carences induites (B, Mn, Cu, Zn) dans certains sols ou d'occurrence de certaines maladies (piétin échaudage sur blé, gale argentée de la pomme de terre).

● **Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques pour améliorer les propriétés physiques des sols battants drainés ou sujets à engorgement temporaire :**

Valeurs du pH_{eau} ou du S/CEC	pH_{eau} 6,5 à 7 selon les références locales (S/CEC ~ 100 % pour pH 6,5)
---	--

Tableau 9.5 : Valeurs souhaitables des indicateurs pour améliorer les propriétés physiques.

Dans ces sols, le pH_{eau} minimal est le même que dans le cas précédent mais l'amélioration des propriétés physiques peut se poursuivre au-delà d'un pH de 6 et peut donc justifier une gamme de pH souhaitable un peu plus élevée que pour lever les risques liés à l'excès d'acidité.

Attention ! Dans certains sols, la gamme de pH souhaitable pour les propriétés physiques peut se situer au dessus du seuil maximal. Il faudra être vigilant sur les risques plus importants de carences induites (Manganèse, Bore) ou d'occurrence de certaines maladies.

Stratégie d'apport

Entretien ou Redressement puis Entretien, selon la valeur des indicateurs par rapport aux seuils souhaitables.

L'entretien visera à maintenir le pH_{eau} au dessus du seuil minimal pour rester dans la gamme des pH souhaitables.

Le redressement est à faire quand le pH_{eau} est inférieur au seuil minimal défini ci-dessus ou quand il devient inférieur au seuil limite défini par rapport à tel ou tel problème.

● **Entretien**

Il est en moyenne de l'ordre de 250 à 300 unités de VN par ha et par an. Ces valeurs moyennes sont à nuancer en fonction des pratiques (voir chapitre 6).

L'utilisation d'engrais ammoniacaux, un bilan N excédentaire générant une perte de nitrate en cas de drainage, des rendements élevés, une exportation fréquente des résidus (pailles) vont dans le sens d'un entretien plus important et réciproquement.

● **Redressement**

Il faut prendre en compte le pouvoir tampon du sol, le différentiel de statut acido-basique (souhaité - actuel) et la quantité de terre concernée.

La quantité de terre dépend de la densité apparente, de la teneur en cailloux et de la profondeur de sol à amender, en lien avec les itinéraires de travail du sol pratiqués.

Le **pouvoir tampon** pour le calcul du besoin

en bases, peut être estimé par la $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ ou par une relation établie pour un milieu donné incluant l'argile, la matière organique, voire la teneur en aluminium échangeable pour les sols à pH inférieur à 5,5.

Le différentiel de statut acido-basique peut être estimé par exemple de la façon suivante :

avec le pH :

en utilisant $(\text{pH}_{\text{souhaité}} - \text{pH}_{\text{actuel}})$
ou mieux $(e^{\text{pH}_{\text{souhaité}}/1,5} - e^{\text{pH}_{\text{actuel}}/1,5})$

avec le S/CEC :

en utilisant $(\text{S/CEC}_{\text{souhaité}} - \text{S/CEC}_{\text{actuel}})$
(uniquement si $\text{pH} < 6,8$)

Attention !

- Les sols sodiques ne relèvent pas de ce cas général.
- Dans les sols lourds dont la CEC est supérieure à 15 cmol+/kg, les formules de calcul ci-dessous atteignent les limites de leur domaine de validité. Ces types de sols requièrent des quantités importantes d'amendement pour améliorer leur statut acido basique.

Exemples de calculs de besoin en redressement :

● **Avec le pH** , modèle non linéaire (Formule de Rémy) pour une base de 4000 tonnes de terre :

$$\text{BEBr} = 0,22 \times [A + (5 \times \text{M.O.})] \times [\exp(\text{pH}_{\text{souhaité}}/1,5) - \exp(\text{pH}_{\text{actuel}}/1,5)]$$

Avec :

BEBr Besoin en bases de redressement exprimé en unités de VN par ha

0,22 Coefficient donné par Rémy pour les sols de l'Aisne sur une base de 4000 t de terre/ha.

A Teneur en argile en g/kg

M.O. Teneur en matière organique en g/kg
exp exponentielle

Exemple :

BEBr

$= 0,22 \times [150 + (5 \times 20)] \times [e^{(6,3/1,5)} - e^{(5,8/1,5)}]$

$= 0,22 \times [150 + (5 \times 20)] \times [66,68 - 47,78]$

$= 1040$ unités de VN par ha

● **Avec le taux de saturation :**

$BEBr = CEC \times [S/CEC_{\text{souhaité}} - S/CEC_{\text{actuel}}]$

$\times 0,0028 \times \text{Dens} \times \text{Prof} \times \text{TF}$

Avec :

BEBr Besoin en bases de redressement exprimé en unités de VN par ha

CEC CEC Metson exprimée en $\text{cmol}^+ / \text{kg}$

S/CEC Taux de saturation exprimé en %

0,0028 Coefficient de passage de masse en charge pour les équivalents CaO

Dens Densité apparente
(en général de 1,2 à 1,8)

Prof Profondeur en cm

TF Pourcentage de terre fine
(moins de 2 mm)

Exemple :

BEBr

$= 10 \times [80 - 70] \times 0,0028 \times 1,5 \times 25 \times 95 =$

998 unités de VN par ha

● **Tableaux de calcul**

Les deux premiers tableaux sont établis à partir des formules citées ci-dessus, et les résultats sont arrondis à la dizaine inférieure.

Besoin En Bases (BEB) exprimé en unités de Valeur Neutralisante (VN) par ha pour remonter le taux de saturation de 10 points (par exemple de 70 à 80 %) :

Profondeur en cm	Quantité de terre équivalente pour une densité de 1,5 (*)	CEC _{Metson} (en cmol^+/kg)					
		7	10	12	15	20	30
	et 0 % de cailloux						
15	2250 tonnes par ha	440	630	750	940	1260	1890
20	3000 tonnes par ha	580	840	1000	1260	1680	2520
25	3750 tonnes par ha	730	1050	1260	1570	2100	3150
30	4500 tonnes par ha	880	1260	1510	1890	2520	3780

Tableau 9.6 : Besoin En Bases pour augmenter le taux de saturation de 10 points

Pour une augmentation de 20 points au lieu de 10, il faut doubler ces chiffres.

(*) La densité apparente peut varier de 1,2 à 1,8 dans les sols français.

Besoin En Bases (BEB) exprimé en unités de Valeur Neutralisante (VN) par ha
(formule de Rémy, base 4 000 tonnes de terre) :

Modification de pH recherchée :		Valeur de A + 5 MO (en g/kg)					
passer de	à	150	200	250	300	350	400
pH 5,5	pH 6,0	510	680	850	1020	1190	1360
pH 6,0	pH 6,5	710	950	1180	1420	1660	1900
pH 6,5	pH 7,0	990	1320	1650	1990	2320	2650
pH 7,0	pH 7,5	1380	1850	2310	2770	3230	3700

Ne pas oublier le cumul éventuel de différentes lignes si l'augmentation recherchée est supérieure à 0,5 points de pH.

Tableau 9.7 : Besoin En Bases en fonction du pH_{eau} , de la teneur en argile et en matière organique.

Exemple de références locales :

Regroupement de 20 essais issus du Sud Ouest, Centre et Ouest de la France, cité et édité par l'ITCF dans *Chaulage et fertilisation magnésienne*, (Paillard et al. 1997).

Besoin En Bases (BEB) exprimé en unités de Valeur Neutralisante (VN) par ha.

Modification de pH recherchée :		CEC _{Metson} (en cmol ⁺ /kg)		
passer de	à	5	10	15
pH 5,0	pH 5,5	500	1000	1300
pH 5,5	pH 6,0	700	1300	1700
pH 6,0	pH 6,5	1000	1900	2800

Ne pas oublier le cumul éventuel de différentes lignes si l'augmentation recherchée est supérieure à 0.5 points de pH.

Tableau 9.8 : Besoin En Bases en fonction du pH eau et de la CEC.

● Fréquence des apports d'entretien

Les besoins annuels en entretien dépendent de la consommation annuelle de bases (en fait de la production de protons H⁺ à compenser) et du pouvoir tampon du sol, mais la fréquence des apports d'entretien dépendra surtout du type de sol :

- pour un sol filtrant (sableux) : apports fréquents, voire annuels pour limiter le lessivage (entraînement des particules en profondeur).

- pour un sol argileux : apport possible tous les 5 ans au maximum. Les quantités à épandre et la trésorerie nécessaire sont importantes et sont un frein à la pratique du chaulage. Il faut éviter de différer trop longtemps ces apports.

Des apports massifs peuvent également provoquer des blocages d'oligo-éléments. La fréquence des apports dépend donc de considérations autant économiques que techniques.

Le suivi du statut acido-basique permet de vérifier si son évolution est conforme à ce qui était prévu dans le plan prévisionnel

d'amendement, et, dans le cas contraire, d'adapter la stratégie d'apport au comportement réel du sol.

La fréquence dépend également des quantités de produits utilisés, de leur vitesse de dissolution et du pH du milieu. Selon la stratégie choisie par l'agriculteur, et le statut acido-basique visé, elle peut s'échelonner entre des apports annuels en faible quantité avec des produits à action rapide, et des apports plus espacés, avec des quantités majorées de produits moins solubles.

● Cas du non labour

Le cas du non labour de longue durée n'est pas encore adossé à des références suffisantes pour faire l'objet de recommandations particulières sur la fréquence. La couche de surface est la plus influencée par les variations de pH induits soit par les facteurs d'acidification, qui agissent pour l'essentiel à partir de la surface du sol, soit par les apports d'amendements qui ne sont pas incorporés ou ne le sont que superficiellement.

Fractionnement du redressement

Dans ce cas général, le fractionnement en cas de redressement important ne se justifie pas, sauf si le pH visé est très supérieur au seuil minimal.

Un apport inférieur aux quantités nécessaires ne donnera qu'une partie des résultats

attendus. Si des arbitrages financiers sont nécessaires, mieux vaut hiérarchiser les parcelles selon les risques encourus et appliquer la pleine dose sur les parcelles les plus exposées que faire du saupoudrage ■

Cas des systèmes de culture betteraviers et endiviers

Diagnostic

Identification des risques :

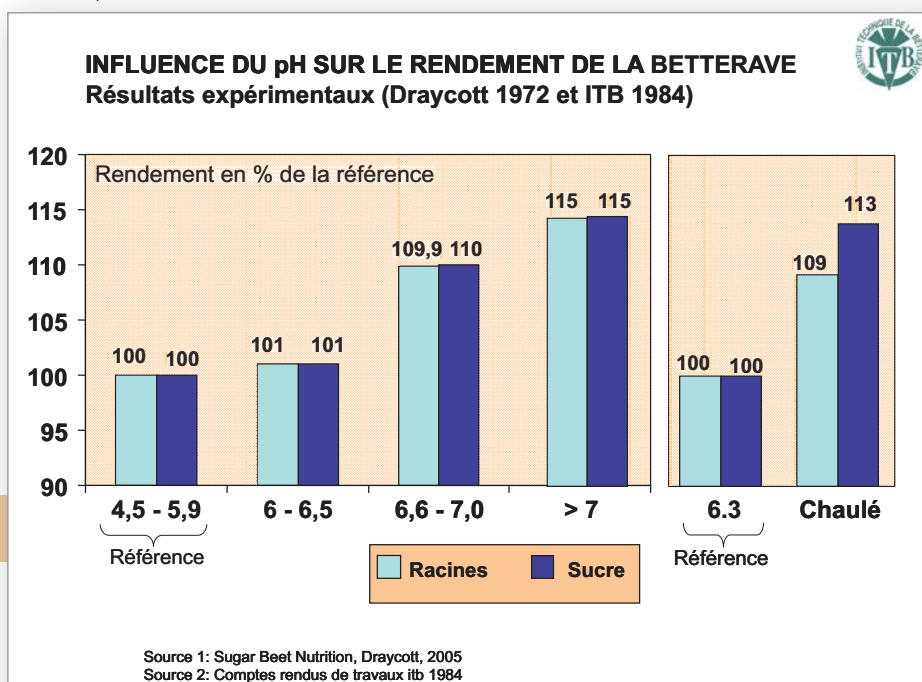


Figure 10.1

*Influence du pH
sur le rendement
de la betterave
à sucre.*

Fertilité physique

Risques	Conséquences
Battance	Levées et oxygénation du système racinaire perturbées (Figure 10.2).
Prise en masse	Développement racinaire et porosité des mottes limités.
Érosion	Asphyxie des plantules, pertes de terre, ravines.
Dynamique de l'eau	Ressuyage et ré-humectation du profil plus longs, disponibilité en eau réduite.
Praticabilité	Diminution du nombre de jours disponibles.

Tableau 10.1 : Altération de la fertilité physique des sols betteraviers.

Fertilité chimique

Risques	Conséquences
Acidité de surface (entre 0 et 10 cm)	Réduction de croissance, mortalité des jeunes plantes.
Toxicité aluminique ou manganique éventuelle	Intoxication des plantules.

Tableau 10.2 : Altération de la fertilité chimique des sols betteraviers.

● **Fertilité biologique**

Risques	Conséquences
Risque de maladies fongiques	Développement d'Aphanomyces (maladie du pied noir).
Réduction de l'activité biologique	Dégradabilité de la matière organique libre plus faible. Limitation de l'activité des vers de terre.

Tableau 10.3 : Altération de la fertilité biologique des sols betteraviers.

Indicateurs à prendre en compte :

● **Indicateur de risque de dégradation des états de surface : l'indice de battance**

Indépendamment du statut acido-basique du sol, texture et teneur en matière organique confèrent une sensibilité à la battance. On classe les sols selon cette sensibilité, évaluée par l'indice de battance :

L'indice de battance :

$$IB = (1,5 LF + 0,75 LG) / (A + 10 M.O.)$$

(Rémy et Marin-Laflèche, 1974).

● **Indicateur du risque d'acidité de surface : la réserve de carbonates totaux (teneur en $CaCO_3$) et pH_{eau}**

En hiver et au printemps, sous l'action des pluies, et également des apports d'engrais azotés, le pH dans les premiers centimètres du sol peut baisser rapidement (Figure 10.3) et affecter la croissance des jeunes plantes, voire la bloquer totalement dans certaines zones de la parcelle.

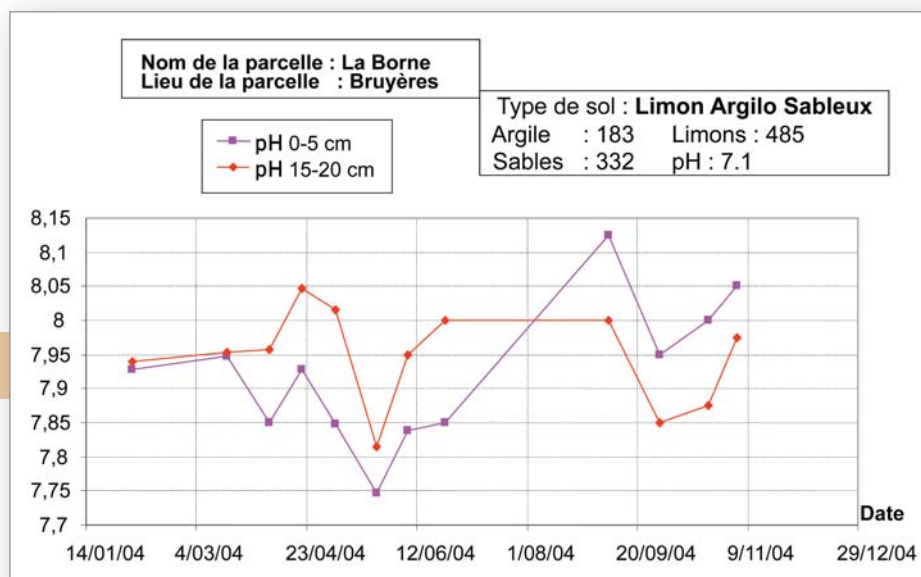


Figure 10.2

Battance affectant la croissance d'une jeune betterave.

Figure 10.3

Variation du pH
au printemps
(source LDAR
Station
agronomique
de l'Aisne).



En conséquence, il apparaît souvent un gradient de pH dans l'horizon labouré. Le maintien d'une réserve minimale de carbonates évitera les baisses rapides de pH superficiel qui peuvent affecter certaines zones des parcelles limoneuses. De même, on maintiendra la valeur du pH, mesuré sur tout l'horizon 0-30 cm, au dessus d'une valeur seuil afin de prévenir ce phénomène d'acidification de surface.

En sol sensible à la battance, l'objectif sera d'éviter les dégradations de structure superficielle et d'anticiper l'acidification de surface. La méthode consiste à surveiller la réserve d'alcalinité liée aux carbonates

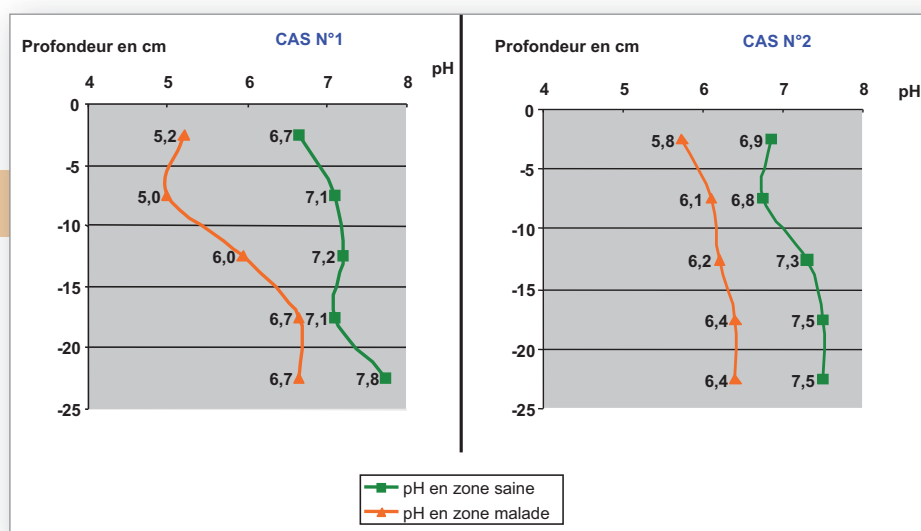
et à agir avant qu'elle ne soit intégralement consommée. L'indicateur de la teneur en CaCO_3 total sera privilégié, la seule valeur du pH sur l'horizon labouré (Figure 10.4) ne permettant pas de prévoir l'évolution à court terme du sol.

● Indicateur du risque à court terme : Teneur en Calcium échangeable

La teneur en Calcium échangeable devient un indicateur du pouvoir tampon du sol quand la réserve de carbonate s'épuise. Il permet d'évaluer la nécessité d'intervenir rapidement et la possibilité de différer un chaulage.

Figure 10.4

Gradient de pH
en fonction de
la profondeur dans
les zones saines
et malades de
deux cas étudiés
(pH_{eau} rapport
 $\text{sol}/_{\text{eau}} 1/2,5$)
(d'après B. Colomb,
1998).



En sol peu battant, l'anticipation à court terme est moins déterminante. Un suivi régulier du pH définira la conduite à tenir, en prenant en compte le pouvoir tampon du sol.

Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques

Indice de battance	Objectifs et valeurs souhaitables
Faible (< 1,4)	pH _{eau} = 7
Moyen (1,4 < IB < 1,8)	pH _{eau} = 7,3, Teneur en CaCO ₃ = 3g/kg
Élevé (> 1,8)	pH _{eau} = 7,5, Teneur en CaCO ₃ = 3g/kg

Tableau 10.4 : Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques.

Stratégie d'apport

Elle est fonction de la valeur des indicateurs (Tableau 10.5).

Indice de battance	CaCO ₃ (g/kg)	pH	Ca éch. (g CaO/kg)	Stratégie
Faible (<1,4)		< 7		Apport pour ramener le pH au dessus de 7 Calcul avec option 1 (*).
		> 7	< 6,7	Prévoir un apport avant les prochaines betteraves (entretien).
			> 6,7	RAS, pas d'apport à prévoir dans l'immédiat.
Moyen (1,4 < IB < 1,8)	< 3	< 7,3		Redressement = maximum de option 1 ou 2 (*)
		> 7,3		Remonter le CaCO ₃ à 3 g/kg Redressement avec option 2 (*).
	> 3	< 7,3		Ramener le pH au dessus de 7,3 Redressement avec option 1(*).
		> 7,3	< 6,7	Prévoir un apport avant les prochaines betteraves (entretien).
			> 6,7	RAS, pas d'apport à prévoir dans l'immédiat.
		> 6,7		RAS, pas d'apport à prévoir dans l'immédiat.
Élevé (>1,8)	< 3	< 7,5		Redressement = maximum de option 1 ou 2 (*)
		> 7,5		Remonter le CaCO ₃ à 3 g/kg Redressement avec option 2 (*).
	> 3	< 7,5		Ramener le pH au dessus de 7,5 Redressement avec option 1(*).
		> 7,5	< 6,7	Prévoir un apport avant les prochaines betteraves (entretien)
			> 6,7	RAS, pas d'apport à prévoir dans l'immédiat.
		> 6,7		RAS, pas d'apport à prévoir dans l'immédiat.

(*) Apport impératif avant prochaines betteraves.

Options de calcul :

Option 1 = Calcul de BEB établi à partir de la valeur du pH, de la valeur du pH souhaitée, et du pouvoir tampon du sol.

Option 2 = Calcul de BEB établi sur le stock de CaCO₃ du sol et le stock souhaité.

Tableau 10.5 : Stratégie d'apport.

Besoin en Bases

● *Entretien :*

Voir le chapitre 9 : Cas général.

Le différentiel de statut acido-basique peut être estimé à partir du pH :

● *Redressement :*

Il faut prendre en compte le pouvoir tampon du sol, le différentiel de statut acido-basique (souhaité - actuel) et le tonnage de terre concerné.

Le **pouvoir tampon** (sans compter celui du aux carbonates) peut être estimé par la CEC ou par une relation établie pour un milieu donné incluant l'argile et la matière organique.

(option 1)

$$(\text{pH}_{\text{souhaité}} - \text{pH}_{\text{actuel}})$$

ou mieux :

$$(e^{\text{pH}_{\text{souhaité}}/1,5} - e^{\text{pH}_{\text{actuel}}/1,5})$$

(option 2)

ou à partir de la teneur en CaCO_3 actuelle et de la teneur souhaitée.

Exemples :

● Avec le pH, (option 1) :

modèle non linéaire (Formule de Rémy et Marin La Flèche, 1974) pour une base de 4 000 tonnes de terre :

$$\text{BEB} = 0,22 \times [\text{Arg} + (5 \times \text{M.O.})] \times [\exp^{(\text{pH}_{\text{souhaité}}/1,5)} - \exp^{(\text{pH}_{\text{actuel}}/1,5)}]$$

Avec :

BEB	Besoin en bases exprimé en unités de VN/ha
Arg	Teneur en argile en g/kg
M.O.	Teneur en matière organique en g/kg
exp	fonction exponentielle

Exemple :

$$\text{BEB} = 0,22 \times [150 + (5 \times 20)] \times (e^{(7,4/1,5)} - e^{(6,7/1,5)}) = 2847 \text{ unités de VN/ha}$$

● Avec la teneur en CaCO_3 (option 2) :

$$\text{BEB} = \text{Dens} \times \text{Prof} \times \text{TF} \times (\text{CT}_{\text{souhaité}} - \text{CT}_{\text{actuel}})/1000$$

Avec :

BEB	Besoin en bases exprimé en tonnes de Calcaire (CaCO_3)/ha
Dens	Densité apparente
Prof	Profondeur en cm
TF	Pourcentage de terre fine
CT	Teneur en Calcaire total (CaCO_3) en g/kg

Exemple :

$$\text{BEB} = 1,5 \times 25 \times 95 \times (3 - 2) / 1000 = 3,56 \text{ t } \text{CaCO}_3/\text{ha}.$$

Tableaux de résultats :

Besoin en bases exprimé en unités de Valeur Neutralisante (VN) / ha, pour remonter le pH de 0,5 point (formule de Rémy et Marin-Laflèche, 1974, base 4000 tonnes de terre).

Modification de pH recherchée		Valeur de A + 5 MO en g/kg					
de		150	200	250	300	350	400
5,5	6,0	511	681	851	1021	1192	1362
6,0	6,5	713	950	1188	1426	1663	1901
6,5	7,0	995	1326	1658	1990	2321	2653
7,0	7,5	1388	1851	2314	2777	3239	3702

Tableau 10.6 : Calcul selon l'option 1.

Besoin en bases exprimé en tonnes de CaCO_3 /ha pour remonter la teneur en CaCO_3 jusqu'à une valeur de 3 ou 3,5 g/kg (exemples de calcul pour l'horizon 0-25 cm d'un sol de densité apparente 1,3).

Valeur initiale	Valeur finale	
	3,0	3,5
0 - 0,5	10,7	12,5
1 - 1,5	7,1	8,9
1,5 - 2	5,3	7,1
2 - 2,5	3,5	5,3

Tableau 10.7 : Calcul selon l'option 2.

Fréquence des apports d'entretien

Elle dépend du pouvoir tampon du sol :

- **pour un sol à faible pouvoir tampon** : apports fréquents, voire annuel avec des quantités limitées.

- **pour un sol à fort pouvoir tampon** : apport possible tous les 5 ans avec des quantités plus élevées.

Attention dans ce dernier cas, les quantités à épandre et la trésorerie nécessaire risquent de devenir importantes et d'être un

frein à la pratique du chaulage. Il est donc préférable de ne pas différer trop longtemps les apports.

La fréquence dépend également du type de produit utilisé et de leur vitesse de dissolution.

Fractionnement du redressement

Si l'analyse de terre justifie un redressement, celui-ci devra être réalisé sans fractionnement afin de corriger le statut acido-basique du sol avant l'implantation des prochaines betteraves.

Une surveillance particulière des teneurs du sol en bore et magnésium sera réalisée, avec apports systématiques de bore en végétation en cas de redressement important ■

Cas des prairies de longue durée

Diagnostic

Identification des risques :

● Fertilité physique

Risques	Conséquences en sol acide
Circulation ralentie de l'eau dans le sol.	Ressuyage lent du sol et ré-humectation lente du profil. Capacité de rétention d'eau réduite, sensibilité à la sécheresse.

Tableau 11.1 : Altération des propriétés physiques des sols de prairie.

● Fertilité chimique

Risques	Conséquences en sol acide
Toxicité aluminique.	Croissance racinaire réduite, alimentation hydrique et minérale affectée, flore adaptée de faible productivité et de qualité médiocre.
Perturbation de l'alimentation des plantes.	Diminution de la disponibilité du Phosphore.

Tableau 11.2 : Altération des propriétés chimiques des sols de prairie.

● Fertilité biologique

Risques	Conséquences en sol acide
Réduction de certaines activités biologiques.	Nitrification lente de l'azote ammoniacal.

Tableau 11.3 : Altération des propriétés biologiques des sols de prairie.

Indicateurs à prendre en compte :

- **pH_{eau}** : Il est important de surveiller le pH de la couche de surface à partir de laquelle se reconstruit chaque année l'essentiel du système racinaire. Il faut par ailleurs éviter l'acidification en profondeur qu'il est très difficile de corriger par la suite.
- **Aluminium échangeable.**
- **Flore acidophile (rumex petite oseille).**
- **Composition botanique (disparition des légumineuses productives).**
- **S/CEC et/ou Ca/CEC** : On peut se référer à l'un ou à l'autre de ces deux indicateurs.
- **Type de parcelle, caractérisée par sa fonction et le niveau de fertilisation azotée.**

Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques

Elles dépendent étroitement des objectifs assignés à la prairie.

On trouvera dans le tableau 11.4 les valeurs souhaitables associées à ces objectifs.

Stratégie d'apport

Les fonctions de la prairie, et en particulier son mode d'exploitation, déterminent les stratégies d'apport.

Trois types de prairies peuvent être distingués, selon les pratiques de fertilisation, le niveau de production visé et le mode d'exploitation de la prairie.

- **Type 1** : prairies conduites de façon intensive (forte fertilisation azotée ou présence de légumineuses), exploitées en fauche ou en pâture, caractérisées par une production élevée et de qualité.

- **Type 2** : prairies gérées de manière extensive, valorisées en pâture par des ani-

maux à l'entretien ou à performance individuelle moyenne, ou en fauche, avec un fourrage abondant mais d'une qualité généralement faible.

- **Type 3** : prairies les plus extensives sans fertilisation, ni organique (hormis les déjections au pâturage), ni minérale, valorisées le plus souvent par des animaux à l'entretien, avec un faible chargement à l'hectare.

Le tableau 11.4 décrit les différentes stratégies possibles en fonction des valeurs des indicateurs.

Besoin en Bases

L'apport d'**entretien** consiste à compenser l'acidification liée à la production de protons.

Du fait de son application en surface, les bases apportées neutralisent essentiellement l'acidité de la couche superficielle (0-10 cm).

Des apports de 200 à 300 unités de VN par ha et par an suffisent généralement à entretenir le pH au dessus du pH_{eau} critique (Voir également le chapitre 7).

Pour le **redressement**, l'importance des quantités à apporter sera fonction de la nature du sol, de son pouvoir tampon notamment, de la quantité de terre fine prise en compte (profondeur de sol) et de l'augmentation de pH_{eau} visée. À titre indicatif, pour une $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ de 10 cmol^+ par kg, l'augmentation d'un demi point de pH_{eau} correspond pour un horizon 0-10 cm à 850 unités de VN/ha, et pour une $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ de 15 cmol^+ /kg à 1 250 unités de VN/ha.

Fréquence des apports d'entretien

La fréquence des apports d'entretien (annuels ou bloqués pour plusieurs années, 2 à 3 ans) dépend de la nature des produits

utilisés et de considérations d'ordre économique.

		Sols	Très acide	Acide		Faiblement acide		Peu acide	
		pH _{eau} sur 0-10 cm (1)		5 ou 5,5 (2)		5,8		6,3 (3)	6,8
Prairie		Ca/CEC Metson		45 %		55 %		75 %	100 %
		S/CEC Metson		55 %		70 %		90 %	120 %
Type	Fonction	Conduite	Attention, les valeurs indiquées se réfèrent à un pH _{eau} moyen faisant abstraction de pics de variations spatiales et temporelles du pH						
1	Animaux en production, à performance élevée, fourrage très abondant de bonne qualité (P et/ou F)	Alimentation azotée non limitante, Chargement élevé, Fertilisation forte, Prairie drainée ou peu hydromorphe	Redressement justifié par : - la toxicité aluminique - la composition botanique qui peut se dégrader	Entretien régulier visant à maintenir le pH au dessus de 5,5 (*) pour l'amélioration de la production et la préservation de la composition botanique		Contrôle régulier du pH et S/CEC. Entretien régulier pour le maintien du potentiel de production		Contrôle régulier du pH et S/CEC.	
2	Animaux à l'entretien ou à performance moyenne, fourrage abondant de faible qualité (F et/ou P)	Alimentation azotée limitante, Chargement peu élevé, Fertilisation faible		* 5 si le prélèvement est fait sur 0- 5 et si la teneur en matière organique est supérieure à 3 %		Contrôle régulier du pH et S/CEC. Entretien régulier pour le maintien du potentiel de production		Contrôle régulier du pH et S/CEC.	
3	Animaux à l'entretien, maintien de la couverture herbacée (P)	Pas d'azote, Pas de fertilisation, Chargement faible, Flore acidophile		Entretien du pH		Rien		Rien	

Tableau 11.4 : Stratégies d'apport selon les fonctions de la prairie et les valeurs des indicateurs.

(1) On devrait privilégier 0 - 5 cm.

(2) Bornes variables selon les expertises.

(3) Plage explorée par les essais COMIFER.

P : prairie pâturée.

F : prairie fauchée.

Gestion des apports de redressement

Les apports doivent se faire de préférence à l'implantation de la prairie temporaire afin d'incorporer le produit pour corriger le pH sur la profondeur la plus importante possible.

Pour les prairies permanentes ou les prairies temporaires installées, l'apport de surface est de règle. Son effet en profondeur (plus de 10 cm de profondeur) est très long à se manifester.

La période d'application s'étale traditionnellement de Septembre à Mars bien qu'il n'y ait aucune contre-indication à appliquer

le produit après une coupe (par exemple : au mois de Juillet après une deuxième coupe) ■



Prairie de longue durée.

2

Cas des sols sableux à forte teneur en matière organique

Diagnostic

Identification des risques

La toxicité aluminique est dans ce type de sol le principal problème lié à l'acidité. Le maïs, culture la plus répandue, risque d'être affecté par ce problème si la teneur en aluminium échangeable dépasse 50 mg/kg (Juste 1978).

La carence en magnésium peut-être accen-

tuée par la présence d'aluminium (Colomb 1972).

Le taux de minéralisation de l'azote organique du sol serait temporairement augmenté après chaulage (Saur 1989). Cette observation a été faite à l'occasion de défrichages forestiers qui sont généralement suivis d'une baisse de la teneur en matière organique du sol (Arrouays 1994).

● Fertilité chimique

Risques	Conséquences
Toxicité aluminique	Réduction de croissance, voire mort de la plante
Disponibilité des oligo-éléments	Risque de carence en molybdène (sur cultures maraîchères par exemple)
Mobilité des éléments traces	Absorption par la plante ou lixiviation des éléments traces

Tableau 12.1 : Altération de la fertilité chimique des sols sableux à forte teneur en matière organique.

● Fertilité biologique

Risques	Conséquences
Modifications de certaines activités biologiques	Ralentissement de la nitrification Rémanence de certains pesticides

Tableau 12.2 : Altération de la fertilité biologique des sols sableux à forte teneur en matière organique.

Indicateurs analytiques à prendre en compte :

- pH_{eau}
- Aluminium échangeable

Valeurs souhaitables pour les indicateurs

Pour s'affranchir de la toxicité de l'aluminium dans ce type de sol, le pH_{eau} doit être maintenu au dessus d'un seuil variable selon le type de sol sableux (Juste 1989).

	Cultures	
	Maïs	Cultures maraîchères
Objectif minimum absolu : pH _{eau} : 5,0	pH _{eau} = 6,2	pH _{eau} souhaitable de 5,5 à 6,2*
Si présence d'Al échangeable pour une teneur supérieure à 50 mg/kg	risque de toxicité sur maïs	toxicité possible

* 6,4 pour certaines cultures cultivées sur ce type de sol (framboisiers par exemple)

Tableau 12.3 : Valeurs souhaitables pour les indicateurs.

Stratégie d'apport

● Redressement

Remonter le pH_{eau} du sol au-delà du seuil critique d'expression de la toxicité aluminique.

Les quantités d'amendement nécessaires, peuvent être déterminées à partir des for-

mules de Laveau et Juste, INRA de Bordeaux (Contribution à la mise au point d'une méthode de détermination rapide du besoin en chaux des sols sableux des Landes, 1982).

En fonction du pH souhaité pour un système de culture donné, trois formules sont proposées :

- pH_{eau} souhaité $\approx 5,6 \rightarrow BEB = (124 MO + 1285 \times (5,6 - pH_{eau} \text{ actuel}) - 160)$
- pH_{eau} souhaité $\approx 6,0 \rightarrow BEB = (287 MO + 1410 \times (6,0 - pH_{eau} \text{ actuel}) - 830)$
- pH_{eau} souhaité $\approx 6,4 \rightarrow BEB = (490 MO + 1113 \times (6,4 - pH_{eau} \text{ actuel}) - 710)$

Avec :

BEB Besoin en bases exprimé en unités de VN/ha

MO Teneur en matière organique en %

pH pH_{eau} actuel compris entre 4,2 et 6,4

Exemple :

Pour amener le pH_{eau} d'un sol sableux contenant 5% de matière organique de 4,8 à 6,0 il faudra apporter :

$$BEB = 287 MO + (1410 \times (6,0 - pH)) - 830$$

$$BEB = 287 \times 5 + ((1410 \times (6,0 - 4,8)) - 830) = (1435 + 1692 - 830) = 2297 \text{ unités de VN par ha.}$$

NB : Ces formules ne sont qu'indicatrices des quantités nécessaires.

En effet le pH_{eau} maximum atteint dépend de la nature de l'amendement apporté, des modalités de son

incorporation dans le sol et de l'acidité induite par les facteurs de l'acidification, au cours de la période pendant laquelle le pH_{eau} s'élève de la valeur initiale à corriger jusqu'au pH souhaité.

Entretien

Apports périodiques pour maintenir le pH_{eau} impérativement au dessus de 5,0 et jusqu'à 6,2 (afin d'éviter tout problème de carence en manganèse ou zinc ...).

Tenir compte de la pluviosité, de l'irrigation et de la fertilisation azotée (dose et type d'engrais).

Fréquence des apports d'entretien

À priori tous les deux ans, voire annuellement pour limiter le lessivage (entraînant des particules de carbonates en profondeur).

Le contrôle analytique doit être fréquent pour ajuster au mieux les apports.

Fractionnement du redressement

En cas de redressement important l'apport doit, quoi qu'il en soit, permettre d'élever le pH au dessus du seuil de toxicité aluminique.

En l'absence de ce risque, on ne dépassera pas 1 500 unités de VN par ha et par an.



Figure 12.1 : Vue d'un essai chaulage du maïs.

À gauche sol acide, avec fort ralentissement de la croissance et jaunissement des feuilles ; à droite sol chaulé ■

Cas des sols sableux ou filtrants à faible teneur en matière organique

Diagnostic

Identification des risques

La toxicité aluminique n'est pas exclue dans ce type de sol. La carence en magnésium peut-être accentuée par la présence d'aluminium.

Le faible pouvoir tampon peut entraîner des variations importantes du pH_{eau} dans le temps.

● Fertilité chimique

Risques	Conséquences
Toxicité aluminique Acidité de surface	Réduction de la croissance, voire mort de la plante
Disponibilité des oligo-éléments	Risque de carence en molybdène (cultures maraîchères par exemple)
Mobilité des éléments traces	Absorption par la plante ou lixiviation des éléments traces

Tableau 13.1 : Altération de la fertilité chimique des sols sableux à faible teneur en matière organique.

● Fertilité biologique

Risques	Conséquences
Réduction de l'activité biologique	Ralentissement de la nitrification Installation plus difficile des rhizobiums

Tableau 13.2 : Altération de la fertilité chimique des sols sableux à faible teneur en matière organique.

Indicateurs analytiques à prendre en compte :

- pH_{eau}
- Aluminium échangeable

Remarque : les rapports S/CEC ou Ca/CEC ne sont pas utilisables dans ce type de sol (CEC trop faible). Pour s'affranchir de la toxicité de l'aluminium le pH_{eau} doit être maintenu au dessus d'un seuil minimal.

Valeurs souhaitables pour les indicateurs :

Objectif minimal pour le pH_{eau} : 5,4	Le pH_{eau} doit évoluer entre 5,4 et 6,2 et ne jamais atteindre le seuil de manifestation de la toxicité aluminique à l'implantation de la culture.
---	--

Tableau 13.3 : Valeurs souhaitables pour les indicateurs.

Stratégie d'apport

« Pilotage à vue » sur la base du suivi analytique fréquent du pH_{eau} .

Besoin en Bases (BEB) à l'entretien

- De l'ordre de 300 à 500 unités de VN par ha et par an.
- A augmenter de 50 à 100 unités en cas d'irrigation, avec suivi du pH.
- A adapter en fonction de la composition de l'eau d'irrigation (présence de carbonates ou d'hydrogéo-carbonates). Tenir compte de la conduite de l'irrigation.

Modalités d'apport

Tous les ans ou tous les deux ans dans le cadre de l'entretien pour limiter le lessivage (entraînement des particules de carbonate en profondeur).

Possibilité de faire des apports au semis.

S'il y a risque de toxicité aluminique, il est conseillé de ne pas fractionner dans la limite de 2000 unités de VN par ha (pouvoir tampon faible et pertes par entraînement) ■

Vignes

Diagnostic

Au même titre que la matière organique, la prise en compte du statut acido-basique du sol est un préalable à toute fertilisation de la vigne.

Identification des risques liés à l'acidification

● Fertilité chimique

Risques	Conséquences en sol acide
En sol non calcaire, diminution de la CEC effective*	Baisse des capacités de stockage de cations, diminution du pouvoir tampon du sol vis-à-vis du pH et du potassium.
Lixiviation de cations	Pertes d'éléments nutritifs
La fertilité du sol est diminuée	Les éléments tels que phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg) sont moins disponibles pour la plante à partir d'un certain niveau d'acidification. Apparition de carences en Bore par solubilisation et lixiviation de cet élément.
Augmentation de la solubilisation de certains métaux toxiques	Cette solubilisation peut entraîner des toxicités (aluminium, cuivre, manganèse) si le pH descend trop bas (inférieur à 5,5). Ces toxicités peuvent toucher la vigne (en particulier les jeunes plants) mais agissent surtout sur la vie du sol. Les éléments trace deviennent mobiles et peuvent être absorbés.

Tableau 14.1 : Altération de la fertilité chimique des sols viticoles acides.

● Fertilité physique

Risques	Conséquences en sol acide
Dégradation de la structure du sol	La cohésion du sol est moins bonne. L'infiltration de l'eau est plus difficile, car la porosité diminue, favorisant ainsi l'érosion.
Érosion	Rigoles, dépôts, pertes de terre

Tableau 14.2 : Altération de la fertilité physique des sols viticoles acides.

● Fertilité biologique

Risques	Conséquences en sol acide
Diminution de l'activité biologique du sol	Les phénomènes liés à la vie microbienne sont plus difficiles : minéralisation, dégradation de la matière organique, nitrification.

Tableau 14.3 : Altération de la fertilité biologique des sols viticoles acides.

Indicateurs du statut acido-basique du sol

Observation : flore naturelle, dégradation de l'état de surface, dégradation plus difficile des résidus organiques (sarments notamment).

- Le pH_{eau}^* : il permet de mesurer l'acidité du sol. Il a l'inconvénient d'être variable dans le temps (plus élevé en hiver) et dans l'espace. Il est donc conseillé de réaliser les prélèvements de terre en hiver, époque de l'année où les variations de pH sont les plus modérées. Il est important de noter que le pH idéal n'existe pas (en particulier le $pH = 7$, neutralité, n'est pas un objectif).
- Taux de saturation (S/CEC) : l'acidification du sol se traduit par une perte des

cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) du complexe d'échange et leur remplacement progressif par les ions H^+ et Al^{3+} . Le taux de saturation (rapport cations échangeables/ CEC_{Metson}^*) apparaît donc comme une bonne approche pour évaluer cette acidification. Dans les sols à faible CEC ($CEC_{Metson} < 6\text{ cmol}^+/kg$), l'utilisation du pH_{eau} est cependant préférable au taux de saturation.

- Pouvoir tampon : cette notion traduit la plus ou moins grande faculté du sol à modérer les variations de pH. Ce pouvoir tampon est surtout fonction de la teneur en argile et en matières organiques (un sol argileux a un pouvoir tampon plus élevé qu'un sol sableux par exemple).

Valeurs souhaitables des indicateurs analytiques :

S/CEC	70 à 75%		~ 95%		
Ca/CEC	60 à 65%		80-85 %		
pH_{eau}		6.2		7.0	
Stratégie	Redressement		Entretien en fonction du pouvoir tampon du sol (CEC)		pas d'apport

Tableau 14.4 : Valeurs souhaitables de pH_{eau} et de S/CEC .

Stratégie d'apport

Le raisonnement s'effectue en fonction des indicateurs précédents.
Le calcul des doses se fait en tenant compte de la différence entre état souhaitable et état actuel et du pouvoir tampon (voir cas général, chapitre 9).

● **Conseils :**

Incorporer l'apport au sol, si possible, pour une meilleure rapidité d'action.
Raisonnement le statut acido-basique du sol avant la matière organique (Cf. influence sur la minéralisation et la dégradation de la matière organique).
Sur vigne en place, les apports d'amendement organique et d'amendement basique

sont à alterner : l'apport d'amendement organique est à réaliser l'année suivant l'apport d'amendement basique.

Avant plantation, éviter un apport d'amendement basique avec un apport d'amendement organique (risque de neutralisation). Apporter toujours l'amendement basique (si possible en l'incorporant au sol) avant l'amendement organique.

Éviter un apport d'amendement basique avec un apport d'engrais ammoniacal (pertes par volatilisation).

Dolomie : On apporte du Magnésium, donc à réserver aux sols déficients en Mg.

● **Critères de choix d'un amendement basique**

	Plantation	Vigne en place		
Situation		Redressement ↓	Entretien	
			sol lourd	sol léger
Rapidité d'action	lente	rapide	rapide	moyennement rapide et durable
Solubilité carbonique	moyenne à faible	élevée	élevée	moyenne
Fréquence d'apport			3 à 5 ans	2 à 3 ans

Dans le cas d'une plantation, si le pH est inférieur à 5,8, il convient d'utiliser des produits à finesse plus grande pour un effet plus rapide.

Il est fortement déconseillé de planter tant que le pH du sol n'a pas été remonté au minimum à 5,8 ■

Partie III

Éléments pratiques sur les produits

Normalisation des produits utilisables

Mise sur le marché

La mise sur le marché des matières fertilisantes (engrais, amendements minéraux ou organiques) est réglementée et peut se faire sous plusieurs régimes.

Pour les amendements minéraux basiques, le régime le plus utilisé est celui de la normalisation. Ce régime est encadré par la norme NF U 44-001. Cette norme est rendue d'application obligatoire par arrêté interministériel.

Pour utiliser ce régime de mise sur le marché, le fabricant doit s'assurer que son produit fait bien partie de ceux définis dans la norme, et en respecter toutes les dispositions.

Les amendements qui ne relèvent pas de ce régime (c'est-à-dire non définis dans la

NF U 44-001) ne peuvent être mis sur le marché que :

- comme déchets, sous le régime des « plans d'épandage », avec autorisation préfectorale. Il est dans ce cas nécessaire d'analyser chaque produit et chaque parcelle destinataire, avec un suivi analytique des sols où le produit a été épandu.
- ou bien sous le régime de l'Homologation ou de l'Autorisation Provisoire de Vente (APV), avec autorisation donnée par le Ministère de l'Agriculture. Il faudra dans ce cas faire la preuve de l'efficacité, de l'innocuité et de la constance de composition dans les conditions d'emploi préconisées.

La norme NF U 44-001

La norme NF U 44-001 est disponible auprès de l'AFNOR (www.afnor.fr).

En accord avec les principes de chimie rappelés par le COMIFER (ce n'est pas le calcium ou le magnésium qui font remonter le pH des terres, mais la base associée), le titre de la norme a été modifié.

Les « amendements calciques et ou magnésiens » s'appellent désormais les « amendements minéraux basiques » eu égard aux propriétés du même nom qu'ils apportent.

On trouve dans la norme NF U 44-001 :

- Les classes et les types de produits concernés,
- Leurs modes d'obtention,
- Leurs spécifications minimales (teneurs et qualités),

- Les obligations d'auto-contrôle (éléments déclarés, éléments trace),
- Les obligations de marquage,
- Des critères de qualité relatifs à l'innocuité.

La dernière mise en application obligatoire de la norme NF U 44-001 concerne la version de février 2001 et ses additif A1 d'avril 1998 et A2 de juillet 2003.

Cependant, cette norme a été mise en révision en 2006, et une nouvelle version consolidée référencée avril 2009 a été homologuée par l'AFNOR.

La mise en application obligatoire de cette nouvelle version est prévue pour fin 2009.

On se référera à cette dernière version pour plus de précision sur les types et les modes d'obtention des produits contenus dans chaque classe.

Classes de la norme NF U 44-001

La nouvelle norme NF U 44-001 d'avril 2009 définit plusieurs classes :

Classe 1 Carbonates de calcium d'origine naturelle (produits crus d'origine géologique, terrestre ou marine à base de CaCO_3).

Classe 2 Carbonates de calcium et de magnésium d'origine naturelle, (idem, plus MgCO_3).

Classe 3 Chaux (produits cuits) ; (Chaux vives (CaO) ou éteintes (Ca(OH)_2), calciques ou magnésiennes).

Classe 4 Amendements basiques sidérurgiques.

Classe 5 Amendements minéraux basiques mixtes. (mélange de produits crus et cuits ou sidérurgiques).

Classe 6 Autres amendements minéraux basiques (écumes de sucreries, boues de décalcification des eaux de forage et carbonate de calcium issu de la production de la pâte à papier kraft).

La norme définit également certaines méthodes de contrôle et donne des informations statistiques sur les éléments en trace pouvant contribuer à apprécier l'innocuité des produits dans les conditions d'emploi, à condition de connaître les doses épandues. Dans le cadre de la norme ou de l'homolo-

gation, l'étiquetage des amendements est obligatoire.

Les caractéristiques doivent figurer soit sur le bordereau d'accompagnement pour les produits en vrac, soit sur une étiquette ou sur le sac pour les produits conditionnés. L'étiquetage doit parvenir jusqu'à l'agriculteur.

Les éléments à mentionner obligatoirement, selon la NF U 44-001 : 2009, sont notamment :

- Dénomination du type d'amendement,
- Référence à la norme,
- Teneurs conventionnellement exprimées en % CaO et % MgO sur le produit brut, tel qu'il est livré, et non sur sec,
- Forme chimique du CaO et du MgO (carbonate, oxyde, hydroxyde, silicate),
- Humidité (si elle dépasse 1 %),
- Valeur Neutralisante,
- Finesse de mouture : 80 % minimum passant au tamis de ... mm, (facultative pour les produits de la classe 3, 5 et certaines dénominations du type de la classe 6),
- Solubilité carbonique ou dureté de la roche, (selon le type et la finesse, uniquement pour les produits crus),
- Nom et adresse du responsable de la mise sur le marché,
- Masse nette.

Exemple d'étiquetage

Cet étiquetage peut être complété par d'autres mentions rendues obligatoires par d'autres dispositifs réglementaires (emballages, matières dangereuses, certification, transports...).

La norme autorise certaines mentions facultatives :

- marque du fabricant et / ou du produit

- indications de stockage, d'emploi et de manutention,

en particulier la mention éventuelle :

- « Produits utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) n° 834/2007 », uniquement pour les produits des classes I et II (produits crus).

Les mentions qui ne sont pas expressément autorisées sont interdites.

Exemple :**« AMENDOSOL »
AMENDEMENT MINERAL BASIQUE****NF U 44-001
AMENDEMENT CALCO-MAGNESIEN PULVERISE**

42 % d'Oxyde de Calcium (CaO) total combiné à l'état de Carbonate
10 % d'Oxyde de Magnésium (MgO) total combiné à l'état de Carbonate
Valeur neutralisante : 56

80 % minimum passant au tamis de 0,100 mm

Solubilité carbonique de l'amendement : 45

Amendement à action moyennement rapide

Apports cumulés d'éléments trace par les matières fertilisantes :
voir article 6 de la norme NF U 44-001

Ets DUPONT 44001 Trifouilly

Masse nette : 50 Kg

Autres méthodes

Si le produit ne s'apparente pas aux amendements traditionnels d'un point de vue chimique, on peut avoir une idée de sa capacité de neutralisation en réalisant des incubations normalisées (NF EN 14984). Cette norme permet de suivre l'évolution du pH de la terre sous différentes modalités (terre seule, terre avec amendement de référence, terre plus produit à évaluer) dans des conditions contrôlées reproductibles et standardisées de température, d'humidité et de type de sol.

Par ailleurs une méthode de dosage des carbonates présents en petite quantité dans une terre est en cours de normalisation. Elle permet de mesurer l'efficacité des amendements crus en suivant leur taux de dissolution.

Enfin, une nouvelle méthode de réactivité est à l'étude pour remplacer à terme la solubilité carbonique avec les avantages suivants :

- Facilité de mise en œuvre avec titration automatique ;
- Temps réduit (15 minutes au lieu de 2 heures) ;
- pH de dissolution contrôlé ;
- Échantillon plus représentatif (5 g au lieu de 200 mg) ;
- Excellente répétabilité ;
- Capacité de discrimination équivalente ■



Quelques éléments pour raisonner le choix des produits

Introduction

Outre la quantité apportée, la nature de l'amendement peut également influencer l'évolution des caractéristiques du sol dont l'amélioration est recherchée. Le choix de l'amendement le mieux adapté à l'objectif recherché implique donc de bien connaître le mode de transformation des produits disponibles sur le marché. Les éléments suivants sont à prendre en compte.

Éléments à prendre en compte

1 La valeur neutralisante d'un amendement basique s'exprime d'autant plus que le milieu est plus acide.

En effet, une acidité faible suffit pour fixer H^+ à CO_3^{2-} dont la basicité est assez forte, mais il faut une acidité plus forte pour fixer H^+ à HCO_3^- dont la basicité est très faible. Les constantes de dissociation de l'acide carbonique H_2CO_3 ($pK_a(*)$: 6.36 et 10.33) rendent compte de cela.

Ainsi dans une solution dont le pH est inférieur à 4,5, on peut considérer que la capacité de neutralisation d'un amendement carbonaté s'exprime complètement

(figure 16.1). Elle diminue d'autant plus que le pH s'élève pour ne plus s'exprimer au-delà d'un pH qui dépend de la concentration de Ca et de CO_2 . Un pH de 8,34 correspond au pH d'équilibre du carbonate de calcium avec le CO_2 de l'atmosphère (Lindsay 1979). Par conséquent l'ajout de $CaCO_3$ à un milieu ayant ce pH ne fait pas varier ce pH c'est à dire qu'il ne fixe pas H^+ .

Attention, dans la figure 16.1, il s'agit du pH d'une solution, et non du pH d'un sol mesuré conventionnellement au laboratoire qui est souvent supérieur au pH in situ du fait du protocole de mesure normalisé.

Évolution du taux de dissociation de l'acide carbonique

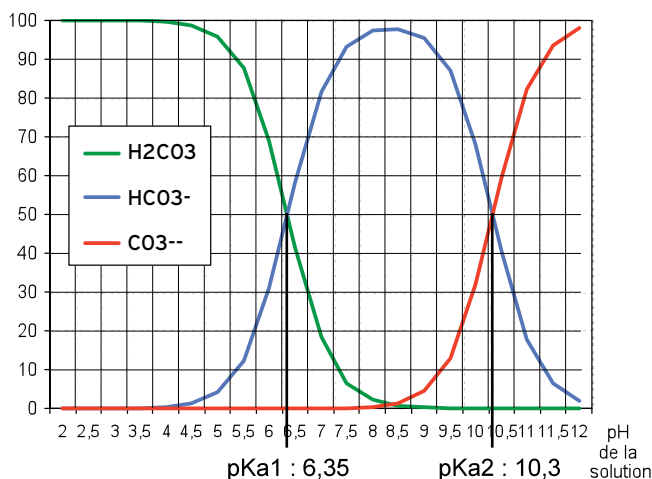


Figure 16.1

Courbes de dissociation de l'acide carbonique dans l'eau pure et valeur des pK_a .

L'ordonnée, présentant une échelle de 0 à 100 % indique la proportion des différentes espèces chimiques présentes à différents niveaux de pH.

(*) pK_a : caractéristique d'un couple acide base.

Lorsque $pH = pK_a$ les deux espèces conjuguées sont en concentrations égales dans la solution. Pour les amendements minéraux basiques contenant la fonction carbonate, les entités chimiques suivantes sont produites dans le sol :

H_2CO_3 après neutralisation de $2H^+$
(ou $H_2O + CO_2$)
 HCO_3^- après neutralisation de $1H^+$
 CO_3^{2-} qui peut neutraliser $2 H^+$

À partir de la figure 16.1, on a calculé par combinaison linéaire le nombre de protons H^+ neutralisés par un carbonate en fonction du pH de la solution dans ces mêmes conditions (figure 16.2).

Bien que dans la réalité, l'évolution du pH soit limitée à environ 8,5 du fait de la pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère, cette figure permet d'illustrer que la valeur neutralisante d'un carbonate de calcium s'exprime d'autant moins que le pH s'élève.

Neutralisation de protons par un carbonate en fonction du pH du milieu

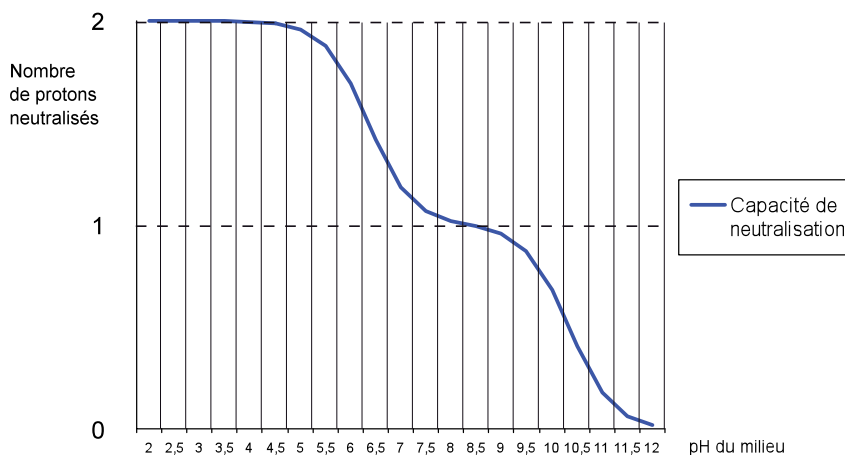


Figure 16.2

Possibilité de neutralisation de protons par un carbonate en l'absence de pression partielle de CO_2 et sans formation de précipités.

2 Plus un matériau est fin et/ou tendre, plus sa vitesse de dissolution est rapide.

Ceci est en relation avec la surface d'échange et la facilité d'attaque du matériau par l'acidité du milieu.

3 À masse apportée égale, le nombre et la répartition des particules dans la terre conditionnent l'effet de l'amendement.

Pour un amendement de finesse et solubilité données, son action sur le sol dépend de la répartition des particules dans le volume de terre où elles sont incorporées.

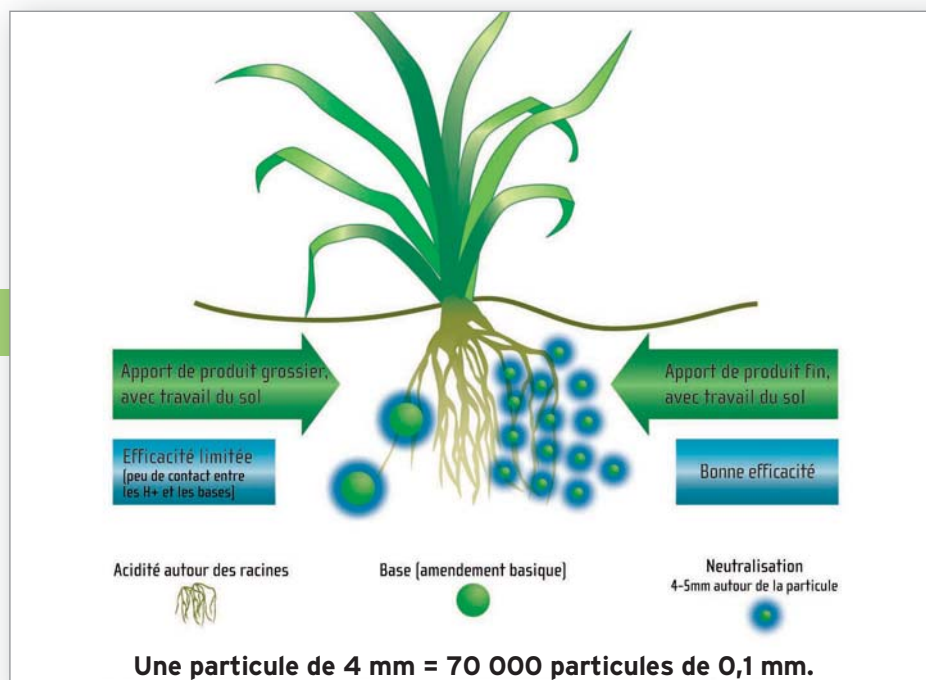
La répartition homogène des particules dans le sol accroît leur vitesse de dissolution et homogénéise la modification du pH. La dispersion des particules de l'amendement dans la terre dépend des modalités de travail du sol mises en oeuvre pour son incorporation.

Pour déterminer la vitesse de dissolution des amendements carbonatés trois études ont été réalisées :

1. L'élaboration de deux méthodes d'analyse des carbonates dans le sol :
 - Détermination du calcaire total (carbonate total) restant par attaque avec HCl et mesure volumétrique du CO_2

Figure 16.3

Schéma de principe présentant le volume de terre dont le pH est influencé par l'amendement en fonction de la taille de ses particules.



dégagé (en cours de normalisation, cf. chapitre 15).

- Détermination du calcaire total par spectrophotométrie infra rouge.

Ces méthodes permettent de mesurer avec précision la quantité restante de carbonate dans un sol et, en connaissant les quantités initialement présentes ou apportées, de calculer le taux de dissolution effectif des amendements dans une terre.

Elles ont été validées en comparant à plusieurs doses la quantité apportée à la quantité mesurée dans le sol immédiatement après l'apport (figure 16.4).

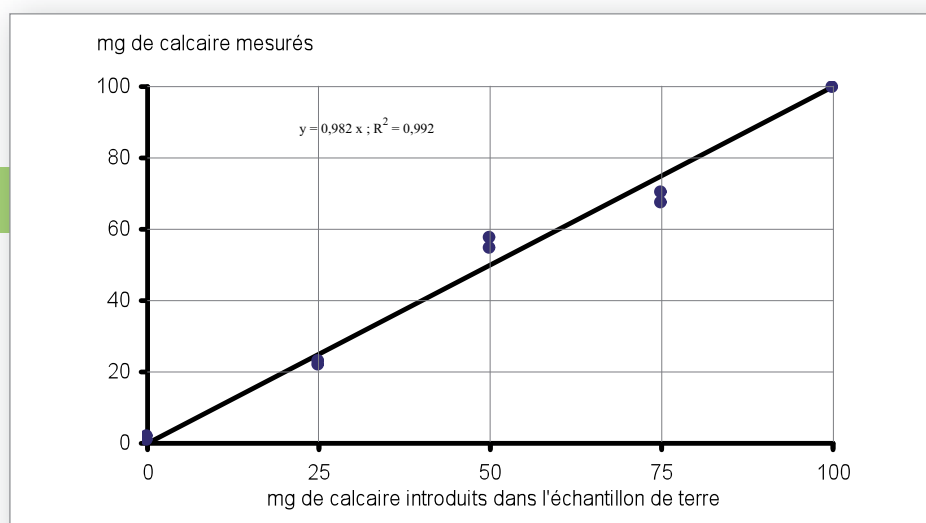
Les points représentant les quantités apportées et mesurées se répartissent sur une droite qui est quasiment la bissectrice ($y = 0,982 x$).

Les points ne sont pas très éloignés de la droite comme l'illustrent les R^2 :

Les droites de régression obtenues sur les différentes modalités (différents produits, différentes masses de prise d'essai pour la terre, différentes méthodes d'analyses) montrent des r^2 allant de 0,93 (spectrométrie infrarouge) à 0,98 (calcaire total pour des faibles teneurs).

Figure 16.4

Relation entre la quantité de calcaire (0-160 m) apporté dans le sol et la quantité mesurée par la méthode du calcaire total, pour une prise d'essai de 20 g de terre.



2. Des essais réalisés par la SADEF en 2007 et 2008 en incubation contrôlée pendant 1 mois et 2 mois (figure 16.5 et tableaux 16.1 et 16.2) qui confirment que :

- plus le milieu est basique, plus le taux de dissolution est faible.
- plus le produit est fin, plus le taux de dissolution est élevé.

3. Un protocole d'essai au champ pour mesurer en conditions réelles et bien contrôlées le taux de dissolution de différents produits.

contribuer au choix du type de produit le mieux adapté pour atteindre les objectifs assignés à l'amendement. D'autres éléments, de nature pratique et économique, doivent également être pris en compte.

Dose d'apport (g/kg)	Taux de dissolution (%)	Groupes homogènes Newmann et Keuls
0,25	53,5	A
0,50	36,4	AB
0,75	26,4	B
1,00	22,8	B

Tableau 16.1 : Taux de dissolution d'un carbonate fin (0-160 μ m) après un mois d'incubation dans un sol acide, en fonction de la dose apportée.

Les trois principes énoncés plus haut constituent des éléments susceptibles de

pH du sol	Granulométrie du produit	Durée d'incubation (semaines)								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sol acide (5,6)	0-160	47	27	non	42	53	58	59	60	77
Sol neutre (6,8)	0-160	37	32	me-	41	37	47	58	61	69
Sol acide (5,6)	160 -1mm	23	14	su-	34	39	36	44	50	55
Sol neutre (6,8)	160 -1mm	18	21	ré	24	25	27	47	55	46

Tableau 16.2 : Taux de dissolution (en %) du calcaire apporté à la dose de 1 g par kg de terre, en fonction du temps, du pH et de la granulométrie du produit.

La figure 16.5 est reconstituée à partir des données du tableau 16.2

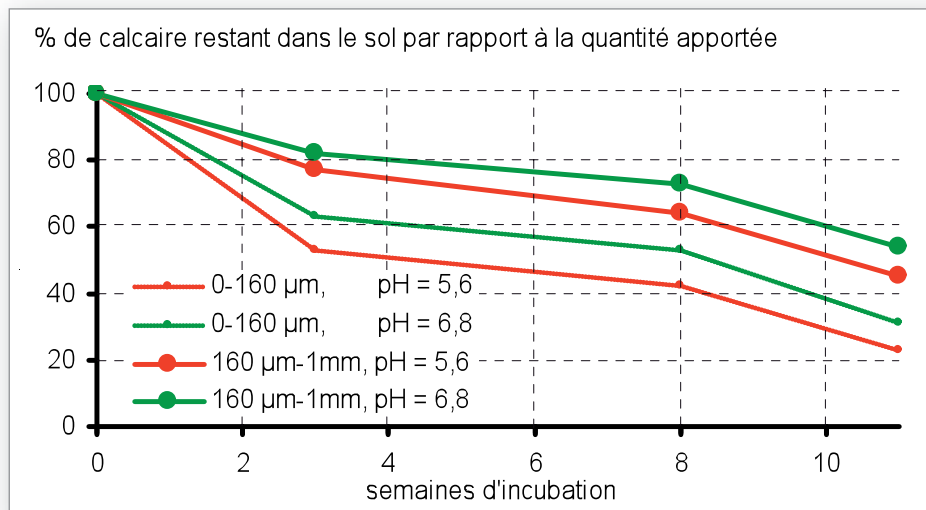


Figure 16.5

Proportion de carbonate de calcium (100 - taux de dissolution) restant dans le sol en fonction du temps d'incubation, du pH et de la granulométrie du produit apporté.

L'essentiel

La valeur neutralisante d'un amendement basique s'exprime d'autant plus que le milieu est plus acide. Plus un matériau est fin et/ou tendre, plus sa vitesse de dissolution est rapide. À masse apportée égale, le nombre et la répartition des particules dans la terre conditionnent l'effet de l'amendement ■

3

Aides au calcul

Du besoin en bases à la quantité de produit

Il est nécessaire de connaître la valeur neutralisante (VN) du produit, qui doit figurer sur l'étiquetage légal réglementaire qui accompagne le produit lors de sa livraison, ainsi que le besoin en bases (BEB) déterminé en se servant des fiches par système de culture.

Quantité de produit = $\frac{\text{Besoin en bases}}{\text{VN du produit} \times 10}$

Avec :

Quantité de produit : en tonnes/ha

Besoin en bases : en unités (ou Kg) de VN/ha

VN du produit : en Kg de VN pour 100 Kg de produit (voir étiquetage).

● **Exemple :**

Le besoin en bases calculé est de 1800 unités de VN par ha.

Pour passer en tonnage d'un produit titrant 64 de VN :

$1\,800 / (64 \times 10) = 2,81$ tonnes de produit par hectare.

Coefficients de conversion

Conversions masse/charge

Élément	Unité	Coefficient multiplicateur	Unité
Calcium	ppm CaO ou mg CaO/kg	► 0,00357 ► ◀ 280 ▶	cmol ⁺ de calcium/kg ou meq de calcium/100g
Magnésium	ppm MgO ou mg MgO/kg	► 0,00496 ► ◀ 201 ▶	cmol ⁺ de magnésium/kg ou meq de magnésium/100g
Potassium	ppm K ₂ O ou mg K ₂ O/kg	► 0,00212 ► ◀ 471 ▶	cmol ⁺ de potassium/kg ou meq de potassium/100g
Sodium	ppm Na ₂ O ou mg Na ₂ O/kg	► 0,00323 ► ◀ 310 ▶	cmol ⁺ de sodium/kg ou meq de sodium/100g

Conversions métal/oxyde

Élément	Unité originale	Coefficient multiplicateur	Unité convertie
Calcium	ppm Ca ou mg Ca/kg	►1,40► ◄0,71◄	ppm CaO ou mg CaO/kg
Magnésium	ppm Mg ou mg Mg/kg	►1,66► ◄0,60◄	ppm MgO ou mg MgO/kg
Potassium	ppm K ou mg K/kg	►1,20► ◄0,83◄	ppm K ₂ O ou mg K ₂ O/kg
Sodium	ppm Na ou mg Na/kg	►1,35► ◄0,74◄	ppm Na ₂ O ou mg Na ₂ O/kg

1 pour 1 000 = 1 pm = 1 ‰ = 1 g/kg = 1 kg/tonne = 1 000 ppm

1 ppm = 1 partie par million = 1 pour 1 million = 1 mg/kg

1 meq = 1 milliéquivalent

● Exemple :

L'analyse de terre donne un résultat en calcium échangeable de 1,5 g/kg de Ca.

Pour l'exprimer en forme oxyde (ppm CaO), puis en charges :

1,5 g/kg Ca = 1 500 mg/kg Ca

1 500 mg/kg Ca x 1,4 = 2 100 mg/kg CaO

2 100 mg/kg CaO x 0,00357 = 7,49 cmol⁺/kg terre fine ■

Glossaire

Les termes définis sont suivis de leur équivalent anglais en italique. Dans les définitions, les mots en gras renvoient à d'autres termes définis dans le glossaire.

Acide *Acid*

n.m.: Entité chimique (molécule, ion, ...) susceptible de donner H^+ (proton) à une autre entité chimique qui est une base.

adj. : se dit d'une entité chimique susceptible de donner H^+ (proton) à une autre espèce chimique qui est alors dite basique. Se dit aussi d'une solution ou d'un sol dont l'acidité effective ou d'échange est jugée élevée.

Remarque : Ce qualificatif est donc subjectif, à utiliser avec prudence.

Acidification

Action d'ajouter un acide

Modification résultant de l'apport d'acide ou de réactions produisant des acides (ou consommant des bases)

Cette action ou ces modifications peuvent conduire à plus ou moins long terme à un abaissement du pH.

Acidité effective (ou Active) *Active acidity or effective Acidity*

Concentration de H_3O^+ (notée H^+ pour simplifier) dans la solution du sol

Remarque : Cette concentration dépend donc de ce que l'on désigne par "solution du sol". Elle dépend de l'acidité d'échange du sol, mais aussi du rapport de dilution (ou de la teneur en eau du sol) et de la composition de la solution. La méthode de mesure de cette grandeur doit donc impérativement être précisée. (voir pH).

Acidité d'échange *Salt Replaceable Acidity*

Quantité de H^+ et Al^{3+} extraite en traitant une masse donnée d'un échantillon de terre par un sel neutre non tamponné.

Remarque : Cette quantité dépend du sel neutre employé.

Acidité titrable jusqu'à un pH donné

Acidité évaluée par la quantité de **base** consommée lorsque l'on amène le **pH d'un échantillon de terre** de sa valeur actuelle à une valeur donnée.

Remarque : l'acidité titrable dépend du **pH** (initial et final), de la **base** apportée et du cation associé, de la solution (suspension dans l'eau, KCl, ...), du temps de contact ...

Adsorption *Adsorption*

Rétention d'une molécule, d'un ion..., à la surface des corps par différents processus physiques ou chimiques (attraction électrostatique, complexation, liaisons de Van der Waals,...).

Alcalin *Alkaline*

Voir **Basique**

Alcalinisation

Action d'ajouter une base

Modification résultant de l'apport d'une base ou de réactions consommant des protons

Alcalinité ou Capacité à neutraliser les acides

Acid Neutralising Capacity, ANC

Quantité de bases neutralisables par un acide fort, (exprimée en cmol (OH^-) par kg de sol).

Amendement basique *Lime ou Liming Material*

Matière fertilisante caractérisée par un anion de basicité importante (O^{2-} , HO^- , CO_3^{2-} , anions silicates et silico phosphates) et un cation d'acidité négligeable (Ca^{2+} , Mg^{2+} principalement).

Remarque : L'intérêt principal d'un amendement basique est de neutraliser tout ou partie de l'acidité d'un sol.

Amendement basique calcique et/ou magnésien

Amendement basique contenant CaO , $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, avec la présence éventuelle de leurs homologues magnésiens.

Amphotère *Amphoteric*

Entité chimique ayant à la fois des propriétés acide et basique.

Anion *Anion*

Ion chargé négativement (ex : NO_3^-).

Base *Base*

Entité chimique (molécule, ion,...) susceptible d'accepter un ou des H^+ (proton) en provenance d'une autre entité chimique qui est un acide. Remarque : En pratique, l'apport d'une base permet de neutraliser les H^+ et de diminuer ainsi l'acidité du sol.

Basique *Basic*

Adj. : Se dit d'une entité chimique possédant les propriétés d'une base, ou d'un milieu dont le $pH > 7$.

Besoin en Base (BEB) *Lime Requirement*

Quantité d'amendement basique nécessaire pour neutraliser une partie de l'acidité d'une quantité de terre donnée.

Remarque : Le BEB est exprimé en unités de VN (exprimée en kilogrammes de CaO/ha). La partie de l'acidité à neutraliser peut être estimée de nombreuses manières.

Bilan de protons *H⁺ balance*

Différence entre les protons produits ou apportés et les protons consommés ou perdus dans un écosystème.

Capacité d'échange cationique (CEC) *Cation Exchange Capacity*

Quantité de charge cationique retenue par la charge négative du système adsorbant et susceptible d'être échangée de façon inversible. Cette quantité est estimée par une mesure chimique ou physico-chimique conventionnelle réalisée sur un échantillon de terre.

Remarque: Les conditions (pH , nature et concentration des cations et anions,...) influent beaucoup sur le résultat; il faut donc indiquer la méthode utilisée. Voir **Adsorption, CEC effective, CEC "Metson", Cations échangeables, $cmol^+ kg^{-1}$ de sol, Charge permanente, Charge variable, Charge dépendant du pH .**

Capacité d'échange cationique effective

(CEC_E) *Effective cation exchange capacity*

CEC évaluée par une méthode modifiant peu le sol, en particulier son pH et la concentration ionique de la solution.

Remarque: Les trois méthodes principales utilisent, les chlorures de cobaltihexammine ou "Cohex", de baryum, de potassium.

Remarque : Cette méthode n'est pas utilisable pour le calcul du besoin en bases.

Cation

Ion chargé positivement (ex : Ca^{++} , K^+).

Cations échangeables *Exchangeable Cations*

Cations retenus par le complexe adsorbant dont ils compensent la charge négative, et susceptibles d'être remplacés charge pour charge par d'autres cations provenant de la solution du sol.

Remarque : Voir **Neutralité électrique, Adsorp-**

tion. La méthode d'analyse influe sur les résultats: en présence de $CaCO_3$ la méthode "Metson" surestime la teneur en calcium échangeable.

CEC effective, ou "CEC au pH du sol" *Effective CEC*

Voir Capacité d'échange cationique effective.

CEC "Metson"

CEC évaluée par la méthode "Metson", caractérisée entre autres par une mesure tamponnée à un pH voisin de 7.

Remarque : En général, la CEC Metson surestime la **CEC effective** pour les sols acides et la sous-estime pour les sols basiques. Voir **Charge dépendant du pH .**

Charge dépendant du pH *pH Dependant Charge*

Charge variable dont la valeur dépend du pH .

Voir charge variable ou protonique

Charge structurale ou permanente (s_o) *Structural Charge*

Charge, presque toujours négative, de certains minéraux (principalement des phyllosilicates et des phyllo manganates) due au remplacement dans le réseau cristallin de certains cations par d'autres cations de charge différente ("substitution isomorphique").

Remarque : dans le cas d'une charge permanente négative, le cation de remplacement a une charge électrique inférieure à celle du cation original.

Charge variable ou protonique (s_H)

Proton charge

Charge due à la dissociation ou à l'association de protons (H^+) avec des groupements fonctionnels superficiels des phases solides du sol, organiques ou inorganiques. Cette charge dépend du pH et de la composition de la solution.

Remarque : Elle est toujours négative pour l'humus, mais elle peut être positive ou négative pour les oxydes (de fer, d'aluminium...).

Chaulage *Liming*

Technique culturale consistant à apporter un amendement basique au sol.

Remarque : ce terme désigne indifféremment les amendements basiques crus et cuits.

$cmol$

symbole de la centimole (centième de mole).

Voir mol.

cmol(+)

symbole de la centimole de charge positive.
Exemple : 1 cmol(+) est la charge portée par $\frac{1}{100}$ mol de Ca^{2+} ou 1 cmol de K^+ .

cmol+.kg⁻¹ ou cmol+/kg

Symbole de la centimole de charge positive par kilogramme (de terre fine). Unité d'expression de la CEC et des **cations échangeables**.
Remarque : Le résultat est numériquement égal à l'expression en milliéquivalent pour 100 grammes de terre (mé/100g ou meq/100g).

Décarbonatation

Diminution de la teneur en carbonates du sol du fait de l'acidification
Remarque : le terme décalcarification est à éviter.

Décalcification

Perte de calcium du sol par lixiviation ou exportation par les récoltes. Dans les sols non calcaires elle résulte essentiellement de leur remplacement par des protons (H^+) sur le système adsorbant. C'est une conséquence de l'acidification.

Densité de charge *Charge density*

Charge électrique, surfacique ou massique, des constituants du sol (voir CEC).

Désorption

Processus inverse de l'**adsorption**.

Force d'un acide *Acid strength*

Indication qualitative de l'aptitude d'un **acide** à donner H^+ .
Remarque: L'acidité sera dite "forte", "faible", "négligeable". Voir K_a .

Force d'une base *Base strength*

Indication qualitative de l'aptitude d'une **base** à accepter H^+ .
Remarque:... donc à donner naissance à des HO^- en solution aqueuse. La basicité sera dite "forte", "faible", "négligeable". Voir K_b .

 K_a (Constante d'acidité) *Acidity constant*

Évaluation quantitative de la force d'un acide dans l'eau. $K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$, HA et A^- forment un couple acide/base conjugués.

 K_b (Constante de basicité)

Évaluation quantitative de la force d'une base dans l'eau.

$K_b = 10^{-14}/K_a$, K_a est la constante d'acidité de l'acide conjugué (voir K_a).

Lessivage *Leaching*

Entraînement mécanique de particules solides dans le sol par l'eau gravitaire. Souvent utilisé à tort pour désigner aussi la lixiviation.

Lixiviation

Entraînement d'éléments dissous par l'eau gravitaire.

meq

Milli équivalent, voir cmol

mol

Symbole de la mole: une mole contient $6,022 \times 10^{23}$ molécules élémentaires.

mol.l⁻¹ ou mol / l

Symbole de la mole par litre.

Neutralité acido-basique

Caractéristique d'une solution aqueuse dans laquelle les concentrations de H_3O^+ et HO^- sont égales, c'est à dire dont le pH est égal à 7 à 25 °C. Par extension : caractéristique d'une entité chimique dont la solution aqueuse répond aux critères ci-dessus.

Neutralité électrique

Etat de la matière à l'équilibre se traduisant par l'égalité entre les charges positives et les charges négatives.

pH

Abréviation de potentiel Hydrogène. Indication chiffrée, reliée à la concentration de H_3O^+ d'une solution aqueuse (notée H^+ pour simplifier). En solution diluée, on a
 $\text{pH} = \log_{10}(1/[\text{H}^+])$ $\text{pH} = -\log_{10}([\text{H}^+])$
soit $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$

pH d'un échantillon de terre *soil pH*

pH d'une suspension d'un échantillon de terre dans l'eau pure ou dans des solutions (KCl , CaCl_2) dans un rapport donné

Remarque :

Les valeurs de pH_{eau} et pH 0,01M CaCl_2 sont différentes, et toutes deux différentes de celle de la solution du sol.

 pH_{eau} pH_{water}

pH d'une suspension de terre dans de l'eau pure dans un rapport terre / eau donné (1/5 en volume dans la norme française).

pH_{KCl 1M}

pH d'une suspension de terre dans une solution de chlorure de potassium de concentration molaire. Le pH peut aussi être mesuré avec d'autres sels à des concentrations données. Exemple pH CaCl₂ 0,01M.

pKa

Egal à -log Ka. Quand le pH est égal au pKa, les concentrations d'un acide et de sa base conjuguée sont égales. Plus le pKa est élevé, plus l'acide est faible.

Pouvoir tampon du sol *Buffer capacity*

Propriété conférée au sol par certaines entités chimiques (à l'état solide, adsorbé ou dissous), de modérer une variation de concentration de H⁺, potassium, phosphore,... dans la solution du sol à la suite d'apports, de productions, de prélèvements ou de pertes de H⁺, potassium, phosphore...

Proton *Proton*

Particule constitutive du noyau atomique. Noyau de l'atome d'hydrogène ; il porte une charge électrique élémentaire positive. Symbole chimique H⁺.

S : Voir somme des cations échangeables d'acidité négligeable.

Solution du sol

Phase liquide du sol.

Somme des cations échangeables (notée S)

Somme des cations échangeables d'acidité négligeable.

Elle correspond pour l'essentiel à la somme des charges portées par Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺.

Remarque : Les cations et S sont exprimés en cmol+.kg⁻¹ ou cmol+/kg.

Sorption

Enlèvement d'un ion ou d'une molécule de la solution du sol et rétention de cette substance (le sorbé) en surface (adsorption) et à l'intérieur (absorption, au sens restreint) d'une autre substance (le sorbant). Ce terme est souvent utilisé quand la nature exacte du mécanisme n'est pas connue.

Notes :

(1) Les forces qui retiennent le sorbé peuvent être chimiquement prédominantes (chemisorption) ou physiques, y compris les forces capillaires (le processus peut alors être appelé condensation capillaire);

(2) toute perte subséquente du sorbé par le sorbant est appelée désorption;

(3) dans le langage courant, absorption est usité dans le

sens plus général de faire ou laisser pénétrer un liquide ou un gaz dans sa propre substance.

T : Voir Capacité d'Echange Cationique.

Remarque : Utilisé antérieurement dans la formule du taux de saturation, ce terme doit être abandonné. Il faut indiquer la méthode de détermination de la CEC utilisée (Metson, Cobaltihexamine, effective, Mehlich, ...).

Taux d'acidité d'échange (TAE)

Pourcentage de la CEC effective occupée par des cations échangeables franchement acides (H⁺ et Al³⁺), tous exprimés en cmol+ /kg :

TAE = 100.(H⁺ + Al³⁺)/(Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺ + H⁺ + Al³⁺).

Taux de saturation (S/CEC ou S/T ou V) *Saturation rate*

Pourcentage de la CEC occupée par les cations échangeables d'acidité négligeable :

S/CEC en % =

100 x (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺)/CEC.

Remarque : Il faut préciser la méthode de détermination de S et CEC.

Les cations, S et la CEC sont exprimés en cmol + kg⁻¹ ou cmol + /kg.

Unité

Indicateur de masse souvent utilisé pour quantifier les éléments fertilisants.

Ce terme est quantitativement équivalent au kilogramme. On préférera toutefois utiliser les unités pour les éléments fertilisants et les kilogrammes pour les produits apportés.

Exemple : un apport de 100 Kg de KCl titrant 60 de K₂O correspond à un apport de 60 unités de K₂O.

V : Voir Taux de saturation de la CEC.

Remarque : Ne plus utiliser ce terme.

Valeur Neutralisante

La valeur neutralisante (VN) d'un produit, en particulier d'un amendement basique, s'exprime par la masse (en kg) d'oxyde de calcium (CaO) qui a la même capacité de neutralisation que 100kg du produit. On la mesure par action d'un acide fort (HCl). Un amendement titrant 54% de CaO a une valeur neutralisante de 54.

Remarque : La valeur neutralisante est une mesure chimique conventionnelle qui exprime la capacité potentielle d'un amendement basique à neutraliser l'acidité d'une terre. L'expression de ce potentiel dépend des conditions de milieu, et le cas échéant, de la finesse et de la dureté des particules d'amendement ■

Bibliographie et Normes

Articles

- **Arrouays D., Kicin J.L., Pélissier Ph., Vion I., 1994** : Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. *Etude et Gestion des Sols*, 2 : 29-37.
- **Bigorre F., Tessier D., Pedro G., 2000** : Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 330 : 245-250.
- **Boiffin J., Sebillotte M., 1982** : Fertilité - Potentialité - Aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronomie, *BTI*, n°370-372, 345-353.
- **Boiffin J., Guérif J. et Stengel P., 1990** : Les processus d'évolution de l'état structural du sol : quelques exemples d'études expérimentales récentes. Dans *La structure du sol et son évolution*, Ed INRA, Paris 1990, Les colloques de l'INRA n° 53, 37-69.
- **BONISCHOT R., 1986** : Faut-il chauler les prairies permanentes, in *Etat calcique des sols et fertilité ; Le chaulage*, Acta, 1986, 130-137
- **Bolan N.S., Adriano D.C., Curtin D., 2003** : Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability, *Advances in agronomy*, 78, 215-272
- **Bouthier A., Damay N., Fabre B., Julien J.-L., Peltier O., 2001** : Le chaulage, in "Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée", Thévenet (Comifer)et Joubert (Gemmas) eds, p 201 à 236.
- **Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996** : Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 3 : 27-40.
- **Charlet L., Schlegel M.L., 1999** : La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau / particules. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85-2 : 7-24.
- **Clune et al, 1999** : Effects of aluminium on canola roots. *Plant and Soil* 216 : 27-33
- **Coppenet M., 1956** : Dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse INA PG 1956.
- **Coppenet, M., 1957** : Le problème du chaulage à la lumière de la science agronomique moderne, *Bul AFES* n°93, 1020-1044.
- **Draycott A.P. 2006** : Sugar Beet. Blackwell Publishing, 474 pages
- **Duval Y., Boiffin J., 1993** : La dynamique de formation des croûtes de battance, in *L'implantation de la betterave industrielle*, Colloque n°67, Inra ., 67-85.
- **Fabre B., Kockmann F., 1987** : Relance du chaulage en Bresse Chalonnaise : mise en place d'un protocole d'étude et premiers résultats, *Bulletin technique d'information*, n°416, 3-19.
- **Fardeau JC, Stalmesse JP, 1995** : Fertilisation phosphatée ; efficacité du phosphore d'un amendement calcique phosphaté sidérurgique, *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 1995,81, n°1, 189-202.
- **Giller K. et al., 1998** : Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soil : a review, *Soil Biol. Biochem.*, 30, 10/11, 1389-1414
- **Groupe Chaulage du COMIFER, 1995** : Comment bien fertiliser en grandes cultures, in *Analyser et fertiliser en toutes connaissances*, Ignazi (Comifer)et Riou (Gemmas) eds, 135-148
- **Groupe Chaulage du COMIFER, 2000** : Du laboratoire au champ, questions vives sur le chaulage, *Comifer*, 9 pages
- **GUEYDON C., 1992** : Prairies permanentes : Comment améliorer leur rentabilité, *Journée technique*, Chambre d'Agriculture de la Loire, 14 avril 1992, 22 pages.
- **Helyar K.R., Porter W.M. 1989** : Soil acidification, its measurement and the processes involved. In *Soil Acidity and Plant Growth* (A.D. Robson Ed.). Academic Press, Sydney, pp 61-101.
- **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.
- **Julien JL et al, 2005** : L'acidification des sols (pages 516 à 537). In *Sols et Environnement*. M.C. Girard Ed. Dunod, France.
- **Juste C., 1965** : Thèse
- **Justes C. 1966** : Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest Atlantique : application à leur mise en valeur. *Annales agronomiques* 17, (2), 157-187, 17, (3), 251-341.
- **Kockmann F., Loisy C., 1995** : La pratique du chaulage : diversité des modèles d'action. In *Analyser et fertiliser en toutes connaissances*. 2è rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS et COMIFER), Blois. Ed. IGNAZI J.C. et RIOU P, 67-76.
- **Laveau G., Juste C., 1982** : Contribution à la mise au point d'une méthode de détermination rapide du besoin en chaux des sols sableux des

Landes. Académie d'agriculture de France, 610-616.

● **Peltier O., 2001** : Raisonnement de l'apport d'amendements minéraux basiques sur les prairies permanentes et temporaires de longue durée : influence sur la production et la qualité du fourrage, *In* Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée, Gemas Comifer, 231-236.

● **Pernes-Debuyser A., Tessier D., 2002** : Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols. Cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 177-186.

● **Pernes-Debuyser A., 2003** : Différenciation des propriétés du sol par des apports d'engrais et d'amendements, cas de l'essai de longue durée des 42 parcelles (Versailles), Thèse Univ Bourgogne, 150 pages.

● **Pinto M., Rodriguez M., Besga 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 journal of agricultural Research*, 38, 143-155.

● **Rémy J.C. et Marin-Lafleche A., 1974** : L'analyse de terre : réalisation d'un programme automatique. *Annales agronomiques*, 25 (4), 607-632.

● **Rodriguez M., Lopez F.A., Pinto M., Balcazar N., Besga G., 1994** : Basic Linz-Donawitz slag as a liming agent for pastureland, *Agronomy journal*, 86, 904-909.

● **Saur E., 1989** : Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-élément (Cu, Mn, Zn, B) à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de *Pinus pinaster* Soland in Ait. I. Croissance et nutrition en éléments majeurs. *Agronomie*, 9, 931-940

Stevens RJ, Laughlin RJ, 1996. *Journal of Agricultural Science* 127, 451-461. Effect of lime and nitrogen on two sward types on a 10 year period.

● **Tessier D., Bigorre F., Bruand A., 1999** : La capacité d'échange, outil de prévision de propriétés physiques des sols. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 : 37-49.

● **Warfingue Peter and Sverdrup Harald, 1989** : Modeling limestone dissolution in soils, *American Journal of soil science Society*, vol 53, n°1, (53 :44-51), January - February 1989.

Livres

Acidification des sols : origine, suivi et maîtrise, 2002 : Etude et gestion des sols, 2002 : Numéro spécial, 9, 3, 75 pages.

Bouthier A, Le Souder C, Castillon P, 1997 : Chaulage et fertilisation magnésienne, ITCF, 44 pages.

Colloque L'acidification des sols : origine, approche,

enjeux et maîtrise, programme et résumé, 2001. Ed AFES, INRA, Versailles, 4-5 avril 2001, 58 pages.

Coppenet et al., 1986 : Etat calcique des sols et fertilité : le chaulage, Comifer-ACTA, 166 pages.

Davet P., 1996 : Vie microbienne du sol et production végétale, INRA, Paris, 383 pages.

Deneux-Mustin et al., 2003 : Mobilité et transferts racinaire des éléments traces : Influence des micro-organismes du sol, Tec Doc, Lavoisier, paris, 280 pages.

Girard M-C et al., 2007 : Sols et environnement, Dunod, 816 pages.

Schvartz C., Muller J.-C., Decroux J. 2005 : Guide de la fertilisation raisonnée, Ed. France Agricole, 414 pages.

Normes

Norme NF ISO 10390 : Qualité du sol - Détermination du pH (Indice de classement : X31-117 Statut : Norme homologuée).

Norme NF X 31-130 : Qualité des sols - Méthodes chimiques - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles (Indice de classement : X31-130 Statut : Norme homologuée).

Norme NF EN 12944-3 : Engrais et amendements calciques et/ou magnésiens - Vocabulaire - Partie 3 : termes relatifs aux amendements calciques et /ou magnésiens (Indice de classement : U42-041-3 Statut : Norme homologuée).

Norme NF EN 12945 : Amendements minéraux basiques - Détermination de la valeur neutralisante - Méthodes par titrimétrie (Indice de classement : U44-177 Statut : Norme homologuée).

Norme NF EN 14069 : Amendements minéraux basiques - Description et exigences minimales (Indice de classement : U44-096. Statut : Norme homologuée).

Norme NF U 44-001 : Amendements minéraux basiques - Dénominations et spécifications (Indice de classement : U44-001 Statut : Norme homologuée).

Norme NF EN 14984 : Amendements minéraux basiques - Détermination de l'impact du produit sur le pH du sol - Méthode d'incubation du sol. (Indice de classement : U44-178 Statut : Norme homologuée).

Site

COMIFER, site internet :

http://www.comifer.fr/groupe_travail/chaulage.htm

Le chaulage

Des bases pour le raisonner

Par le groupe Chaulage au sein du

c o m i f e r



Le groupe Chaulage du COMIFER

a souhaité actualiser la brochure publiée en 2005 pour tenir compte de l'évolution des connaissances. Cet ouvrage est amendé de nouvelles références expérimentales. Enfin, il propose des éléments pour raisonner le choix des produits.

Le groupe Chaulage du COMIFER

recherche un consensus au travers de nombreux échanges entre les professionnels de l'amendement, de la recherche à la production, en passant par les laboratoires, la distribution et le conseil.

« Nous souhaitons que ce travail puisse être relayé auprès de tous les utilisateurs potentiels et contribue au partage d'une connaissance actualisée, en particulier auprès des jeunes générations. »

LE CHAULAGE - Novembre 2009

ISBN 978-235253-0442

Prix : 15,00



9 782352 530442