

Du laboratoire au champ, questions vives sur le chaulage.

A l'attention du lecteur : Ce texte résume les principaux acquis du Groupe Chaulage du COMIFER. Il est le fruit de la collaboration de compétences variées, du chimiste à l'agronome. Certaines affirmations pourront surprendre, en particulier dans le premier chapitre : Les membres du Groupe sont à la disposition du lecteur pour répondre à toutes questions.

1. Les amendements basiques – Propriétés

Les amendements basiques sont des amendements capables d'augmenter le pH d'un sol. Ils sont constitués d'un anion et d'un cation. L'anion porte des charges négatives ; il est capable de s'associer avec les H^+ pour les neutraliser : il a des propriétés basiques. Le cation porte des charges positives et peut s'adsorber sur le complexe adsorbant.

Les anions, éléments actifs des amendements basiques :

O^{2-} : anion constitutif de la chaux vive (CaO). Cet anion réagit très vite avec l'eau pour donner HO^- (voir ci-dessous). C'est une base forte.

HO^- : anion de la chaux éteinte $Ca(OH)_2$. C'est une base forte.

CO_3^{2-} : anion du carbonate de calcium ($CaCO_3$) ou de magnésium ($MgCO_3$). CO_3^{2-} est une base de force moyenne (mais, in fine, fixe autant de H^+ que $2HO^-$).

Anions silicates et silicophosphates : anions présents dans les amendements sidérurgiques. Ces anions complexes et variés sont des bases plutôt fortes.

Note : La force de la base rend compte de l'énergie avec laquelle elle fixe H^+ : plus la base est forte, plus elle fixe énergiquement H^+ .

Les cations :

Ca^{2+} : cation calcium, Mg^{2+} : cation magnésium.

Ca^{2+} et Mg^{2+} sont des acides de force négligeable.

La remontée du pH a souvent été associée à un effet direct du cation venant arracher et prendre la place des H^+ sur le complexe adsorbant. En réalité, les cations calcium sont incapables de «casser» la liaison très forte liant les H au complexe adsorbant (**figure 1**) :

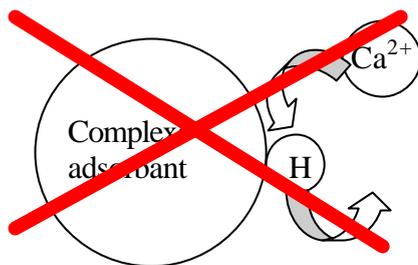


Figure 1 : Interprétation erronée du mécanisme du chaulage, les Ca^{2+} ne peuvent pas déplacer les H acides (voir ci-après).

Mode d'action schématique d'un amendement basique : INTERPRETATION JUSTE.

Seules les bases issues de l'amendement basique peuvent «arracher», à l'état de H^+ , et neutraliser les H acides fixés sur le complexe adsorbant (H acides : H^+ échangeables, rares, et H liés par covalence, beaucoup plus nombreux). Le pH de la solution du sol augmente. Les sites négatifs, libérés par les H^+ , peuvent alors accueillir les cations Ca^{2+} ou Mg^{2+} apportés par l'amendement (voir **figure 2**). Le mode d'action de l'amendement basique est présenté d'une manière plus complète dans le chapitre suivant.

AINSI

L'anion, c'est à dire la base, **est** l'élément actif de l'amendement basique.
L'efficacité d'un produit (amendement, fumier...) sur le pH n'est pas due à sa teneur en calcium.

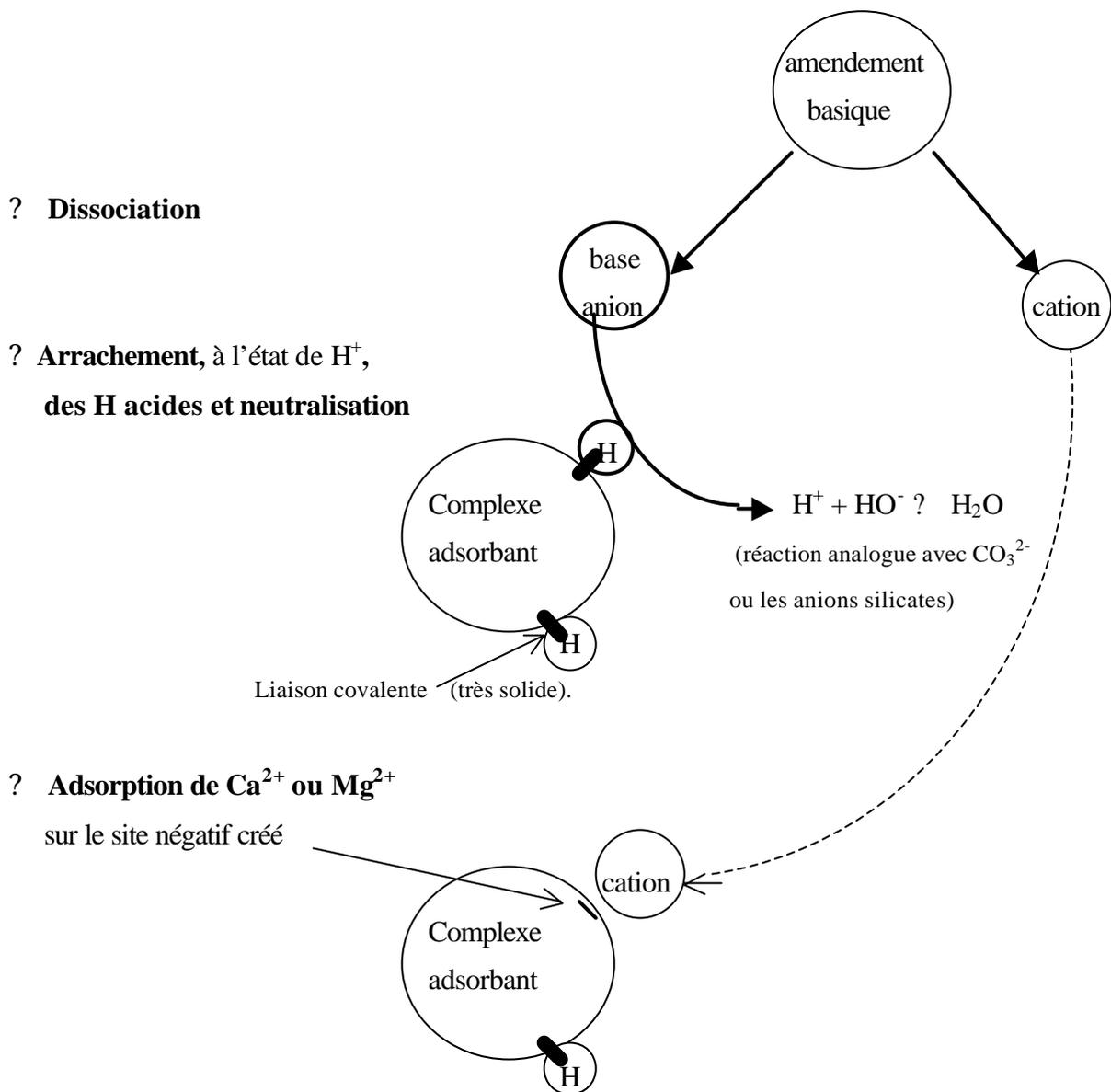


Figure 2 : L'efficacité d'un amendement basique tient à l'action de sa base, l'anion O^{2-} , HO^- , CO_3^{2-} ou silicate. Le cation, Ca^{2+} ou Mg^{2+} , ne fait qu'accompagner.

2. Les amendements basiques : Modes d'action.

Les ANIONS de l'amendement (O^{2-} , HO^- , CO_3^{2-} , silicates...), en raison de leurs propriétés basiques marquées, ont les principaux effets suivants (**figures 3, 4 et 5**) :

Solution du sol

- ? Neutralisation de H^+ .
- ? Précipitation d'ions de l'aluminium (présents si le pHeau du sol est inférieur à 5,8).

Sol

- ? Arrachement, à l'état de H^+ , et neutralisation de H acides fortement liés à la matière organique ou aux bordures des minéraux (liaisons covalentes). Des sites négatifs sont créés.
- ? Arrachement et précipitation de cations du fer (et de l'aluminium) complexés. Des sites négatifs sont libérés.
- ? Précipitation d'ions de l'aluminium échangeables, ce qui libère des sites négatifs (présents si le pHeau du sol est inférieur à 5,8).

AINSI

- Le pH augmente (pHeau et pH de la solution du sol).
- Le nombre de groupes acides diminue (groupes concernés par les réactions ? et ?).
- La CEC effective augmente (sites négatifs plus nombreux, réactions ? et ?).
- Le nombre d'ions aluminium échangeables et en solution diminue (réactions ? et ?)

Les CATIONS de l'amendement (Ca^{2+} , Mg^{2+}) :

- S'adsorbent sur les sites négatifs créés ou libérés (réactions ? ? et ?). En raison de l'acidité négligeable de Ca^{2+} et Mg^{2+} , ces sites négatifs peuvent exprimer leur basicité, variable selon la nature des sites.
- Prennent éventuellement la place d'autres cations échangeables.

AINSI

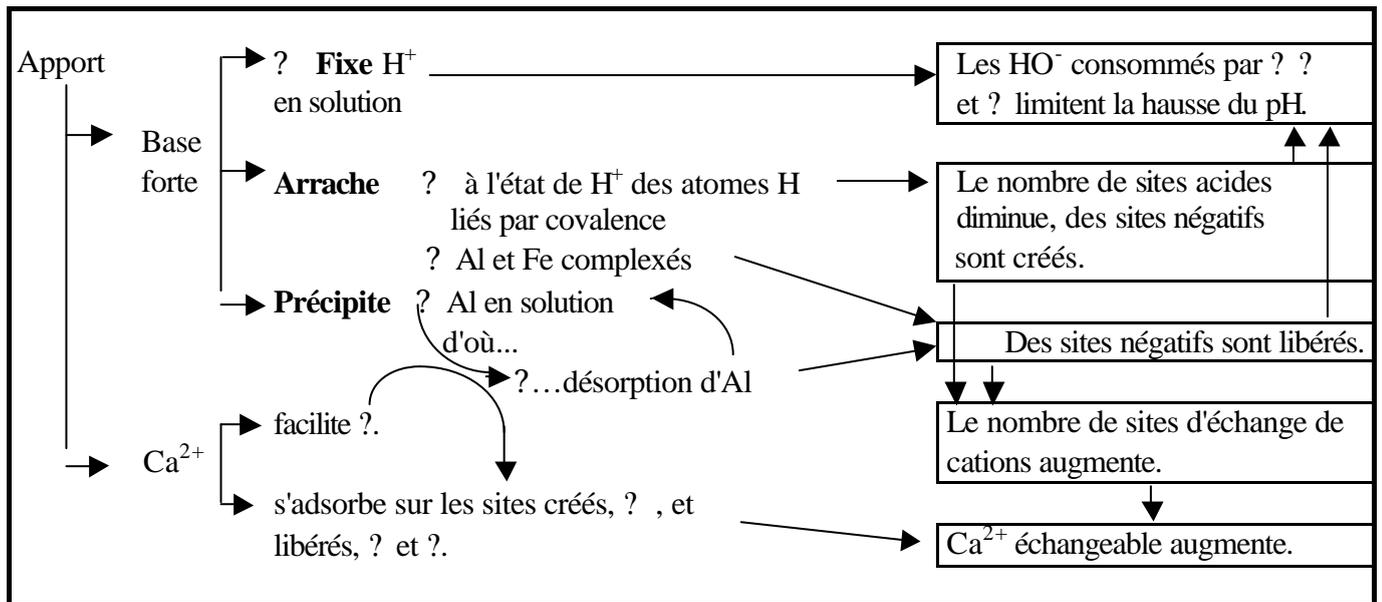
- La quantité de calcium échangeable augmente (et de magnésium le cas échéant).

Le **POUVOIR TAMPON** du sol vis à vis du pH est la faculté que possède le sol de modérer les variations du pH de la solution du sol. Ce pouvoir tampon dépend des acides et des bases (de force non négligeable) qui sont présents :

- sur la matrice organo-minérale ;
- à l'état échangeable ;
- en solution.

Pour un sol sans aluminium échangeable ($pHeau > 5,8$), la quasi-totalité des bases issues de l'amendement est consommée par les réactions avec les seuls groupes acides (réactions ? et ?). La diminution du nombre de groupes acides est à peu près égale à l'augmentation du nombre de sites négatifs. Dans le cas d'un amendement basique calcique, ces deux variations sont bien estimées par l'augmentation de la quantité de calcium échangeable. La CEC Metson étant une mesure de la quantité de sites négatifs à pH 7, des formules d'estimation de la dose d'amendement fondées sur le taux de saturation de la CEC Metson ont été proposées (Document COMIFER à paraître).

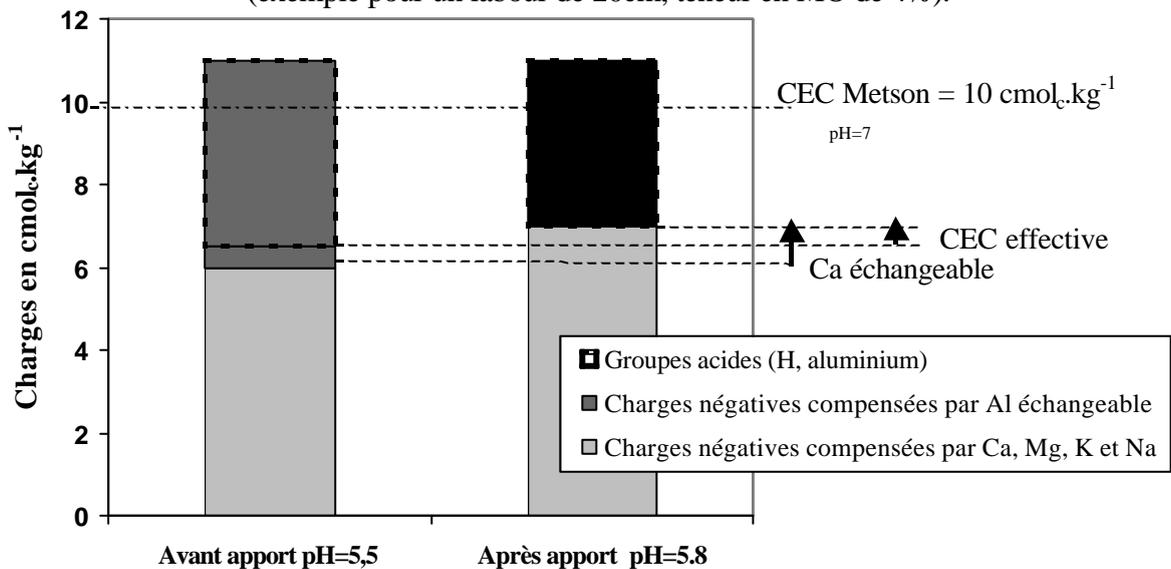
Figure 3 : Modes d'action et effets d'un apport d'amendement basique.



Les numéros renvoient au texte de la page 3.

Figure 4: Effet d'un apport de 1000 unités neutralisantes / ha

(exemple pour un labour de 20cm, teneur en MO de 4%).



Les groupes acides et l'aluminium échangeable diminuent au total de $1 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, le calcium échangeable augmente d'autant, la CEC effective augmente ($+ 0.5 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$).

Note : Une expression en équivalents (ou en milliéquivalents) est parfois ambiguë. On doit adopter les moles de charge, mol_c (norme ISO). La valeur numérique est la même en milliéquivalents pour 100 grammes ($\text{meq}/100\text{g}$) ou en centimoles de charge par kilo gramme ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$).

3. Les indicateurs du statut acido-basique des sols

Il existe plusieurs indicateurs analytiques du statut acido-basique, pH_{eau}, pH_{KCl}, S/T, aluminium échangeable..., détaillés dans le **tableau 1**. Ils sont souvent corrélés entre eux. L'approche du statut acido-basique est plus fiable quand on dispose de plusieurs indicateurs (**tableau 2**).

Ce sont en général les indicateurs biologiques qui alertent l'agriculteur. On peut citer par exemple, de façon non limitative, la qualité d'un peuplement prairial, la dominance de certaines adventices, une minéralisation difficile, une rémanence anormale d'herbicide, la dégradation facile des états de surface, une pénétration racinaire difficile, etc...

Tableau 1 : Indicateurs analytiques du statut acido-basique des sols acides :

<i>indicateur</i>	<i>description</i>	<i>avantages</i>	<i>limites</i>	<i>Explications agronomiques</i>
pH eau	Mesure de l'acidité d'une suspension de terre dans de l'eau (rapport terre/eau normalisé).	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 en ions H ⁺ et aluminium de la solution du sol est élevée (risques de toxicité...).
pH KCl	Idem 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 l'acidité d'échange (2).
pH eau – pH KCl	Simple écart	Peut indiquer l'urgence du chaulage (3).	Attention aux variations des déterminations 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 universelle de référence	A ne pas confondre avec la CEC effective (4).	Mesure la charge négative potentielle du sol (pH=7) : les surfaces réactives.
S / T ou taux de saturation	$\frac{(Ca + Mg + K + Na) \times 100}{CECMetson}$ (5).	Corrélié avec le pH _{eau} . Un des estimateurs du besoin en «chaux»(6),	Entretient l'idée fautive de l'effet basique de ces 4 cations (acides de force négligeable).	Mesure la part de la charge potentielle (pH=7) occupée par les cations d'acidité négligeable.
Ca / T ou taux de saturation en calcium	$\frac{Ca \times 100}{CEC}$ (5)	Idem, mais limité au calcium.	Idem ci-dessus.	Mesure la part occupée par le calcium, très «floculant».
CEC effective (Cobaltihexammine ou BaCl ₂)	Capacité d'Echange de Cations déterminée au pH du sol.	Méthode simple.	La CEC effective peut varier (4).	Mesure la charge négative utile pour l'échange de cations (CEC effective).
Aluminium échangeable	Mesure conventionnelle de l'aluminium échangeable du complexe adsorbant.	Un des indicateur de la toxicité aluminique	Ne permet pas de quantifier le besoin en «chaux»(6).	En équilibre avec les ions aluminium en solution, dont certains sont toxiques pour les plantes.
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.

(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 meq / 100g ou mieux en cmol_c.kg⁻¹ (même valeur numérique).

(6) Besoin en unités neutralisantes.

Tableau 2 : Statut acido-basique des sols

Domaine	Indicateurs et caractéristiques				<i>Les bornes indiquées sont des moyennes.</i>			
	très acide		acide		peu acide		neutre	
pHeau (1)		5.5		5.8		6.5		7.2
S/CECMetson (2)		55		70		100		150
Ca/CECMetson (*)		45		55		85		130
S/CECeffective (2)		80		100		100		100
Ca/CECeffective (*)		70		80		90		>90
Complexe adsorbant	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 pH cations dominants	Aluminium abondant Peu de Ca Mg K	5.0	Ca Mg K Na Peu d'aluminium	5.4	Ca Mg K Na, (Ca très variable). Absence d'aluminium			<7

Questions spécifiques

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	

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

(1) pHeau : 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 $\text{cmol}_e \cdot \text{kg}^{-1}$.

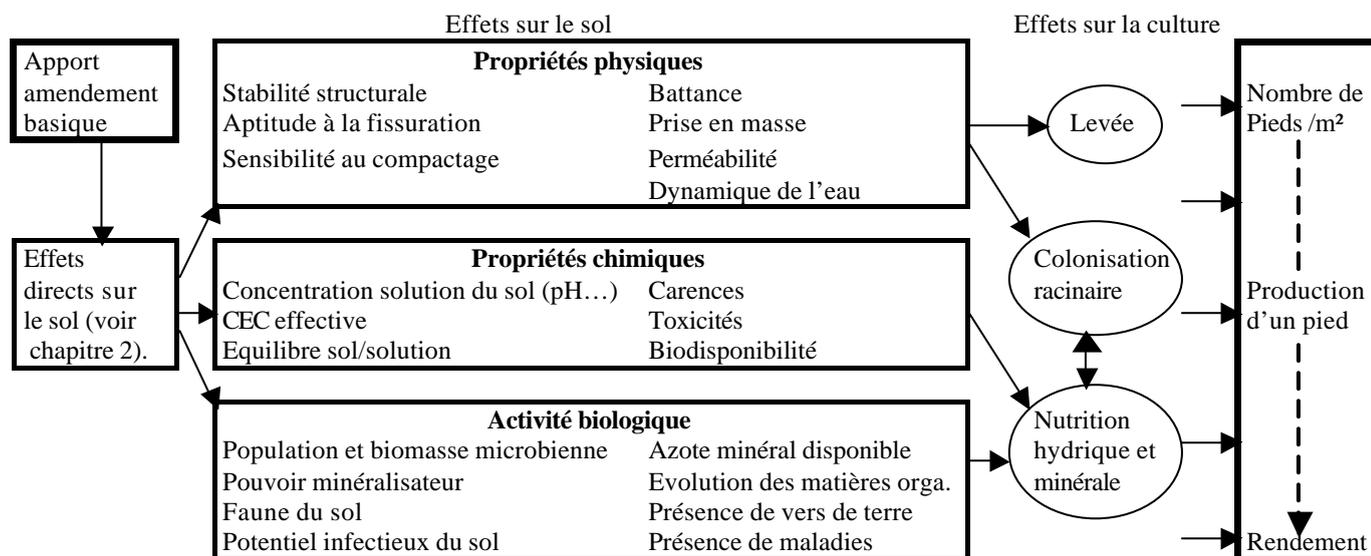
CEC effective : CEC au pH du sol (cobaltihexammine ou BaCl_2).

CEC Metson : CEC standardisée à pH 7.

4. Les effets indirects d'un apport d'amendement basique

En dehors des très rares cas où s'exprime la carence en Ca^{2+} , les amendements basiques calciques n'agissent pas directement sur la production des cultures. On ne peut donc pas faire de relation directe entre le rendement obtenu et l'apport d'un tel amendement. L'effet d'un chaulage s'exerce à travers l'installation puis l'alimentation hydrique et minérale d'un peuplement. (figure 6)

Figure 6 : Les répercussions d'un apport d'amendement basique calcique



Il importe de bien distinguer les propriétés, souvent mesurées au laboratoire et de manière reproductible, et les comportements et les états évalués au champ, dépendants du climat, de l'état initial du sol et des techniques culturales.

Les effets indirects

On peut distinguer trois grands types d'effets d'un apport d'amendement basique sur le sol :

- **Effets sur les propriétés physiques** : la stabilité structurale est généralement améliorée, rendant plus durable une structure favorable, acquise soit par le travail du sol, soit par l'activité biologique. Il en résulte une colonisation accrue du sol par les racines, une augmentation de la capacité de rétention en eau et de meilleures conditions de circulation de l'eau et de l'air.

- **Effets sur les propriétés chimiques** : l'augmentation du pH supprime certaines toxicités quand elles existent (Al, Mn, éléments traces métalliques), conduisant à une meilleure exploration racinaire.

La disponibilité de certains éléments minéraux est modifiée : P, K, Mg, Oligo-éléments (augmentation pour Mo et diminution pour B, Mn, Zn, Cu).

- **Effets sur l'activité biologique** : l'augmentation du pH modifie les populations microbiennes. Leur activité est de plus influencée par d'autres effets indirects du chaulage : matière organique plus facilement dégradable, augmentation des apports de carbone par les végétaux (résidus, masse racinaire, exsudats).

Extériorisation des effets

L'ensemble de ces effets se manifeste au champ différemment selon :

- ? la texture du sol,
- ? l'état initial du sol (structure, disponibilité des éléments minéraux, humidité),
- ? le rythme et l'intensité des précipitations.

De plus, l'effet d'un chaulage sur la production des cultures varie fortement selon :

- ? la nature de la culture, plus ou moins sensible :
 - à une toxicité aluminique,
 - à une dégradation de l'état structural qui peut induire des pertes à la levée et/ou un mauvais fonctionnement racinaire.
- ? le système de culture et les itinéraires techniques (nombre et période de passage d'outils, doses d'intrants), qui peuvent masquer, réduire ou amplifier les effets attendus du chaulage.

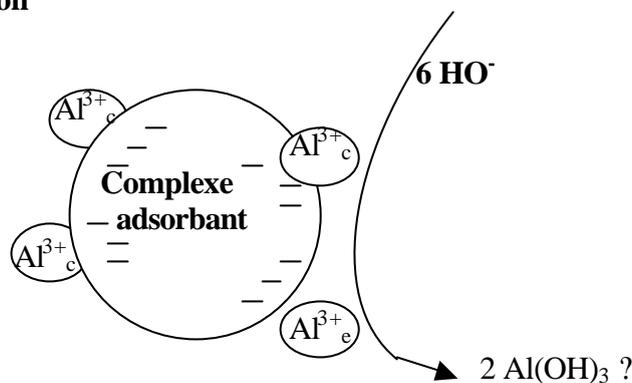
AINSI :

Les apports d'un amendement basique calcique doivent résulter d'une caractérisation du sol, par l'analyse de terre et l'observation au champ, données qu'il faut interpréter en fonction des conditions climatiques et du système de culture (grilles d'interprétation en préparation par le COMIFER).

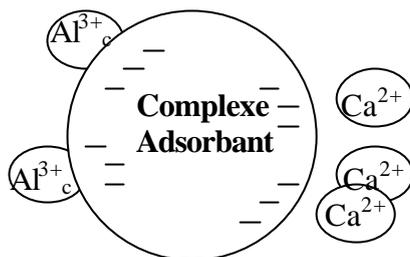
L'intérêt économique du chaulage dépend des différents effets cités, et est de ce fait difficile à évaluer : une stratégie de chaulage se raisonne à moyen terme, avec une analyse des risques.

Figure 5 ; Schéma complémentaire pour le mode d'action de la base sur l'aluminium complexé (Al^{3+}_c) ou échangeable (Al^{3+}_e) :

? Précipitation



? Adsorption de Ca^{2+} sur les sites négatifs (remarque: il reste des Al complexés, non échangeables).



Ont validé ce document :

Myriam BARANGER, Service agronomique de Dolfrance.

Gilbert BONNET, Service agronomique, CA 37.

Alain BOUTHIER, ITCF.

Pierre CASTILLON, ITCF.

Nathalie DAMAY, Station Agronomique de l'Aisne.

Bernard FABRE, enseignant d'agronomie, ISARA.

François Xavier GAUMONT, Service agronomie MEAC. Membre du BNAME et du CELAC.

Jean-Luc JULIEN, Alaa-Smc.

François KOCKMANN, Service agronomie-environnement, CA 71.

Olivier PELTIER, Service agronomie France Amendement. Membre du Syndicat des Chaux.

Jean-Pierre STAIMESSE, Scories France. Membre du BNAME.

André TURPIN, enseignant de chimie, ENFA.

Devraient valider ce document :

Raymond REAU, CETIOM.

Marc DIAB, SAS.