UTILISATION DE LA CHAUX AGRICOLE

Manuel du technicien

2023 – Version 1

FOLUR
Food · Land Use · Restoration

IFC Société Financière Internationale
GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE
Créer des marchés, créer des opportunités

Remerciements

La réalisation de ce document a été rendue possible grâce à la mobilisation des acteurs étatiques et non étatiques de Côte d'Ivoire.

L'équipe FOLUR/IFC tient à exprimer sa gratitude envers les antennes ivoiriennes du Centre international pour la recherche en agroforesterie (ICRAF) et de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour leur contribution au présent document et leur soutien dans l'organisation d'un webinaire qui s'est tenu en avril 2023, portant sur le thème « Chaulage : un outil efficace pour lutter contre l'acidité des sols et augmenter les rendements ».

L'équipe FOLUR/IFC souhaite également exprimer sa reconnaissance envers la société Carrières et Chaux du Mali (CCM), qui a joué un rôle essentiel dans la production du document original, adapté ensuite au contexte ivoirien.

© International Finance Corporation 2023 Tous droits réservés.

2121 Pennsylvania Avenue, N.W.

Washington, D.C. 20433

Internet: www.ifc.org

Le contenu du présent document est protégé par le droit d'auteur.
La reproduction ou la distribution partielle ou intégrale du présent document sans autorisation préalable peut constituer une infraction
à la législation en vigueur.
IFC ne garantit pas l'exactitude des données contenues dans cette publication et décline toute responsabilité quant aux conséquences de leur utilisation.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

A. L'AGRICULTURE EN CÔTE D'IVOIRE 5

1. Généralités 5
2. Une utilisation faible des engrais 7
3. Des terres fragiles 7

B. L'ACIDIFICATION DES SOLS 9

1. Le pH 9
2. Étendue de l'acidité des sols en Côte d'Ivoire 9
3. Les causes de l'acidité des sols 10
4. Conséquences de l'acidité et solutions 12

C. MESURER L'ACIDITÉ DES SOLS 14

1. Objectif des tests de sol 14
2. Mesure de pH au laboratoire et in situ 14
3. Le papier pH : techniques d'utilisation 15

D. LE CHAULAGE : GÉNÉRALITÉS 18

1. Définition du chaulage 18
2. La dolomie 20
3. Les types de chaulage 20
4. Les indicateurs de gestion du chaulage 21

E. LE CHAULAGE : APPLICATION 23

1. Lire une étiquette de chaux agricole 23
2. La valeur neutralisante VNR 23
3. Rapidité d'action : finesse et solubilité 24
4. Les catégories d'amendements 25
5. Les doses recommandées 26
6. Prise en compte du pH 27
7. … de la texture du sol 27
8. … des apports en matière organique 28
9. … de la pureté 29
10. Quand réaliser le chaulage ? 29

F. LES DÉMONSTRATIONS DE CHAULAGE 31

1. Bien-fondé des démonstrations et étapes 31
2. Résultats d'essais de chaulage 31
3. Les bénéfices globaux du chaulage 33

INTRODUCTION

En Afrique, l'agriculture emploie environ deux tiers de la main-d'œuvre du continent et contribue en moyenne de 30 à 60 pour cent au Produit intérieur brut (PIB) des pays[i].

Cependant, les sols y sont soumis à de rudes épreuves (exportation massive des éléments nutritifs par les cultures, exposition des sols lors des récoltes, utilisation inadéquate des engrais chimiques et pesticides, forte érosion, monocultures, etc.). Ils ne sont pas aussi sains et productifs qu'ils devraient l'être. Au contraire, ces pratiques agricoles non durables conduisent à la dégradation des terres agricoles : 56 % d'entre elles sont concernées par l'acidité[ii].

En Côte d'Ivoire, environ 22.7 % des terres cultivées en cacaoculture sont affectés par l'acidité des sols[iii]. Cela réduit fortement la productivité des sols et la production agricole, ainsi que les efforts initiés pour parvenir à la sécurité alimentaire.

Il est aujourd'hui primordial de réhabiliter ces sols acides pour contribuer à améliorer la santé des sols agricoles. Cette réhabilitation est aussi nécessaire pour développer des systèmes agricoles résilients face aux changements climatiques.

Rares sont les agriculteurs, surtout les petits exploitants, qui connaissent l'état de la fertilité de leur sol, notamment s'il y a présence d'acidité.
Pourtant, les tests sont simples à effectuer, à petite échelle : les bandelettes de papier pH donnent une indication instantanée au producteur. Une fois ces tests réalisés, l'épandage de la chaux agricole et l'adoption de bonnes pratiques agricoles s'avèrent être des solutions particulièrement efficaces pour lutter contre l'acidité des sols, avec des résultats probants.

Le chaulage, développé en Europe depuis l'antiquité, commence à susciter un réel intérêt en Afrique. L'Éthiopie, le Kenya, la Tanzanie et le Rwanda ont lancé des plans stratégiques pour la réhabilitation/restauration des sols acides, soutenus par des investissements publics substantiels. Ces derniers sont souvent accompagnés d'investissements privés croissants — quoiqu'encore modestes — de la part de l'industrie de la chaux.

Ce manuel est destiné aux techniciens agricoles et à toutes les personnes intéressées par la correction de l'acidité des sols, ainsi que par les techniques de tests et d'application de la chaux agricole.

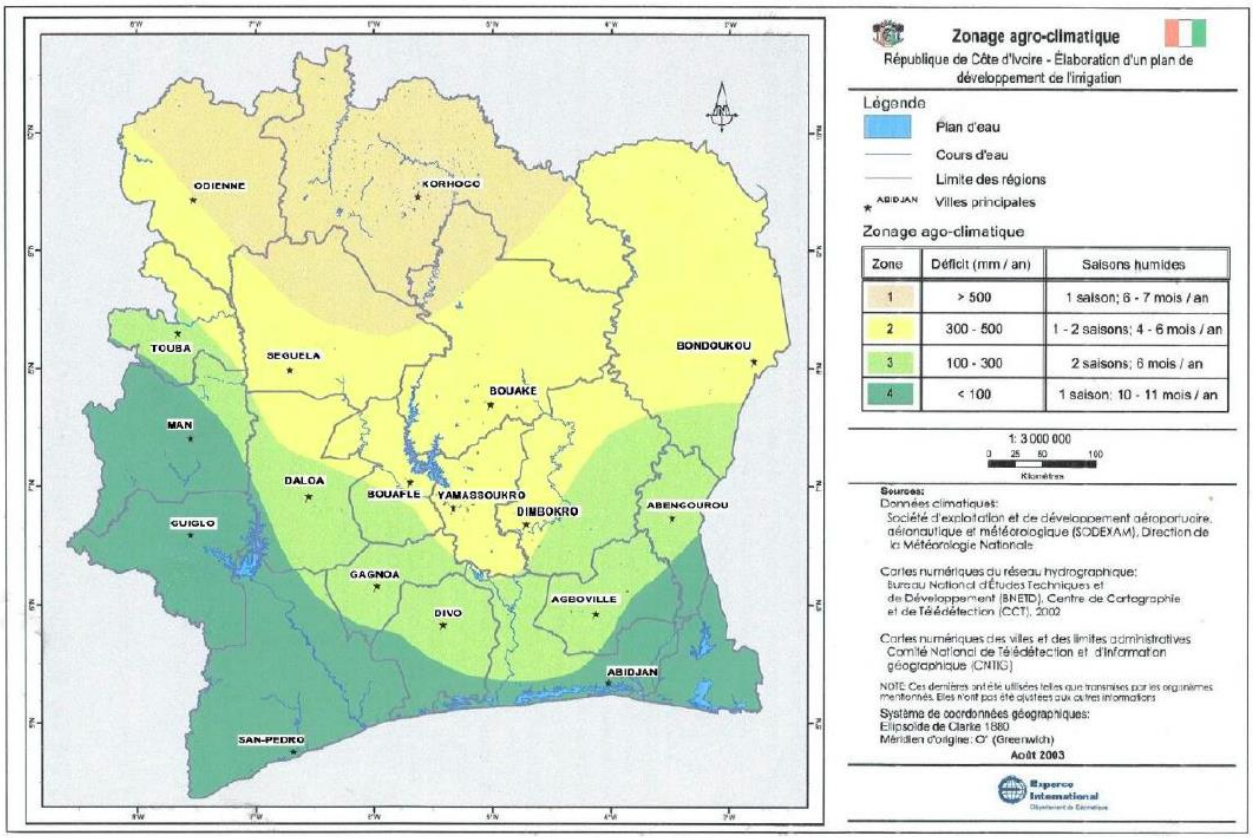
Il est adapté au contexte ivoirien, en particuiler à la culture du cacao.

A. L'AGRICULTURE EN CÔTE D'IVOIRE

1. Généralités

Situation géographique

La Côte d'Ivoire est un pays d'Afrique de l'Ouest d'une superficie de 322 462 km^2. Les terres cultivables sont estimées à 17 millions d'hectares, soit 53% de la superficie totale du pays[iv]. La Côte d'Ivoire possède un climat tropical dans le sud et un climat de savane dans le nord. Le pays est constitué de quatre zones agro écologiques : la zone guinéenne, la zone soudanaise, la zone soudano-guinéenne 1 et la zone soudano-guinéenne 2.



Zones agro climatiques de la Côte d'Ivoire (MINAGRI,2003)

L'agriculture au cœur de la société et de l'économie

La population ivoirienne est estimée à 29,3 millions habitants (RGPH 2021). Le taux de croissance démographique est d'environ 2,9% par an. Premier pays producteur de cacao, la Côte d'Ivoire occupe également une place de leader pour plusieurs autres cultures d'exportation telles que l'anacarde, la banane, le café, le coton et l'hévéa.

Le secteur agricole constitue, l'un des piliers de l'économie ivoirienne. 70% de la population active exerce dans ce secteur et contribue à hauteur de 60% des recettes d'exportation. La production agricole est dominée par deux cultures qui sont le café et le cacao, qui représentant 20% du PIB et fait vivre une population estimée à 6 millions d'habitants, avec 600 000 exploitations en activité[v].

Le secteur du cacao

La culture du cacao a été introduite en Côte d'Ivoire à la fin du XIXe siècle (1895).
Depuis son indépendance en 1960, la Côte d'Ivoire est devenue le premier producteur mondial de cacao, en quadruplant presque ses récoltes de 550 000 tonnes par an en 1980 à plus de 2 millions de tonnes en 2018.
Toutefois, cette réussite n'a pas fondamentalement changé les conditions de vie des producteurs et de leurs familles.
La dernière enquête des ménages montre ainsi que 54,9 % des producteurs de cacao vivaient au-dessous du seuil de pauvreté en 2015.[vi]

Les défis principaux du secteur agricole

La Côte d'Ivoire s'est développée au cours du XXe siècle grâce à l'agriculture. Ce développement s'est fait au détriment de la couverture forestière du pays et de la santé des sols.
Le pays doit aujourd'hui faire face à de multiples défis :

- ✓ Faire face à la forte dépendance aux aléas climatiques, surtout pour les petits producteurs ;
- ✓ Le passage d'une agriculture basée sur la fertilité de sols forestiers nouvellement défrichés à une agriculture durable zéro-déforestation adaptée aux enjeux climatiques;
- ✓ La gestion des conflits fonciers ruraux ;
- ✓ L'augmentation du niveau de transformation des produits agricoles ;
- ✓ L'augmentation du taux d'équipement des producteurs ;
- ✓ Le renforcement de la professionnalisation et l'intégration des organisations de producteurs dans les filières agroalimentaires ;
- ✓ L'augmentation de la fertilité inhérente des sols grâce à des pratiques culturales appropriées (jachères suffisamment longues, cultures intercalaires, compostage, gestion durable des terres, etc.) ;
- ✓ Et, en particulier, la lutte contre l'acidification et la salinisation des sols.

Pour la majorité des cultures, les rendements agricoles demeurent faibles, même si une amélioration est notable, par exemple en cacaoculture ces dernières années.

Programme national d'investissement agricole et politique forestière.

La Côte d'Ivoire consacre 15 % de son budget au développement agricole[vii], au-delà de l'objectif des 10 % fixé par la Déclaration de Maputo (2003).

Les objectifs stratégiques du PNIA 2 ont été déclinés en six programmes d'investissement, représentant des investissements de 4325,4 milliards FCFA sur la période 2018-2025[viii] :
Programme 1 « Productivité et développement durable de la production agrosylvopastorale et halieutique »

Programme 2 « Amélioration de la valeur ajoutée et de la performance des marchés »
Programme 3 « Gestion durable des ressources environnementales et résilience climatique »
Programme 4 « Amélioration des conditions de vie des acteurs, et promotion du secteur agro-sylvo--pastoral et halieutique »
Programme 5 « Expansion de l'accès au financement et des canaux d'investissements privés »
Programme 6 « Renforcement du cadre institutionnel, de la gouvernance du secteur et de l'environnement des affaires »

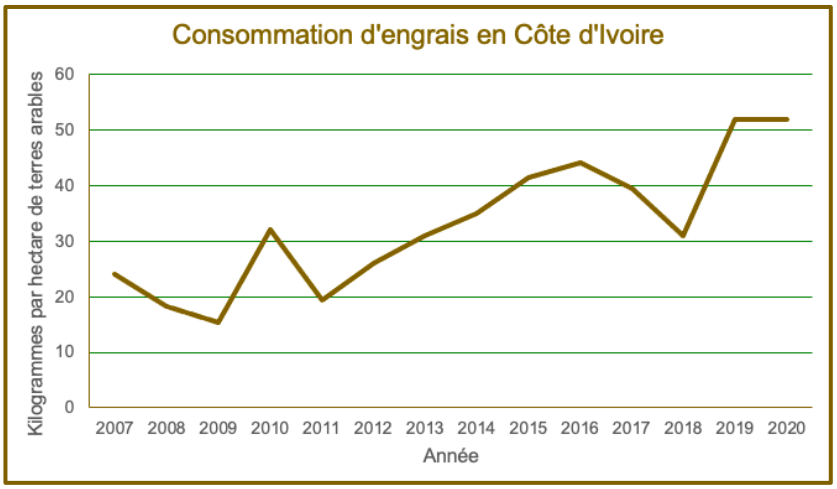
2. Une utilisation faible des engrais

La faible utilisation des intrants, la salinisation des sols et le caractère aléatoire des précipitations poussent le plus souvent les producteurs à adopter des pratiques culturales non durables, notamment l'agriculture extensive pour augmenter leurs productions agricoles.

Seulement, il est de plus en plus difficile de compter sur les stratégies d'extensification pour soutenir la croissance agricole et subvenir aux besoins de la population ivoirienne, notamment à cause du changement climatique, de la croissance démographique et du déclin de la fertilité des sols.

La voie préconisée est l'intensification de la production agricole à travers une augmentation de la productivité. Cette stratégie nécessite un recours à l'utilisation des engrais minéraux, qui constituent le meilleur moyen pour restaurer la fertilité des sols et accroître les rendements des plantes cultivées.

La consommation d'engrais est depuis peu légèrement au-dessus de l'objectif de 50 kg/ha fixé par les gouvernements africains à travers le Programme Détaillé de Développement de l'Agriculture Africaine (PDDAA), mais ce chiffre est essentiellement tiré par la filière coton.



Source : Banque mondiale

3. Des terres fragiles

En Côte d'Ivoire, près de 60% des terres productives sont dégradées. Le massif forestier est passé de 16 millions d'hectares en 1960 à 3 millions d'hectares en 2018.[ix]

Si le cacao est le principal moteur de la croissance économique du pays, il est « aussi malheureusement un des fossoyeurs de la forêt ivoirienne », selon un article sur le portail officiel du gouvernement ivoirien. Le premier pays producteur de cacao est donc « bien décidé à concilier agriculture et reboisement de la forêt ».

Le gouvernement a pris l'engagement en 2014, dans le cadre de la déclaration de New York sur les Forêts, de produire un cacao ivoirien zéro-déforestation à partir de 2017 et de restaurer 20% du couvert forestier du territoire national d'ici à 2030.

Les sols ivoiriens sont majoritairement fragiles et manquent d'éléments nutritifs essentiels et de matière organique.

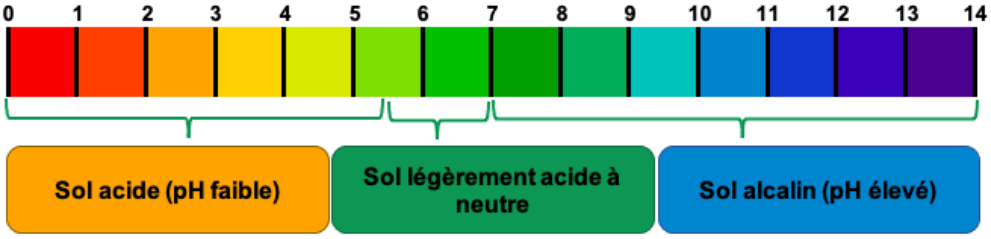
La combinaison de fortes pluies, de pentes raides et d'un manque de couverture du sol entraîne une perte importante de sol et de nutriments par érosion. Cette dernière élimine les éléments nutritifs cruciaux pour la bonne croissance des cultures et expose aussi le sous-sol, qui est alors plus dur et plus difficile à pénétrer pour les racines des cultures.

Manifestation de l'acidité des sols sur les cacaoyers.

B. L'ACIDIFICATION DES SOLS

1. Le pH

Le pH (ou potentiel hydrogène) du sol est une mesure du niveau d'acidité ou de basicité d'un sol. Il varie entre 0 et 14 sur une échelle logarithmique.

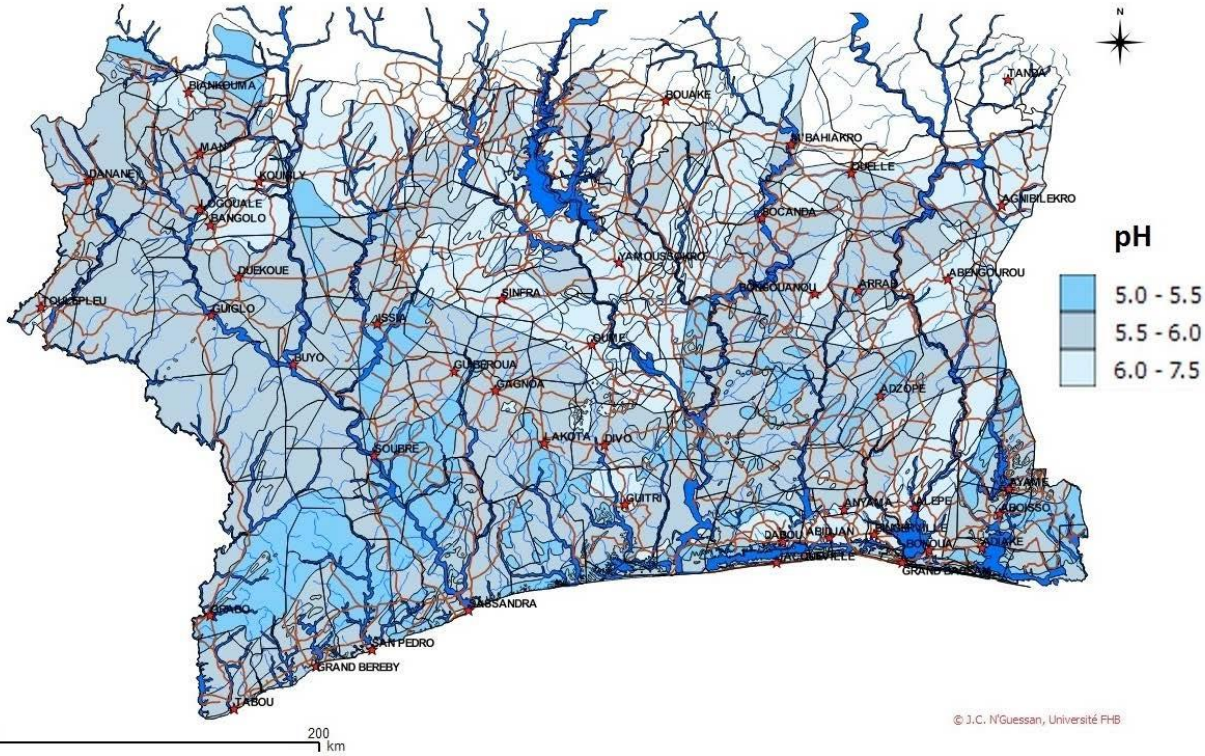


Le pH d'un sol est une mesure importante, car il indique la disponibilité des nutriments dans le sol, l'activité microbienne et la croissance des plantes.

Pour aller plus loin : Ions acides et ions basiques

- ✓ Plus un sol est acide, plus les ions hydrogène H^+ seront nombreux et, dans une certaine mesure, les ions aluminium (Al^{3+}), fer (Fe^{2+}) et manganèse (Mn^{2+}).
- ✓ Dans un sol basique, les cations basiques calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+) et sodium (Na^+) sont abondants.
- ✓ Lorsque les ions acides et les ions basiques sont équilibrés, le milieu du sol est dit neutre et stable, jusqu'à ce que d'autres facteurs interviennent et déstabilisent à nouveau le fragile équilibre.

2. Étendue de l'acidité des sols en Côte d'Ivoire



Selon l'étude réalisée par le CIRAD et le CNRA sur l'acidité des sols en Côte d'Ivoire, environ 22,7 % des sols ont un pH inférieur à 5,5, et sont donc trop acides pour le cacaoyer.

Les teneurs des sols en éléments nutritifs (azote N, phosphore P, potassium K) sont très faibles, ce qui entraîne une faible productivité des sols et des cultures. De même, la teneur en matières organiques est basse et la plupart du temps en dessous des niveaux considérés comme l'idéal pour la croissance des cultures et la santé des sols.

3. Les causes de l'acidité des sols

L'acidification des sols résulte d'un ensemble de processus complexes enclenchés à la fois par des phénomènes naturels et par l'activité humaine. Elle est liée à l'activité biologique naturelle des sols. Dans le monde, l'acidité affecte 30 % des sols et 75 % des sous-sols des terres non recouvertes par la glace.

L'acidification des sols dépend de leur nature, de la végétation, des conditions climatiques et des facteurs externes, notamment des pratiques agricoles : choix des cultures, exportations des résidus et formes d'engrais apportées.

La simplification du travail du sol ou le zéro labour a tendance à acidifier davantage la couche superficielle du sol, où s'accumulent les engrais azotés dans les systèmes de production intensive. Un suivi régulier de cette couche superficielle est primordial[x].

Les principales causes naturelles ou anthropiques de l'acidification des sols sont les suivantes :

- **Utilisation d'engrais azotés**, en particulier lorsqu'ils sont appliqués de façon inadéquate, au-delà des besoins des cultures, notamment dans les systèmes agricoles intensifs pratiquant la monoculture. La volatilisation des engrais azotés et les pertes par lessivage des nitrates ont une action acidifiante. Une fertilisation azotée efficace et raisonnée réduit l'acidification.

Pour aller plus loin : Nitrification, volatilisation

- ✓ Les engrais azotés contribuent à l'acidification, par la nitrification. L'ammonium (NH_4^+) se transforme en nitrates (NO_3^-) en produisant deux protons H^+, selon l'équation :

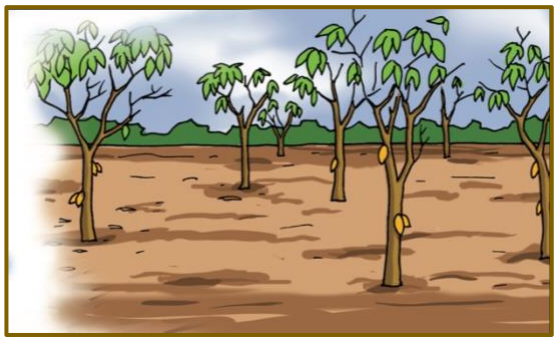
$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+$$

- ✓ Selon la forme chimique des engrais (urée ou engrais ammoniacal notamment), l'acidification sera plus ou moins accentuée.

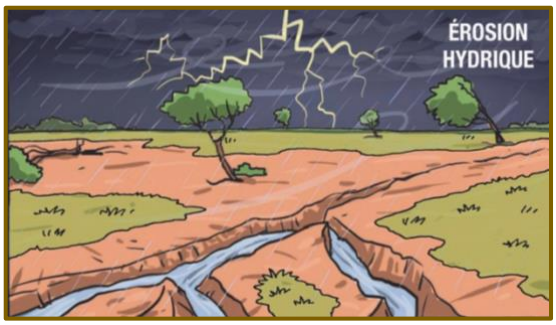
$$CO(NH_4)_2 + 2H^+ + 2H_2O = 2NH_4^+ + H_2CO_3$$

L'ion NH_4^+ est converti en nitrate selon la formule ci-dessus, avec quatre ions d'hydrogène libérés par les deux ions d'ammonium.

- ✓ La volatilisation des ions NH_4^+ en NH_3 est aussi acidifiante, puisqu'il y a production de protons H^+.



- **Exportation de la végétation après récolte et/ou des résidus de culture (pour le fourrage ou le brûlis par exemple)**. Durant sa croissance, la plante utilise certains nutriments (calcium, magnésium et potassium) qui sont stockés dans les feuilles, la tige et les graines. Après récolte, si ces différentes parties de la plante sont laissées sur place, ces nutriments sont restitués au sol et contribuent à l'alcaliniser. Par contre, l'exportation des résidus contribue à appauvrir et à acidifier le sol.



- **Lixiviation, ruissellement, irrigation mal maîtrisée, saisons des pluies longues, pluies acides.** Ils favorisent l'acidification du sol en entraînant les éléments basiques en profondeur. Dans ces cas-là, l'aluminium (parfois le manganèse) peut devenir très disponible au point d'être toxique : on parle de toxicité aluminique. D'autres éléments comme l'azote, le calcium, le phosphore, le magnésium et le potassium deviennent alors moins faciles à absorber par les cultures. Les sols facilement lessivables comme les limons, le sable, le grès et certains granites seront plus sensibles à ces phénomènes.

Pour aller plus loin : La toxicité aluminique

Lorsque la quantité d'ions Al^{3+} (ou $Al(OH)^{2+}$ ou $Al(OH)_2^{+}$) devient trop importante, ils entrent en réaction avec les bases (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} et Na^{+}) en formant des composés complexes qui créent des sortes de « bouchons » empêchant les autres éléments (phosphore, magnésium, potassium, calcium) d'être disponibles pour la plante. Les racines de la plante n'ont alors plus la possibilité de se développer.

Conséquences de la toxicité aluminique sur le développement racinaire de plants de maïs.

- **L'apport d'engrais organiques en excès.** L'activité des micro-organismes et des racines peut alors acidifier le sol.

Pour aller plus loin : Minéralisation de la matière organique

La minéralisation de la matière organique, c'est-à-dire la transformation des molécules complexes en molécules plus simples, n'implique pas que ces dernières soient disponibles pour les plantes. Le rapport carbone/azote est déterminant dans le choix de l'engrais organique à apporter. La valeur optimale de ce rapport devra se situer entre 10 et 25 pour que le sol puisse nourrir correctement la plante.

4. Conséquences de l'acidité et solutions

Dans un sol acide, les cultures et les parcelles présentent généralement les symptômes suivants :

- Une faible vigueur de la plante
- Une entrave à la croissance des plantes
- Une faible nodulation des légumineuses
- Un ralentissement de la croissance des racines
- La persistance des mauvaises herbes tolérantes à l'acide
- Une décoloration jaune/rouge des feuilles
- Une incidence accrue des maladies.

Ces effets néfastes sont dus au fait que la plante ne parvient pas à prélever les nutriments dont elle a besoin : potassium, phosphore et azote notamment. Ces derniers sont souvent présents, mais ne sont pas disponibles, à cause de l'une ou plusieurs des raisons énumérées plus haut. Ces phénomènes sont dynamiques et complexes.

L'activité biologique du sol est aussi fortement perturbée par l'acidité des sols, car cette dernière influence la composition de la microflore (bactéries, champignons) et l'activité de certains vers de terre du sol.

Enfin, l'acidité des sols est une cause majeure de la baisse de rendement des cultures et donc de la baisse des revenus agricoles.

Dans l'optique de circonscrire le problème d'acidité afin d'améliorer la fertilité, des solutions existent pour préserver les propriétés physico-chimiques des sols :

- ✓ Le recours aux semences tolérantes à l'acidité des sols
- ✓ Les amendements organiques (matière organique, chaux agricole, etc.)
- ✓ Les amendements minéraux basiques (AMB)

La chaux, qui nous intéresse dans ce document, fait partie des amendements minéraux basiques.

Le chaulage permet :

✓ D'augmenter le pH du sol
✓ D'améliorer la structure (propriétés physico-chimiques) du sol et de sa productivité.
✓ D'éliminer les éléments gênants tels que les mauvaises herbes, les champignons et micro-organismes pathogènes, etc.
✓ D'améliorer l'activité biologique du sol
✓ D'améliorer l'efficacité des engrais minéraux.

Le chaulage contribue à la réduction de l'acidité des sols et à l'amélioration de la productivité

C. MESURER L'ACIDITÉ

Ce chapitre technique aborde les points suivants :

- ✓ Les différents outils existants pour tester un sol.
- ✓ Les étapes nécessaires pour un test de sol au moyen de bandelettes pH.

1. Objectifs des tests de sol

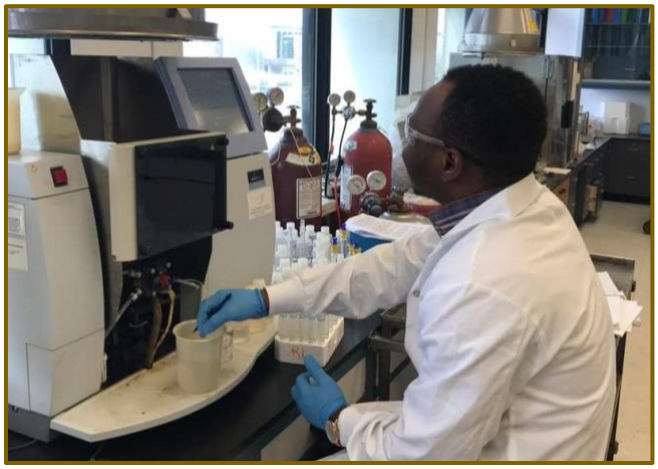
Pour évaluer le degré d'acidité d'un sol, il est nécessaire au préalable de mesurer son pH. Cette mesure suffit à effectuer un diagnostic d'acidité pour déterminer s'il est nécessaire de chauler ou non.
La mesure au papier pH est généralement fiable, la marge d'erreur est faible.

2. Mesures de pH au laboratoire et in situ

La première manière de mesurer le pH consiste à effectuer une analyse au laboratoire :

✓ Avantages : la mesure du pH est précise, ce qui est intéressant lorsqu'un chaulage est envisagé sur de grandes surfaces.

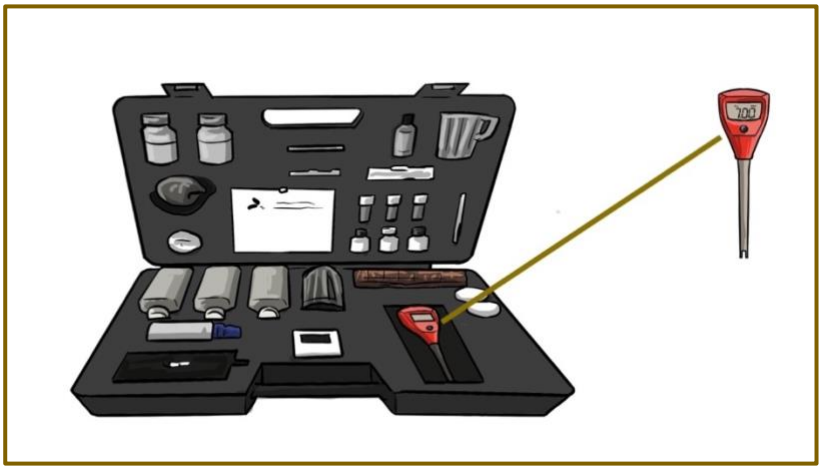
✓ Inconvénients : la démarche est coûteuse ; les échantillons doivent être transportés jusqu'au laboratoire ; enfin, l'analyse peut prendre plusieurs jours.



La deuxième méthode consiste à recourir à des kits mobiles. Ces « laboratoires dans une boîte » utilisent des mini-versions des appareils de mesure de laboratoire pour des séries d'analyses visant à évaluer les paramètres du sol : pH, nitrate, soufre disponible, phosphore disponible, potassium disponible, carbone actif du sol (matière organique), conductivité électrique (indicateur des niveaux de fertilité générale et de la salinité), ainsi que certaines propriétés physiques des sols comme la texture, entre autres. Tous les instruments fonctionnent avec des batteries et utilisent l'eau potable (localement disponible dans des bouteilles en plastique) pour permettre l'analyse de sol dans les endroits les plus reculés et donner des résultats sur le champ.

✓ Avantages : le kit peut être transporté directement sur site ; il peut être composé d'une sonde unique ou bien d'un diagnostic complet du sol, etc.

✓ Inconvénients : le kit doit être manipulé par un(e) spécialiste ; la démarche reste coûteuse pour le producteur (comme au laboratoire).



Les kits d'analyse mobile permettent d'effectuer une panoplie de mesures de différents paramètres. Ils comprennent un pH-mètre.

Le pH-mètre est un boîtier de mesure du pH. Il se compose d'une électrode double, connectée à un boîtier électronique affichant sur un écran la valeur de pH mesurée.
Cet appareil de mesure donne une indication plus précise du pH d'une solution que le papier pH.

Son étalonnage est indispensable à l'aide de deux solutions tampons, avant utilisation :

- ✓ Une première solution présentant un pH neutre (= 7)
- ✓ Une seconde solution ayant un pH acide (= 4) ou un pH basique (= 9).

Après étalonnage, l'électrode est rincée avant d'être trempée dans la solution boueuse (sol+eau) à tester.
La lecture du résultat est quasiment immédiate, simple et fiable.

3. Le papier pH : techniques d'utilisation

La méthode la plus couramment utilisée et la moins coûteuse est l'utilisation du papier pH.

Le papier pH est une bandelette de papier, imbibée d'un mélange d'indicateurs. Il permet de mesurer globalement l'acidité ou la basicité d'un corps ou d'une solution.

Lorsque l'on trempe la bandelette dans une solution, elle change de couleur selon le pH du sol.

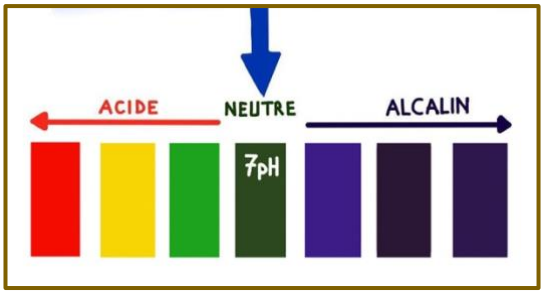
Méthode d'utilisation

Prélèvement d'échantillons de sol

- ✓ Sélectionner plusieurs points de la parcelle. Par exemple, là où les rendements sont le meilleur, moyen et le plus faible.
- ✓ Prélever une poignée de terre à 4-5 cm de profondeur (il est inutile d'aller plus en profondeur).
- ✓ Placer les échantillons dans des récipients très propres.
- ✓ Éliminer les déchets de chaque échantillon à analyser.

Prélèvement d'eau et vérification de son pH

- ✓ Puiser de l'eau propre issue d'une rivière ou d'un puits.
- ✓ En verser un peu dans un récipient très propre.
- ✓ Tremper la bandelette de papier pH pendant 5 à 10 secondes.
- ✓ Sortir la bandelette et la secouer.

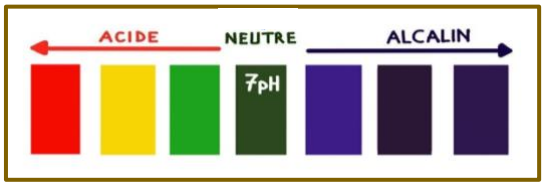


- ✓ Le papier pH doit afficher une valeur proche de 7 à la lecture. Si ce n'est pas le cas, il faut éviter d'utiliser cette eau.

Test des échantillons de terre

- ✓ S'assurer que le pH de l'eau a été évalué au préalable.
- ✓ Verser l'eau dans les récipients contenant l'échantillon.
- ✓ Mélanger le contenu de chaque récipient jusqu'à homogénéisation, sans laisser décanter. Utiliser un bâton pour mélanger.

- ✓ Tremper la bandelette de papier pH pendant 5 à 10 secondes dans le mélange boueux.
- ✓ Sortir la bandelette et la secouer.



- ✓ La couleur que prend le papier indique le niveau d'acidité, de neutralité ou d'alcalinité du sol (acide, neutre ou alcalin).
- ✓ Lire et noter ce chiffre.
- ✓ Faire de même avec une nouvelle bandelette pour chaque échantillon.

Pour aller plus loin : Fondements de la notion de pH

Un pH de 6 est 10 fois plus acide qu'un pH de 7, mais un pH de 5 est 100 fois plus acide qu'un pH de 7.
En effet, le potentiel hydrogène est fonction de la quantité d'ions hydrogène selon les formules logarithmiques suivantes : $pH = -\log [H^+]$ et $H^+ = \log[10^{-pH}]$
Plus les ions H^+ sont nombreux dans une solution, plus le pH est bas et inversement.

A RETENIR

- ✓ Il est plus pratique de tester le sol avec un papier pH pour décider de chauler ou non.
- ✓ Pour une meilleure précision des résultats, il peut être intéressant de se référer à un laboratoire.
- ✓ Ne jamais oublier de tester l'eau qui va être utilisée avant de tester l'échantillon de sol.

D. LE CHAULAGE : GÉNÉRALITÉS

1. Définition du chaulage

Le chaulage est une technique agricole consistant à diminuer l'acidité d'un sol en y apportant des produits contenant du calcium seul (calcaire, chaux calcique) ou du calcium et du magnésium (dolomie, chaux dolomitique) en vue d'améliorer sa fertilité et d'élever l'efficacité des engrais minéraux.

L'effet recherché à travers le chaulage des sols acides est de réduire l'acidité du sol en augmentant le pH à un niveau favorable à l'amélioration de la croissance des plantes dans les terres agricoles et les forêts aménagées.

Il existe couramment quatre types de chaux :

- ✓ **Le calcaire (carbonate de calcium, CaCO3)** : il est le moins cher et est directement obtenu à partir du broyage de roches provenant de gisements calcaires naturels. Il ne nécessite pas de traitement ultérieur et n'est pas corrosif.

- ✓ **Le calcaire dolomitique ou dolomie :** il contient à la fois du carbonate de calcium et de magnésium. Il provient aussi du broyage de roches issues de gisements naturels. Il doit présenter des caractéristiques particulières pour être qualifié de dolomie (voir plus bas).

- ✓ **La chaux brûlée ou chaux vive :** c'est une poudre blanche très corrosive, obtenue en chauffant du calcaire ou du calcaire dolomitique dans un four afin d'en chasser le CO2. L'utilisation de la chaux vive en l'agriculture n'est pas recommandée, à cause des températures élevées causées par sa réaction avec l'eau du sol. Son utilisation requiert un équipement spécialisé pour éviter les brûlures.

✓ **La chaux hydratée ou chaux éteinte (hydroxyde de calcium)** : elle est produite en brûlant du calcaire ou du calcaire dolomitique en présence de vapeur d'eau. La fabrication de la chaux éteinte est rapide, mais coûteuse.

Gisement de roches dolomitiques utilisé pour la production de chaux agricole. (Mali)

Pour aller plus loin : Les réactifs et produits en présence

- ✓ Le chaulage apporte des amendements ou produits basiques, par exemple les carbonates de calcium ($CaCO_3$) et de magnésium ($MgCo_3$) , susceptibles de libérer des anions basiques : carbonates (CO_3^{2-}), bicarbonates (HCO_3^-), etc. qui se lient avec les cations acides du sol.
- ✓ L'objectif est de réduire l'acidité du sol en neutralisant les cations responsables (H^+, Al_3^+, Fe_2^+, Mn_2^+) de cette acidité.
- ✓ Le chaulage permet de rendre disponibles les éléments minéraux comme l'ammoniac (NH_3), le phosphore (P_2O_5), le magnésium (MgO) et les oligo-éléments comme le molybdène (Mo), le manganèse (Mn), le bore (BO_3), le zinc (Zn) ou le cuivre (Cu) pour la plante.

Le choix d'apporter à la fois du calcium et du magnésium doit se raisonner en fonction des résultats d'analyse de sol. Si le sol est suffisamment pourvu en magnésium, l'épandage des produits sans magnésium est beaucoup plus économique.
Dans un sol carencé en magnésium, une dose annuelle de 30 à 60 kg d'oxyde de magnésium (MgO) par hectare suffit pour satisfaire les besoins des cultures. Cette dose doit être d'autant plus élevée que la teneur du sol est faible.
La dolomie, par sa composition, permet de lutter contre l'acidité du sol, mais aussi de corriger les carences en magnésium.

Haut-fourneau dédié à la pyrolyse et au broyage du calcaire brut. (Mali)

2. La dolomie

La chaux agricole, à base de dolomie, est obtenue par un procédé simple, qui consiste en l'extraction, le nettoyage et le broyage d'un gisement de calcaire, pour en faire un produit fini.

Il s'agit d'un carbonate double de calcium et de magnésium, de formule chimique $CaMg(CO_3)_2$), composé de :
- ✓ Au moins 30 % d'oxyde de calcium (CaO)
- ✓ Au moins 15 % d'oxyde de magnésium (MgO)

Traces d'oxyde de silicium (<1 %), d'oxyde de fer (<0,2 %) et d'oxyde d'aluminium (<0,3 %)

Elle se présente sous forme de poudre dont les grains font 0-5 mm de diamètre.

Plus la proportion d'oxyde de silicium (sable), en particulier, est basse, plus la dolomie est de bonne qualité.

La dolomie est utilisée pour corriger l'acidité des sols en agriculture conventionnelle, industrielle et biologique ainsi que pour l'aviculture et l'élevage, et comme additif stimulant dans l'industrie des engrais.

3. Les types de chaulage

Pour des terres agricoles nécessitant un chaulage, il faut en premier lieu évaluer le besoin en chaux avant de choisir l'amendement et réaliser l'épandage. On distingue le chaulage de redressement et le chaulage d'entretien.

Le chaulage de redressement pour corriger un sol trop acide
Le chaulage de redressement vise à remonter le pH à un niveau souhaitable afin d'obtenir rapidement des conditions optimales pour le cacaoyer.
Il s'agit de relever le niveau de pH d'un demi-point ou d'un point au moyen d'un seul traitement pour plusieurs années, à raison de 500 kg à 1000 kg de dolomie par hectare. L'apport doit être fait lors de l'implantation de la cacaoyère.

Le chaulage d'entretien pour compenser les sources d'acidification.
La tendance naturelle d'un sol est de s'acidifier. Le chaulage d'entretien consiste à apporter régulièrement (tous les 3 à 4 ans) un amendement basique destiné à maintenir le pH et à restituer au sol les quantités de calcium et de magnésium utilisées au cours du temps.
L'apport la dolomie se fait durant la vie de la plantation pour l'entretien de sa fertilité et l'augmentation de sa durée de vie et de sa productivité.
On évalue les quantités à apporter en fonction de l'importance des exportations des résidus de cultures, du lessivage et de l'action acidifiante des engrais minéraux. En moyenne, il est conseillé d'apporter environ 300 à 500 kg/ha d'oxyde de calcium (CaO) chaque année sur les cacaoyers.

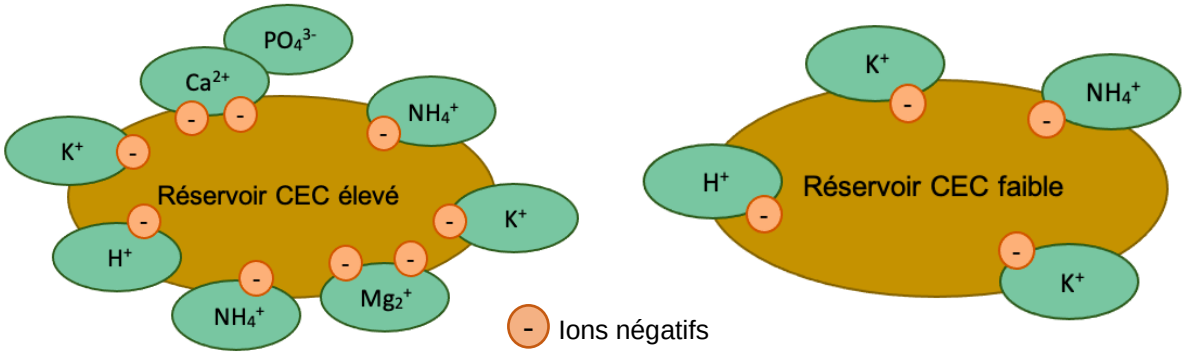
Le chaulage d'entretien permet d'accroître le rendement et la qualité de la production du verger.

Conjointement à ces traitements, il faut agir sur les causes humaines de l'acidification des sols.

4. Les indicateurs de gestion du chaulage

Pour aller plus loin : Le complexe argilohumique

Le complexe argilohumique (constitué de très fins éléments d'argile et d'humus) d'un sol est naturellement chargé négativement. Les cations ont donc tendance à s'y agglomérer, notamment l'aluminium (Al^{3+}) et l'hydrogène (H^+, H_3O^+) appelés ions forts. Or, d'un point de vue nutritif et pour limiter l'acidité du sol, les ions faibles (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, NH_4^+) sont plus intéressants. D'où l'ajout de dolomie.
De manière plus imagée, le complexe argilohumique représente le « réservoir » à cations du sol :



Exemple avec une terre argileuse

Exemple avec une terre sablonneuse

- **Premier indicateur : le pH.**

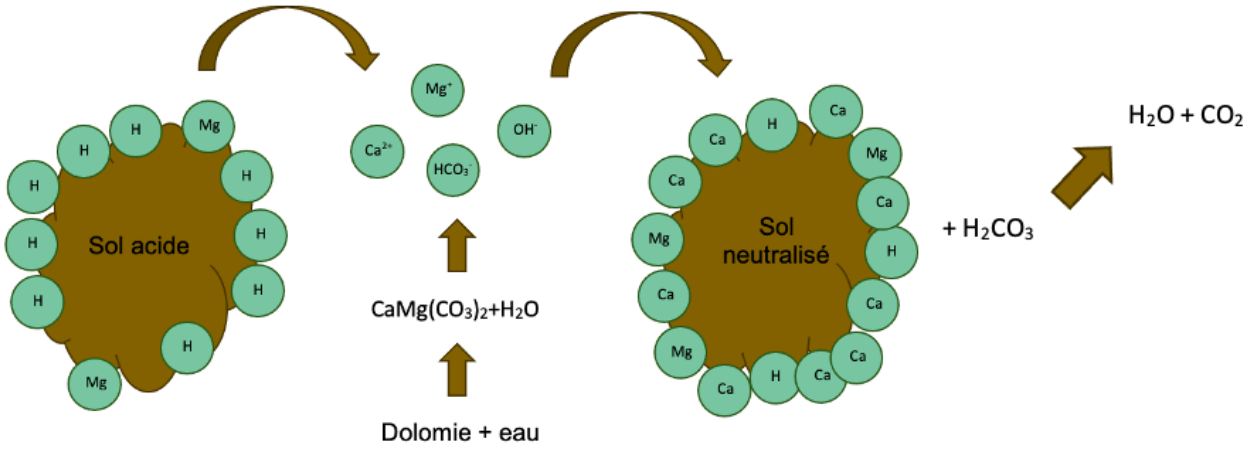
La mesure du pH suffit pour faire un diagnostic et prendre des décisions. La quantité de chaux nécessaire pour atteindre un pH donné varie d'un sol à l'autre.

- **Deuxième indicateur : la Capacité d'Échange Cationique (CEC).**

Il s'agit de la quantité de cations (éléments chargés positivement) qu'un sol peut retenir à un pH donné. Ce peut être des acides forts (hydrogène, aluminium) ou des acides faibles (calcium, magnésium).
L'intérêt du chaulage sera de mettre en place des acides faibles à la place des acides forts, car ces derniers sont responsables de l'acidification du sol.
Plus le sol est riche en argile et en matière organique, plus la CEC sera élevée. Un sol argilo-limoneux possèdera une CEC élevée, contrairement à un sol sablonneux.
Les conditions (pH, nature des acides, etc.) influent sur le résultat, il est important d'indiquer la méthode utilisée pour déterminer la CEC (CEC Metson, effective, etc.)

Pour aller plus loin : Impact de la dolomie sur le complexe argilohumique

La dolomie se dissout pour former des ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{+}), bicarbonate ($HCO3^{-}$) et hydroxyle (OH^{-}).
Le calcium se déplace à la surface des particules du sol remplaçant ainsi l'ion H^{+}.

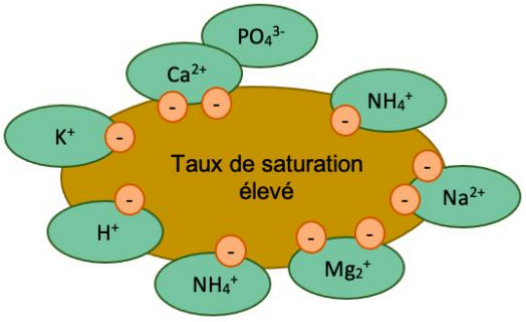


Impact de la dolomie sur le complexe argilohumique

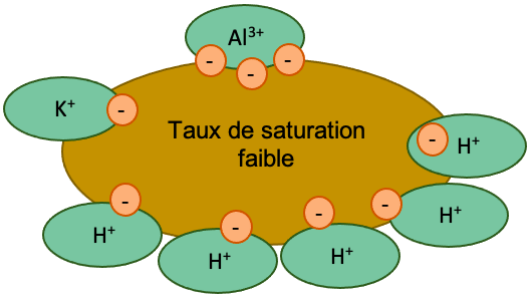
Pour aller plus loin : D'autres indicateurs utiles

- ✓ **Teneur en carbonates (« calcaire total »)**
  Lorsque les carbonates se solubilisent, sous l'effet des précipitations, ils libèrent des ions calcium (et magnésium) qui viennent compenser les pertes dues à la lixiviation par les pluies, et des ions carbonates (anions d'une base forte) qui neutralisent les ions H^{+}.
  Il est estimé qu'une teneur minimale de 3 g/kg de terre fine de carbonates est nécessaire dans ces situations à risque pour éviter une chute brutale de pH.

- ✓ **Teneur en aluminium échangeable (S/T ou S/CEC)**
  Taux de saturation du sol en cations nutritifs intéressants échangeables (Ca, Mg, K, Na) , qui désigne « le taux de remplissage » de la CEC par ces cations. Le chaulage est nécessaire lorsque le taux de saturation est inférieur à 80%, et selon le pH.



S/CEC = 80 %
Le chaulage n'est pas nécessaire.



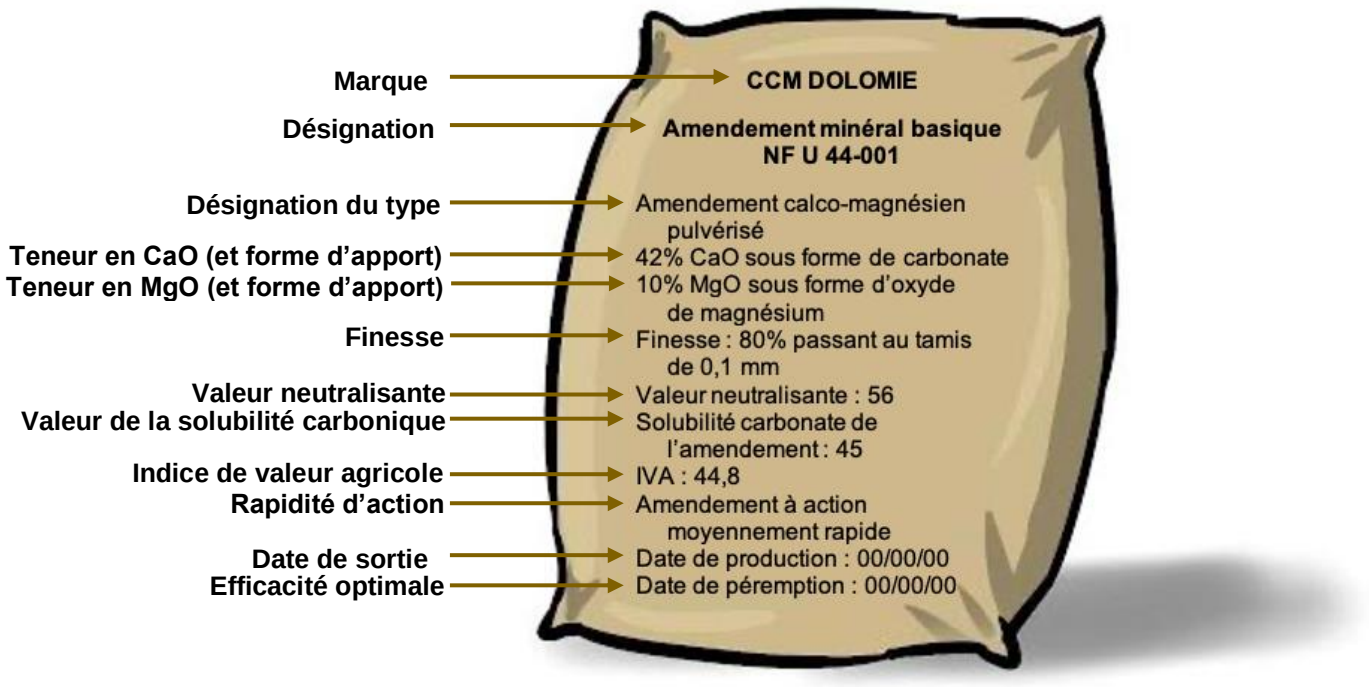
S/CEC < 20 %, pH acide
Le chaulage est nécessaire.

E. LE CHAULAGE : APPLICATION

Ce chapitre technique aborde les points suivants :

- ✓ Le choix du type de chaux agricole
- ✓ L'itinéraire d'application de la chaux agricole
- ✓ Les conditions d'application de la chaux agricole

1. Lire une étiquette de chaux agricole



L'IVA détermine la valeur commerciale de la chaux agricole selon la formule :
IVA = VNR (valeur neutralisante) x Finesse

2. La valeur neutralisante VNR

La valeur neutralisante (VNR) est la quantité d'acide que la chaux agricole est capable de neutraliser par rapport à la quantité d'acide que la même masse de carbonate de calcium pur ($CaCO_3$) serait capable de neutraliser.
Elle est exprimée en Équivalent Carbonate de Calcium (ECC).

Plus la VNR est élevée, plus le produit est réactif.

Si les valeurs en ECC ne sont pas disponibles, les teneurs élémentaires peuvent être utilisées pour les calculer, à l'exemple du tableau ci-contre :

Facteurs de conversion pour les éléments de type chaux
Ca (%) x 2,50 = ECC
Mg (%) x 4,17 = ECC
CaO (%) x 1,79 = ECC
MgO (%) x 2,50 = ECC
$MgCO_3$ (%) x 1,19 = ECC
$Ca(OH)_2$ (%) x 1.36 = ECC
Exemple de produit de chaulage: Teneur en Ca : 35% : ECC = 35 x 2,50 = 70 % Teneur en Mg : 2% : ECC = 2 x 4,17 = 8,34 % Total ECC : 70 + 8,34 = 78,34 %

3. Rapidité d'action : finesse et solubilité

La rapidité d'action d'un produit de chaulage dépend de la finesse de mouture et de la solubilité de ce produit.

L'utilisation des produits à action rapide ne se justifie techniquement qu'en cas de redressement. Pour le chaulage d'entretien, une action rapide n'est nullement nécessaire : la chaux agricole se dissoudra petit à petit dans le sol.

Un amendement avec une solubilité supérieure à 50 % a une action rapide ; inversement, l'action est lente si la solubilité est inférieure à 20 %.

Plus le produit est réduit en poudre fine et soluble, plus il est cher et à action rapide (la chaux étant la plus soluble). La comparaison des prix se fait en fonction de la solubilité et par unité de CaO.

Finesse

Compte tenu de la réactivité des différentes tailles de particules de chaux, comme indiqué ci-dessus, la chaux doit être broyée ou pulvérisée à des tailles de particules inférieures à 5 mm.

Trois classes de finesse de moutures sont définies :
- ✓ Amendement pulvérisé : plus de 80 % du produit passe au tamis de 0,315 mm.
- ✓ Amendement broyé : plus de 80 % du produit passe au tamis de 4 mm.
- ✓ Amendement concassé : moins de 80 % du produit passe au tamis de 4 mm.

Pour aller plus loin : Capacité d'adsorption

Plus le produit est fin, plus sa capacité d'adsorption est forte, c'est-à-dire la capacité des cations basiques à se fixer sur le complexe argilo-humique en y déplaçant les cations acides.

Différentes finesses de mouture.

Solubilité

La solubilité peut être estimée par la mesure de la solubilité carbonique (S) des constituants de l'amendement et varie de 0 à 100 %.

Un amendement avec une solubilité supérieure à 50 % a une action rapide. Inversement, l'action est plus lente avec une solubilité inférieure à 20 %.

4. Les catégories d'amendement

Selon l'amendement choisi, la rapidité d'action sera plus ou moins importante :

- ✓ Action rapide (quelques semaines) : chaux, craie broyée ;
- ✓ Action moyennement rapide (quelques mois) : calcaire broyé ;
- ✓ Action lente (plusieurs années) : calcaire concassé.

Les caractéristiques des différents amendements sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Type et appellation	CaO (%)	MgO (%)	Valeur neutralisante	Rapidité d'action	Coût indicatif
Produits crus					
Calcaire pulvérisé	46 à 54	0 à 5	45 à 54	Action rapide	Coût moyen
Calcaire broyé	46 à 54	0 à 5	45 à 54	Action moyennement rapide	Coût faible
Dolomie pulvérisée	30 à 35	18 à 20	58 à 60	Action moyennement rapide	Coût moyen
Dolomie broyée	30 à 35	18 à 20	58 à 60	Action lente – roche tendre	Coût faible
Calcaire concassé	> 35		> 35	Action lente – roche tendre	Coût faible

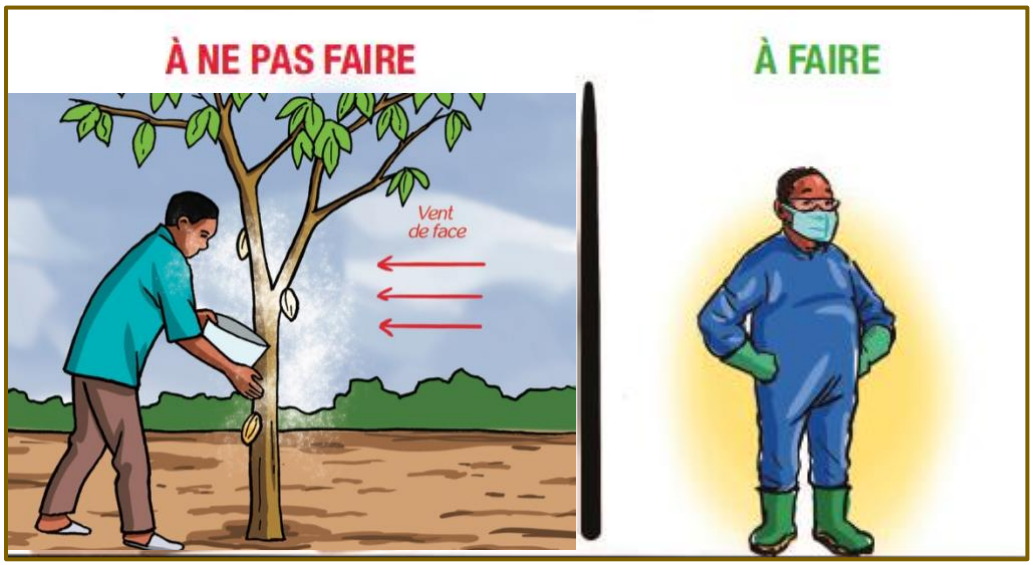
5. Les doses recommandées

Pour connaître la quantité d'amendement à apporter, il faut appliquer la formule suivante :

$$Quantité\ d'amendement\left(\frac{kg}{ha}\right) = \frac{Quantité\ de\ CaO\ à\ apporter\ (\frac{kg}{ha})}{Valeur\ neutralisante\ de\ l'amendement/100}$$

Par exemple, si l'on souhaite apporter 250 kg de CaO par hectare, au moyen de calcaire broyé ayant une valeur neutralisante de 50, la quantité d'amendement nécessaire sera de 500 kg/ha. (250/0,5= 500).

Il est nécessaire de réaliser d'abord une préincorporation pour homogénéiser le mélange terre-amendement avant le travail profond.



S'il y a du vent, la chaux peut être emportée sur des parcelles non ciblées. Il faut éviter d'inhaler ou d'être en contact avec la chaux, ou d'effectuer le chaulage sans protection appropriée.

Enfin, des solutions d'application raisonnée de la chaux agricole par microdose sont en cours d'expérimentation, mais aucune préconisation n'est actuellement disponible pour les exploitations.

Il faut faire attention à ne pas mettre de la chaux agricole en excès : le sol risque de devenir trop basique, la plante ne parviendra plus à absorber des éléments importants comme le potassium, le phosphore ou encore le fer.

6. Prise en compte du pH

La mesure de l'évolution du pH des sols et de ses teneurs en calcium et magnésium doit être effectuée tous les 5 ans.

Si le pH est inférieur à 6, les mesures d'amendement pourront être plus rapprochées et réalisées par exemple tous les trois ans, en ne considérant que ce paramètre.

Le pH varie en fonction de la saison. Il est donc nécessaire de réaliser les analyses successives durant la même période de l'année.

Le tableau suivant résume la conduite à tenir, selon les cultures et en fonction du pH :

Niveau d'acidité du sol	Sol très acide	Sol acide	Sol peu acide		Sol neutre	Sol basique
Ca/CEC	< 40%	40 à 60%	60 à 75%	75 à 90%	90 à 140%	> 140%
pH eau	< 5,4	5,4 – 5,8	5,8 – 6,2	6,2 – 6,5	6,5 – 7,2	> 7,2
Pâturage	Redressement	Entretien	Impasse	Impasse	Impasse	Impasse
Céréales	Redressement	Redressement	Entretien	Impasse	Impasse	Impasse
Orge	Redressement	Redressement	Entretien	Entretien	Impasse	Impasse

« Impasse » signifie que les causes de la mauvaise santé du champ sont à rechercher ailleurs qu'au niveau de l'acidité du sol.

En règle générale, il est conseillé d'éviter les augmentations brutales de pH : il est judicieux de procéder au maximum à une augmentation du pH de 0,5 à 1 point par action d'amendement.

7. Prise en compte de la texture du sol

La CEC est une propriété fondamentale du sol qui dépend, d'une part, de la teneur en argile et en matière organique et, d'autre part, du type d'argile présent dans le sol. Les types d'argile varient en partie en fonction du climat, sauf pour des zones où la roche mère est relativement jeune (zones volcaniques, roches calcaires en zones côtières, etc.).

Plus la CEC du sol est importante, plus la dose à apporter sera élevée.

Le tableau ci-contre donne la quantité approximative de calcaire finement broyé à apporter en fonction de la texture du sol, afin d'élever le pH d'une unité à la profondeur de 18 cm.

Texture du sol	Quantité de chaux nécessaire (kg/hectare)	
	pH 4,5 à pH 5,5	pH 5,5 à pH 6,5
Sableuse à sablo-limoneuse	600	900
Limono-sableuse	1100	1550
Argileuse	1700	2200
Limoneuse	2700	3100
Limono-argileuse	3350	4200

8. Prise en compte des apports en MO

L'activité biologique d'un sol varie avec le pH.
La diversité, l'abondance et l'activité de la microflore (bactéries, champignons, mycorhizes…) sont en effet influencées par le pH.
Sous l'action des micro-organismes apportés par de la matière organique (MO), la matière organique morte se transformera soit en humus stable, soit en biomasse microbienne, ce qui correspond à la fraction la plus active.
Les matières organiques contribuent également au maintien de l'équilibre acido-basique du sol.

Par exemple, le fumier frais comporte 3,8 kg d'oxyde de calcium (CaO) par tonne.
Un épandage de 15 tonnes de fumier à l'hectare (dose recommandée) représentera donc un apport d'environ 57 kg d'oxyde de calcium.
Il est important d'en tenir compte afin d'adapter la quantité à apporter pour limiter ainsi le coût du chaulage.

Le fumier à apporter après le chaulage doit être mûr.

Lorsque des apports de chaux et de matière organique (ou de fumier) doivent être réalisés, les deux ne doivent pas être mélangés directement.

Il faut effectuer le chaulage en premier afin d'incorporer la chaux par un labour, avant d'épandre et d'enfouir rapidement la matière organique, afin de limiter les pertes en azote par volatilisation.

Pour aller plus loin : La « faim d'azote »

Si de la matière organique fraiche, telle que le fumier, et la chaux sont incorporées en même temps, il peut se produire le phénomène de « faim d'azote » : la matière fraiche utilise l'azote disponible pour se dégrader et l'azote ne sera alors plus disponible pour les plantes, qui souffriront de carence.

9. Prise en compte de la pureté

Les recommandations des laboratoires d'analyse se basent sur de la chaux agricole à base de carbonate de calcium pur, qui neutralise l'acidité à 100 %.
Seulement, la chaux agricole du marché n'est jamais pure à 100 %, à cause des impuretés naturelles.
La recommandation donnée doit donc être ajustée en fonction de la pureté.

Par exemple, un produit dont la pureté en carbonate de calcium est supérieure à 95 % neutralisera l'acidité du sol plus efficacement qu'un produit dont la pureté sera de 60 %. Le deuxième devra être épandu en plus grande quantité que le premier pour avoir le même effet.

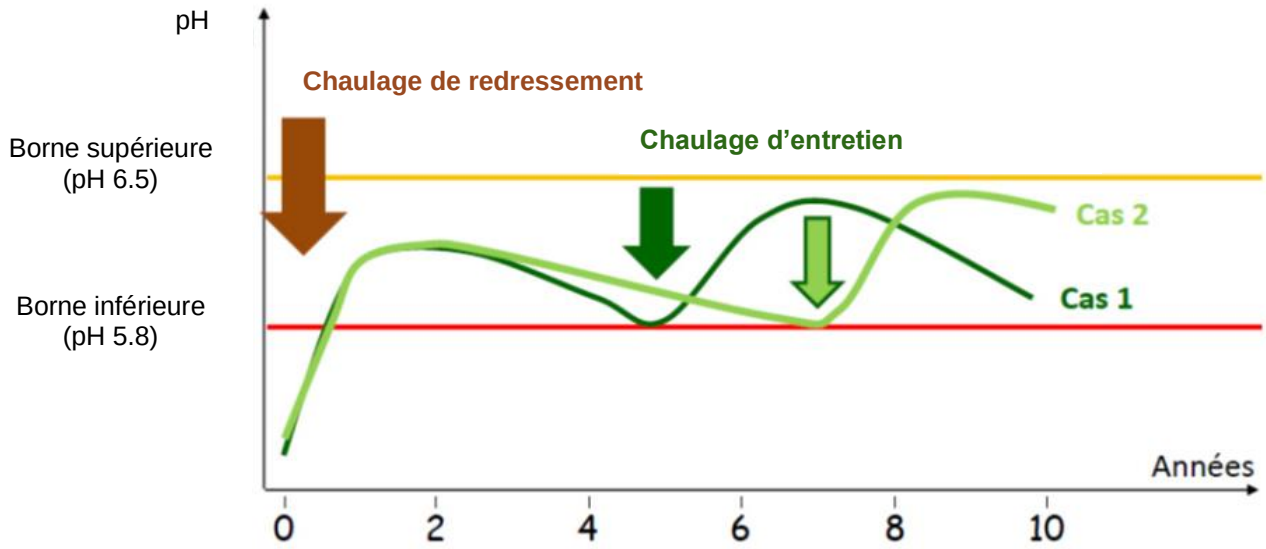
Plus la chaux est pure, plus elle est efficace.

10. Quand réaliser le chaulage ?

L'apport de dolomie a lieu généralement une fois tous les trois ans, contrairement aux engrais, dont l'apport a lieu tous les ans.

Il convient de réaliser les apports dans des conditions qui ne dégradent pas la structure du sol et facilitent l'incorporation de l'amendement au sol. La période interculture semble être la plus favorable.

Le graphique ci-contre propose un calendrier :



Calendrier de chaulage redressement/entretien

Le fait de différer l'apport d'amendement d'un ou deux ans peut avoir des conséquences sur le rendement, selon le tableau suivant :

	Si l'apport d'amendement est différé d'un ou deux ans :			
pH		5,5 < pH du sol < 6	6 < pH du sol < 6,5	pH du sol > 6,5
Risque sur le rendement	Élevé	Moyen	Faible	Faible
Conseil	Redressement urgent avec produits à vitesse d'action rapide (exemple : carbonates pulvérisés, etc.)	Redressement à base de produits à action rapide ou moyennement rapide (exemple : carbonates pulvérisés, ou broyés)	Entretien à base de produits à action moyennement lente	Impasse ou entretien dans certaines situations (sols instables drainés)

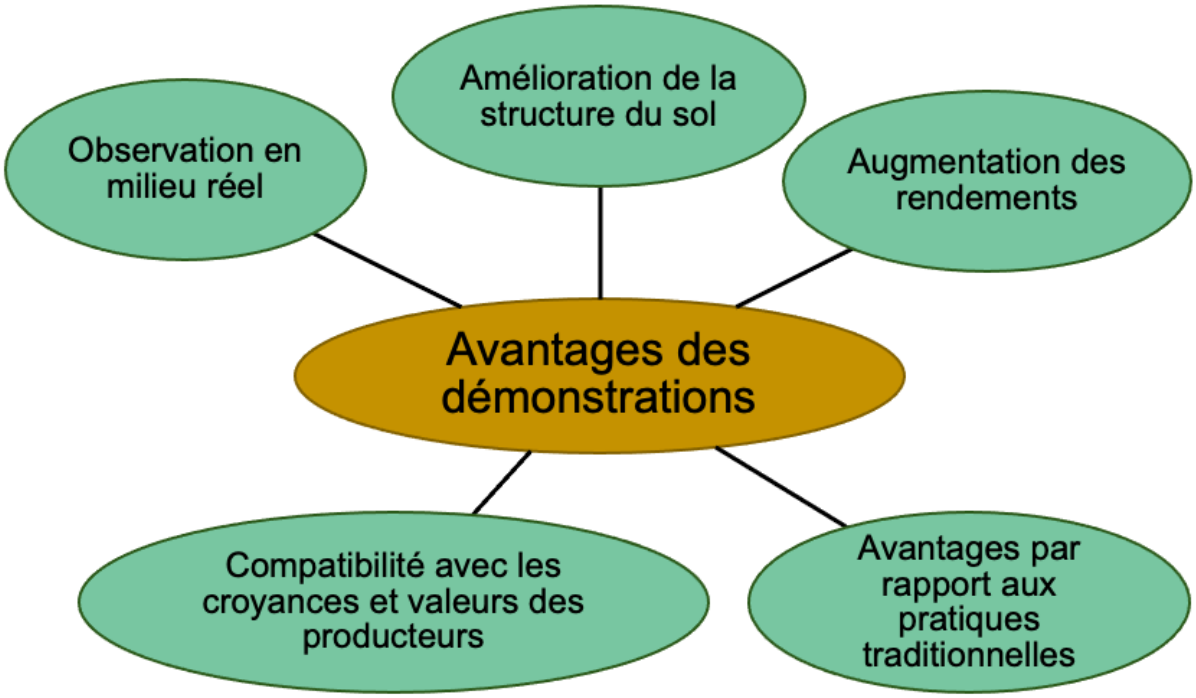
À RETENIR

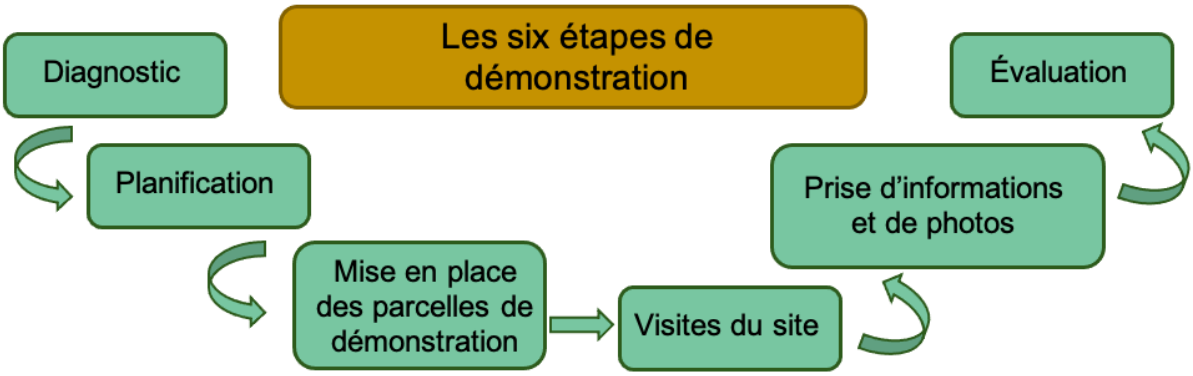
- ✓ La rapidité d'action du produit est déterminante pour l'efficacité du chaulage.
- ✓ Elle est liée à la pureté et à la finesse de la chaux.
- ✓ Il est recommandé de respecter les consignes et prendre en compte les conditions d'applications pour éviter les dommages, les affections ou la perte de produit.
- ✓ Le meilleur moment pour effectuer le chaulage est la période interculture.

F. LES CHAMPS-ÉCOLE

1. Bien-fondé des démonstrations et étapes

Les démonstrations ont de multiples avantages, qui mettent en avant les bienfaits du chaulage. Elles peuvent s'effectuer en six étapes.





2. Protocoles d'essai de chaulage

Objectif général : Contribuer à l'amélioration de la fertilité des sols par la correction du pH du sol.

Objectif spécifique : Développer une approche participative adaptée de lutte contre l'acidité des sols à travers l'application de la dolomie.

♦ Première année : étape par étape

✓ Choix des sites de démonstration
✓ Délimitation des parcelles élémentaires
✓ Prélèvement d'échantillons du sol pour analyse :

✓ Épandage de la fertilisation organique et de la chaux agricole :

✓ Labour et semis :

✓ Entretien des cultures

✓ Traitements phytosanitaires

✓ Visites interpaysannes : recueil de témoignages, vidéos, élaboration de sketchs, film documentaire…

- ✓ Récolte et évaluation des rendements
- ✓ Restitution des résultats
- ✓ Recueil des avis des producteurs
- ✓ Prélèvement de sols dans les parcelles élémentaires

♦ Deuxième année : suivi des arrières-effets de la chaux

✓ Les activités suivantes ont été ajoutées :

- Formation sur l'identification et les espèces indicatrices d'un sol
- Mesure de la correction du pH par la dolomie
- Évaluation des prix et situation des dépositaires de la chaux dans les différentes zones
- Évaluation de la situation de stocks
- Évaluation du temps de conservation

3. Les bénéfices globaux du chaulage

Les résultats des essais de chaulage, les démonstrations en milieu paysan et les études de référence attestent de l'impact positif du chaulage sur la santé du sol et sur les plants :

- ✓ Accroissement de l'absorption de l'azote, du phosphore et du potassium et de la disponibilité des autres oligo-éléments
- ✓ Stimulation de l'activité biologique des sols
- ✓ Développement de systèmes racinaires plus vigoureux
- ✓ Amélioration de la fixation de l'azote par les légumineuses
- ✓ Réduction de la toxicité causée par le manganèse et l'aluminium dans la solution du sol
- ✓ Renforcement de la qualité de la structure du sol et ainsi meilleure tolérance à la sécheresse
- ✓ Fourniture d'une source peu coûteuse de calcium et de magnésium
- ✓ Meilleure conservation des productions et donc réduction des pertes post-récoltes
- ✓ Augmentation des rendements et des revenus du producteur.
- ✓ Réduction des besoins en engrais et herbicides, et donc, des dépenses en intrants agricoles.
- ✓ Conformité de la dolomie aux cahiers des charges et aux normes de l'agriculture biologique et amélioration de la santé nutritionnelle globale.

Références

De nombreuses données de ce manuel technique sont issues de « l'Atelier de formation et d'échanges sur la chaux agricole produite par la société CCM S.A. », organisé conjointement par la CCM et IFC le 18 et 19 novembre 2021, à l'hôtel Onomo, Bamako, Mali.

[i] Quatrième session ordinaire du Comité Technique Spécialisé (CTS) sur l'Agriculture, le Développement Rural, l'Eau et l'Environnement (ADREE) 13 - 17 décembre 2021 ADDIS ABEBA, ETHIOPIE
[ii] Bian, Miao ; Zhou, Meixue ; Sun, Dongfa ; Li, Chengdao , 2013/12/01, P - 91–104 - Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants
[iii] Source projet de cartographie des sols rapport final,CNRA/CIRAD, 2015
[iv] Synthèse des volumes du Recensement des Exploitants et Exploitations Agricoles (REEA) 2015/2016
[v] Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture, FAO Octobre 2009
[vi] Morisset et Coulibali, 2019.
[vii] Cadre stratégique pour la relance économique et le développement durable (CREDD) 2019-2023
[viii] Programme National d'Investissement Agricole 2018-2015, Edition 2018, Ministère de l'agriculture et du Développement Rural, Abidjan Côte d'Ivoire
[ix] Lutte contre la désertification: La Côte d'Ivoire veut mettre fin à la déforestation causée par l'agriculture déforestation, Portail officiel du gouvernement de la Côte d'Ivoire, Mai 2022.
[x] Chambre d'agriculture de Bourgogne, juillet 2015.