

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
1. INTRODUCTION	1
2. APERCU HISTORIQUE	1
3. CONCEPT MODERNE DE LA FERTILISATION.....	3
4. NOTION DE FERTILITE DU SOL	4
4.1. DÉFINITION	4
4.2. FACTEURS DE FERTILITÉ.....	4
4.2.1. Les facteurs écologiques : le climat et le sol.....	4
4.2.2. Les facteurs techniques	4
4.3. AMÉLIORATION DES PROPRIÉTÉS DU SOL.....	5
4.3.1. Propriétés physiques	5
4.3.2. Les propriétés chimiques.....	10
4.3.3. Les propriétés biologiques	11
4.4. APPRÉCIATION DE LA FERTILITÉ DU SOL	11
4.4.1. Critères d'appréciation de la fertilité du sol	11
4.5. ÉPUISEMENT DES SOLS ET PERTE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX.....	13
4.6. RÉGULATION IONIQUE	15
4.7. RÉACTION DU SOL	15
4.7.1. Réaction du sol et propriétés physiques du sol	17
4.7.2. Réaction du sol et propriétés chimiques	17
4.7.3. Réaction du sol et propriétés biologiques	19
4.8. ORIGINE DE L'ACIDITÉ DU SOL	19
4.9. RÉAJUSTEMENT DU PH.....	20
4.10. ÉTAT CALCIQUE DU SOL	21
4.10.2. Le "calcaire échangeable"	21
4.10.3. Le "calcaire total"	22
4.11. AMENDEMENTS CALCAIRES (RECALCIFICATION).	22
4.11.1. Les produits "crus".	22
4.11.2. Les produits "cuits"	23
4.12. MODE D'ACTION DES PRODUITS CALCAIRES.....	23
4.12.2. Les carbonates	24
4.12.3. Les résidus industriels.....	25
4.12.4. Le plâtre	25
4.13. POUVOIR DE NEUTRALISATION DES PRODUITS DE RECALCIFICATION	25
4.14. CARACTÉRISATION DES PRODUITS CALCAIRES	26
4.14.1. Teneur en Ca.....	27
4.14.2. Teneur en CaO.....	27
4.14.3. Teneur en CaCO ₃	28
4.15. EFFETS DES AMENDEMENTS CALCAIRES.....	28
4.15.1. Sur les rendements	29
4.15.2. Sur les propriétés du sol.....	29
4.16. LE CHAULAGE (DU CALCAIRE AU SOL)	30
4.16.1. Choix entre CaO et CaCO ₃	30
4.17. ACIDIFICATION DES SOLS	31
4.17.1. Produits d'acidification.....	31
4.18. LES AMENDEMENTS HUMIFÈRES	32
4.18.1. Formes des matières organiques du sol.....	32
4.18.2. Les matières organiques fraîches et les produits de leur décomposition.....	33
4.18.3. Caractéristiques des matières organiques	34
4.18.4. Rôle de la matière organique dans le sol.....	35
4.18.5. Facteurs influençant la décomposition de la matière organique du sol	38
4.18.6. Différents amendements humifères	39

4.18.7. La matière organique du sol et classification des sols.....	43
4.19. L'EAU FACTEUR ÉCOLOGIQUE DE FERTILITÉ	44
4.19.1. Sources de l'eau dans la nature	44
4.19.2. La qualité de l'eau.....	45
4.19.3.Effets de l'eau de qualité médiocre sur le sol et la culture.....	45
4.19.4.Méthodes de lutte contre les méfaits de l'eau de mauvaise qualité.....	47
4.19.5. Principe de mesure de la salinité.....	50
4.19.6. Grades de salinité et les sels influençant la qualité de l'eau.....	51
5. LA NUTRITION MINÉRALE DE LA PLANTE	54
5.1. LES ÉLÉMENTS NUTRITIFS	54
5.2. LE MÉCANISME DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES	55
5.2.1. L'absorption des éléments minéraux	55
5.2.3. Les interactions entre éléments minéraux.....	58
5.2.4. La toxicité des éléments minéraux.....	59
5.3 LA QUALITÉ DES PRODUITS AGRICOLES	60
5.4. LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS MINÉRAUX ESSENTIELS.....	62
5.4.1. Les éléments majeurs et secondaires.....	62
5.4.3. Types de carence et moment d'observation des symptômes.....	78
5.4.4. Les oligo-éléments et le Mg dans les sol congolais	79
5.4.5. Causes de carences en RDC.....	80
5.4.6. Organes manifestant des symptômes de carence.....	80
5.4.7. Apport des oligo-éléments.....	80
5.4.8. Éléments stimulant le développement mais sans fonction physiologique spécifique.....	81
5.4.9. Éléments toxiques aux consommateurs.....	83
5.4.10. Perte des éléments minéraux de la plante.....	84
6. LES ENGRAIS.....	84
6.1. LES ENGRAIS SIMPLES ET COMPOSÉS	84
6.1.1. Définition.....	84
6.1.2. La valeur d'un engrais	85
6.1.3. Classes des engrais	85
6.2. LES ENGRAIS SIMPLES	86
LES ENGRAIS POTASSIQUES.....	88
6.3. LES ENGRAIS COMPOSÉS	89
6.3.1. Définition.....	89
6.3.2. Teneur en éléments fertilisants	89
6.3.3. Différentes catégories d'engrais composés	89
6.3.4. Appréciation et choix d'un engrais composé.....	91
6.3.5. Conditions d'emploi des engrais composés.....	93
6.3.6. Les modes d'épandage.....	94
6.4. CALCUL DE LA DOSE D'ENGRAIS À APPLIQUER.....	96
6.5. CALCUL D'UN MÉLANGE À RAPPORT DÉTERMINÉ.....	97
7. LES LOIS DE LA FUMURE (LOIS DE LA CROISSANCE VÉGÉTALE).....	98
7.1. LES PRINCIPES DE BASE DE LA FERTILISATION	98
7.1.1. La loi de la restitution (nécessité mais insuffisance de la restitution)	98
7.1.2. La loi du minimum ou des facteurs limitants (Liebig).	99
7.1.3. Loi des excédents moins que proportionnels (Mitscherlich).....	99
7.2. RÔLE DE LA FUMURE.....	100
7.3. DÉTERMINATION DES BESOINS EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX.....	100
7.5. RENTABILITÉ DE L'EMPLOI DES ENGRAIS	102

1. INTRODUCTION

Au même titre que l'homme et l'animal, la plante est un être vivant avec les mêmes besoins fondamentaux que ceux-ci, à savoir :

- 1° le besoin énergétique et
- 2° le besoin matériel ou plastique.

Cependant le problème de l'alimentation végétale se pose d'une façon différente de celle de l'homme et de l'animal.

De par son immobilité, la plante doit pouvoir trouver ses aliments sur un espace assez limité comparativement à l'homme et à l'animal. D'autre part, à l'inverse de l'homme et de l'animal, la plante est autotrophe alors que ces premiers sont hétérotrophes en ce qui concerne l'alimentation en C.

Dans la nature, à cause de l'adaptation des végétaux à leur milieu écologique d'une part et du fait de l'inexistence des exportations des principes nutritifs d'autre part, le problème de l'alimentation des végétaux ne se pose pas tel qu'il se pose dans la pratique agricole car, par essence, la nature est organisation et équilibre. Dans la pratique agricole, non seulement, nous imposons souvent un nouvel habitat à nos plantes, mais aussi nous appauvrissons nos sols par des retraits fréquents des produits de récolte. Ces deux phénomènes, à eux seuls, peuvent déjà expliquer, à suffisance, les précautions que doit prendre l'agriculteur pour aménager le milieu de culture (le réajustement du pH, l'irrigation, le drainage, l'usage des engrais devenu pratique courante, surtout en culture intensive, ...).

2. APERCU HISTORIQUE

La notion de fertilité dans ses débuts, était surtout considérée sous l'aspect tropique de la plante.

Déjà dans l'antiquité, les savants de l'époque savaient que la plante avait besoin de se nourrir. Aristote disait à l'époque : "le végétal est un animal inversé qui, au lieu de tenir sa tête en l'air, fixe sa bouche au sol pour extraire tout ce dont il a besoin". Pour lui les feuilles semblaient avoir pour l'arbre à peu près l'importance et l'utilité d'un vêtement qui l'embellit et protège les fruits contre les ardeurs du soleil.

Du point de vue phytotrophologique, Aristote énonça aux environs de l'an 350 la théorie de l'humus, théorie selon laquelle la plante ne se nourrit que de l'humus. La conviction que la plante se nourrit de l'humus a ainsi persisté pendant plusieurs siècles. Cependant en 1563, Bernard PALISSY donna une certaine précision. Comme premier, il entrevu le rôle de la matière minérale contenu dans le sol pour l'alimentation des plantes.

En 1652, le physiologiste Van HELMONT mena une expérience devenue célèbre, la première expérience de végétation, à l'issue de laquelle il conclut que la plante synthétisait ses substances à partir de l'eau. Le rôle des feuilles était encore toujours inconnu, mais commençait à intriguer certains esprits.

Au cours de ce XVII^e siècle, MALPIGHI parvint à mettre en évidence l'importance des feuilles. Il supprima systématiquement aux jeunes graines qui germaient les cotylédons et les feuilles : aucun ne se développa et même un jeune arbuste en pleine vigueur ne pu survivre longtemps à la défoliation.

Après plusieurs péripéties :

- Charles BONNET émit comme premier l'hypothèse selon laquelle les feuilles dégageaient des gaz, mais la réfuta lui-même après faute de preuve.
- PRIESTLEY démontra que la respiration de la plante était de nature inverse à celle des animaux, chez elle, le gaz dégagé était constitué d'oxygène.
- INGEN-HOUSZ vint à préciser que les plantes respiraient comme les animaux en viciant l'air, mais en les exposant au soleil, elles purifiaient l'air vicié et le CO₂ était absorbé par les parties vertes des feuilles.

En 1804, Théodore DE SAUSSURE synthétisa toutes les idées de ses prédécesseurs et éclaircit le phénomène de la photosynthèse : "La plante a besoin pour son développement de CO₂ de l'air, de l'eau et des substances minérales".

L'agent même de la fixation du CO₂ de l'air fût découvert et isolé par deux chimistes français PELLETIER et CAVENTOU qui lui donnèrent le nom de "vert des feuilles", la chlorophylle. Après cette découverte remarquable, en 1809, A. Thaer resurgit avec la théorie de l'humus, réfutant toutes les autres théories antérieures : "Hormis l'eau, seul l'humus constitue l'aliment pour les végétaux".

Après cette période, indépendamment l'un des autres, trois chercheurs réfutèrent la théorie de l'humus et furent à la base de la théorie de l'alimentation minérale des végétaux :

. 1825 - 1835 : Carl SPRENGEL

. 1840 - 1840 : Justus von LIEBIG (1803-1873) établit les principes de l'alimentation minérale des plantes dans son ouvrage intitulé "Die Chemie in ihrer Anwendung an Agrikultur und Physiologie" (= La chimie dans son application à l'agriculture et à la physiologie), ouvrage qui connut un très grand succès à l'époque (cinq éditions en trois ans).

Dans son ouvrage, Liebig émit quelques principes essentiels sur l'alimentation des plantes dont en voici quelques uns :

- Les substances minérales sont des éléments constitutifs des végétaux;
- Les végétaux ont besoin de dix éléments essentiels pour leur croissance : C, O, H, N, P, S, K, Ca, Mg, Fe qui proviennent de sels du sol, hormis C, O et H qui proviennent de l'eau et de l'air atmosphérique;
- La matière organique (fumier, excréments des hommes et des animaux) n'agit pas directement sur les végétaux comme telle, mais bien par les produits de sa décomposition après minéralisation;
- Les analyses des plantes qui ont végété dans un sol donnent la somme des éléments enlevés à la terre par les récoltes et donnent une indication sur les quantités qu'il faut restituer à la terre pour la rétablir dans sa fertilité primitive.

Ces considérations de LIEBIG ouvrirent ainsi une nouvelle ère, celle de la production et de l'utilisation des engrais chimiques.

3. CONCEPT MODERNE DE LA FERTILISATION

Alors que la fertilisation, dans le passé, considérait essentiellement l'augmentation des rendements, dans la conception moderne, elle traite, bien sûr, encore de cet aspect du problème mais en veillant à l'aspect qualitatif des récoltes et sur son influence sur le consommateur et l'environnement.

Sous cet aspect, le domaine de la fertilisation se trouve à la limite avec beaucoup de disciplines et souvent, concourt avec des sciences connexes telles, l'écologie, la pédologie, la phytotechnie, la phytophysiologie, la phytopathologie, la génétique, la biochimie, la physiologie animale et humaine...

4. NOTION DE FERTILITE DU SOL

4.1. Définition

Dans la pratique, la fertilité étant un concept plutôt dynamique, sa définition est quelque peu malaisée à émettre. Mais, néanmoins, la fertilité d'un sol peut se définir comme étant son "aptitude permanente" à produire beaucoup dans son environnement lorsqu'on lui applique les techniques agricoles qui lui conviennent les mieux. Ainsi, de la définition de fertilité, on peut distinguer deux groupes de facteurs au centre desquels se situe la plante qui subit l'influence des uns comme des autres. Ce sont les facteurs écologiques et les facteurs techniques.

4.2. Facteurs de fertilité

4.2.1. Les facteurs écologiques : le climat et le sol

- Le climat, par sa pluviosité (quantité et répartition), ses variations de température, sa luminosité, ses vents, ... peut soit interdire soit favoriser une culture dans une région donnée.
Ainsi par exemple, la zone équatoriale est, naturellement, propice à l'hévéa, au palmier à huile, au riz, au café robusta, à la banane, ... et la zone tropicale, avec une saison sèche bien marquée, est propice aux cultures à courte durée de végétation : l'arachide, le maïs, le coton, ...
- De même le sol lui-même en tant que substrat, par sa profondeur, son profil, sa texture, sa perméabilité à l'air et à l'eau peut soit interdire soit favoriser une culture plutôt qu'une autre.

4.2.2. Les facteurs techniques

Leur maîtrise est importante car, sinon, ils peuvent conduire à une mauvaise appréciation de la fertilité du sol.

Parmi les facteurs techniques, nous retiendrons les plus importants, notamment :

- le choix des espèces et variétés adaptées au milieu écologique, (sécheresse, photopériodisme, vernalisation ...);
- les amendements dont le but est d'améliorer la structure du sol, de régulariser son pH et, par là, favoriser l'activité biologique;
- les techniques de travail du sol avec des instruments appropriés et en temps opportun, le contrôle des éléments minéraux et de l'humidité, le désherbage et la lutte contre les ennemis des plantes...

Ainsi donc, fertiliser un sol ne consiste pas seulement à lui appliquer des engrais, mais à le rendre et le maintenir productif par une action conjuguée sur tous les facteurs susceptibles de contribuer à la productivité.

L'agriculteur ayant moins d'influence sur le macro-climat, il peut, néanmoins, avoir une action déterminante sur les propriétés du sol en les adaptant aux exigences spécifiques de chaque culture.

4.3. Amélioration des propriétés du sol

L'amélioration des propriétés du sol peut concerner les propriétés physiques et/ou les propriétés chimiques dont, l'ensemble des effets bénéfiques favorise, généralement, les propriétés biologiques.

4.3.1. Propriétés physiques

Elles concernent la texture, la structure et la stabilité structurale.

- La texture peut, dans une certaine mesure, être modifiée par le sablage, mais hormis ce cas, elle est difficilement modifiable;
- La structure et la stabilité structurale peuvent être améliorées, par le travail du sol avec des instruments appropriés en période favorable et par l'application des matières organiques et du calcaire. De nos jours certaines substances (floculants synthétiques) sont utilisées dans le but d'améliorer la structure des sols (ex: krylium).

De façon globale, l'action sur les propriétés physiques du sol, notamment sur la texture, la structure et la stabilité structurale favorise surtout une bonne circulation de l'air

et de l'eau, un bon développement des microorganismes ainsi que celui du système racinaire, permettant ainsi aux racines d'exploiter un plus grand volume du sol, ce qui veut dire :

- plus d'éléments nutritifs
- plus d'eau
- racines profondes → protégées contre sécheresse.

4.3.1.1. La texture

La texture renseigne sur la proportion de chaque constituant mécanique du sol, chacun avec ses qualités, mais aussi avec ses défauts.

En général, dans un sol, les qualités des uns compensent les défauts des autres, bien entendu à condition que leurs proportions soient convenablement dosées.

Ceci n'est malheureusement pas toujours le cas. Ce qui recommande l'étude et l'appréciation des différents types de textures. Selon la prédominance de l'un ou de l'autre élément nous distinguons différents types de textures.

4.3.1.1.1. La texture grossière

Le sable est prédominant dans ce type de texture (85 à 95 %). Dans un sol à une telle texture, la cohésion entre les particules étant faible, la perméabilité à l'air et à l'eau est très élevée. Aussi la capacité de rétention d'eau est-elle très réduite ou même nulle, le drainage naturel très grand, l'humidité du sol faible et son rechauffement rapide. Le développement des végétaux dans ces conditions est contrarié par la faible teneur en eau, ce qui entraîne la diminution de leur nutrition.

Quoique les sables libèrent des éléments minéraux par altération, leur capacité nutritive diminue très vite du fait de leur pauvreté en colloïdes, surtout dans des régions humides à cause de l'intensité du lessivage.

Les sols sableux peuvent néanmoins donner des récoltes suffisantes si, sous un climat humide, ils reposent sur un substrat imperméable. La cohésion des sables peut être améliorée par l'apport simultané des matières organiques (humus) et du calcaire.

4.3.1.1.2. La texture fine

A l'opposé de la texture grossière, celle-ci contient au moins 17 % d'argile et au plus 45 % de sable.

Les particules fines (argile) étant fortement cohérentes, la perméabilité à l'air et à l'eau diminue dans ce type de texture et le rechauffement du sol est lent.

Si l'engorgement d'eau est très élevé, cette texture devient asphyxiante pour les racines des végétaux à cause de la diminution du taux d'oxygène. Généralement les sols à texture fine sont difficiles à travailler et à pénétrer par les racines.

Néanmoins, la texture fine contribue à la formation et à la stabilité de la structure et intervient dans la conservation des principes nutritifs à cause de l'augmentation des colloïdes du sol et à la diminution concomittente du lessivage.

Certains de ses défauts peuvent être éliminés par le drainage qui élimine une partie d'eau et par l'apport des particules grossières, les sables, pour éliminer la forte cohésion des colloïdes et rendre ainsi le sol meuble, plus facile à travailler.

Un sol à texture fine peut toutefois donner des rendements élevés s'il repose sur un sous-sol perméable qui évacue l'excédent d'eau.

4.3.1.1.3. La texture moyenne

Elle présente des caractéristiques intermédiaires à celles des textures fine et grossière. Celle-ci offre une cohésion moyenne entre les particules, par conséquent une bonne aération. C'est une texture assez équilibrée en ce qui concerne les différentes propriétés des sols (physiques, chimiques et biologiques).

4.3.1.1.4. La texture calcaire

On a la texture calcaire lorsque la teneur en calcaire est au moins égale à 5 %. Mais, si le calcaire peut contribuer à améliorer la structure des sols, il peut aussi conduire, en cas d'excès, à la destruction rapide de la matière organique et au blocage de certains éléments minéraux essentiels aux plantes deux défauts qui sont assez préjudiciables pour l'agriculture.

4.3.1.1.5. La texture humeuse

Un sol est dit humeux lorsque sa teneur en humus dépasse 5 %. Les sols humeux sont généralement acides. Ils ont un pouvoir d'absorption d'eau très élevé.

Des sols à texture humeuse peuvent être des bonnes terres s'ils ne sont pas formés dans un milieu engorgé d'eau, auquel cas il faut les améliorer par le drainage, le labour et le chauffage.

4.2.1.2. La structure

La structure exprime la façon dont les éléments solides du sol sont assemblés entre eux. La notion de structure est liée aux agrégats et à l'état des colloïdes.

L'état structural influe sur la fertilité du sol dans ce sens qu'il conditionne la porosité, la perméabilité, le stockage d'eau, le développement racinaire et les échanges gazeux indispensables au métabolisme des racines des végétaux et des microorganismes du sol. Chaque type de structure a ses qualités et ses défauts qui influent sur la fertilité (3 types essentiels).

* Structure particulaire : c'est une structure sans agrégats à cause de la non floculation des colloïdes ou à cause de leur absence quasi totale dans la texture. En général, cette structure est constituée des particules grossières, ce qui entraîne le manque d'eau et la pauvreté en éléments minéraux essentiels.

L'apport du Ca et des M.O. peut conduire à la floculation des colloïdes et à l'amélioration de la structure.

* Structure compacte :

Elle est constituée des colloïdes à l'état dispersé, ce qui rend le sol imperméable à l'air et à l'eau. Elle offre une grande résistance à la pénétration des racines et est difficile à travailler.

L'état dispersé des colloïdes peut être changé par l'apport du Ca.

* Structure grumuleuse

Ici les différentes particules du sol sont liées en agrégats par les colloïdes à l'état floculé. Une structure grumuleuse offre généralement des agrégats résistants aux facteurs de dégradation (ex pluie).

Un sol à structure grumuleuse et meuble est favorable à la pénétration des racines et à la bonne formation des organes souterrains (bulbes, tubercules,...). La circulation de l'eau et de l'air y sont bonnes. C'est une structure optimale pour les cultures.

La structure et la stabilité structurale peuvent être améliorées par le travail du sol avec des instruments appropriés en période favorable et par l'application des matières organiques et du calcaire. De nos jours, certaines substances synthétiques (Krylium) sont utilisées dans le but d'améliorer la structure des sols.

4.3.2. Les propriétés chimiques

Celles-ci peuvent être améliorées par l'action directe, mais aussi par l'action indirecte.

L'action directe par la neutralisation de l'acidité du sol en apportant des amendements calcaires et par l'enrichissement du complexe sorbant en éléments nutritifs par des apports d'engrais, de cendres et de matières organiques minéralisables.

Mais pour en assurer l'efficacité, les éléments nutritifs, par le biais des substances qui les apportent, doivent être placés dans des conditions telles qu'une absorption maximale en soit assurée par les racines de la plante en temps opportun.

Dans la zone équatoriale, il est recommandable de fractionner la dose des engrais, surtout ceux contenant des éléments mobiles dans le sol à cause des pertes importantes dues à l'abondance et à l'intensité des pluies, surtout sur sols légers.

Dans le cas d'engrais simples, le P et le K peuvent être apportés lors du semis (ou peu avant), alors que N doit être fractionné. Toutefois, il faut signaler que le fractionnement des faibles doses n'est pas rentable tel que le montre les résultats qui suivent obtenus à Yangambi.

Tableau : Rendement et teneur en protéines du maïs

Traitement	Rendement Kg/ha	Production relative	Teneur en protéines (% M.S.)
TO	894,5	100,0	11,37
T1	1036,2	115,8	12,90
T2	918,0	102,5	14,50
T3	927,5	103,7	11,99

Source : Tropicultura, 1987, n° 5, 1 : 7-10.

TO = Témoin

T1 = dose unique à la levée

T2 = 1/3 à la levée, 2/3 à 50 cm de haut

Pr. Lumpungu Kabamba

T3 = 1/3 à la levée, 1/3 à 50 cm, 1/3 fin montaison.

L'action indirecte par l'accroissement de la valeur et de l'efficacité du pouvoir sorbant du sol par l'apport des amendements humifères. Un pouvoir sorbant élevé retient et met à la disposition des plantes une grande quantité d'éléments nutritifs et empêche une trop grande perte de ceux-ci par les eaux d'infiltration.

4.3.3. Les propriétés biologiques

En évaluant et en analysant les diverses propriétés physico-chimiques d'un sol, on peut en déduire ses propriétés biologiques qui, généralement, en découlent. Ainsi une bonne aération qui, en fait, dépend d'une bonne porosité crée des conditions d'aérobiose, tandis que l'inverse conduirait à des conditions d'anabiose. De même le pH, selon son niveau, favorise certains types d'organismes et influe ainsi sur l'activité des microorganismes du sol.

De cette façon on peut avoir une certaine mesure appréhender et apprécier le degré de fertilité d'un sol en appréciant ses différentes propriétés.

4.4. Appréciation de la fertilité du sol

Apprécier la fertilité d'un sol revient à analyser et apprécier ses diverses propriétés physico-chimiques et biologiques. A ces diverses propriétés correspondent des critères d'appréciation qui donnent une idée sur le degré de fertilité d'un sol.

4.4.1. Critères d'appréciation de la fertilité du sol

4.4.1.1. Profondeur

Une grande profondeur offre un grand espace aux racines et une grande réserve en matières nutritives et en eau du sol. Les racines profondes sont aussi préservées du danger de dessiccation lors de sécheresse. La profondeur a une importance non négligeable sur le degré de fertilité et sa durée.

4.4.1.2. Texture et structure

De façon générale, les grains moyens et une bonne structure comme critère d'une

Pr. Lumpungu Kabamba

bonne fertilité, favorisent un bon développement du système racinaire, une bonne infiltration et conservation de l'eau et bonne aération.

La texture peut aussi donner une idée sur les réserves minérales du sol, une fine texture laissant présager sur une teneur élevée en éléments minéraux.

4.4.1.3. Réaction du sol

Le pH (l'optimum est variable avec les cultures) est souvent signe du niveau du calcaire dans le sol. Il donne aussi une idée sur l'assimilabilité des différents éléments nutritifs du sol et surtout des oligo-éléments.

4.4.1.4. Composition minéralogique du substrat parental

Un substrat parental homogène donne un sol pauvre en éléments nutritifs et fournit une alimentation déséquilibrée.

Par contre, un substrat hétérogène est susceptible de donner un sol riche en divers éléments nutritifs et fournit une alimentation plus ou moins équilibrée.

4.4.1.5. Teneur en éléments nutritifs

Une haute teneur en réserves des éléments nutritifs et une teneur optimale de la fraction mobile favorisent une croissance optimale et soutenue des plantes. Une teneur élevée en réserves minérales laisse présager sur une longue durée de fertilité.

4.4.1.6. Teneur et composition de l'humus

Les colloïdes humiques améliorent la structure du sol, forment des complexes facilement mobilisables avec les substances minérales (les chélates) et activent la vie des microorganismes auxquels ils servent de support et d'aliment.

4.4.1.7. Capacité du complexe sorbant

Une haute capacité du complexe sorbant constitue un pouvoir tampon bénéfique pour les plantes dans les cas d'excès de fumure. Celui-ci protège les éléments nutritifs contre l'entraînement par les eaux d'infiltration

Le type de colloïdes peut donner une idée sur la capacité d'échange d'un sol.

Tableau I : Capacité d'échange de colloïdes

Type d'argiles (ou colloïdes)	Capacité d'échange (mval/100 g de substance)
Kaolinite	3 - 5
Montmorillonite	50 - 100
Acides humiques	100 – 500

D'après Fiedler - Reissig (R. Gasser p. 327).

Ainsi donc, en considérant le substrat, un sol fertile est celui sur lequel la plante n'aura pas d'autres limites à sa pleine croissance et à son plein développement que les aléas climatiques ou la puissance de végétation propre à l'espèce. Dans ce contexte, la notion de fertilité, qui s'applique au sol en tant que substrat, en quantités suffisantes et voulues, des différents éléments nutritifs assimilables indispensables à la plante et sous-entend corrélativement l'absence d'éléments toxiques capables de limiter ou de supprimer la productivité du sol.

Dans la pratique, il y a lieu de différencier la productivité de la potentialité d'un sol.

La productivité est la capacité du sol à produire un certain volume de récolte par ha/an, tandis que la potentialité, elle, est la productivité éventuelle du sol quand toutes les améliorations possibles ont été réalisées (= capacité productrice potentielle).

Le quotient entre la potentialité et la productivité nous donne l'indice d'amélioration qui signifie que la productivité du sol peut être multipliée par ce facteur si toutes les améliorations techniques sont réalisées.

4.4.1.8. Teneur en produits toxiques : absence de ceux-ci.

4.5. Epuisement des sols et perte des éléments minéraux

L'épuisement des sols, suite logique des exportations par les récoltes, sous-entendu dans l'un des principes de LIEBIG, nous incite à dire qu'une exploitation sans fumures tend à appauvrir graduellement le sol. Ceci est un fait réel, mais il faut relativiser

l'idée de LIEBIG, car actuellement, il est établi que cet appauvrissement n'est pas dû seulement aux exportations par les récoltes, mais aussi à d'autres phénomènes, notamment :

1° à la lixiviation par les eaux de percolation, surtout dans les zones à forte pluviosité. Ici les éléments nutritifs peuvent être entraînés à des profondeurs inaccessibles aux racines des plantes;

2° au phénomène de complexation ou de blocage pouvant résulter d'un mauvais usage des engrais chimiques (ex. : phosphates solubles dans les sols latéritiques riches en fer) ou d'une mauvaise pratique du chaulage (un apport inconsidéré de la chaux mène souvent au blocage des oligo-éléments, Fe, Cu, Mn, Zn, B).

Notons qu'il y a blocage quand un élément réduit l'assimilabilité d'un autre sans pour autant prendre sa place dans le métabolisme de la plante, ce qui impliquerait un antagonisme. Ici l'élément bloqué est en quelque sorte seulement inhibé, paralysé, rendu moins sollicité par la plante du fait de la présence en excès d'un autre élément.

Le calcium joue ce rôle à l'égard de beaucoup d'autres ions, souvent non pas par son action directe, mais plutôt par les conditions de pH sur lesquelles il influe.

Dans certains cas, par contre, mais toujours par son influence sur les conditions de pH, il peut rendre un élément jusque là inaccessible plus assimilable pour la plante. Ainsi par exemple, le fer et le phosphate des complexes Fe - P, très stables aux environs de pH 5, deviennent plus solubles par l'élévation du pH à 6,5 - 7 et par voie de conséquences plus assimilables par les racines. Les plantes développent néanmoins différemment la capacité d'absorption des éléments minéraux à différents pH.

3° aux volatilisations gazeuses (pour N et S).

4° aux érosions

La perte est encore exacerbée par la pratique agricole. D'où il faut bien contrôler, régulièrement, le statut minéral des sols agricoles.

Si l'épuisement des sols est fréquent en agriculture, il reste cependant imperceptible dans la forêt, même sur un sol qu'on peut qualifier de pauvre à cause de la restitution régulière

des substances minérales par les débris végétaux après décomposition et minéralisation.

Schématiquement les mouvements des éléments du sol se présentent de la sorte :

Fig.1 : Mouvements des éléments dans le sol.

4.6. Régulation ionique

De par tous les mécanismes de soustraction des éléments minéraux et les pertes diverses, la balance des différents ions subit constamment des modifications dans le sol. Dans la pratique agricole, c'est le calcium, qui, par son action sur la solubilité des minéraux du sol sert à la mobilisation des éléments minéraux par la modification de la réaction du sol, et par la neutralisation des ions acidifiants, notamment H^+ .

4.7. Réaction du sol.

La réaction du sol est un indicateur précieux qui peut donner des renseignements sur les propriétés physiques, chimiques et même biologique d'un sol. Elle se mesure par le pH (= potentia hydrogenii) et nous indique si le sol est acide, neutre ou alcalin.

En pratique la mesure du pH du sol peut concerner soit la solution du sol, soit les particules solides de celui-ci. Lorsque le pH concerne la solution du sol, il représente l'acidité active du sol (= acidité "actuelle" ou réelle"). Mais lorsqu'il concerne les ions H^+ fixés, il représente l'acidité potentielle du sol (= acidité de réserve ou de "titration").

Dans le sol tous les ions H^+ libres et fixés sont toujours en équilibre. En déterminant l'acidité par le pH "eau" et le pH "KCl", la différence du potentiel entre les deux peut donner une idée sur l'acidité potentielle du sol. Le pH "eau" est généralement plus élevé que le pH "KCl" parce que par échange les ions K^+ du KCl déplacent les ions H^+ fixés sur les colloïdes et rend ainsi la solution plus acide. Lorsque l'écart est d'une unité, l'acidité potentielle est forte, lorsqu'il est de 1/2 unité, elle est moyenne et lorsqu'il est de moins de 1/2 unité, elle est faible. Plus l'acidité potentielle est élevée, moins riche sera le sol en bases échangeables. Les ions H^+ fixés prenant la place d'autres ions sur les colloïdes, l'acidité potentielle représente, en fait, l'"insaturation" du complexe du sol, c'est-à-dire qu'elle est la différence entre la capacité totale d'échange (T) et la somme des bases échangeables (S)

Mais en réalité la corrélation entre l'acidité et le taux saturation n'existe pas en termes rigoureux, parce que le sol n'est pas un corps homogène. Comme tel, il dispose de beaucoup de facteurs qui le composent et qui sont susceptibles de libérer les ions H^+ sans pour autant modifier le taux de saturation (par exemple la matière organique et la présence en abondance des ions Al^{+++} et Fe^{+++} sur le complexe). Ces derniers lorsqu'ils sont libérés, ils forment bases faibles peu dissociables avec production d'ions H^+ .



Ainsi, une acidité suggère un taux de saturation en bases échangeables relativement faible et, inversement, une acidité faible suggère un taux de saturation en bases échangeables relativement élevé.

Conventionnellement il y a des grades de pH échelonnés, étalés sur des zones plus ou moins larges.

Signalons que la plupart de sols ont leur pH variant entre 4 et 8. En dessous de pH 4, les sols contiennent, généralement, du soufre menant à la formation de l'acide

sulfurique et au delà de pH 8, les sols présentent souvent un excès en sels de Ca ou un excès en cations Na^+ sur leur complexe.

4.7.1. Réaction du sol et propriétés physiques du sol

Un pH acide indique, généralement, un bas niveau du calcium et l'absence d'un bon humus, deux facteurs essentiels qui contribuent à la stabilité structurale et, partant, favorisant une bonne circulation de l'eau et de l'air dans le sol, ainsi qu'un bon développement des racines et des microorganismes.

4.7.2. Réaction du sol et propriétés chimiques

- Le pH peut donner une certaine idée sur la présence, mais surtout sur la mobilité des éléments nutritifs dans le sol et plus particulièrement celle des oligo-éléments;
- Il a une influence certaine sur la solubilité des éléments minéraux du sol et sur le taux de saturation du complexe sorbant. De ce fait, il peut être un bon indicateur permettant de prédire les déficiences ou carences en éléments nutritifs dans un sol et éventuellement sur la toxicité de certains autres éléments : Al, Mn.

Tableau II : Les zones les plus favorables à l'assimilabilité des éléments nutritifs (Gros, 1967).

ELEMENTS	pH
Azote N	6 à 8
Potasse, Soufre K, S	6 à 8,5
Acide phosphorique P	6,5 à 7,5
Calcium, Magnésium Ca, Mg	7 à 8,5
Fer, Manganèse Fe, Mn	4,5 à 6
Bore, Cuivre, Zinc B, Cu, Zn	5 à 7
Molybdène Mo	7 à 8,5

Quelques éléments présentent des particularités dans le sol.

- En ce qui concerne le P, à des pH bas, il y a précipitation des phosphates de fer et d'aluminium et aux pH élevés, il y a précipitation des phosphates de Ca. Au delà de pH 8,5, les phosphates deviennent, généralement, facilement mobilisables parce qu'ici, il y a prédominance de Na qui forme des sels solubles avec P.
- La disponibilité du bore est assez limitée à des pH élevés, mais comme il est, généralement, en quantité suffisante, les symptômes de carence sont rares. Sa carence est souvent liée à la pauvreté du substrat parental. En RDC la carence en B est signalée dans les provinces du Kivu et du Bas-Congo.
- Le molybdène est le seul des oligo-éléments dont la solubilité augmente avec le pH. A des pH inférieurs, il est précipité par le fer et l'aluminium. Du point de vue nutritionnel, le pH entre 6,5 et 7,5 conviennent mieux à beaucoup de plantes de culture.
- Selon la nature des argiles ou des colloïdes, le pH peut donner une idée sur le taux de saturation en bases du sol comme le montre la figure 2

Fig. 2 Relation pH - taux de saturation en base
(Mehlich 1941, 1942).

Pr. Lumpungu Kabamba

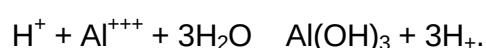
4.7.3. Réaction du sol et propriétés biologiques

Le pH influe sur le développement et la nature des microorganismes du sol. Alors que les bactéries utiles (nitrificateurs, humificateurs, Rhizobia et les verres de terre...) prolifèrent à un pH voisin de la neutralité ou légèrement alcalin, le pH peu élevé, par contre, inhibe leur action et favorise la prolifération des champignons et des bactéries acidophiles, tel le thiobacillus thiooxydans. Il faut noter que le comportements des différents microorganismes dans le sol est bien différent qu'en culture pure. Quel que soit le pH du sol, on trouvera, toujours, dans le sol une gamme variée des microorganismes à exigences des pH différente pour la simple raison que le sol n'étant pas homogène, la distribution des ions H^+ est très inégal dans celui-ci. Mais, néanmoins, la tendance générale sera plus ou moins sous influence de la réaction du sol.

4.8. Origine de l'acidité du sol

Le pH d'un sol en exploitation n'est pas une constante. Il varie sous l'influence de plusieurs facteurs. Dans la pratique agricole, l'une de nos préoccupations sera ainsi de le maintenir dans les limites compatibles avec les exigences des plantes de culture.

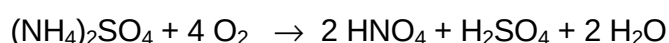
Le changement du pH peut provenir de l'augmentation du taux des ions H^+ dû, essentiellement au remplacement, des ions échangeables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ par H^+ et les ions tel que Al^{+++} sur le complexe sorbant (Al^{3+} surtout au-dessous de pH 5) selon la formule suivante:



De façon générale, les H^+ proviennent des diverses sources :

1° des engrais physiologiquement acides, leurs cations étant plus absorbés, les anions qui restent forment ainsi des acides dans le sol.

De même des fortes doses d'engrais à base d'ammonium (NH_4^+) ou ceux qui forment l'ammonium sont plus acidifiants. Un engrais tel $(NH_4)_2SO_4$ en se nitrifiant forme trois mûles d'acides forts dans le sol.



2° de l'absorption par les plantes d'ions alcalins et alcalino - terreux du complexe qui sont ainsi remplacés par H^+ (e manioc et, surtout, les légumineuses absorbent avec plus d'avidité les ions alcalins et alcalino-terreux).

3° de la lixiviation des cations des sels du sol. Pendant la saison de pluie, il se forme des acides dans le sol ($H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$) qui activent ainsi l'altération des minerais dont les cations sont entraînés par les eaux de percolation. Dans des régions industrielles, il peut y avoir accumulation d'autres acides dans le sol (pluies acides par ex).

4° la production de H^+ dans le sol peut aussi, provenir de la synthèse des acides humiques et fulviques au cours de l'humification des M.O.

4.9. Réajustement du pH

Le sol ayant ainsi subit une baisse de pH, souvent préjudiciable pour les cultures, celui-ci nécessite un réajustement qui se fait, généralement, à l'aide des amendements calcaires.

Du point de vue chimique, cependant, le calcium utilisé en tant qu'amendement joue un triple rôle dans le sol :

1° il permet de maintenir ou d'élever le pH jusqu'aux limites optimales voulues. En se substituant sur le complexe aux ions H^+ qui y sont fixés (acidité potentielle), le Ca et le Mg qui l'accompagne souvent, neutralisent l'acidité potentielle et par le fait même l'acidité de la solution du sol, car le pH de la solution du sol résulte de l'équilibre entre complexe et solution du sol.

2° il sert de monnaie d'échange contre d'autres cations sur le complexe. Comme il est facilement échangeable contre les ions K^+ et NH_4^+ (apportés par les engrais ou issus de la décomposition des matières organiques ou de minerais du sol), il permet de fixer ces cations qui ne le serait pas dans un sol acide.

Le fait que K^+ et NH_4^+ remettent les ions Ca^{++} en solution, ils provoquent une

décalcification du sol (= action décalcifiante des engrais potassiques et ammoniacaux).

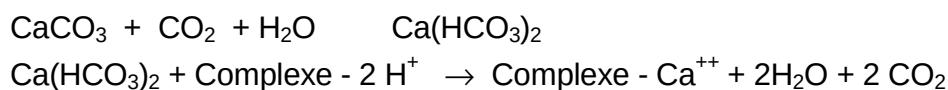
3° il permet la fixation réversible du phosphore sur le complexe, en servant de "pont" entre le complexe et les ions H_2PO_4^- , HPO_4^{--} auxquels il tend ses charges positives. Il libère aussi facilement ces ions (H_2PO_4^- et HPO_4^{--}) pour l'alimentation des plantes.

4.10. Etat calcique du sol

Il se définit par la nature et la teneur du calcium du sol.

Ainsi dans les analyses du sol, on distingue, généralement, trois fractions de calcaire : le calcaire actif, le calcaire échangeable et le calcaire total.

4.10.1. Le "Calcaire actif", constitué essentiellement de carbonate de calcium à l'état de fines particules livre continuellement une importante fraction d'ions Ca^{++} à la solution du sol après solubilisation par les acides du sol.



L'analyse du "calcaire actif" s'impose dès que le calcaire total atteint le seuil de 5 à 6 %, car l'excès mène à des blocages des autres principes nutritifs (Fe, Mn, Zn, Cu) et à une destruction trop rapide de la matière organique dans le sol.

Signalons toutefois que c'est sous cette forme de fines particules que le calcaire intervient dans l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Les sols riches en "calcaire actif" sont dits "sols calcaires".

4.10.2. Le "calcaire échangeable"

Celui-ci est constitué du calcium fixé sur le complexe sorbant du sol, en équilibre avec les cations calciques libres dans la solution du sol, fournis par le calcium soluble qui peut s'y trouver sous forme de bicarbonate, de sulfate ou de nitrate. Il est toujours échangeables et peut être mesuré par déplacement des bases, puis dosage du calcium. Les sols riches en calcaire échangeable sont dits non calcaires, mais bien pourvus en Ca échangeables.

4.10.3. Le "calcaire total"

Il constitue la somme de deux premières fractions plus le calcaire dur qui se présente sous forme de grains inattaquables par les acides du sol.

Ces grains durs présentent une très faible activité chimique et sont sans action sur le complexe sorbant. Ils constituent le "calcaire inactif". Cette fraction constitue, néanmoins, une réserve utilisable à longue échéance, car elle évolue à la longue vers une forme plus active, soluble dans le sol. Le sol ne contenant que le calcaire inactif sont dits sols non calcaires, très pauvres en Ca échangeable. Leur pH est bas, ce sont des sols acides.

4.11. Amendements calcaires (Recalcification).

La recalcification se fait, généralement, à l'aide des différentes substances contenant le calcium.

Selon leur origine ou le traitement subi, on distingue notamment :

4.11.1. Les produits "crus".

Ceux-ci apportent le Ca sous forme de:

a) Carbonates d'origines diverses plus ou moins broyées, mais ceux-ci se différencient par :

- leur teneur en CaO qui varie de 45 à 65 % (32 - 40 % Ca)
- leur finesse (exprimée par le n° du tamis qui laisse passer les particules)
- leur solubilité carbonique, % du produit dissous dans une eau chargée de CO₂.

Lorsque le carbonate est sous forme cristalline, on l'appelle calcite.

b) Craie qui sont des calcaires tendres et riches en Ca 0, 56 % (40 % Ca)

c) Calcaires magnésiens/Calcaire dolomitique

Ils apportent le Ca sous forme de CaCO₃ en mélange avec MgCO₃. Ils peuvent doser de 25 à 30 % de CaO (18-21 % Ca) et de 15 à 30 % de MgO (9-18 % Mg).

4.11.2. Les produits "cuits"

Ceux-ci apportent le Ca sous forme de CaO (oxyde de Calcium ou chaux vive) ou sous forme de Ca(OH)₂ (hydroxyde de calcium ou chaux éteinte).

- de 80 à 95 % pour le CaO (57 - 68% Ca)
 - de 50 à 72 % pour le Ca(OH)₂ (36-51 % Ca).

Le carbonate double de calcium et de magnésium est dénommé dolomie lorsque le CaCO₃ et le MgCO₃ se trouvent en proportion équimolaire. Dans d'autres proportions on le désigne "calcaire dolomitique".

d) Autres produits contenant du calcaire

- Les marnes (= mélange naturel de calcaire et d'argile) peuvent doser de 15 à 30 % de CaO (11 - 21 % Ca),
- les dépôts marins.

4.11.3. Les résidus industriels contenant le calcium

- Les écumes de défécation de sucreries
- des produits, telles les scories de déphosphoration obtenues dans la purification de l'acier qui contiennent le Ca sous forme de CaSiO₃.

4.12. Mode d'action des produits calcaires

Les divers produits de recalcification agissent différemment dans le sol, selon leur nature chimique et selon leur finesse. Les produits fins agissent plus vite que les produits grossiers.

4.12.1. La chaux (CaO et Ca(OH)₂) élève rapidement le pH. Elle est de ce fait à employer dans les sols très acides et à fort pouvoir tampon. Elle est à utiliser avec précaution pour éviter les blocages d'autres éléments nutritifs, essentiellement les oligo-éléments.

Dans le sol, la chaux vive s'hydrate d'abord, puis se dissocie de la manière suivante:



Ca⁺⁺ se fixe sur le complexe argilo-humique en échange contre les ions H⁺ et Al⁺⁺⁺

b) Ca(OH)_2

2 OH^- se combinent aux ions H^+ libérés pour former H_2O et aux ions Al^{+++} pour former Al(OH)_3 .

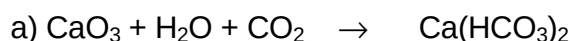
Schématiquement ceci peut être représenté de la manière suivante :

Avec la chaux vive et la chaux éteinte, aucun résidu acide n'apparaît dans le sol, l'élévation du pH est de ce fait rapide.

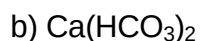
4.12.2. Les carbonates

Les carbonates agissent plus lentement, surtout s'ils sont moins broyés. Ils conviennent aux sols légers, au pouvoir tampon faible.

Dans le sol, ils sont attaqués, en partie, par les acides du sol et l'eau chargée de gaz carbonique et sont transformés en bicarbonate de Ca, plus soluble, qui se dissocie de la sorte :

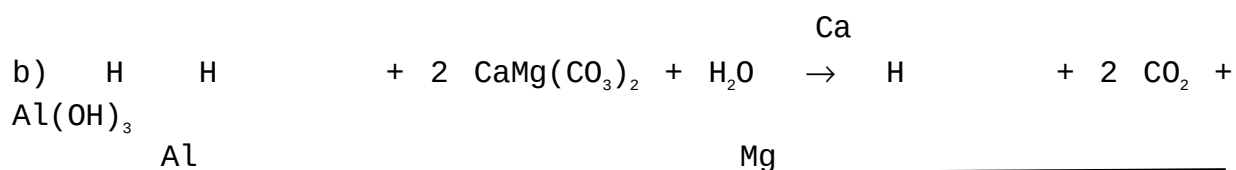
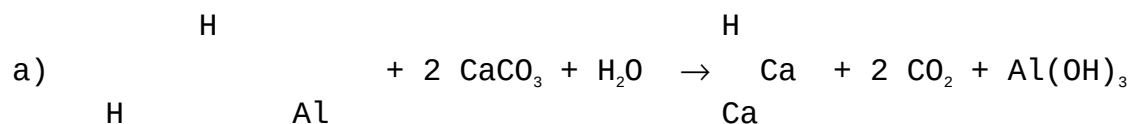


Ca^{++} se fixe sur le complexe argilo-humique en échange contre les ions H^+



2 CO_3H^- se combinent aux ions H^+ libérés pour redonner de l'acide carbonique (acide faible) qui attaque des nouvelles quantités de CaCO_3 .

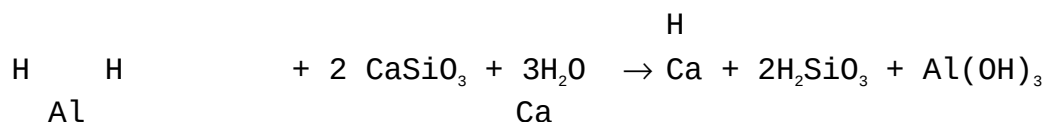
Une fraction de CaCO_3 réagit avec l'eau du sol pour neutraliser les ions Al^{+++} de la manière suivante :



Pr. Lumpungu Kabamba

4.12.3. Les résidus industriels

Les résidus industriels contenant le Ca sous forme de CaSiO_3 réagissent de la manière suivante :



L'acide silicique formé se dissocie peu, de sorte que le pH monte plutôt sous l'action de Ca. Plus couramment, cependant, le produit de déphosphoration est utilisé plutôt comme engrais phosphaté à cause de sa teneur élevée en P.

A cause de son action de neutralisation sur l'acidité, il convient comme engrais phosphaté dans des sols acides.

4.12.4. Le plâtre

Le plâtre (= gypse ou $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) n'élève pas le pH du sol. Il est plutôt un engrais calcique qu'un amendement calcaire. En grande quantité, il peut contribuer à baisser le pH des sols basiques par la formation de H_2SO_4 .

Dans le sol, il se dissocie de la manière suivante :

Ca^{++} se fixe sur le complexe argilo-humide en échange contre les ions H^+ .

CaSO_4

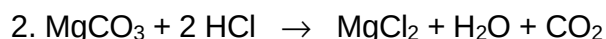
SO_4^{--} se combinent aux ions H^+ libérés pour former de l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui est un acide fort qui s'oppose à l'élévation du pH.

4.13. Pouvoir de neutralisation des produits de recalcification

Les divers produits de recalcification diffèrent largement par leur pouvoir de neutraliser les acides. Ce pouvoir exprime la quantité d'acide qu'une unité de poids de substance peut neutraliser. Il dépend naturellement de la composition moléculaire des substances et de leur pureté.

En pratique, dans l'évaluation du pouvoir de neutralisation, le carbonate de calcium pur est considéré, conventionnellement, comme la substance de référence, son pouvoir de neutralisation constitue le pouvoir étalon et est fixé à 100 %. Pour cette raison le pouvoir de neutralisation est appelé aussi équivalent CO₃.

La constitution moléculaire est le facteur essentiel qui détermine la valeur du pouvoir de neutralisation ou l'équivalent CO₃.



Dans les deux équations, chaque molécule, CaCO₃ et MgCO₃, neutralise deux molécules de HCl, mais cependant les poids moléculaires de deux substances diffèrent, 100 pour CaCO₃ et seulement 84 pour MgCO₃. Autrement dit, 84 g de MgCO₃ peuvent neutraliser autant d'acide que 100 g de CaCO₃.

Proportionnellement le MgCO₃ neutralise :

$$\frac{84}{100} = \frac{100}{X} = 119,1, \text{ soit } 1,19 \text{ fois plus d'acide que le même}$$

poids de CaCO₃. Son pouvoir de neutralisation est de 119 % par rapport au CaCO₃. Sa valeur pour les autres produits est donnée ci-après :

Tableau III : Pouvoir de neutralisation des produits calcaires

Substances	Pouvoir de neutralisation en %
CaO	179
Ca(OH) ₂	136
MgCO ₃	119
CaMg(CO ₃) ₂	109
CaCO ₃	100
CaSiO ₃	86

4.14. Caractérisation des produits calcaires

La valeur des produits calcaires de recalcification peut être exprimée par leur teneur en Ca, en CaO ou en CaCO₃.

4.14.1. Teneur en Ca

Le CaCO₃ dont le poids moléculaire est 100 et le poids atomique de Ca 40, sa teneur en ca est de (40 : 100). 100 = 40 %.

Celle de MgCO₃ en Mg est de (24 : 84). 100 = 28,6 %.

Pour convertir la teneur en Ca en son équivalent carbonate de calcium (ou pouvoir de neutralisation) qui est 100, il suffit de la multiplier par le facteur :

$$\frac{100}{40} = 2,5 \text{ 2}$$

et pour convertir la teneur en Mg de Mg CO₃ en son équivalent carbonate de magnésium, il suffit de la multiplier par le facteur

$$\frac{84}{24} = 3,5 \text{ 3}$$

4.14.2. Teneur en CaO

Le calcite pur dont le poids moléculaire est 100 contiendrait (PM: CaO = 56)

$$\frac{56}{100} \cdot 100 = 56\% \text{ de CaO 4}$$

Pour convertir sa teneur en ca est de 40 % en CaO (56 %), il suffit de multiplier les 40 % par le facteur : $\frac{56}{40} = 1,4 \text{ 5}$

et pour convertir celle de CaO en Ca, il suffit de multiplier la teneur en CaO par le facteur :

$$\frac{40}{56} = 0,714 \text{ 6}$$

Les différents autres facteurs de conversion sont donnés ci-après:

Facteurs de conversion des produits de recalcification.

	%	%
Ca	0,714	CaO
	1,40	
Ca	0,54	Ca(OH) ₂
	1,85	
Ca	0,40	CaCO ₃
	2,50	
Mg	0,60	MgO
	1,87	
Mg	0,41	Mg(OH) ₂
	2,42	
Mg	0,29	MgCO ₃
	3,50	
Mg	0,60	Ca
	1,67	
Mg	0,24	CaCO ₃
	4,17	
MgO	0,40	CaCO ₃
	2,50	
MgCO ₃	0,84	CaCO ₃
	1,19	

4.14.3. Teneur en CaCO₃

La qualité ou la valeur des amendements calcaires peut aussi être exprimée par leur teneur en carbonate totale, sans en faire une distinction entre le carbonate de Mg et de Ca.

4.15. Effets des amendements calcaires

4.15.1. Sur les rendements

Utilisé judicieusement, le calcaire peut améliorer sensiblement les rendements sur les sols tropicaux comme le montre notre expérience en vases de végétation avec l'arachide dans le tableau III.

Mais, il peut aussi améliorer l'état sanitaire des plantes et la qualité de produits de récolte.

Tableau IV : Effet de CaCO_3 sur le rendement de l'arachide sur sol de Yangambi (vases de végétation, 1980)

pH du sol	Rendement/variante
(sans chaux) 4,5	28 gr
(avec chaux) 6,5	85 gr

Cette augmentation de rendement n'est pas dû seulement à l'action nutritionnelle de Ca, mais surtout à ses effets secondaires sur la mobilisation des autres principes nutritifs du sol, P et oligo-éléments, sur l'élévation de l'activité des microorganismes telluriques, notamment ceux de la nitrification et de la décomposition des matières organiques libérant ainsi les principes nutritifs et sur l'activation des microorganismes symbiotiques et non-symbiotiques fixateurs d'azote.

Dans la plupart de cas, les sols neutres ou faiblement acides renferment encore une grande quantité de Ca échangeable dans leur complexe sorbant. Par contre, dans les sols latéritiques et podzoliques, le taux de Ca est généralement très bas. Cette déficience peut se répercuter sur les rendements, surtout lorsque le taux de saturation du complexe se situe en-dessous de 20 %.

4.15.2. Sur les propriétés du sol

Il convient de signaler qu'il n'existe pas encore une règle commune pour les sols tropicaux quant à la pratique des amendements calcaires. Leur action est complexe et différente d'un sol à un autre. Néanmoins, dans une étude comparative, l'application des amendements calcaires dans les sols gris et rouges (latosols rouges) (VENEMA et MIDDELBURG) a révélé les faits suivants dans le latosol rouge :

- détérioration de la structure qui mène à l'imperméabilité;

- apparition des symptômes carenciels en micro-éléments, et
- décomposition très rapide des matières organiques.

Il faudrait donc prendre beaucoup de précaution avec les amendements calcaires dans les sols tropicaux.

4.16. Le chaulage (du calcaire au sol)

Les produits de chaulage étant quasi immobiles dans le sol, il est recommandé lors de l'épandage de les incorporer et les homogénéiser avec le sol dans la couche exploitée par les racines. Ainsi, on permet l'élévation du pH dans toute la couche exploitée par les racines.

4.16.1. Choix entre CaO et CaCO_3

Le choix entre ces deux produits devrait se baser, essentiellement sur trois critères :

- 1° économique
- 2° nature du sol
- 3° richesse intrinsèque du sol et nature plante.

- Le CaO présente un avantage par rapport au CaCO_3 là où la chaux doit être transportée sur une longue distance. En brûlant le CaCO_3 , on réduit de 44 % le poids du produit à transporter.
- En ce qui concerne la nature du sol, son pouvoir tampon doit être pris en compte. Alors que dans un sol, léger, la préférence serait accordée aux CaCO_3 , le CaO ou Ca(OH)_2 peuvent être utilisés dans des sols lourds.
- Le besoin du chaulage va dépendre de la nature de culture et du problème qui se pose !

L'herbe, les graminées, de façon générale, couvrir leurs besoins en Ca même sur sol acide, apparemment pauvre en Ca. Ici l'agriculteur peut avoir deux alternatives: chaulage pour mobiliser les autres principes nutritifs ou apport d'engrais pour combler le déficit.

La décision dépendra de la disponibilité et du coût des produits à utiliser. Les

légumes, par contre, sont avides de Ca et nécessitent de grandes quantités de cet élément pour une meilleure croissance.

4.17. Acidification des sols

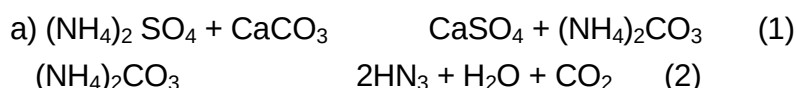
Si la pratique des amendements calcaires est bien plus répandue, il arrive, cependant, des fois qu'il soit nécessaire d'acidifier un sol, surtout dans des régions arides avec des pH très élevés. Dans ce cas, contrairement à l'action du chaulage, on cherche à baisser le pH du sol par des apports des produits acidifiants.

4.17.1. Produits d'acidification

Pour baisser le pH, divers produits peuvent être utilisés, notamment le soufre, l'acide sulfurique, le sulfate d'aluminium, le sulfate de fer et certains engrais azotés, tel le sulfate d'ammonium, le phosphate d'ammonium et l'urée enrobé de soufre qui présente un double avantage de pourvoir à l'acidification et d'apporter l'azote.

Dans les deux cas le S et SO_4^{--} restant dans le sol sont transformés en H_2SO_4 qui contribue ainsi à baisser le pH.

Le S est oxydé dans le sol par des bactéries de la famille de Thiobacillus qui mènent ainsi à la formation de H_2SO_4 .



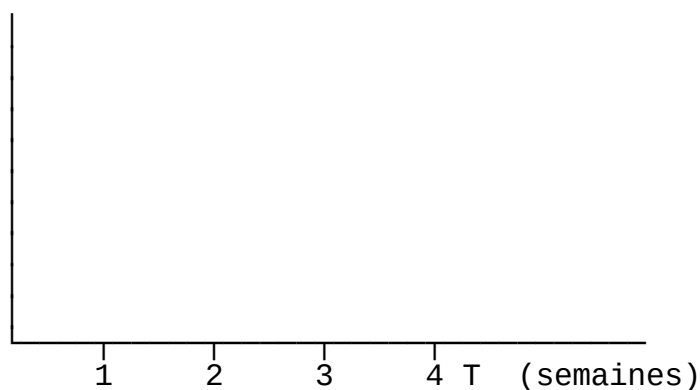
L'urée enrobée de soufre apportée dans un sol riche en CaCO_3 présente certains avantages, notamment :

- apport de l'azote
- diminution du taux de volatilisation de NH_3 à cause de l'effet acidifiant de S.

L'apport des substances acidifiantes peut contribuer à la restitution indirecte de certains éléments aux plantes (Ex : l'enrichissement du sol en H^+ transformera, par ex. le Mn^{++++} , inassimilable en Mn^{++} assimilable).

L'effet repressive de S sur la volatisation de NH_3 est démontré dans la figure qui suit:

% Perte en NH_3 - N



Source : LUMPUNGU, 1978.

Figure IX : Comparaison des taux de volatisation de NH_3 à partir de l'urée normale et de l'urée enrobée de soufre (S-Urée dans un sol Ouest-Allemand (Uedorf, pH 6,7).

4.18. Les amendements humifères

De par la définition du sol : "Le sol est le matériel meuble issu de l'altération des roches se trouvant partout à la surface terrestre, mélangé avec des matières organiques en décomposition ou déjà décomposées et transformées en humus" (E. BLANCK), on voit bien que la matière organique en est une partie intégrante et on comprend bien, dès lors l'importance que lui confère l'agronomie. Les matières organiques ont, dans le sol, un double rôle :

- un rôle trophique pour les plantes puisque, elles fournissent la quasi totalité de l'azote du sol et une part importante d'autres éléments, surtout S et P.
- un rôle d'amendement pour le sol puisqu'elles améliorent les propriétés du sol (physiques, chimiques et biologiques).

4.18.1. Formes des matières organiques du sol

Conventionnellement, on distingue dans le sol trois formes, difficilement définissables, des matières organiques, plutôt caractérisées par leur stade ou degré de décomposition, mais néanmoins, participant, ensemble, à la fertilisation. On distingue à

cet effet :

1° Les matières organiques fraîches

Elles sont constituées des débris végétaux et animaux recouvrant le sol

2° Les "produits transitoires"

Il résultent d'une décomposition active dont une fraction importante se trouve encore incorporée dans les microorganismes et dans leurs excréments, selon leur composition. Les matières organiques fraîches peuvent donner différents produits résultant de leur décomposition (selon le stade de développement).

3° L'humus stable

Il est constitué d'un mélange complexe d'acides humiques, synthétisés à partir des certains des produits transitoires (= éléments carbonés issus principalement de la lignine et de la cellulose et des matières azotées). En pratique, l'humus c'est la totalité des substances post-mortem, d'origine biologique ainsi que leurs produits de transformation, c'est un ensemble hétérogène des différents stades de décomposition de M.O. et de leurs produits de synthèse.

4.18.2. Les matières organiques fraîches et les produits de leur décomposition

Selon leur stade de développement et leur composition, les matières organiques fraîches peuvent donner différents produits résultant de leur décomposition.

4.18.2.1. Substances végétales riches en sucres et en azote

Celles-ci se décomposent vite et donnent, en abondance des produits transitoires et des corps microbiens. Ces produits ainsi que les microorganismes formés disparaissent aussi vite qu'ils ont été formés en ne laissant pratiquement pas d'humus. Les engrais verts enfouis jeunes n'arrivent qu'à ce stade de décomposition.

4.18.2.2. Substances végétales riches en cellulose et en lignine mais pauvre en azote

Celles-ci se décomposent moins vite que les premières et le produit final de leur décomposition est un humus stable qui reste en bonne quantité dans le sol. Ici les produits de départ peuvent être la paille, le fumier pailleux ou tout autre substance riche en cellulose et en lignine, substances qui résistent à la décomposition des

microorganismes, sauf des spécialistes.

4.18.3. Caractéristiques des matières organiques

Communément les matières organiques fraîches, l'humus ou même tout le sol, en tant que substrat, sont caractérisés par leur rapport C/N. Ce rapport donne une idée sur la nature des matières organiques et leur degré de décomposition. L'humus stable a un rapport C/N d'environ 10-11/1; la paille, environ 80-100/1; le fumier, 20-25/1 et les engrais verts 16-20/1.

Dans tous les cas, les matières organiques apportées dans le sol, subissent l'attaque des microorganismes qui ramènent le rapport C/N aux environs de 11/1.

Lorsqu'on utilise des substances pauvres en N, la décomposition étant microbienne, les microorganismes de décomposition combleront le déficit en azote par des prélèvements sur l'azote minéral du sol, appauvrissant ainsi celui-ci au détriment de la culture subséquente.

Aussi, généralement, lorsque le rapport C/N des matières organiques employées excède 30, il convient de compenser les prélèvements de l'azote par les microorganismes par des apports d'engrais azotés pour que la culture ne souffre pas de carence en cet élément. Entre 20 et 30, les prélèvements et la minéralisation se tiennent la balance et en-dessous de 20, la minéralisation excède les prélèvements.

La vitesse de décomposition est bien entendu fonction de la quantité de matières organiques apportée, du supplément d'azote apporté et de la résistance de matières organiques utilisées (elle même fonction de leur teneur en lignine, en cires et en lipides), de l'humidité et de la température du sol.

Selon leur résistance à la décomposition, les constituants des plantes peuvent être classés de la manière suivante :

1. l'amidon, sucres, ... (hydrates de carbone) → faciles à décomposer et très rapidement.
2. les hémicelluloses et la cellulose → décomposées à une vitesse moyenne.

3. les lipides, la lignine, les cires → difficiles à décomposer, vitesse lente.

4.18.4. Rôle de la matière organique dans le sol

Dans le sol, outre le rôle trophique, la matière organique agit sur diverses propriétés, notamment sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et même sur la physiologie de la plante, en activant sa croissance.

Hormis son effet protecteur sur la surface du sol, dans tous les autres cas, la matière organique agit d'autant mieux qu'elle est bien décomposée. Chez les plantes à tubercules, une matière organique mal décomposée peut provoquer des malformations.

4.18.4.1. L'action sur les propriétés physiques du sol

a) La matière organique "granule" et stabilise la structure des sols "lourds" comme celle des sols "légers", favorisant ainsi une bonne circulation de l'eau et de l'air.

Cette granulation est due à :

- l'incorporation des racines aux particules du sol, surtout les racines des graminées dont l'incorporation est plus parfaite. A cela il faut ajouter l'action des microorganismes de la rizhosphère;
- la prolifération des microorganismes dont les sécrétions couvrent les particules du sol d'une couche de filaments microscopiques;
- l'association de l'argile et de l'humus en un complexe beaucoup moins collant que l'argile seule.

Selon la nature des matières organiques utilisées, la stabilité structurale est intense, mais temporaire après usage des engrais verts; moins intense, mais prolongée pour la paille et moins visible à court terme, mais durable pour les matières organiques fournissant beaucoup d'humus stable.

b) Elle améliore la capacité de rétention de l'eau du sol et surtout celle des sols sableux.

Tableau VI : Pouvoir d'absorption H₂O de quelques substances organiques

Nature de substances	Capacité d'absorption
paille	± 250 kg H ₂ O/100 kg de substance
feuilles mortes	± 200 kg H ₂ O/100 kg de substance
tourbe	± 500 - 700 kg H ₂ O/100 kg de substance
sciure de bois	± 420 kg H ₂ O/100 kg de substance

4.18.4.2. L'action sur les propriétés chimiques du sol

- Par leur minéralisation, les matières organiques constituent une source d'aliments pour les végétaux et les microorganismes utiles du sol. Cette source est d'autant plus intéressante que la minéralisation se fait progressivement, d'où leur action lente et soutenue dans l'alimentation des végétaux.

Schéma de la décomposition de la matière organique

Matière organiques

minéralisation	NH ₃	
(Débris végétaux)		CO ₂
± rapide	HPO ₄ ⁻⁻⁻	
		SO ₄ ⁻⁻⁻
	K ₁	...

(Microorganismes) réorganisation

Synthèse de complexes		NH ₃
humiques colloïdaux	minéralisation	CO ₂
(<u>humification</u>)	lente	HPO ₄ ⁻⁻⁻
		K ₂
		NO ₃ ⁻

Cette action est plus prononcée pour les substances d'origine animale qui ont aussi l'avantage d'être plus riches en certains minéraux tel le sang, la viande desséchée, la corne terrefiée, ...

Composition moyenne de quelques engrais organiques (%)

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Sang desséché	13,0	2,0	1,0	0,5	
Cendres d'os	-	35,0	-	46,0	1,0
Poudre d'os	4,0	22,5	-	33,0	0,5
Râpures de cornes et sabots	14,0	1,0	-	2,5	
Sauterelles séchées	10,0	1,5	0,5	0,5	
Poudre de poisson	9,5	7,0	-	8,5	0,5
Cabosses de cacao	2,5	1,0	2,0	1,5	0,5
Graine de coton broyées	7,0	3,0	2,0	0,5	0,5

- Les colloïdes humiques issus de la décomposition de la matière organique augmentent la capacité totale d'échange du sol et mettent ainsi les cations du sol à l'abri de perte par entraînement par les eaux de percolation.

Les colloïdes humiques sont plus efficaces que les colloïdes minéraux, 1 mg d'humus peut fixer 5 fois plus de cations qu'un g d'argile.

- Les acides humiques forment avec P du sol des humo-phosphates (compostage) dont l'assimilabilité est plus ou moins garantie pour les plantes, surtout dans les sols latéritiques où le phosphore minéral forme avec le fer des complexes inertes, non accessibles aux plantes.

4.18.4.3. L'action sur l'activité biologique du sol

Les matières organiques servent de support et d'aliment aux microorganismes du sol. Mais plus l'humus se "stabilise", plus il devient inaccessible aux microorganismes. Toutefois son action positive sur les propriétés physiques et chimiques du sol, contribue à améliorer les conditions de vie des microorganismes du sol.

4.18.4.4. L'action sur la physiologie des plantes

Pr. Lumpungu Kabamba

L'humus contiendrait des activateurs de croissance qui permettent une meilleure utilisation des engrais.

CHAMINADE constate que l'addition d'acide humique ou d'humate calcique colloïdal aux solutions nutritives à des doses de 2 à 5 ml/l accroît de façon constante l'absorption de tous les éléments minéraux par les plantes.

4.18.5. Facteurs influençant la décomposition de la matière organique du sol

La décomposition de la matière organique est essentiellement influencée par un couple de facteurs :

1. la quantité de la matière organique
2. les conditions climatiques

Dans les conditions éco-climatiques de la RDC et surtout dans la région équatoriale, la décomposition et la minéralisation des matières organiques se font très rapidement. La décomposition atteint souvent 50 % déjà au bout de 30 semaines (BARTSOLOMEW). Dans la pratique, l'établissement du bilan de la matière organique se fait à l'aide de 2 coefficients, K_1 ou coefficient d'humification et K_2 ou coefficient de minéralisation.

Le premier indique la quantité de matières organiques (d'humus stable) qui reste dans le sol après humification de la matière organique, c'est le coefficient d'humification ($= K_1$) ou Isohumique.

Il est lié essentiellement à la nature de la matière organique apportée.

Le deuxième, le coefficient K_2 dépend, par contre, essentiellement des conditions du milieu. Il représente annuellement le % d'humus stable minéralisé ($=$ Taux annuel de minéralisation de l'humus stable).

Ainsi la quantité d'humus formé par un apport de matières organique est égal au produit de cette quantité par le coefficient d'humification (K_1). Par exemple 5 T de matières organiques dont K_1 est égal à 0,2 donneront $5 \times 0,2 = 1$ T d'humus. La valeur de ce coefficient varie entre 0 et 1.

Il est possible de déterminer à l'aide de ces 2 coefficients :

1. la quantité d'humus formé
2. la durée probable de l'humus dans un sol donné.

Dans les conditions climatiques sous les tropiques ces deux coefficients sont très élevés, notamment, à cause de :

- 1° pluies abondantes et régulières;
- 2° humidité relative de l'air au niveau du sol presque toujours au point de saturation;
- 3° température, toujours élevée, en moyenne 25° C;
- 4° abondance d'insectes dans et sur le sol. La décomposition du bois est accélérée par les insectes qui y creusent des galeries, augmentant ainsi la surface d'attaque par les microorganismes spécialisés.

Compte tenu de cette rapide décomposition, la matière organique dans les sols tropicaux exige une attention particulière, surtout en agriculture intensive. Les apports doivent être plus réguliers.

4.18.6. Différents amendements humifères

On distingue plusieurs types d'amendements humifères :

- . engrais verts
- . fumier de ferme
- . compost
- . pailles, ...

4.18.6.1. Les engrais verts

Ce sont des cultures dérobées de végétation rapide, enfouies sur place et destinées avant tout à améliorer le sol. En plus du rôle commun des matières organiques, elles ont l'avantage de couvrir le sol, le protégeant ainsi contre la battance des pluies, contre l'érosion du ruissellement et éolienne et contre l'insolation directe. Leurs racines labourent le sol en frayant le chemin aux racines de la culture subséquente. Elles ont l'avantage d'ameublir le sol en tous sens.

Les légumineuses cultivées, à cet effet, enrichissent le sol en azote symbiotique. Leurs apports peuvent dépasser 200 kg d'azote à l'ha.

L'enfouissement des engrais verts devra se faire, de préférence, quand le développement végétatif a atteint son maximum, c'est-à-dire lorsque les plantes entrent en fleurs.

La quantité d'azote fixé varie considérablement, selon l'espèce utilisée, comme le montre le tableau qui suit.

Tableau V : Quantités d'azote fixé par différentes légumineuses

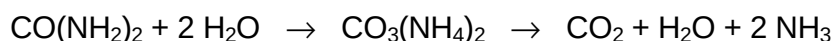
Plante		Azote fixé (kg N/ha/an)
Légumineuses à graines		
Calopo	<i>Calopogonium muconoïdes</i>	370-450
Fèves	<i>Vicia faba</i>	45-552
Pois cajan	<i>Cajanus cajan</i>	168-280
Niébé	<i>Vigna unguiculata</i>	73-354
Pois mungo	<i>Vigna mungo</i>	63-342
Guar	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	41-220
Soja	<i>Glycine max</i>	60-168
Pois chiche	<i>Cicer arietinum</i>	103
Lentille	<i>Lens esculenta</i>	88-114
Arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	72-124
Pois	<i>Pisum sativum</i>	52-77
Haricot	<i>Phaseolus vulgaris</i>	40-70
Légumineuses fourragères		
Desmodium	<i>Desmodium intortum</i>	897
Sesbania	<i>Sesbania cannabina</i>	542
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	74-584
Centro	<i>Centrosema pubescens</i>	126-398
Luzerne	<i>Medicago sativa</i>	229-290
Trèfle souterrain	<i>Trifolium subterraneum</i>	207
Trèfle ladino	<i>Trifolium repens</i> var. <i>giganica</i>	165-189
Trèfle blanc	<i>Trifolium repens</i>	128
Stylo	<i>Stylosanthes</i> spp.	34-220
Vesce velue	<i>Vicia villosa</i>	110
Pueraria	<i>Pueraria phaseoloïdes</i>	99

Source : FAO (1985) : Les inoculants de légumineuses et leurs applications, p. 5.

4.18.6.2. Les fumiers de ferme (En cas de stabulation)

Ils sont constitués des déjections liquides et solides des animaux et de leur litière. De ce fait leur composition varie avec l'espèce animale, la nature et la quantité des substances utilisées comme litière, la forme de stabulation et la nourriture des animaux.

Les déjections solides et liquides influent sur la qualité du fumier dans ce sens que les premières sont formées essentiellement des substances qui ont échappé à la digestion et aux fermentations gazeuses du tube digestif et les secondes résultent d'une transformation des matières ingérées. La matière azotée de la nourriture solubilisée et le K étant éliminée en grande partie par les urines (sauf chez le porc), il est clair que les aliments riches en ces éléments donneront des déjections liquides plus riches en ces éléments que les aliments qui en sont pauvres. L'azote se trouvant essentiellement sous forme d'urée dans les déjections liquides, celui-ci est susceptible de subir des grandes pertes par volatisation sous forme d'ammoniac gazeux.



Moyen d'éviter les pertes en N et en K

Un premier moyen d'éviter les pertes en N sous forme d' NH_3 volatil est d'utiliser une litière capable de fixer l'ammoniac, telle la tourbe ou d'éviter une trop grande concentration des déjections liquides dans la litière.

Un deuxième moyen est de transformer NH_3 en un produit non volatil par l'adjonction des produits acidifiants, tel le sulfate de fer, le plâtre, le superphosphate, l'acide sulfurique, ...

Mais ces substances ont l'inconvénient d'arrêter la fermentation du fumier.

En tassant, suffisamment, le fumier, on peut minimiser la volatisation de l'ammoniac.

Les pertes en K s'opèrent essentiellement par l'écoulement du jus. Pour éviter ces pertes, il faut éviter l'écoulement du jus en disposant le fumier sur une plate-forme étanche (béton en plastique) et en recueillant le purin (= déjections liquides des animaux associées au jus ± dilué par les eaux qui s'écoulent du tas de fumier) dans un puits étanche.

4.18.6.3. Les composts

Ce sont des produits de décomposition et de désagrégation des déchets ou débris de toute nature, d'origine animale ou d'origine végétale obtenus, habituellement, par addition de chaux (5 à 10 % de la masse totale, 10 % dans le cas des substances résistantes) pour activer la décomposition.

Les composts se préparent habituellement en stratifiant les substances organiques avec une certaine quantité de terre, de manière à former des couches alternes dont le tas ne dépasse pas 1,5 à 2,0 m de hauteur. Pour éviter le déplacement de grandes quantités de terre, le compostage peut se faire sans adjonction de la terre.

4.18.6.3.1. Compost de fumier

Il se fait en deux étapes :

- une phase en milieu anaérobie qui consiste à imprégner et tasser les litières afin d'empêcher le démarrage de la fermentation;
- une phase en milieu aérobie (le fumier est broyé, émietté et aéré). Pendant cette phase la température s'élève jusqu'à 70-80°C dans le tas. Cette élévation de température est bénéfique, car elle détruit dans le compost les germes pathogènes et les graines de mauvaises herbes.

Selon G. BARBIER, l'élévation de température favorise l'humification. L'humification chaude de la paille donnerait deux fois plus d'humus que l'humification à froid.

4.18.6.3.2. Compost de paille et autres résidus végétaux (= fumier artificiel)

Le compostage est aussi conduit en deux phases :

- une phase en milieu anaérobie. La paille ou autre substance organique, étendue en lits homogènes est tassée et arrosée abondamment en plusieurs fois, séparées, avec de l'eau ou du purin. Entre les lits, incorporer éventuellement les engrais minéraux (phosphate de Ca et N organique) puis tasser très énergiquement;
- une phase de fermentation chaude, cfr compostage du fumier.

N.B. : Les arrosages étant difficiles lorsque le compostage est fait loin d'une source d'eau, on pourrait, avantageusement les substituer par l'adjonction des matières végétales riches en eau (ex. feuilles de bananiers).

4.18.6.4. Le paillis ou dry mulching

La paille ou tout autre substance organique est étendue à la surface du sol, empêchant ainsi l'action directe du soleil et de la pluie sur le sol tout en maintenant l'humidité nécessaire en surface. Le paillis doit constamment être renouvelé pour éviter la dessiccation des racines attirées à la surface par chimiotropisme. Actuellement, les matières organiques peuvent être remplacées par des toiles en plastique noir pour le même objectif.

4.18.7. La matière organique du sol et classification des sols

Dans l'appréciation de la matière organique et la classification des sols, deux tenues sont à ne pas confondre. Il s'agit de :

- teneur
- quantité

Alors que la teneur exprime le % de la matière organique dans le sol, la quantité s'exprime en kg/m² ou T/ha, dans une profondeur donnée.

Dans un sol non encore pris en culture, la teneur en matières organiques du sol finit par atteindre un stade d'équilibre où la production, d'un côté, et l'humification et la minéralisation, de l'autre, se tiennent la balance.

Dans un sol cultivé par contre, cet équilibre est rompu du fait de:

1. l'exportation des récoltes
2. la décomposition très rapide de la matière organique, favorisée par le travail du sol (bonne opération et bonne circulation de l'eau) et l'apport des engrais (activation des microorganismes) et l'apport des engrais (activation des microorganismes).

D'où la nécessité de renouveler la matière organique en sol cultivé, surtout sous les tropiques où les conditions de décomposition sont plus qu'optimales.

Dans la pratique pour trouver la teneur en matière organique d'un sol, il suffit d'en déterminer la teneur en C. Celle-ci étant, en moyenne de 50 % (45-60 %) dans la matière organique, il suffira de la multiplier par le coefficient 2 ou 1,72.

Mais, plus souvent aussi, la teneur en matière organique est présentée comme le % en humus. Ceci n'est pas tout à fait correct, car dans la teneur en C déterminée, y est

compris aussi le C des racines et microorganismes vivants, alors que celui-ci ne fait pas partie de l'humus.

Classification des sols d'après leur teneur en matière organique

Teneur en Matière organique (dans Ah)	Désignation des sols
< 1	pauvre en humus
1 - 2	légèrement humique
1 - 4	moyennement humique
4 - 10	riche en humus
10 - 15	très riche en humus
15- 30	semi-tourbeux
> 30	tourbeux

4.19. L'eau facteur écologique de fertilité

L'eau est un constituant naturel du sol, c'est la phase liquide du sol et agit en tant que telle sur le complexe sol-plante, surtout en relation avec l'alimentation en eau et en sels minéraux des plantes. Elle agit aussi sur la pédogenèse et l'évolution des sols.

Dans une région donnée, sa teneur dans le sol dépendra de la quantité et de l'intensité des précipitations, du relief, de sa capacité d'absorption du sol et de sa perméabilité. De la résultante de tous ces facteurs, il y aura formation :

- 1° des eaux de surface (qui s'écoulent et rejoignent les cours d'eau et qui sont partiellement évaporées sous l'action de la chaleur;
- 2° de l'eau du sol proprement dite, comprenant l'eau libre et l'eau d'adsorption. Cette dernière est constituée de l'ensemble de l'eau retenue par les charges libres des constituants solides du sol et de l'eau d'hydratation (couche d'eau enveloppant les particules du sol, essentiellement minérales).

4.19.1. Sources de l'eau dans la nature

Dans les régions chaudes du globe, l'eau est souvent le facteur limitant dans la production végétale (saison sèche!). Une production agricole intensive et continue exige de ce fait, outre les précipitations naturelles, l'apport de l'eau par l'irrigation.

Cette eau d'irrigation peut provenir des : rivières, lacs, océans ou des nappes phréatiques souterraines. Dans le cas des nappes phréatiques, il convient de déterminer s'il s'agit des eaux fossiles ou s'il y a alimentation de l'extérieur (radiochimie). Dans tous les cas, la prudence exige avant leur utilisation une analyse sur la qualité (salinité) de l'eau disponible.

4.19.2. La qualité de l'eau

La qualité de l'eau utilisée en agriculture réside, essentiellement, dans sa teneur en sels solubles qui, somme toute, présentent différents degrés de toxicité (les carbonates et les bicarbonates de Mg, de Ca et le sulfate de Ca sont moins nocifs pour les plantes, tandis que Na_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl , CaCl_2 sont plus nocifs. Ces substances peuvent provenir de l'altération des roches.

Dans les régions chaudes avec l'alternance des saisons humides et sèches, ces sels, lorsqu'ils sont dissous dans l'eau subissent, dans le sol, une migration descendante dans la première phase, puis dans la deuxième phase, une migration ascendante qui conduit à l'accumulation progressive provoquée, selon les conditions du sol, soit à la surface du sol même, soit sous les sillons de labour, surtout dans la pratique de "clean-weeding".

La montée capillaire des eaux peut être freinée par la rupture de la capillarité du sol en incorporant une couche des substances hydrophobes dans le sol, à une grande profondeur.

Ainsi donc, quand on fait le bilan de disponibilité en eau pour l'irrigation, on tient compte, à la fois, de sa qualité et de sa quantité. Mais, il est évident qu'à différentes utilisations correspondent des besoins qualitatifs différents, selon la nature de la culture, du climat et du sol.

4.19.3. Effets de l'eau de qualité médiocre sur le sol et la culture

Au-delà d'une certaine concentration des sels dans le sol (1 %), la pression osmotique de la solution du sol peut devenir si grande que les plantes de culture ne parviennent plus à absorber l'eau. Toutefois la pression osmotique de la solution du sol peut varier dans des larges limites d'un sol à un autre avec :

1° La composition granulométrique :

Pour une même concentration, la pression osmotique sera moindre dans un sol argileux riche en colloïdes (= grande surface d'adsorption) que dans un sol sablonneux. Plus les particules sont fines, plus elles développent leur surface d'adsorption, comme démontré ci-dessous.

: 1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3} -
:1.10°	10^3	10^6	10^9 -
Surface totale (cm ²) : 6	$(6 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1}) \cdot 10^3 = 60$	600	6000 -...

2° Les facteurs climatiques :

La quantité d'eau dans une région donnée est variable avec les facteurs atmosphériques : pluies, insolation (évaporation ...), surtout de la capacité de rétention d'eau de chaque sol.

Celle-ci dépend de :

1. la grosseur des particules (texture) : plus les particules sont fines, plus il y a l'eau d'adsorption dans le sol;
2. la structure : un sol avec beaucoup de micropores aura plus d'eau qu'un sol riche en macro pores;
3. la teneur en colloïdes, surtout les colloïdes d'origine organique, retiennent plus d'eau que les colloïdes minéraux (humates > humines > fulvites). Chez les colloïdes minéraux, la montmorillonite > Vermiculite en retiennent plus que les Illites > Chlorites > Kaolinites.
4. des cations prédominants dans le sol :
Na > K > Mg > Ca

Pour minimiser les pertes par évaporation, dans la pratique agricole, il est recommandé de pratiquer le paillis.

4.19.3.1. Conséquence de l'utilisation d'une eau de qualité médiocre.

En agriculture l'utilisation d'une eau de qualité médiocre peut mener à des problèmes de nature et de gravité diverses, telle:

1° la salinité, problème qui se pose quand la quantité totale des sels contenus dans l'eau

d'irrigation est suffisamment forte pour que l'accumulation de ces sels dans la zone racinaire de l'horizon supérieur en vienne à compromettre les rendements, car le prélèvement de l'eau par la plante se fait en grande partie dans la partie supérieure de la zone racinaire et que celle-ci est plus sensible à la salinité que les zones plus profondes.

2° la perméabilité du sol qui, sous l'effet de certains sels diminue et rend la pénétration et la circulation de l'eau et de l'air dans le sol beaucoup plus difficile.

3° la toxicité, liée, généralement, à la présence de certains éléments particulièrement toxiques pour les plantes.

De façon générale, il faut signaler que le problème de la qualité de l'eau et celui du drainage sont très souvent interdépendants. Tout en contrôlant la qualité de l'eau d'irrigation, il est indispensable de maîtriser, à un niveau acceptable, la nappe phréatique celle-ci présente potentiellement un danger (surtout si elle est à moins de 2 m de profondeur).

Si les analyses laissent présager un risque de salinité, d'alération de la perméabilité ou de toxicité quelconque, il y a lieu d'adopter certaines méthodes culturales pour le contrecarrer, en retarder l'apparition ou le corriger si le problème existe déjà.

4.19.4.Méthodes de lutte contre les méfaits de l'eau de mauvaise qualité

4.19.4.1. Lutte contre la salinité

- irriguer plus fréquemment pour améliorer l'approvisionnement hydrique de la culture et permettre ainsi la lixiviation;
- choisir des cultures tolérantes à une salinité existante ou éventuelle;
- choisir la méthode d'irrigation appropriée. Avec l'irrigation de surface (consommation par la plante et l'évaporation), la solution du sol devient rapidement plus salée qu'avec une irrigation régulière par aspersion;
- modifier les pratiques culturale sur billons comme indiqué.

Fig. Billons et pratique de l'irrigation.

- régulariser la surface pour rendre l'application de l'eau plus uniforme;
- modifier le profil du sol pour améliorer la percolation de l'eau en profondeur en brisant ou en détruisant des horizons durcis qui empêchent ou ralentissent la pénétration de l'eau;
- installer un drainage artificiel s'il existe une nappe gênante ou s'il existe un banc d'argile ou un horizon durci;
- changer de source d'approvisionnement en eau si l'on dispose de plusieurs sources d'approvisionnement en eau, mais cela n'est bien souvent pas réalisable.

4.19.4.2. Solutions d'aménagement aux problèmes affectant la perméabilité

Alors que la salinité diminue la disponibilité de l'eau du sol pour la plante, l'imperméabilité, elle, diminue le volume d'eau mise en réserve pour être utilisée par la culture. Les solutions à envisager seraient :

- diminution du taux de sodium ou augmentation du taux de calcium et de magnésium;
- labours profonds.
- arrosages plus fréquents pour éviter que les cultures ne souffrent d'un déficit hydrique entre les arrosages.

4.19.4.3. Lutte contre la toxicité pour les cultures

Pr. Lumpungu Kabamba

Alors que le problème de salinité et de perméabilité du sol se joue dans le sol, celui de la toxicité se manifeste directement sur le végétal comme résultat de l'absorption et de l'accumulation de certaines substances contenues dans l'eau d'irrigation. La toxicité peut apparaître même quand la salinité est faible. Les éléments les plus à craindre sont le sodium, le chlore et le bore, surtout pour des cultures arboricoles et autres plantes ligneuses de type pérenne. L'excès de l'un ou de l'autre de ces éléments se manifeste par des symptômes spécifiques.

1° Le Sodium

Les symptômes de toxicité de Na se manifestent sur les feuilles adultes. Na absorbé s'accumule dans les feuilles, après évaporation, les feuilles dans lesquelles la concentration a atteint le seuil de toxicité présentent des signes de brûlure, d'abord un roussissement suivi d'une nécrose des tissus situés sur le bord des feuilles. Souvent la toxicité du sodium se modifie et même s'atténue en présence de calcium.

2° Le chlore

Cet élément n'étant pas retenu par les colloïdes du sol, il se déplace facilement avec l'eau du sol. Absorbé par les racines, il s'accumule dans les feuilles comme Na, mais ses symptômes de toxicité sont cependant différents : la brûlure du feuillage se produit tout d'abord à l'extrême pointe des feuilles âgées plutôt que sur les bords et progresse de la pointe vers l'arrière en suivant les bords.

3° Le bore

Il est un des éléments essentiels à la croissance des végétaux, mais il n'est nécessaire qu'à des faibles doses. La toxicité du bore est plutôt à craindre là où l'on utilise l'eau des puits et des sources, dans les régions géothermales ou à proximité de failles sismiques. Les eaux des cours d'eau de surface, sauf bien entendu quand le bore se trouve naturellement dans le sol, ne présentent quasiment pas de danger.

Les symptômes de toxicité du bore se manifestent, tout d'abord sur la pointe puis les bords des feuilles âgées, par un jaunissement, par des taches ou par un dessèchement des tissus foliaires. Parfois on note l'apparition d'une gommose ou d'un exsudat sur les branches ou le tronc d'arbres atteints.

Il faut signaler, toutefois, que la toxicité peut survenir avec n'importe quel élément lorsque sa concentration excède le seuil de tolérance des cultures.

Voici quelques concentrations maximales d'éléments recommandées pour les eaux d'irrigation.

Eléments (symbole)	Eaux utilisées en permanence; tous types de sol mg/l	Utilisation allant jusqu'à 20 ans sur des sols à texture fine, ayant un pH de 6 à 8,5 mg/l
Al	5,0	20,0
As	0,1	2,0
Be	0,1	0,5
B	1	2,0
Cd	0,01	0,05
Cr	0,1	1,0
O	0,05	5,0
Cu	0,2	5,0
F	1,0	15,0
Fe	5,0	20,0
Pb	5,0	10,0
Li	2,5	2,5
Mn	0,2	10,0
Mo	0,01	0,05
Ni	0,2	2,0
Se	0,02	0,02
V	0,2	1,0
Zn	2,0	10,0

Lorsqu'il s'agit d'évaluer une toxicité potentielle, il faut surtout faire une analyse de l'eau portant sur les éléments B, Na, Mg, Ca et les anions CO_3^- et HCO_3^- , SO_4^{--} et Cl^- .

4.19.5. Principe de mesure de la salinité

La qualité de l'eau peut se mesurer par différentes méthodes chimiques (titration, gravimétrie, ...) mais plus couramment, elle est mesurée par la conductivité (ou la

Résistivité) en utilisant les relations physiques :

$$U = I.R \quad U = \text{Tension (volt)}$$

$$I = \text{Intensité (Ampère)}$$

$$R = \text{Résistance (ohm)}$$

La conductivité "C" étant l'inverse de la Résistivité, on aura $C = 1/R$ et son unité de mesure est "mho".

Ex : $R = 8 \text{ ohm}$

$$C = 1/8 = 0,125 \text{ mho} = 125 \text{ mho}$$

4.19.6. Grades de salinité et les sels influençant la qualité de l'eau

1° Grades

Dans la pratique, par conductivité on mesure globalement la concentration des différents sels contenus dans l'eau et des tableaux de corrélation entre conductivité - Pression osmotique et concentration en sels (en %) sont établis.

Tableau VII : Grades de salinité

Grades	I non salin	II légèrement salin	III moyennement salin	IV fortement salin	V très fortement salin
Unités					
mmho/cm	0 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 16	+16 mmho/cm
Atm/l	0 - 0,7	0,7 - 1,4	1,4 - 2,9	2,9 - 5,8	+5,8 Atm/l
%	0 - 0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 1,0	+1,0 %

Ici on devrait tenir compte, d'une part du seuil de tolérance des plantes de culture et, et d'autre part, de l'évapotranspiration (à peu près 1/2 de l'eau disponible). Aussi l'eau d'irrigation devrait mesurer, au maximum, la moitié du seuil de tolérance de la culture et dans le cas d'irrigation permanente, le taux devrait être encore plus bas. Nos recherches ont montré que la pression osmotique de quelques plantes de culture de chez-nous est

généralement plus élevée :

<u>Plante</u>	<u>Pression osmotique</u> (Atm/l)	
	Kisangani	Boma
1. Ignames amer	4,8	
2. Ananas	4,8	
3. Poivrier de Cayenne	4,8	
4. Pomme de terre	7,3 (provenance : KIVU)	
5. Papayer	7,3	
6. Tarot	8,3	
7. Canna indica	9,7	
8. Manioc doux	9,7	
9. Patate douce	12,1	
10. Avocatier	14,6	
11. Rauwolfia	21,8	Plante non cultivée
12. Urena lobata	21,8	Plante non cultivée

2° Les sels qui influencent la qualité de l'eau

Les plus fréquents sont présentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Sels influant sur la qualité de l'eau.

Cations Anions	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻⁻	Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃		
SO ₄ ⁻⁻	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
Cl ⁻	NaCl	MgCl ₂	CaCl ₂

Il faut noter que les sels : MgCO₃, Mg(HCO₃)₂, CaCO₃, Ca(HCO₃)₂ et CaSO₄ deviennent toxiques pour les plantes à des concentrations élevées. Ils comptent parmi les substances utiles à la plante.

Gestion de l'eau

Lorsque les ressources en eau sont limitées dans une région, il faut recourir à une bonne

Pr. Lumpungu Kabamba

gestion, soit en recherchant :

1° les sources supplémentaires (aux sources habituelles)

- * Collecte de l'eau de pluie (au pied des versants, dans des bassins artificiels) → ressources supplémentaires de bonne qualité et à bas prix.
- * Réemploi des eaux (l'augmentation de la demande exigera de plus en plus la rentabilisation es eaux usées) → recyclage

2° Réduction des pertes

- * Réduction de l'évaporation des plans d'eau
L'évaporation étant invisible, elle est souvent négligée et pourtant elle mérite une attention particulière car les pertes annuelles sont énormes en régions chaudes (surtout arides).
- * Réduction des infiltrations dans les canaux et bassins de retenues (→ mais frais élevés)
- * Réduction de l'évaporation des surfaces des sols → par les paillis par ex.
- * Approvisionnement par filets d'eau → = système de tuyaux laissant s'écouler l'eau à côté de chaque plante (approprié pour des vergers p. ex.)
- * Réduction de la transpiration (recherche) → eau $\pm$ 99 % d'eau absorbée par les racines et rejetée dan l'atmosphère par les feuilles.
- * Agriculture en milieu confiné (contrôlé) → sous toiles en plastique transparent.

5. LA NUTRITION MINERALE DE LA PLANTE

5.1. Les éléments nutritifs

La nutrition minérale des plantes présente tout comme d'autres facteurs, des relations d'interdépendance avec divers autres facteurs du milieu où vit la plante. Ex. : la lumière, la température, l'eau ...

Dans la nature les plantes puisent leurs "Aliments" dans deux milieux :

1° dans l'atmosphère, par l'intermédiaire de leurs feuilles, elles puisent le CO₂, l'oxygène, l'eau et les substances minérales dissoutes (fumage des micro-éléments par aspersion);

2° dans le sol par l'intermédiaire des racines, elles puisent l'eau l'oxygène, les substances minérales et organiques dissoutes (des polyphénols et des quinones absorbés stimulent la croissance des plantes).

De cette façon leur composition minérale peut bien entendu varier dans des très larges limites avec leur emplacement selon les éléments minéraux contenus dans le sol (de la consommation de luxe à la carence).

Dans la pratique agricole cependant, seuls les éléments minéraux qui influencent la croissance développent des récoltes et traduisant par un résultat économiquement avantageux présentent un intérêt.

Pour une production optimale, il convient donc de déterminer les besoins de la plante en ces différents éléments (= physiologie) et de les mettre à sa disposition dans les conditions et aux moments les plus favorables à son plein développement (= fumage ou fumure).

Dans le sol l'absorption des sels minéraux est influencée par :

1° La structure du sol (dans un sol trop compact, le métabolisme est ralenti, les Colloïdes → retiennent les sels),

2° le taux d'humidité du sol - mobilité → taux d'oxygène

Pr. Lumpungu Kabamba

3° l'activité biologique du sol : les excréments des microorganismes de la rhizosphère sont capables de dissoudre les éléments minéraux peu solubles dans l'eau tels que le calcaire, les phosphates calciques, les oxydes de fer..., leurs diastases favorisent la minéralisation des substances organiques et la formation des composés organo-minéraux notamment les humo phosphates qui sont plus disponibles pour les plantes.

4° le système racinaire et la profondeur de pénétration de celui-ci. Quoique les racines absorbent les éléments à l'état dissous dans H_2O , il y a une indépendance de l'absorption de l'eau et des éléments minéraux dissous.

Les éléments dits "indispensables" ou "essentiels" à la croissance des plantes sont divisés en 2 groupes :

1° Les éléments majeurs ou macroéléments, dont la plante a besoin en grande quantité (des dizaines de kg/ha) C, H₂, O₂ (fournis par l'air et l'eau);

N, P, K, S, Ca, Mg (fournis par le sol, les matières organiques et les engrais).

2° Les micro-éléments ou oligo-éléments, dont la plante a besoin en très petites quantités (quelques kg/ha) : Fe, Mn; Zn, Co, Cu, Mo, Cl (appelés aussi éléments traces).

5.2. Le mécanisme de la nutrition minérale des plantes

Dans le sol les éléments nutritifs de la plante issus soit de l'altération des roches ou provenant des engrais chimiques ou organiques sont essentiellement absorbés par les poils absorbants des jeunes racines (arachide : pas de poils absorbants).

Ils peuvent aussi être absorbés par les feuilles sous l'influence de pulvérisation des solutions aqueuses (micro-éléments surtout, amis aussi N et P actuellement).

5.2.1. L'absorption des éléments minéraux

L'absorption des éléments minéraux se fait indépendamment de l'absorption de l'eau qui est essentiellement conditionnée par l'Evapo-transpiration. Autrement dit,

l'absorption minérale n'est pas une simple diffusion due à l'absorption des solutions aqueuses.

Certains faits illustrent cette indépendance :

1° Dans une atmosphérique saturée de vapeur d'eau, où l'évapotranspiration est fortement réduite, l'absorption des substances minérales et la croissance se produisent aussi bien que dans le cas d'une transpiration active.

2° Pour les plantes aquatiques, en l'absence de toute transpiration, il y a accroissement de l'absorption des substances minérales.

3° La sève qui s'écoule d'une tige coupée, diffère dans sa composition chimique de la solution où baigne la plante.

5.2.1.1. L'absorption passive (= diffusion libre) :

C'est la diffusion libre de l'ion de la solution dans la partie extérieure de la racine que les Britanniques appellent : "Apparent free space". Les ions peuvent passer et repasser de la solution du sol à la racine.

L'absorption est très rapide au début, elle s'accroît avec la concentration de l'élément dans la solution mais se termine en un court laps de temps. Cette absorption n'est pas affectée par les inhibiteurs du métabolisme et l'élément absorbé ne donne pas lieu à la formation d'un constituant de composition fixe (typique d'une absorption métabolique).

5.2.2.2. L'absorption active ou métabolique

Elle est liée à la vie physiologique de la plante, dont les glucides décomposables des racines produisent de l'énergie et les acides organiques des anions et cations qui appellent des anions et cations de l'extérieur (Carrier-Theory).

L'absorption métabolique se caractérise par une teneur élevée d'ions dans l'excédant que dans la solution et une vitesse constante d'absorption. Elle accuse une réduction sous l'effet des inhibiteurs métaboliques (ex. Dimitrophénol = DPN) et des basses températures. L'élément absorbé entre dans la formation d'un constituant cellulaire de composition fixe.

5.2.2.3. L'absorption par échange

Celle-ci concerne les "cations" et est liée à la nature pecto-cellulosique de la paroi

Pr. Lumpungu Kabamba

externe des racines qui se comporte comme les colloïdes électronégatifs.

Comme tels les racines peuvent fixer et échanger les cations avec la solution du sol.

Par analogie avec le sol, les racines (mortes ou vivantes) ont aussi une capacité d'échange (pour les monocotylédones plus ou moins 25 méq pour 100 gr de matière sèche, les dicotylédones : plus ou moins 50 méq.).

Il faut noter que les colloïdes à capacité d'échange élevée fixent les actions bivalents avec plus d'intensité que les monovalents (K) et inversement dans le cas d'un pouvoir d'absorption moindre.

D'où les légumineuses contiennent plus de Ca et Mg que les graminées qui contiennent plus de K.

Contrairement à la diffusion libre, (absorption passive), les ions pénétrés par échange dans la racine, se retournent dans la solution du sol que moyennant l'entrée d'autres ions.

5.2.2.3.1. Conditions de pénétration des éléments minéraux dans la plante

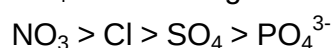
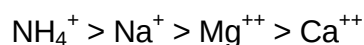
Dans la pénétration des éléments minéraux interviennent :

1° la perméabilité de la membrane qui permet l'entrée de toutes les substances dissoutes par un mécanisme physique (osmose);

2° l'utilisation des éléments minéraux dans les fonctions physiologiques du végétal.

Ainsi on peut observer que certaines substances restent localisées dans l'endoderme après absorption, d'autres n'atteignent pas la tige et d'autres ne sont absorbés qu'en très petites quantités.

En général, la vitesse de pénétration est plus grande pour les cations et anions monovalents que pour le bi - ou polyvalents.



Les cations monovalents (Na et K) ont un effet dispersif, qu'ils peuvent exercer sur (d'autres cations fixés par) les colloïdes électronégatif des membranes et accélérer ainsi leur pénétration.

De cette façon l'accumulation des différents anions dans une même plante variera avec la nature des cations qui les accompagnent.

5.2.3. Les interactions entre éléments minéraux

Dans le sol l'absorption d'un ion par les racines est influencée par :

1° la nature et la proportion des ions du fait de leur action sur la perméabilité de la membrane et de leur influence réciproque autres le comportement.

2° l'affinité protoplasmique.

Toutefois deux ions peuvent avoir soit une interaction négative, soit une interaction positive.

a) L'antagonisme est une interaction négative entre deux éléments (l'action de l'un diminue l'action de l'autre).

Sortes d'antagonismes

1° Antagonisme dans l'absorption :

- une augmentation de N diminue l'absorption de bore, du Cu, ...
- une augmentation progressive de K diminue l'absorption de Mg, (Ca).
- une augmentation progressive de PO_4^{3-} , diminue l'absorption du Cu, ...

2° Antagonisme dans le transport : occasionné par la formation des complexes dans les racines (P et Fe, Mn et Si, Fe et Mn, Fe et Mo, Zn et Mn, Fe et Cu, Mo et Cu).

La formation des complexes insolubles dans les racines, comme on pourrait le remarquer, est plus fréquente entre oligo-éléments. Ceci doit nous pousser à la modération dans l'usage de ces produits ou de contrôler leur disponibilité dans le sol.

3° Antagonisme dans les fonctions :

- action ionique des certains cations et anions (K - Na)
- Fe et Mn dans certaines enzymes (redox).

b) La synergie est une interaction positive entre deux ions (l'action de l'un augmente celle de l'autre).

Ex. : N → augmente la teneur en Ca et Mg dans les feuilles des agrumes.

Hormis des ceux cas, il existe le blocage par lequel un élément inhibe l'absorption d'un autre sans pour autant prendre sa place dans les fonctions physiologiques de la plante.

5.2.4. La toxicité des éléments minéraux

De par les différentes interactions, on comprend que certains sels, toxiques isolement, cessent de l'être en mélange avec d'autres (Ex.: K exerce une action de protection vis-à-vis de Mg → vite toxique à certaines doses lorsque utilisés seuls. Le Ca et Mg sur Na.

D'une manière générale, la toxicité d'une substance, c'est-à-dire son degré de nocivité, dépend de multiples conditions qui sont autant de facteurs de toxicité. Ceux-ci tiennent d'une part à la substance elle-même, à son association avec d'autres substances, aux doses et du mode de pénétration dans l'organisme et d'autre part au sujet récepteur lui-même.

Ainsi donc la toxicité est un terme qu'il convient de considérer pour tous éléments comme "relatif", car dépassé le seuil de tolérance, tout élément (majeur, mineur ou autre) devient nocif pour la plante et par voie de conséquence toxique.

Pour les produits destinés à l'alimentation humaine et au bétail, compte tenu de la quantité journalière de matière à consommer, la teneur en éléments non-essentiels et toxiques ne devrait pas y dépasser le seuil de tolérance admis pour l'homme et les animaux domestiques (Daily Acceptable Intake DAI). Signalons qu'outre les éléments chimiques usuels en agriculture dont l'application peut être contrôlée, il y a d'autres produits dont les origines ne sont pas contrôlables par l'agriculteur et qui peuvent être toxiques pour les plantes, pour l'homme et les bétails qui en sont les consommateurs.

- Les gaz (SO₂, HF, H₂S, ...), poussières (calcaires, ciment, ... se déposent sur les feuilles et forment des croûtes) et les fumées (ralentissent la photosynthèse) libérés par les industries,
- Les égouts industriels,
- Les composts des ordures ménagères et déchets des villes,

- Du fait de la toxicité des certains minéraux (les métaux lourds) sur l'homme et le bétail, un choix judicieux des sols s'impose avant leur prise en culture. Par exemple un sol riche en péridotite ou serpentine sera riche en chrome, cobalt et nickel, substances très peu mobiles dans le sol et très toxiques pour l'homme et le bétail.

5.3 La qualité des produits agricoles

La qualité des produits agricoles résulte de caractéristiques très différentes selon qu'elle est appréciée par :

- l'agriculteur
- le commerçant
- l'industriel transformateur
- le diététicien ou par
- le consommateur (homme ou bétail)

Elle comporte différents aspects dont il faut tenir compte dans l'étude du marché et dans la commercialisation. Il s'agit e.a. de:

1° L'aspect visible ou apparent : il s'appuie sur les critères liés à la présentation (grosceur, couleur, régularité de forme, absence des défauts ...). Il a son importance, car il peut être encré dans les habitudes du consommateur.

2° L'aspect technologique, basé sur des analyses.

Ex. : Teneur en N, l'orge de brasserie (N x 6,25 en dessous de 10 %), teneur en sucre, lipides,...

3° L'aspect basé sur l'examen organoleptique (subjectif)

Ex. : L'arôme du tabac ou du café, la saveur des fruits ou des légumes. Cet aspect peut être lié aux considérations d'ordre culturel et/ou psychologique.

4° L'aspect nutritif (ou qualité biologique).

Il considère les éléments intéressant la physiologie animale et humaine. Il présente deux aspects :

- un négatif : l'absence des produits toxiques ou des résidus toxiques.

- un positif : la présence abondante et équilibrée d'éléments nutritifs: glucides, lipides, protéines (avec le plus possible d'acides aminés essentiels), vitamines, sels minéraux.

En somme, la qualité biologique représente la somme des facteurs individuels présents dans la plante, qui contribuent au maintien d'un métabolisme normal de l'organisme de l'être vivant qui consomme cette plante ou les produits de récolte (A. Voisin).

La fertilisation joue un rôle sur la qualité des produits végétaux du fait que un déséquilibre de l'alimentation, peut orienter le métabolisme vers la production des substances qui peuvent être toxiques pour l'homme ou l'animal ou présenter une composition minérale déséquilibrée.

Parmi les facteurs composants de la qualité biologique, qui peuvent nuire à la santé, certains sont sous le strict contrôle des engrais, il y a lieu de citer e.a. :

- l'excès de nitrate dans la plante, résultant de forts apports de nitrate.
- le déséquilibre des éléments minéraux dans la plante ou dans les produits de récolte.

A titre d'exemple, une forte teneur en K avec simultanément une trop faible teneur en Mg et Na est une des causes principales de la tétanie d'herbe.

- la teneur insuffisante en tout élément minéral essentiel

Ex.: . une carence prononcée de l'herbe en Mn cause de la stérilité chez le bétail

. une carence en cuivre provoque l'ataxie enzootique chez les animaux (incoordination des mouvements), la stérilité, les fractures osseuses ...

. une carence en Co cause l'anémie pernicieuse ou prining des animaux.

- Dans la relation entre la valeur biologique et la santé, il faut tenir, également; compte des anti-métabolites pouvant être synthétisés par les plantes en cas de déséquilibre des éléments minéraux. La déficience en azote → réoriente les synthèses vers des produits pauvres en N, notamment, les :

- lipides chez les champignons et les algues
- caroténoïdes chez les algues
- anthocyane chez les plantes supérieures.

Ceux-ci peuvent être, par exemple, des facteurs anti-thyroïdiques, des oestrogènes, des glucosides cyanogénétiques (avec présence simultanée d'une enzyme les hydrolysant), des saponines, ...

A titre d'exemple, une carence du sol en P amène certaines plantes (tel le trèfle

souterrain) à synthétiser des quantités excessives d'isoflavone, un oestrogène fort dangereux pour l'animal.

La carence en K de la pomme de terre augmente la teneur en solanine.

Ces anti-métabolites peuvent agir directement, soit immédiatement, soit par effet cumulatif lent.

Cet aspect du problème mérite une attention dans le domaine de la nutrition des végétaux.

5.4. Les différents éléments minéraux essentiels

5.4.1. Les éléments majeurs et secondaires

Ce sont les éléments dont la plante a besoin en grandes quantités, d'où la nécessité dans leur renouvellement régulier par les engrais dans le sol.

5.4.1.1. Le Phosphore

Dans la plante

Sous forme minérale et organique : ATP→P minéral nécessaire

- suc cellulaire (minérale)
- graines (phytine = phosphate d'inositol)
- lipides (= lécithines)
- nucléoprotéines
- beaucoup d'enzymes.

Rôle physiologique :

- phosphorylation des substances organiques, fournisseur d'énergie : ATP (Adénosine - triphosphate) qui se décomposent en ADP libère l'énergie.
- Élément constitutif, des graisses (lécithine) et des albumines (nucléoprotéines).

Le phosphore reste dans la plante toujours très mobile et facilement mobilisable; lorsque les organes commencent à vieillir, il migre vers les organes plus jeunes. Dans les plantes annuelles, les dernières feuilles le cèdent aux graines (Voir photo Lotope).

Carence en phosphore

- ralentissement de la croissance
- système racinaire peu développé
- maturation tardive des fruits qui restent acides (manque de sucre)
- perturbation de la protéogenèse (il y a accumulation des amides dans les tissus végétaux)
- formation réduite des vitamines

Symptôme

- la plante a l'air effilé
- les pétioles s'allongent
- les feuilles sont minces et dressées
- dans les vieilles feuilles, il y a dans un premier temps accumulation de la chlorophylle, puis s'en suit un brunissement roux.

Dans le sol

- Sous forme minérale (= apatite) qui par altération chimique est absorbé par les particules colloïdales du sol et par l'humus.
- provenant de la minéralisation des matières organiques.

Pertes du P du sol

a) Par exportation, surtout si les déchets ne sont pas retournés au sol

Ex. : Manioc (Cireghelle, Raoul).

	<u>Racines</u>	<u>Tiges</u>	<u>Total</u>
P ₂ O ₅	20 kg/ha	74 kg/ha	94 kg/ha
P	8,7 kg	32,26 kg	40,98 kg.

b) Par érosion

Le phosphore organique, le plus assimilable se trouve surtout dans la couche arable. D'où l'érosion provoque une perte importante en P. La lutte contre toute érosion s'impose du fait que le P du sous-sol se transforme très lentement en P assimilable après érosion.

c) La perte par lixiviation est quasi inexistante à cause de la mobilité très réduite du P dans le sol. Ceci exige l'application des engrais phosphatés dans la zone des racines et permet l'application des stocks importants.

d) Par complexation

Par labilité P du sol forme des complexes inaccessibles aux plantes. Dans les conditions de la RDC, les latosols qui contiennent 16-41 % de phosphate total, ne contiennent que 0,2-6 % de phosphate assimilable à cause de la formation des complexes insolubles avec les sesquioxides, essentiellement les oxydes de Fer.

Il est à noter qu'il existe une corrélation entre la quantité de PO_4^{3-} fixé et la nature d'oxydes se trouvant dans le sol : les oxydes de forme cristalline en retiennent moins que les oxydes de forme colloïdale et les oxydes hydratés en retiennent plus que les formes anhydres. Ainsi, donc, la connaissance de la nature des sesquioxides du sol est important dans la prise de décision de fumure.

- Relation P du sol - Plante

La carence en P dont pourrait souffrir les plantes peut ne pas être due seulement à la présence des formes inassimilables dans le sol. Elle peut être due aussi à un antagonisme qu'a relevé E.W. RUSSEL. Celui-ci pourrait être dû à l'opposition des ions Fe et Al des racines à l'absorption du P par la formation des complexes Fe - P ou Al - P au niveau des racines.

5.4.1.2. Le Potassium

Dans la plante :

Sous forme ionique, dans le suc vacuolaire surtout. Il est abondant dans les feuilles, surtout chez les jeunes plantes et en général, dans les organes en pleine activité physiologique : cône de végétation, cambium, embryon, organes sexuels ... Les plantes en ont grand besoin pendant leur période végétative.

- Rôle physiologique

Le rôle physiologique spécifique de l'ion K^+ dans les végétaux est encore peu

Pr. Lumpungu Kabamba

connu. Contrairement à P et N, K n'entre pas dans la constitution des (glucides, lipides et protides) substances organiques. Il contribue toutefois en tant que ion monovalent et hydrophile à rendre les membranes des cellules plus perméables. Il diminue la transpiration des cellules et les maintient en état de turgescence. Il améliore ainsi la balance hydrique de la plante surtout vers la fin de la végétation.

En augmentant la pression osmotique du suc cellulaire, il confère aux plantes une plus grande résistance à la dessiccation précoce. Il facilite ainsi aussi, de ce fait, la conservation des racines et des tubercules.

D'une façon générale K participe à l'activation des enzymes. Ici son action est large, mais moins spécifique.

- Carence en K

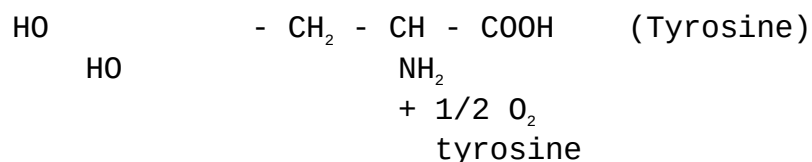
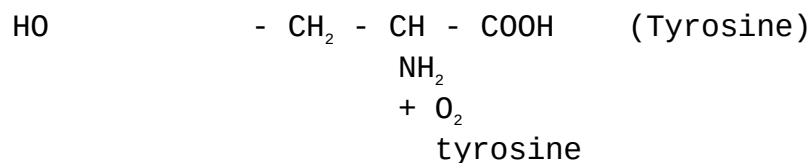
- Diminution de la teneur en glucides
- Diminution de la teneur en protéines avec une augmentation relative d'amides (mauvais goût des légumes).

- Transpiration intense et perte de turgescence

D'une façon générale, compte tenu de sa participation à l'activation des enzymes, le manque de K conduit à un trouble généralisé du métabolisme de la plante et celui de la synthèse des hydrates de carbone en particulier.

- Symptôme de carence

- nécrose des feuilles âgées (à partir des bords)
- flétrissement de la plante
- chez la pomme de terre (probablement chez d'autres tubercules = ignames), la carence en K provoque le noircissement de la chair et l'augmentation de la teneur en solanine qui en altère la saveur. Le noircissement de la chair serait dû à la transformation de la tyrosine en mélanine par oxydation et polymérisation.



COOH

HCNH₂ (- H₂O)

CH₂

polymérisation $\Rightarrow$ mélanine

- Dans le sol

Dans le sol, la teneur en K dépend de la composition minéralogique de la roche mère $\rightarrow$ minéraux potassiques : Feldspaths, micas, orthoclases, biotites, muscovite, illite. Les minéraux micacés de l'argile constituent un réservoir potassique pour la plante. Il provient aussi de la minéralisation des matières organiques.

- Pertes du K du sol

- par érosion
- par lixiviation; assez importante.

Dans un sol sablonneux, il est même recommandé de fractionner la dose.

- par exportation
- par rétrogradation.

5.4.1.3. L'Azote

- Dans la plante :

Sous forme de NO₃ dans le suc cellulaire, mais très souvent dans les composés organiques.

- Rôle physiologique :

Eléments constitutifs de :

- protides
- bases organiques
- enzymes
- vitamines
- chlorophylle...

Les feuilles sont plus riches en N. Chez toutes les espèces, les légumineuses en sont les mieux pourvues. D'une manière générale, les jeunes plantes en sont plus riches que les vieilles.

- Carence en N

- ralentissement de la croissance
- déficience de la formation de la chlorophylle
- la floraison et la fructification sont hâtives, mais en dessous de la moyenne.

- Symptômes

- les feuilles sont d'un vert clair; leurs pétioles se raccourcissent et les nervures sont plus prononcées (parce que le développement des parties succulentes est retardé).
- Chlorose des vieilles feuilles, à partir du sommet (les feuilles jaunissent)
- les plantes sont chétives et leurs feuilles sont dressées. Par contre, une forte dose de N stimule la vie végétative et retarde la maturation. Elle favorise la verse (céréales, lin, ...) et l'accumulation d'Amides.

- Dans le sol

L'Azote du sol est dans sa quasi totalité sous forme organique (99 %), car les roches n'en contiennent, pratiquement pas. Le N du sol provient :

1° de l'air par l'intermédiaire des plantes (légumineuses) qui vivent en symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote (= Rhizobium).

Cette symbiose Rhizobium - légumineuse qui est une adaptation à un déséquilibre dans le bilan de l'azote (= nombreuses nodules actives en l'absence de l'azote et peu de nodules actives en abondance d'azote) nécessite des souches spécifiques actives pour une action rapide et efficiente.

Une légumineuse nouvelle, cultivée sur un sol ne peut profiter de Rhizobium adaptés

antérieurement à d'autres plantes de la même famille qu'après un lent et long processus d'adaptation. Dans le processus symbiotique, les bactéries pénètrent dans les racines (parenchyme), forment des nodules, fixent l'azote de l'air sur la leghémoglobine et synthétisent des protéines qu'elles livrent à la plante en échange des glucides synthétisés par la plante.

Par voie de symbiose, les légumineuses peuvent fixer des quantités variables de N par ha. D'où la pratique de culture mixte : légumineuse - autres plantes (maïs).

Tableau IX : Quantités d'azote et espèces.

Plante		Azote fixé (kg N/ha/an)
Légumineuses à graines		
Calopo	<i>Calopogonium muconoïdes</i>	370-450
Fèves	<i>Vicia faba</i>	45-552
Pois cajan	<i>Cajanus cajan</i>	168-280
Niébé	<i>Vigna unguiculata</i>	73-354
Pois mungo	<i>Vigna mungo</i>	63-342
Guar	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	41-220
Soja	<i>Glycine max</i>	60-168
Pois chiche	<i>Cicer arietinum</i>	103
Lentille	<i>Lens esculenta</i>	88-114
Arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	72-124
Pois	<i>Pisum sativum</i>	52-77
Haricot	<i>Phaseolus vulgaris</i>	40-70
Légumineuses fourragères		
Desmodium	<i>Desmodium intortum</i>	897
Sesbania	<i>Sesbania cannabina</i>	542
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	74-584
Centro	<i>Centrosema pubescens</i>	126-398
Luzerne	<i>Medicago sativa</i>	229-290
Trèfle souterrain	<i>Trifolium subterraneum</i>	207
Trèfle ladino	<i>Trifolium repens</i> var. <i>giganica</i>	165-189
Trèfle blanc	<i>Trifolium repens</i>	128
Stylo	<i>Stylosanthes</i> spp.	34-220
Vesce velue	<i>Vicia villosa</i>	110
Pueraria	<i>Pueraria phaseoloïdes</i>	99

Principes d'inoculation :

- a. déverser sur le nouveau champ de la terre prélevée dans des parcelles ayant porté, précédemment, la même légumineuse. Cette méthode présente certains inconvénients : apport des couches variées non adaptées; manipulation des quantités considérables de terre; apport, plus que probable, des germes pathogènes.
- b. Inoculation préalable des graines avec des souches actives sélectionnées qui garantissent une symbiose optimale.

2° Des microorganismes libres fixateurs d'azote

- a. Bactéries :
 - Azotobactère (sol aéré, pH neutre)
 - Bacillus amylobactère et chlostridium (dans une gamme des pH étendue)
 - Beijerinckia (pH acide, dans sol tropical, laterite).
- b. Algues (Gynophyceae) :
 - Nostoc et Calothrix → dans riziculture irriguée.

- 3° Par réaction chimique : dans les précipitations atmosphériques 1-70 Kg/ha.
 $2 \text{ N (atmosphérique)} + 3 \text{ O}_2 + \text{Energie (éclaire)} \rightarrow 2 \text{ NO}_3$.

4° De l'apport des engrais et de la décomposition des matières organiques

- Perte de l'azote du sol :

- a. - Par exportation
 - b. - Par érosion (l'N se localise dans la couche arable).
 - c. - Par lixiviation, surtout sous forme NO_3 , l'azote des composés organiques étant insolubles et NH_4^+ étant fixé par le complexe du sol. Dans un sol à texture grossière (sable), par des pluies abondantes, la perte de NO_3 peut être beaucoup plus grande. D'où la recommandation de fractionnement de la dose totale suivant la répartition des pluies. Toutefois le fractionnement n'est avantageux que pour des grandes doses.
- De nos jours pour ralentir la nitrification dans le sol, certains produits, dénommés nitrificides, sont d'usage courant pour limiter la perte des nitrates.

- Nitrificides

Les nitrificides ou inhibiteurs de nitrification, parmi lesquels on trouve plusieurs produits phytosanitaires, "nitrification inhibitors" sont des produits chimiques qui ont la propriété

d'arrêter l'oxydation de NH_4 ou tout au moins de ralentir ce processus dans le sol. L'inhibition ou le ralentissement de ce processus est causé par l'action toxique de nitrificides sur les microorganismes responsables de la nitrification dans le sol. Certains nitrificides sont spécifiques, ils agissent soit sur le nitrosomonas, soit sur le nitrobacters, tandis que d'autres sont universels.

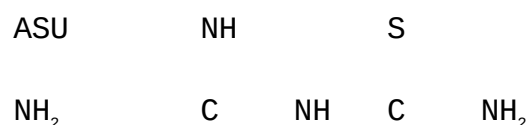
Selon leur spécificité, on distingue :

1. (les inhibiteurs de nitrosation) : Ils agissent, spécifiquement, sur le nitrosomonas. Conséquence : accumulation de NH_4^+ dans le sol.

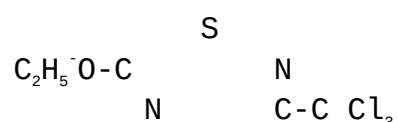
Quelques inhibiteurs de nitrosation de : DCS; NServe; AM; ST; Terrazole; MAST; ASU.

ASU et Terrazole présente certains avantages par rapport aux autres produits de la catégorie.

- ASU contenant 47 % N peut à la fois être utilisé comme engrais, car sa molécule se décompose facilement dans le sol et son N est tout aussi facilement minéralisable et ainsi accessible aux plantes.



- Terrazole étant un bon fongicide du sol, il peut à la fois être utilisé comme tel et comme nitrificide (USA)



2. Les inhibiteurs de nitratisation

Ils agissent, spécifiquement, sur le nitrobacter, menant ainsi à l'accumulation de NO_2 dans le sol.

Quelques NO_2 -nitrificides : DDD et Zytron.

ils ont d'accumuler le NO_2 -dans les végétaux.

3. Les inhibiteurs universels

Ils agissent, indistinctement, sur le nitrosomonas et le nitrobacter.

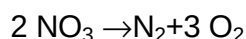
Quelques produits de cette classe : SWEP, Lastan, DCD.

L'usage des nitrificides, lorsque la minéralisation est arrêté au stade d'ammonisation, présente les points positifs essentiels, notamment :

- 1) la perte de N par lixiviation est réduite
- 2) le danger de perte de N par dénitrification est éliminée (pas de NO_3) ou, du moins, retardé.
- 3) réduction du taux des nitrates dans la plante

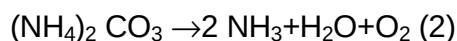
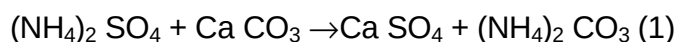
d/ Par dégagement d'azote gazeux :

- dénitrification : en anaérobiose,
par ex: en riziculture :



Pour cette raison les engrais nitriques ne sont pas recommandés en riziculture irriguée.

- volatilisation d' NH_3 : sol alcalin et chaud.



N.B. : $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ plus volatil que le $\text{NH}_4 \text{NO}_3$

- L'urée : en milieu basique $\rightarrow$ transformation en $\text{NH}_4 \rightarrow$ puis volatilisation.

5.3.1.4. Le calcium.

- Dans la plante

En petite quantité sous forme ionique (Ca^{++}) dans le suc cellulaire, mais surtout dans des composés organiques : oxalate (le plus fréquent), pectinate, et en combinaison avec P et C (phosphate, carbonate).

Le Ca se trouve accumulé plus dans des feuilles âgées que dans des jeunes (surtout dans les membranes cellulaires). Sa carence provoque la pourriture apicale de la tomate, du poivron, ...)

Rôle physiologique :

Ca étant un cation hydrophobe, il joue un rôle sur les colloïdes, qu'il dégonfle à l'inverse de K (cation monovalent).

Il diminue de ce fait la perméabilité de la membrane cellulaire et augmente en même temps la transpiration (deux phénomènes contraires qui doivent être compensés par K)

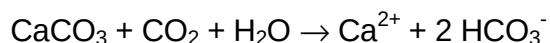
- Elément constitutifs de : . Phytine
- . Pectine

- carence en Ca:
 - Ralentissement et arrêt du développement du système racinaire.
- Symptôme:
 - chlorose des jeunes feuilles, "gaufrement".

- Dans le sol:

Le calcium provient de la décomposition des silicates primaires (feldsspaths calciques, Augite, hornblende, Apatite) et des minerais secondaires (Dolomite Ca CO_3 Mg CO_3 , Gypse $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) d'où il est lié au complexe sorbant du sol et à la matière organique (humates de Ca) après altération.

Le carbonate est la forme la plus avantageuse dans le sol, car en présence de CO_2 il est transformé en bicarbonate beaucoup plus soluble :



N.B. : Dans le latérite tropical, il y a très peu de Ca.

5.4.1.5. Le Magnésium

- Dans la plante :
- * sous forme ionique (Mg^{++}) dans le suc cellulaire,
- * dans des composés organiques (Phytine, chlorophylle, ...)

- Rôle physiologique :
- * Elément constitutif de : chlorophylle, phytine, pectine, ...

* Activation d'enzymes (couplement)

- phosphorylation
- protéogénèse

* Action sur les colloïdes, cfr Ca^{++}

- Carence en Mg

* Diminution de la production glucidique (car peu de chlorophylle)

* Accumulation des amides (réduction de la protéogénèse).

- Symptôme :

* Chlorose intercostale (vieilles feuilles).

- Dans le sol

* De la décomposition des silicates primaires (olivine, biotite) et des minéraux secondaires (Magnésite MgCO_3 , Calcaire dolomitique, Dolomie $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), dans les sols salins, sous forme de MgSO_4 , MgCl_2 .

- Décomposition des matières organiques.

5.4.1.6. Le soufre :

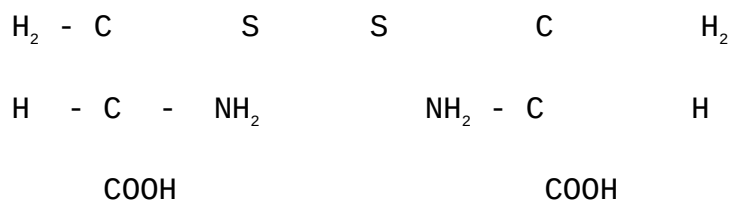
- Dans la plante :

. sous forme minérale : CaSO_4

. sous forme organique

a) protéines

Ex. Cystine (= 2 molécules de Cystéine)



b) enzymes notamment le Co-enzyme A qui est à la base de la formation de triterpène, ergostérol, lanostérol, symostérol, - nécessaire à la formation des huiles et du

caoutchouc).

- Rôle physiologique :

- . Élément constitutif des : - protéines (cystine, méthionine)
 - enzymes
 - vitamines, ...

- Carence en soufre

- . Réduction de la protéogénèse, avec accumulation des amides,
- . Accumulation relative des glucides

- Symptôme :

- . Les membranes cellulaires paraissent plus grosses que la normale
- . Chlorose des jeunes feuilles, les nervures sont souvent plus décourées que les espaces intercostaux. La plante entière jaunit à l'inverse de la carence en N où seules les feuilles sont concernées.

- Dans le sol :

- . Le soufre provient des minéraux à soufre (FeS_2 , CuFeS_2 Chalcopryrite, CaSO_4 gypse), des précipitations atmosphériques (régions industrielles) et des éruptions volcaniques (Kivu). Il se trouve aussi dans le sol sous forme organique ($\pm 60\%$).

Pertes de S du sol

Les pertes peuvent survenir de :

- Erosion
- Volatilisation (dans des conditions d'anaérobiose, la réduction de SO_4^{2-} par *Desulfovibrio* ou *Desulfotomaculum* produit $\text{H}_2\text{S} \rightarrow 8\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$

Circuit de S dans la nature

Dans la nature le soufre subit diverses transformations qui établissent le circuit ci-après :

	Forme	org.	dans	M.	org.
	Plantes			Désulfuration	
	microorganismes			(minéralisation)	

Désulforibrio/Désulfotomaculum

SO_4^{--}

S^{--}

Oxidation par
Thiobacilli/et les bactéries phototrophes

D'après Shlegel.

5.4.2. Les oligo-éléments

	Eléments	Formes d'absorption	Fonctions	Symptômes de carence
Les cations	Fe	Fe^{++} (chélates Fe)	Constituant d'enzymes de Redox participe à la phosphorylation, synthèse de chlorophylle	Chlorose des jeunes feuilles (teint blanc) (maïs)
	Mn	Mn^{++} (chélates)	Activation d'enzymes par couplement, constituant d'enzymes Redox, participe aux différentes synthèses	Chlorose des feuilles, celles-ci tourne au brun et il y a nécrose. Chez la pomme de terre et les légumineuses attaque des jeunes feuilles
	Zn	Zn^{++} (chélates)	Activation d'enzymes par couplement, stimule la formation d'auxine, réduction de N	Chlorose des jeunes feuilles (entre les nervures)
	Cu	Cu^{++} (chélates)	Constituant d'enzymes de Redox, participe à la photosynthèse	Chlorose des jeunes feuilles (sur le sol tourbeux). La carence est plus à craindre sur sol riche en matières organiques.
Les anions	Cl	Cl^-	Anion hydrophile, action sur les colloïdes (<u>gonflement</u>)	pratiquement pas de carence
	B	HBO_3^-	Constituant des esters d'hydrates de carbone régularise l'action d'auxines, action sur colloïdes (<u>dégonflement</u>)	- Chlorose et nécrose des jeunes feuilles. - les bourgeons terminaux meurent et les entre-noeuds des pousses sont très courts près des extrémités. - Tâches ou pourriture du bourgeon terminal, surtout plantes-racines - fruits petits, mal formés+ noeuds subéreux
	Mo	MoO_4^-	Constituant d'enzymes (nitraréductases, phosphates)	Chloroses et déformation des jeunes feuilles

5.4.3. Types de carence et moment d'observation des symptômes

Notons d'abord qu'il y a carence lorsqu'un élément fait, suffisamment, défaut dans le milieu de culture au point de dérégler le métabolisme normal de la plante alors que tous les autres éléments nutritifs sont présents, en quantités suffisantes. Lorsque l'élément manque physiquement dans le milieu de croissance, on parle de carence primaire ou absolue et lorsque celui-ci y est présent, mais que son action est inhibée par le fait d'antagonisme par exemple, on parle de carence induite ou conditionnée.

Du fait qu'une carence finit toujours par dérégler tout le métabolisme de la plante, il est recommandé d'observer les symptômes spécifiques à l'élément déficient dans le premier stade de croissance de la plante.

La carence peut être induite par l'inassimilabilité des éléments due à la variation de pH. En effet, l'assimilabilité des oligo-éléments est surtout influencé par le pH du milieu de culture. L'induction par le Ca se fait, par son jeu sur le pH, soit en favorisant la formation des complexes insolubles, soit en changeant les cations de valence. Par exemple: A l'égard du Mn, lorsque le pH augmente, il y a diminution des ions H^+ du sol et il en résulte une oxydation du Mn^{2+} assimilable en Mn^{4+} inassimilable.

Les éléments Fe, Mn, Cu, Zn, B, leur assimilabilité diminue avec l'augmentation du pH, tandis que Mo, son assimilabilité augmente avec l'augmentation du pH. La carence peut aussi être due à l'antagonisme dû à un mauvais usage des engrais :

D'autres conditions peuvent aussi induire la carence :

- CO $\rightarrow$ se cristallise suite aux brûlis réguliers
- la carence en Mg peut être induite par le rapport K/Mg trop élevé (mauvais fumage)

Dans les conditions de la RDC où le fer est abondant dans les sols, la carence dont pourrait souffrir les plantes en cet élément peut être dû au fait qu'il s'y trouve sous forme colloïdale et non sous forme ionique assimilable (il en est de même pour le Mn). Un autre fait est d'ordre physiologique, le P et le Fe forment des complexes dans les racines, diminuant ainsi la mobilité du Fe dans la plante.

5.4.4. Les oligo-éléments et le Mg dans les sol congolais

Par observations des symptômes types de carence sur les animaux et les plantes de culture, ainsi que par des analyses des tissus végétaux des plantes de culture et fourragères, les sols congolais, dans les différentes Provinces, présentent des déficiences en oligo-éléments ainsi qu'en Mg. Les déficiences des sols en ces éléments s'étendent jusque dans les pays limitrophes.

Ces observations et analyses toutefois ne sont pas le résultat d'une étude systématique sur toute l'étendue du pays.

	Elément Province	Mg	B	Fe	Zn	Mo	Cu	Mn	Co
I	1. KATANGA	x					x		x
	2. KIVU	x	X	x		X	x	x	
	3. ORIENTALE	x		x	x		x	x	
	4. EQUATEUR	x		x					
	5. BANDUNDU	x		x			x		
	6. BAS-CONGO		X	x				x	x
	7. KASAI-OR.	x		x			x	x	x
	8. KASAI-OCC.	x		x				x	x
II	ANGOLA			x	x	X	x	x	
III	RWANDA	x		x			x		
IV	BURUNDI	x		x			x		
V	OUGANDA	x	X	x	x	X	x		

5.4.5. Causes de carences en RDC

Les causes de carences sont variées, mais, il y a notamment :

- * Fe et Mn → Formes colloïdales et cristallines
- * B → insuffisance dans les sols
- * Mg → rapport élevé K/Mg
- * Co → cristallisation suite aux brûlis réguliers

- * Mo → pH très bas

5.4.6. Organes manifestant des symptômes de carence

- Les carences en éléments minéraux provoquent des changements visuels chez les plantes qui sont plus ou moins caractéristiques pour chaque élément et pour un groupe de plantes plus ou moins semblables.

Mais, il faut noter, néanmoins, que l'excès d'un élément minéral peut aussi provoquer ces mêmes symptômes.

- Ces symptômes des carences apparaissent surtout sur les feuilles mais, aussi sur la tige et les racines (pointe apicale), sur les fleurs et sur les fruits.

- Dans la pratique, l'observation sur les racines n'est toujours pas possible. De même, l'observation sur les fleurs et les fruits est tardive pour pouvoir apporter une fumure de correction à temps. D'où, il est indispensable de détecter et maîtriser toute carence dès le jeune âge particulièrement pour les cultures annuelles. Pour les cultures pérennes, le moment devrait être choisi en fonction du cycle de production et de la nature du produit de récolte.

5.4.7. Apport des oligo-éléments

L'introduction d'une substance dans le sol ne suffit pas pour garantir la pénétration rapide dans la plante. En ce qui concerne les oligo-éléments, plus spécialement, pour obtenir un effet rapide, il est préférable de recourir à leur introduction directe dans la plante

même. A cet effet, différentes méthodes sont préconisées :

5.4.7.1. Méthodes d'apport des oligo-éléments :

- a) mise à découvert d'une racine intacte qu'on plonge dans un flacon renfermant la solution à faire absorber (concentration < 1 %) (arbres)
- b) badigeonnage des plaies sur la plante (arbres)
- c) injection dans le tronc (arbres fruitiers).

(Un forage est pratiqué à l'aide d'une tarière avec minimum de dégâts. La solution introduite diffuse progressivement, de bas en haut, au-dessus du point d'injection dans le sens de la circulation de la sève).

Deux points diamétralement opposés sont nécessaires pour assurer l'imprégnation de la totalité des tissus. La substance active peut également être introduite à l'état de gel ou de poudre.

N.B. : faible concentration pour éviter une action corrosive sur le cambium.

- d) injection par le pétiole d'une feuille sectionnée, coiffée d'un tube renfermant la solution.
- e) Trempage des racines dans une solution d'oligo-éléments avant repiquage. Un liant peut permettre la rétention d'une grande quantité.
- f) Pulvérisation sur les feuilles au cours de végétation.
- g) Imbibition des semences avant semis. Cette méthode peut permettre le conditionnement des semences à distribuer par ex.

Il faut signaler que toutes ces méthodes ne sont pas utilisables indifféremment pour différentes cultures. Les unes sont plus appropriées que les autres selon le cas.

5.4.8. Eléments stimulant le développement mais sans fonction physiologique spécifique

Il s'agit des éléments qui stimulent le développement de certaines espèces, mais dont les fonctions physiologiques spécifiques ne sont pas bien définies.

Par ex. : - Na Betterave, Céleri, Avoine (0,10 - 0,30 %) et les halophytes (Dattier plus ou moins 0,100 %)

- Al Théier (0,016 % - 0,020 %), les vieilles feuilles en contiennent plus. Autres plantes : 0,000001 - 0,00001 %.

- Fluor 0,16 - 0,20 %.

- F Sur pâturage les espèces (*Dalbergia saxatilis*) (Fabaceae), *Dichapetalum luga* et *Dichapetalum mombutense* (Dichapetalaceae), *Gloriosa superba* (Liliaceae) et *Mimosa invisa* (Mimosaceae) peuvent être dangereuses parce que leurs teneurs en fluor peut dépasser le seuil de tolérance qui est de 10 ppm. Le genre *Dichapetalum* peut atteindre des seuils variant entre 15,72 ppm (enga) et 18,81 (mombuteuse). Les organes les plus riches ici sont les feuilles (21,32 ppm) contre 6,36 ppm dans la tige et 4,43 ppm dans les racines. Les teneurs les plus élevées dans les feuilles : 21,32 ppm, tige 6,36 ppm, racine 4,43 ppm

- Si Graminée (0,50 %), confère aux organes de soutien la rigidité et rend certaines plantes résistantes contre le mildiou, la verse, ...

- Cl Chez la plupart de plantes, en tant que micro-élément, mais chez certaines, la concentration dépasse largement la limite des oligo-éléments (halophytes)

- Co en tant que constituant de la Vitamine B₁₂, le Co est un élément indispensable pour les microorganismes fixateurs de l'azote.

Les expériences ont montré qu'apporté en petite quantité, dans le milieu de culture, le cobalt augmente l'activité de Rhizobium. Chez le soja, l'apport du cobalt par imbibition des semences avant semis augmente considérablement le diamètre et le nombre de nodules ainsi que le nombre des nodules efficaces par rapport au témoin.

Tableau : Nombre. Coloration et diamètre des nodules (Soja, Variété: DERMAR 43)

Traitements	Nombre total des nodules	Nodules rouges, roses	Nodules blancs	Diamètre mm
1. NPK	11	4	7	5
2. NPK + Cl. él.	17	13	4	6
3. PK + Cl. él.	18	12	6	5
4. PK + Cl él. + Co (0,05 ppm)	24	17	7	6
5. PK + Cl. él. + Co (0,10 ppm)	26	16	8	8

Dans la pratique actuelle, il convient de signaler qu'en vue de prévenir certaines maladies de carence en minéraux chez l'homme et le bétail (goitre, tétanie, ...) il serait souhaitable d'inclure certains éléments (d'après les conditions spécifiques de chaque région) dans les engrais chimiques du commerce. D'où la nécessité de disposer de sa propre industrie d'engrais (nationale ou multinationale, dans le cas de l'intégration économique régionale).

5.4.9. Eléments toxiques aux consommateurs

A l'inverse des éléments nécessaires et indispensables au métabolisme des végétaux, il faut éviter l'accumulation de certains éléments minéraux dans les produits de récolte, particulièrement ceux destinés à la consommation humaine et du bétail. Il s'agit particulièrement des métaux lourds :

Cadmium chez l'homme et l'animal → s'accumule dans le foie et les reins qu'il endommage, détruit les érythrocytes, endommage les testicules et provoque l'augmentation de la tension artérielle. Dans le foie et reins → dans foie, seulement 1/10 de la teneur dans les reins. Cd → bloque beaucoup de systèmes enzymatiques.

Hg : provoque la maladie de Minamata (Japon). Le Hg dans produits d'origine animale → sous forme de méthyle de Hg → plus toxique que le Hg métallique qui n'est que peu toxique, s'il est pris par la voie orale, à cause de sa faible résorption.

L'inhalation par contre est très toxique ! → attaque le système nerveux central → hautes teneurs dans reins, foie, sang et cheveux (pour analyse).

Pb : (abords des routes), il provoque le saturnisme.

5.4.10. Perte des éléments minéraux de la plante

La plante peut, dans certaines conditions, perdre une partie des éléments déjà absorbés. Ces pertes, dues à l'effet des eaux de pluies, peuvent survenir particulièrement dans les organes aériens, surtout au moment de la floraison ou de la maturation. Elles seraient dues soit à un excès inutilisé dans le cas de consommation de luxe, soit à une diminution de vitalité de la plante.

Un séjour prolongé, en cas de diminution de vitalité de la plante, sous les pluies pourrait affecter le coefficient d'assimilabilité de certains éléments

Le coefficient d'assimilabilité est le taux (en %) de l'élément assimilable dans le sol absorbé par la plante.

6. LES ENGRAIS

6.1. Les engrais simples et composés

6.1.1. Définition

Un engrais est une substance destinée à fournir à la plante un ou plusieurs éléments minéraux nécessaires à son métabolisme normal qui soit manquent au sol, soit y sont en quantité insuffisante ou soit encore sont sous formes inassimilables.

6.1.2. La valeur d'un engrais

La valeur fertilisante d'un engrais s'exprime par la teneur de l'élément ou des éléments fertilisants qu'il est chargé d'apporter.

Il s'agit pour :

- l'azote, de sa teneur en élément pur N
- le phosphore, de la teneur en anhydride phosphorique P_2O_5/P
- le potassium, de la teneur en oxyde de potassium K_2O
- les autres éléments :
 CaO pour le calcium
 Mg O pour le magnésium
 S pour le soufre.

Depuis un certain temps la tendance actuelle, recommandée par la FAO est d'exprimer pour les différents éléments, leur teneur en éléments purs, N, P, K, Mg, Ca, S, ... Pour déterminer la teneur d'un élément nutritif dans un engrais, il suffit de procéder au calcul suivant :

$$\% \text{ de l'Élément nutritif} = \frac{\text{Qté de l'Élément dans l'Échantillon}}{\text{poids total de l'Échantillon}} \times 100$$

La connaissance de la composition centésimale de l'engrais est nécessaire pour pouvoir déterminer les quantités à appliquer sur une superficie donnée.

6.1.3. Classes des engrais

Les engrais appartiennent à deux classes (ou catégories) :

- a) les engrais simples n'apportant qu'un seul des 3 éléments NPK
- b) les engrais composés apportant, au moins, deux de ces 3 éléments.

Selon le procédé de fabrication, les engrais peuvent être produits sous différentes formes physiques et dimensions: gazeux, liquide, solide, des particules de différentes dimensions granules, cristaux, pastilles, poudres grossières ou fines. Un engrais de bonne qualité devrait avoir des particules d'un calibre uniforme et ne pas s'agglomérer.

6.2. Les engrais simples

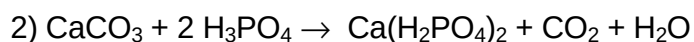
NOM	FORMULE	% N	AUTRES ELEMENTS, %	ACTION ET CARACTERISTIQUES
Ammoniac	NH_3	82	-	Gaz et tendance à se volatiliser, d'où l'application en profondeur
Sulfate d'ammoniaque	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	24 % N	Action progressive et soutenue, il est retenu dans le sol (argile et humus) et est transformé progressivement (nitrification) en azote nitrique. Sel physiologiquement acide
Nitrate de soude ou Salpêtre de Chili	NaNO_3	16	26 % Na	Action rapide (entièrement soluble dans l'eau) Engrais d'origine naturelle, contient Iode et Bore. Mauvaise action de Na : peptisant !
Nitrate de chaux (Ammoniacal)	$(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ $(\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ 7\%})$	16	20 % Ca	Action rapide, très hygroscopique. Physiologiquement basique
Sulfonitrate d'ammoniaque	NH_4NO_3 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	26	15 % S $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $\text{CaSO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3$	Sel double avec action combinée : rapide et progressive, physiologiquement acide.
Nitrate d'ammonium	$\text{NH}_4\text{NO}_3(65\%) + \text{CaCO}_3(35\%)$	23	15 % Ca	Hygroscopique. Le NH_4NO_3 pur est explosif ! (pas recommandable) !
Cyanamide de chaux	$\text{CaNCN}(60\%) + \text{Ca C, C}$	18-22	20 % CaO 15 % C	Action comme herbicide et comme fongicide. Poudre noire, (granulation = "perl-amide" facilement épandable. Physiologiquement basique. Action corrosive sur la peau. <u>Transformations</u> : $\text{CaHCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{NCN} + \text{CaO}$ (Cyanamide toxique)

				$\text{H}_2\text{NCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (urée) $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 - 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ La transformation jusqu'au stade de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ dure 8-14 jours: semis après cette période. La Cyanamide augmente la tension artérielle, pas d'alcool le jour d'épandage.
Urée	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46		Action rapide et progressive (soluble dans l'eau). Sel physiologiquement basique, en se transformant libère NH_3

P/NOM	FORMULE	% P_2O_5	AUTRES ELEMENTS, %	ACTION ET CARACTERISTIQUES
Apatite Uganda Transvaal origine volcanique	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ (X=F, Cl, OH, CO_3 ...) URSS (pres-qu'île de Kola)	30	Mg, Mn, Cl, Na, B et beaucoup d'autres micro-éléments	Action lente, mais n'a de valeur agricole que quand il est très fine-ment moulu. L'utilisation est recommandée avec la matière organique (Humo-phosphate) Phosphates de Tunisie, Algérie, Israël - + tendres (autres origines)
Super-phosphate simple de chaux)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4$ (30%)	18 9	Mg, Mn, Na, B,... (micro-éléments) CaSO_4 50% 12% S	Soluble dans l'eau (réagit vite dans les sols ferrallitiques!) Fixation rapide dans sol, surtout le superphosphate en poudre. Physiologiquement acide!
Super-phosphate triple	Produit de départ: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaCO_3	44- 47%	ne contient pas le CaSO_4	même chose que le super-phosphate simple

Réactions





Scories de déphospho-ration	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Ca_2SiO_4)	15 (12-24)	Cfr P naturel	Dans la purification de l'acier (C plus ou moins 0,2 - 2 %) on insuffle de l'oxygène dans la masse, les oxydes de Ca, si, P, Mg, Mn,..... sont éliminés puis moulus!
Phosphate Rhenania	CaNaPO_4 (Ca_2SiO_4)	29	Na = 12 % (néfaste pour le sol à la longue)	Obtenu par la dégradation des phosphates minéraux (pour ne pas utiliser H_2SO_4 très coûteux). Phosphate + $\text{NaCO}_3 + \text{SiO}_2$ à plus ou moins 1200°C action basique
"Fertiphos" Phosphate bicalcique ou Phosphate précipité	2CaHPO_4	38-42	-	Réaction : neutre. Se dissout mieux en milieu acide. Fabrication : 1) - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaH}_4(\text{PO}_4)_2 + 2\text{CaCl}_2$ puis éliminer CaCl_2 - $\text{CaH}_4(\text{PO}_4)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CaHPO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ 2) - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow 3\text{Ca}_2\text{H}_2(\text{PO}_4)_2$

Les engrais potassiques

K/NOM	FORMULE	% K_2O	AUTRES ELEMENTS, %	ACTION ET CARACTERISTIQUES
Carnalite	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	12-15	Voir composition	Sels bruts moulus, contiennent beaucoup de Cl, Na (peptisants!!)
Kaïnite	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$			
Sylvinite	$\text{KCl} + \text{NaCl} + \text{CCaSO}_4$ (en proportions variables!)			

Pr. Lumpungu Kabamba

Chlorures de K : 1° 40 % 2° 50 % 3° 60 %	KCl KCl KCl	40 50 60	NaCl 20-30% NaCl 10-20% NaCl 1- 3%	Sels raffinés !
Sulfate de Potasse	K_2SO_4	50	18% S	Exempt de Cl, Na; utilisé en serres pour éviter une concentration saline trop élevée Recommandé pour les cultures sensibles au Cl (Tabac, houblon,...)
"Patent Kali"	$K_2SO_4.MgSO_4$	28	20% S, 5% Mg	Exempt de Cl. Peut être utilisé comme le sulfate de Potasse là où se fait sentir la carence en Mg

6.3. Les engrais composés

6.3.1. Définition

On appelle engrais composés les produits contenant, au moins, deux des trois éléments fertilisants de base NPK,

- soit dans un même sel, dont l'acide et la base sont tous deux éléments fertilisants
- soit dans deux ou plusieurs sels combinés chimiquement ou simplement mélangés.

6.3.2. Teneur en éléments fertilisants

La teneur en éléments fertilisants des engrais composés est donnée par une formule de 3 nombres représentant, dans l'ordre NPK, la quantité de chaque élément contenu dans 100 kg d'engrais solide ou 100 litres d'engrais liquide.

6.3.3. Différentes catégories d'engrais composés

6.3.3.1. Les engrais composés de mélange

Ce sont des engrais contenant 2 ou 3 éléments, obtenus par mélange mécanique

intime de constituants simples, sous forme solide, avec ou sans addition d'eau pour la granulation.

Suivant l'origine des matières azotées, on distingue des composés minéraux et des organo-minéraux lorsqu'on fait appel à des produits contenant de l'azote organique (guanos, tourteaux, ...).

Ces engrais de mélange peuvent être pulvérulents ou granulés. Ils peuvent être binaires (NP, NK, PK) ou ternaires (N P K).

6.3.3.2. Les engrais complexes ou de combinaison chimique

6.3.3.2.1. Les binaires N-P (solides)

- Les phosphates d'ammoniaque
 - phosphate monoammonique (pH 4,0)
 - phosphate diammonique (pH 6,5)
- Les superphosphates ammoniés.

Ils sont fabriqués en neutralisant un excès d'acide sulfurique par adjonction d'ammoniac lors de la fabrication des supers. On obtient ainsi un mélange de sulfate d'ammoniaque, de phosphate d'ammoniaque.

- Les nitrophosphates (ou phosphonitrates) = des complexes résultant de l'attaque des phosphates naturels à l'acide nitrique pur ou en mélange avec un autre acide, puis neutralisation par l'ammoniac.

- Les binaires liquides

Ce sont des solutions dans lesquelles l'azote provient des phosphates et polyphosphates d'ammoniaque, de l'urée ou du nitrate d'ammoniaque et l'acide phosphorique des phosphates et polyphosphates d'ammoniaque.

6.3.3.2.2. Les binaires N - K

- Le nitrate de potasse (KNO_3)

6.3.3.2.3. Les binaires P - K

Obtenus par mélange de sels de potasse avec un engrais phosphaté.

6.3.3.2.4. Les ternaires NPK

a) Les ternaires solides :

Le "mélange en vrac" ou bulk blending)

= Il s'agit d'un mélange mécanique d'engrais granulés simples ou binaires ayant, à peu près, la même densité et des granules de même grosseur, afin de limiter la séparation des constituants suivant leur densité et leur grosseur, en tas, au cours de transport et d'épandage.

b) Les ternaires liquides

Ce sont des solutions faites à partir de :

N : Urée, nitrate d'ammoniaque, phosphates d'ammoniaque.

P : Phosphate et polyphosphates d'ammoniaque.

K : Chlorure de potassium

N.B. : La présence de sels de potasse dans la solution en limite la concentration (formation de nitrate de potassium par réaction du Chlorure de K avec le nitrate d'ammoniaque qui réduit la solubilité).

Plus la proportion de potasse est forte dans le ternaire, plus faible sera sa concentration et plus élevée sera la température de cristallisation.

6.3.4. **Appréciation et choix d'un engrais composé**

Ici il faut tenir compte de 3 facteurs

1. Concentration
2. Equilibre
3. Forme chimique

a. Concentration de l'engrais = c'est la somme des unités N P K aux 100 kg.

Ex. : 30 unités ou 45 unités ...

10 - 10 - 10/15 - 15 - 15

En ce qui concerne la concentration, il faut noter que, les faibles dosages, moins

chers, sont, généralement, les moins avantageux quand on fait intervenir les frais de sacherie, de manutention et d'épandage.

b) L'équilibre (ou la proportion des éléments)

C'est la proportion des éléments N, P, K dans l'engrais. N étant considéré comme l'unité.

Ex : N P K = 10 - 10 - 15, l'équilibre est 1 : 1 : 1,5.

Quant à l'équilibre ou la proportion des éléments, il faut noter que les 3 éléments N P K, n'ont ni la même valeur marchande, ni la même action fertilisante.

Dire qu'un engrais contient 30 unités fertilisantes, sans préciser la proportion des éléments (N P K), ne signifie rien.

Un 10-10-10 et un 5-10-15 contiennent tous 30 unités fertilisantes.

Plus la formule sera riche en l'élément le plus cher, plus le prix du sac sera élevé; au contraire, en forçant sur les éléments les moins chers, il est possible de baisser le prix du sac, tout en gardant le même nombre d'unités fertilisantes aux 100 kg.

c. Forme chimique

La forme chimique sous laquelle se présentent les éléments fertilisants est un élément indispensable pour la prise de décision.

Le prix de l'unité fertilisante variant avec la forme chimique, il convient de considérer celle-ci. L'utilisation peut dépendre aussi de la forme chimique, notamment, en ce qui est de la solubilité de l'acide phosphorique qui est un des principaux éléments d'appréciation.

Pour permettre à l'utilisateur de prendre la décision en connaissance de cause, les sacs doivent porter des étiquettes portant tous les renseignements dont l'utilisateur a besoin pour se faire une opinion.

Ex.

Raison sociale du producteur
15 x 15 x 15
15 % de N
6,75 nitrique des nitrates de potasse e d'ammoniaque
6,75 ammoniacal du nitrate et du chlorure d'ammonium
1,50 ammoniacal du phosphate d'ammoniaque
15 % d'acide phosphorique
7,5 soluble à l'eau du phosphate d'ammoniaque
7,5 soluble au Citrate de phosphate de bicalcique
15 % Potasse
15 soluble à l'eau du nitrate de potasse

L'utilisateur devra faire le bilan des avantages et des inconvénients des engrais simples et composés en fonctions des conditions spécifiques de son exploitation pour faire son choix !

Notamment :

- rapidité plus grande du travail, gain de temps :
- économie de main-d'oeuvre, (pas nécessairement sur une exploitation familiale !), Economie de traction;
- Mélange mieux fait, plus homogène à l'usine; suppression des erreurs possibles lors du mélange à la ferme;
- Economie de sacherie, de transport
- Répartition uniforme des éléments nutritifs.

6.3.5. Conditions d'emploi des engrais composés

Elle découlent évidemment des conditions d'emploi de leurs constituants.

- Les binaires P - K ne posent pas de problème, puisque ces 2 éléments ont pratiquement les mêmes conditions d'emploi.

Ce sont, essentiellement, des engrais de fond (mise à disposition lente des éléments) à utiliser pendant la préparation du sol avant la culture, si l'acide phosphorique est sous une forme peu soluble. Ils sont enfouis par le labour ou apportés par épandage en couverture.

Pr. Lumpungu Kabamba

- Pour les binaires N P, N K ou des ternaires N P K, il faut tenir compte des exigences quelque peu différentes de ces 2 catégories d'éléments :

a) L'azote, élément très mobile dans le sol ne doit pas être fourni trop longtemps avant que la plante ne puisse l'absorber à cause des pertes par lixiviation.

b) L'acide phosphorique et le potasse, par contre, doivent être fournis assez longtemps à l'avance à cause de leur faible mobilité, ils peuvent être stockés sans risque d'entraînement. Pour concilier les deux exigences et assurer une meilleure distribution des éléments fertilisants dans le profil, on combinera efficacement :

- les apports de P-K en fumure de fond

- les éléments P-K solubles épandus en couverture en même temps que l'azote pour couvrir les besoins des racines superficielles.

Ainsi donc, on utilisera :

* les éléments peu mobiles → comme engrais de fond (libération lente des éléments fertilisants)

* les éléments mobiles → comme fumure d'appoint qui met rapidement à la disposition des plantes les éléments fertilisants.

* En cas de l'apparition d'une carence en cours de végétation, on appliquera une fumure de correction qui nécessite des méthodes plus appropriées et des produits bien solubles.

6.3.6. Les modes d'épandage

L'épandage dont l'objectif est d'apporter les engrais de façon telle que la plante puissent les absorber en temps opportun et en quantités voulues, ses modes dépendront de :

- la mobilité de l'engrais dans le sol

- la disposition du système racinaire

- la forme physique sous laquelle se présente l'engrais (gaz, solide, liquide).

Trois modes sont disponibles :

6.3.6.1. En couverture, c'est-à-dire l'engrais est épandu à la surface du sol, soit sur sol nu avant le semis, soit au cours de végétation (top dressing).

Ici les engrais liquide apportés sur la surface foliaire peuvent être absorbés directement par

les feuilles. Dans ce cas les concentrations des solutions ne doivent pas être trop élevées pour éviter la corrosion des tissus végétaux et l'apport des engrais ne devrait pas se faire par un temps pluvieux ni trop chaud.

Le top dressing des engrais solides, surtout poudreux, ne devrait pas se faire quand les feuilles sont encore humectées pour éviter la corrosion après évaporation de l'eau par temps chaud.

Irrigation → arrosage ou aspersion

6.3.6.2. Par enfouissement sur toute la surface du champ, à profondeur variable suivant l'époque et la culture (par labour après épandage en couverture ou par injection pour les engrais liquides et gazeux).

6.3.6.3. En localisation : il s'agit d'un placement à la surface ou enfouissement. Ici l'engrais n'est pas reparti dans toute la masse du sol, mais placé en certains endroits choisis pour en faciliter l'absorption par les racines. La méthode égoutte à goutte" est un cas particulier qu'il faut relever ici. Néanmoins, cette méthode de localisation présente des avantages et inconvénients qui méritent d'être relevés.

Avantages/Localisation

- Le contact plus de réduit à l'engrais avec le sol limite les phénomènes de fixation par le sol de l'acide phosphorique, (latosols)
- La localisation diminue la quantité des matières fertilisantes à épandre et utilisées par les mauvaises herbes.
- Elle facilite le démarrage de la végétation en fournissant à la jeune plante une alimentation abondante qui lui permet de prendre, facilement, le dessus (fumure "Starter") sur les mauvaises herbes.

Inconvénients

- La concentration de la solution du sol peut devenir trop élevée et causer des dommages lors de la germination.

Il faut utiliser des doses limitées et disposer l'engrais en bandes à quelques cm au-dessous de la graine et latéralement (voir figure).

Bonne localisation
d'engrais au semis

Mauvaise localisation

- Par chimiotropisme, les racines se développent avec plus d'intensité autour des plages d'engrais et n'exploitent ainsi qu'une zone réduite, ce qui peut entraîner une grande sensibilité à la sécheresse.
- L'emploi des engrais composés à une période trop précoce pour l'azote
- L'emploi de ce mêmes engrais à une période tardive pour l'acide phosphorique et la potasse (éléments peu mobiles), surtout pour les terres pauvres ne disposant pas de réserves!

6.4. Calcul de la dose d'engrais à appliquer

La quantité d'engrais à appliquer à l'hectare dépendra de la concentration de l'engrais disponible. Le calcul tiendra compte de la dose à épandre et de la teneur de l'élément (ou des éléments nutritifs) dans l'engrais.

Vous disposez de l'urée et de nitrate d' NH_4 (46 % N et 23 % N), on vous demande d'appliquer 60 kg N/ha, quelle quantité de l'un et de l'autre utiliserez-vous ?

$$\frac{\text{Dose kg/ha}}{\% \text{ Élément}} \cdot 100$$

$$: \frac{60 \text{ kg/ha} \times 100}{46} = 130,0 \text{ kg urée/ha}$$

$$\frac{\text{g/ha} \times 100}{23} = 260,8 \text{ kg } \text{NO}_3 \text{NH}_4 \text{/ha}$$

6.5. Calcul d'un mélange à rapport déterminé

Dans la préparation des mélanges, il faut éviter des erreurs pouvant conduire soit à des pertes d'éléments nutritifs, soit à la conglomération du mélange ou encore à la réduction de la solubilité du produit.

Quelques règles

- les engrais ammoniés ne devraient pas être mélangés avec des produits contenant du calcium qui conduirait à la libération de NH_3 .
- de même, les engrais phosphatés hydro-solubles ne sont pas à mélanger avec les produits contenant du Ca qui en réduirait la solubilité.
- les engrais hygroscopiques, à cause de leur tendance à s'agglomérer s'ils sont entreposés après mélange, ne peuvent être utilisés dans des mélanges que juste avant usage.

Pour déterminer les quantités à mélanger en vue d'obtenir un rapport prédéterminé α : β : γ des éléments (a, b, c) se trouvant dans les produits P_a , P_b et P_c dont les concentrations sont $a = p$ %, $b = q$ % et $c = r$ %, il faut appliquer la formule suivante en fixant à l'avance la quantité du produit P_a dans le mélange (100 kg p. ex.). On détermine le coefficient K :

$$K_{\text{quant}} = 100 \cdot \frac{P}{\alpha}$$

$$P_b = K \frac{\beta}{q}, P_c = K \frac{\gamma}{r} 15$$

Ex. un rapport 2: 1: 1 | Engrais

- urée	46 %
- super simple	18 %
- KCl	40 %

pour 100 kg d'urée :

$$K = 100 \cdot \frac{46}{2} 16 =$$

$$P = \left(100 \cdot \frac{46}{2}\right) \cdot \frac{1}{18} \quad K = \left(100 \cdot \frac{46}{2}\right) \cdot \frac{1}{40} 17$$

7. LES LOIS DE LA FUMURE (lois de la croissance végétale)

7.1. Les principes de base de la fertilisation

7.1.1. La loi de la restitution (nécessité mais insuffisance de la restitution)

Pour éviter l'épuisement du sol, il est nécessaire de lui restituer les éléments fertilisants enlevés par les récoltes. C'est une évidence; mais si la restitution des éléments exportés par les récoltes est nécessaire, elle n'est pas suffisante, car il faut aussi tenir compte des faits suivants :

- Les pertes par les eaux d'infiltration ! (insignifiantes pour P, faibles pour K, importantes pour N, Mg, S, Ca).
- Le sol peut être riche en certains éléments et très pauvre en d'autres. La fumure a justement pour but de corriger les défauts du sol et non d'aggraver les déséquilibres minéraux, ce qui ne manquerait pas de se produire si on estime les éléments du sol suivant le seul critère des exportations par les récoltes.
- La plante a des exigences spéciales en "période de pointe", qui ne correspondent pas à la composition finale des récoltes (exemple : acide phosphorique, au démarrage de la végétation).

7.1.2. La loi du minimum ou des facteurs limitants (Liebig).

"L'importance du rendement obtenu est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité, relativement, aux besoins des récoltes".

Actuellement il est plus exact de dire que "chaque facteur de production agit d'autant mieux que tous les facteurs sont plus près de leur optimum".

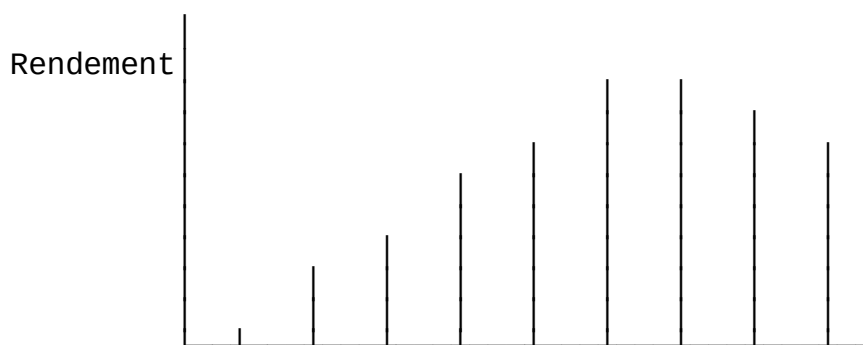
Cette loi ne s'applique pas aux seuls éléments minéraux, elle concerne tous les facteurs de rendement : facteurs génétiques, cultureaux (mauvaises herbes !), climatiques, ...

7.1.3. Loi des excédents moins que proportionnels (Mitscherlich)

"Quand on apporte des doses croissantes d'engrais, les augmentations de récolte obtenues sont de plus en plus faibles, au fur et à mesure que les doses s'élèvent. Autrement dit, il y a une limite à l'emploi des engrais, et d'une manière générale, à tous les facteurs de croissance.

C'est-à-dire, il arrive un moment où la dose supplémentaire d'engrais ne procure aucune augmentation de rendement : le rendement maximum théorique est atteint.

Mais, auparavant, on atteint un niveau de rendement où les suppléments de récolte obtenus ne font plus que couvrir la dépense d'engrais, la limite économique est atteinte.



N.B. : 1 > 2 > 3 > 4 ... pour chaque unité supplémentaire d'engrais apporté. Loi de Mitscherlich.

7.2. Rôle de la fumure

En résumé, la fumure minérale doit corriger les défauts du sol. Elle doit avant tout combler le déficit entre les besoins de la plante et les quantités d'éléments nutritifs livrées par le sol sur ses réserves. Une bonne fumure doit être "équilibrée" ou "équilibrante", c'est-à-dire qu'elle doit être à même de remédier aux déficiences du sol (de son pouvoir fixateur) afin que la plante trouve dans la solution du sol tous les éléments qui lui sont nécessaires en proportions convenables.

7.3. Détermination des besoins en éléments minéraux

Dans la pratique différentes méthodes sont utilisées pour évaluer l'état nutritionnel et établir les besoins de plantes en éléments minéraux :

1. le diagnostic des symptômes de carence sur la plante
2. l'analyse du sol (au laboratoire ou par des tests rapides)
3. les tests sur les tissus et le diagnostic foliaire
4. expérimentation en champ.

ad 1) l'identification exacte et l'interprétation des symptômes de carence est souvent problématique. Les symptômes des différents éléments peuvent se couvrir, varier avec les facteurs climatiques et parfois ressembler aux maladies parasitaires. Très souvent, les

symptômes de carence ne deviennent bien reconnaissables que par une carence prononcée, alors que déjà une carence latente peu influencer négativement sur le rendement et/ou sur la qualité des produits de récolte (arachide/huile).

ad 2) L'interprétation des résultats dans les pays en développement est tout aussi problématique à cause de manque d'expérience suffisante sur la diversité des sols et à cause du manque de corrélation entre les résultats d'analyses au laboratoire et des expérimentations en champ.

ad 3) Cette méthode se base sur le fait qu'une plante bien nourrie contiendrait chaque élément minéral au-delà d'un certain seuil minimum. Quoique les résultats peuvent être influencés par divers facteurs, tels que l'âge, la partie de la plante utilisée, ..., cette méthode donne des résultats plus ou moins fiables, surtout pour un certain type de cultures, et pérennes particulièrement (canne à sucre, agrumes, caféier, bananier, ananas, palmier à huile, ..., mais aussi pour certaines cultures annuelles (cotonnier, maïs, ...)

La méthode présente l'avantage d'être très rapide et pas très coûteux. Elle permet d'établir la déficience en cours de végétation, ce qui permet la correction de celle-ci en temps opportun.

L'analyse des tissus végétaux peut se faire aussi après récolte sur la matière sèche. Les résultats mis en rapport avec les rendements peuvent ainsi permettre d'établir des corrélations plus exactes que l'analyse rapide sur tissus frais.

La méthode présente l'avantage de pouvoir doser un plus grand nombre des éléments avec plus de précision.

ad 4) Cette méthode nécessite beaucoup de temps et de travail, mais elle donne des résultats fiables et valables au lieu d'expérimentation.

La diversité des sols et des climats limite cependant l'extrapolation des résultats d'une station expérimentale à d'autres régions. Elle a, néanmoins, l'avantage de :

1. faciliter la recherche des méthodes optimales d'épandage et les doses optimales pour

Pr. Lumpungu Kabamba

différentes cultures sous différents climats et sur différents sols;

2. permettre l'évaluation économique des résultats;

3. servir de démonstration pour la vulgarisation (photos pouvant être utilisées pendant plusieurs années).

Avec un grand nombre d'essais, il est possible d'établir des conseils généraux de fumure pour une région donnée. Mais les besoins en éléments nutritifs ne sauraient être déterminés une fois pour toutes, parce que les conditions se modifient rapidement dans le sol.

7.5. Rentabilité de l'emploi des engrais

Deux méthodes, parmi tant d'autres sont couramment utilisées pour le calcul de la rentabilité de l'emploi des engrais:

1° calcul du revenu net ou augmentation de revenu. $\text{Revenu net} = \text{valeur de l'augmentation du rendement (en espèce)} - \text{coût de l'engrais (en espèces)}$.

Un revenu net positif signifie que l'apport de l'engrais a été rentable.

2° le rapport valeur/coût (RVC) qui s'obtient en divisant la valeur de l'augmentation de production par le coût de l'engrais (V/C).

Si le rapport valeur/coût dépasse 1, l'engrais est rentable, mais la rentabilité est excellente lorsque RVC est égale à 3.