CATALIST

Catalyser l'Intensification Agricole Accélérée pour la Stabilité Sociale et Environnementale

Résoudre les Problèmes Agricoles Relatifs à l'Acidité du Sol dans la Région des Grands Lacs de l'Afrique Centrale

Un Rapport du Projet CATALIST

par T. W. Crawford, Jr., U. Singh, and H. Breman

Kigali - Rwanda, Octobre 2008

UN CENTRE INTERNATIONAL POUR LA FERTILITE DU SOL
ET LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE

ADRESSES

Le Siège

P.O. Box 2040
Muscle Shoals, Alabama 35662, USA
Tél:+ 1 (256) 381-6600
E-mail: general@ifdc.org
Site Internet: www.ifdc.org

IFDC Burundi

Rohero II - Avenue Bweru n° 3
B.P. 1995 Bujumbura
Tél : +257 22 25 78 75
E-mail : ifdcburundi@ifdc.org

IFDC Rwanda

Rue de l'Akanyaru n°3064
Kiyovu
B.P. 6758 Kigali
Téléphone +250 (0) 255 10 42 11
E-mail : ifdcrwanda@ifdc.org

IFDC Kivu
République Démocratique du Congo

Avenue Basila n°200
Rue du Musée
Q. Himbi-Goma
Province Nord Kivu
Tél : +243 811 821 661
E-mail : ifdcrdc@ifdc.org

Table des Matières

UN CENTRE INTERNATIONAL POUR LA FERTILITE DU SOL 2
ET LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE 2
ADRESSES 2
Table des Matières iii
Sigles et Abréviations v
Remerciements 7
I. Introduction 8
II. L'Acidité du Sol 9
II.1. Information de Base sur le Sol et l'Acidité du Sol 9
II.2. Les Sols Tropicaux par rapport aux Sols Tempérés 13
II.3. Problèmes de Nutrition des Plantes dans les Sols Acides 14
II.4. Disponibilité des Eléments Nutritifs comme une Fonction du pH du Sol 16
III. L'Ampleur de l'Acidité du Sol et la Gestion des Sols Acides dans la Région Africaine des Grands Lacs 17
III.1. Au Burundi 18
III.2. En République Démocratique du Congo 19
III.3. Au Rwanda 19
III.4. En Tanzanie 20
III.5. En Ouganda 20
IV. Diagnostic de l'Acidité du Sol et de la Toxicité en Al 21
IV.1. Comment Echantillonner et Tester le Sol 21
IV.2. Comment Déterminer le pH du Sol 21
IV.3. Comment Déterminer la Toxicité en Al 22
V. Correction de la Toxicité en Al et de l'Acidité du Sol. 22
V.1. Matières pour Corriger la Toxicité en Al et l'Acidité du Sol 22
V.2. Propriétés Chimiques et Physiques des Echantillons de Chaux et de Travertin. 27
V.3. Corriger la Toxicité en Al 31
VI. Comment Calculer les Taux de Chaulage pour le Calcite ($CaCO_3$), l'Oxyde de Calcium (CaO) et de la Chaux Agricole Rwandaise 34
VI.1. Comparaison des BC en Utilisant les Trois Formules 34
VI.2. Utilisation de l'Equivalent du Carbonate de Calcium (ECC) 35
VI.3. Comment calculer le BC, en tenant compte du facteur de finesse 36
VI.4. Autres Questions Pratiques 38
VII. Vivre Avec les Sols Acides. 40
VII.1. Nutrition des Plantes 40
VII.2. Cultures et Variétés Tolérantes 42
VII.3. Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols 47
VIII. Impressions Préliminaires sur la Faisabilité Financière de la Correction de la Toxicité en Al 60
VIII.1. Estimer les Bénéfices de la Correction de la Toxicité en Al 60
VIII.2. Coût Préliminaire: Estimations des Bénéfices 66
VIII.3. Conclusion 70

IX. Recommandations Pratiques pour les Gouvernements et les Bailleurs, les Agriculteurs et leurs Encadreurs. 71
IX.1. Recommandations pour les Gouvernements et les Bailleurs 71
IX.2. Recommandations pour les Agriculteurs et leurs Encadreurs 72
Appendice A. Cartes 73
Appendice B. Tableaux Comparant les Caractéristiques Physiques et Chimiques des Echantillons de Chaux et de Travertin Rwandais Obtenus en 2007 85
Appendice C. Les Calendriers Culturaux du Rwanda, de la Tanzanie et de l'Ouganda 100
Appendice D. Revue de la Littérature sur l'Acidité du Sol et les Sols Acides 103
Appendice E. Bibliographie 117

Sigles et Abréviations

Al	Aluminium
BC	Besoin(s) en chaux
C	Carbone spécial
Ca	Calcium
$Ca(OH)_2$	Hydroxide de calcium
$CaCO_3$	Carbonate de calcium, calcite ou calcaire calcitique
$CaMg(CO_3)_2$	Carbonate de calcium-magnesium ou calcaire dolomitique/dolomite
CAN	Nitrate de calcium ammonium
CaO	Oxide de calcium
CATALIST	Catalyser l'Intensification Agricole Accélérée pour la Stabilite Sociale et Environnementale
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CECE	Capacité d'Echange Cationique Effective
CO_2	Dioxide de carbone
DAP	Phosphate de diammonium
DECC	Degré d'Effectivité du Carbonate de Calcium du matériel de chaulage (= ECC × FF)
DESA	Degré Exigé pour la Saturation en Al
ECC	Equivalent du carbonate de calcium
Fe	Fer
FF	Facteur de Finesse
GIAS	Gestion Intégrée de l'Acidité des Sols
GIFS	Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols
H	Hydrogène
H_2O	Eau
HCO	Bicarbonate
ICRAF	International Center for Research in Agroforestry
IITA	Institut International d'Agriculture Tropicale
ISAR	Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda
K	Potassium
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
MO	Matière Organique
MOS	Matière Organique du Sol
N	Azote
NUANCES	Nutrient Use in Animal and Cropping Systems—Efficiency and Scales
O	Oxygène
OH^-	Hydroxyde
ONG	Organisations Non Gouvernementales
P	Phosphore
PN	Phosphate Naturel
RDC	République Démocratique du Congo
RGLAC	Région des Grands Lacs de l'Afrique Centrale

RVC	Rapport Valeur/Coût
S	Soufre
SCA	Saturation Critique en Al
SO_2	Dioxyde de Soufre
TSP	Triple Superphosphate
UBT	Unité(s) de Bétail Tropical
WARDA	Centre Ouest-Africain de Développement Rizicole

Remerciements

Ce rapport est le produit des contributions de beaucoup de membres du personnel d'IFDC, des conseillers extérieurs et des scientifiques de l'Université Nationale du Rwanda et de l'Institut National des Statistiques du Rwanda. Leur assistance est hautement appréciée. Des contributions clé ont été apportées par Dr. B. Janssen et Peter de Willigen (Wageningen University and Research Center), Dr. P. van Asten (IITA, Kampala), et Prof. Dr. B. Delvaux (University of Louvain). Mme C. Bennett a fourni de l'assistance en localisant les références pour la revue de la littérature. Mme L. Mukamana a fourni les données sur le pH du sol (Appendice D) et les échantillons du matériel de chaulage, qui ont été analysés au siège de l'IFDC et décrits dans l'Appendice B. Elle a également fourni les données sur les effets du chaulage sur le rendement au Rwanda et Mr. Z. Nzohabonayo fit de même au Burundi. Dr. E. R. Austin et Mme W. Bible ont mené l'analyse physique et chimique des échantillons rwandais et burundais de chaux et travertin rapportés dans l'Appendice B. Dr. J. Sanabria a réalisé l'analyse statistique des propriétés chimiques et physiques des matières de chaulage. Mr. S. J. Van Kauwenbergh a fourni des observations concernant les propriétés chimiques des échantillons des matières de chaulage. Mlle. F. Rey de Castro a établi la plupart des cartes de l'Appendice B. Dr. Y. Camara a fourni d'importantes observations concernant les complexités des aspects économiques de l'utilisation des matières de chaulage dans la Région des Grands Lacs de l'Afrique. Au cours de la consultance à court terme du premier auteur au Rwanda, Dr. A. Lyambabaje l'a aidé en lui facilitant les contacts à l'Université Nationale du Rwanda et en lui donnant l'information au sujet des rapports sur la faisabilité de l'utilisation du travertin comme matière de chaulage. Dr. L. Munyakazi, Directeur Général de l'Institut National des Statistiques du Rwanda ainsi que le personnel de cet Institut ont fourni des données numériques des limites administratives actuelles au Rwanda. Dr. Jean-Jacques Mbonigaba a fourni l'information et les données nécessaires sur l'utilisation de la MO pour traiter les sols acides ainsi que les cartes des caractéristiques du sol et l'information écologique sur le Rwanda. Ms. Adrie Mukashema a été utile en fournissant l'information sur les changements induits par l'homme dans la fertilité des sols dans certaines parties du Rwanda et en facilitant les contacts à l'Université Nationale du Rwanda et à l'Institut National des Statistiques du Rwanda.

I. Introduction

IFDC, un Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement Agricole qui a son siège aux Etats-Unis, exécute actuellement un projet pour intensifier la production agricole dans la Région des Grands Lacs de l'Afrique Centrale (RGLAC). Le projet ***Catalyser l'Intensification Agricole Accélérée pour la Stabilité Sociale et Environnementale*** (CATALIST) est une activité régionale de 5 ans financée par le Gouvernement Néerlandais. Le projet a commencé en octobre 2006 et continuera jusqu'en septembre 2011. Le siège régional est situé à Kigali. En plus du Rwanda, le projet opérera principalement au Burundi et dans l'Est de la République Démocratique du Congo (RDC) ainsi que, dans une moindre mesure, en Ouganda et en Tanzanie. Le but ultime de CATALIST est de contribuer à la paix et à la stabilité environnementale à travers la production agricole intensifiée et durable ainsi que l'amélioration du commerce des produits. Le lien entre la paix et la productivité fait ressortir la conviction importante selon laquelle la condition sine qua non pour la stabilité régionale est la productivité accrue pour améliorer la sécurité alimentaire et les revenus du monde rural.

CATALIST se focalise sur les denrées de base plutôt que sur les produits de haute valeur car l'intensification de la production de base détient le plus grand impact potentiel sur la réduction de la pauvreté et le revenu accru du producteur.

La suite est partiellement basée sur un rapport d'une consultance de 2 semaines effectuée par T. W. Crawford, Jr., sur l'information additionnelle obtenue de la communication avec des experts (voir remerciements) ainsi que sur la littérature. L'information de base est présentée sur l'acidité du sol et la toxicité en Al, souvent inhérente, ainsi que sur le diagnostic et la correction de la toxicité en Al et de l'acidité du sol au moyen du chaulage. Le document traite aussi d'autres informations y relatives concernant la gestion du sol et des cultures, y compris les engrais. Il traite également des alternatives partielles pour le chaulage coûteux dans le chapitre VII : « Vivre avec les Sols Acides. »

A cause de la quasi-absence des données régionales concernant les effets de la suppression ou de la diminution de la toxicité en Al sur les rendements de cultures, seule une estimation approximative a été faite sur la faisabilité financière du chaulage dans différentes séries de conditions dans la RGLAC. L'avant dernier chapitre présente les résultats.

Les Appendices présentent (A)les termes de référence du travail du consultant, (B) plusieurs cartes, (C) l'information sur des sources rwandaises et burundaises de la chaux, (D) les calendriers de cultures au Rwanda, en Tanzanie et en Ouganda, (E) le survol de la littérature et (F) la bibliographie. Les cartes présentent la présence des sols acides en RGLAC sur fonds d'une carte générale des sols et climat (carte agro climatique) pour la région de CATALIST. F. Rey de Castro a fait la plupart de ces cartes sur base de l'information sur Internet, etc.

Le document a été écrit pour les agronomes des projets tel que CATALIST, les services et les organisations de recherche et de vulgarisation, les organisations d'agriculteurs, les organisations non gouvernementales (ONG),etc. Il se focalise sur les sols tropicaux qui diffèrent de façon significative des sols des régions tempérées concernant l'acidité du sol, la toxicité en Al et leur

correction (voir II.2). Les recommandations présentées au sujet des analyses et traitements du sol sont pour les agronomes indiqués ; pour le moment, les agriculteurs ne disposent pas encore de moyens pour les analyses (voir introduction de III) et la faisabilité financière pour corriger la toxicité en Al dans la plupart des pays de la RGLAC reste encore à prouver. Le rapport montrera que les gouvernements et les bailleurs devraient aider à assurer qu'une bonne qualité de chaux est disponible à des prix raisonnables (VIII)

Les agronomes devraient utiliser le document pour y tirer des recommandations pour les agriculteurs. Les projets, les services et les organisations devraient y tirer des recommandations pour ceux qui élaborent les politiques et pour les bailleurs afin d'améliorer la faisabilité financière de contrôler l'acidité et la toxicité en Al.

II. L'Acidité du Sol

II.1. Information de Base sur le Sol et l'Acidité du Sol

"Les aliments proviennent de la terre. La terre et ses eaux nous donnent la nourriture. La terre récompense richement les sages et les assidus mais elle punit inexorablement les ignorants et les paresseux. Ce partenariat entre la terre et l'agriculteur est la pierre angulaire de notre structure sociale complexe. » W. C. Lowermilk (Soil Improvement Committee, 1985)

Le sol, un medium de la croissance des cultures, est une substance naturelle complexe dérivée des roches et de la matière organique désintégrées et décomposées, qui fournit les éléments nutritifs essentiels et l'ancrage pour les plantes terrestres. L'information suivante sur l'acidité du sol provient principalement d'une publication pratique, *The Western Fertilizer Handbook* (Soil Improvement Committee, 1985). Parmi les 17 éléments nutritifs essentiels de plantes, seul le Carbone(C) est obtenu par la plante primordialement à partir de l'air avec la fixation du dioxyde de carbone dans la photosynthèse. Tous les 16 autres éléments nutritifs dont les plantes ont besoin en quantités adéquates pour compléter leur cycle de vie et atteindre leur plein potentiel génétique sont absorbés à travers les racines.

Les racines des cultures sont le point d'entrée des éléments nutritifs à partir du sol et l'absorption des éléments nutritifs par la plante à partir du sol est affectée par plusieurs caractéristiques du sol. Une caractéristique clé de l'environnement chimique des racines des plantes dans tous les sols est la réaction du sol, qui est mesurée comme pH. La valeur du pH est le logarithme négatif de l'activité de l'ion d'hydrogène (H) et est, par conséquent, également un indicateur des quantités relatives des ions H^+ et des ions d'hydroxyde (OH^-) dans la solution du sol (l'eau dans le sol). La somme des valeurs du pH et du p (OH) est égale à 14. Les valeurs du pH sont caractérisées comme acides, neutres ou alcalins sur une échelle de 0 à 14. Au milieu de l'échelle (7,0), le sol est neutre en réaction ; en dessous de 7,0, le sol est acide ; au dessus de 7,0, le sol est alcalin. Plus la valeur du pH est basse, plus le sol est acide et, inversement, plus la valeur du pH est élevée, plus le sol est alcalin. Puisque le pH est une fonction logarithmique, la différence entre une unité de pH et la suivante représente une augmentation ou diminution décuplée dans une relative acidité ou alcalinité. Par exemple, un sol avec le pH 4,0 est 100 fois plus acide qu'un sol avec le pH 6,0.

La réaction du sol est importante pour la croissance des plantes parce que (1) elle affecte la disponibilité des éléments nutritifs pour les racines ; (2) elle a un effet direct sur l'assimilation des éléments nutritifs par les racines ; (3) elle affecte la solubilité des substances toxiques tel que l'Al [1] ***;*** et (4) elle affecte les micro-organismes dans le sol. Comme conséquence de ces facteurs, (5) le développement des racines est influencé et il influence à son tour les facteurs (1) et (2) aussi bien que l'absorption d'eau, la croissance des plantes et leur développement. Entre pH 6,0 et 8,0, la plupart des éléments nutritifs des plantes sont solubles et sont disponibles sauf si le sol en a été « miné » en prenant lors de la récolte plus d'éléments nutritifs qu'on en retourne. La plupart des cultures agricoles montrent un développement optimal des racines et produisent bien dans la marge de pH 6,0–8,0 si tous les éléments nutritifs des plantes (y compris l'hydrogène et l'oxygène comme eau) sont disponibles dans le sol.

Il y a beaucoup de sources d'acidité du sol(Havlin et al., 2005): (1) la précipitation; (2) la matière organique du sol ; (3) la transformation et l'assimilation de éléments nutritifs; (4) le lessivage; (5) les minéraux argileux, oxydes d'aluminium (Al), les oxydes de fer (Fe), et la matière organique (MO); (6) l'hydrolyse d'Al et du Fe; (7) les sels solubles; (8) les engrais; et (9) d'autres effets à long terme. Les précipitations ou les pluies introduisent l'acidité dans les sols, parce que le dioxyde de carbone gazeux (CO_2) et l'eau (H_2O) dans la pluie réagissent pour former une solution d'environ pH 5,7. Le pH de l'eau de pluie peut varier selon les contributions à l'acidité des précipitations par les gaz tels que le dioxyde de soufre (SO_2), l'ammoniac (NH_3), et les oxydes gazeux d'azote (NO_x), tels que l'oxyde nitrique (NO) et l'oxyde nitreux (N_2O), produits d'industrialisation.

La matière organique du sol (MOS) est une source de CO_2; comme les micro-organismes dans le sol décomposent la MOS, le gaz libéré de la décomposition se combine avec l'eau dans le sol pour produire H^+ et le bicarbonate (HCO_3^-). Puisque le CO_2 produit par la décomposition des résidus organiques et par la respiration des racines est environ dix fois plus concentrée que le CO_2 atmosphérique au dessus de la surface du sol, l'acidité produit à partir du CO_2 du sol est plus grande que celle produite dans l'atmosphère. La MOS contient aussi des acides organiques et des groupes carboxyliques et phénoliques réactifs qui sont sources d'acidité (H^+). Dans des sols tourbeux, aussi bien que dans les sols minéraux avec un contenu de matière organique élevé, les acides organiques contribuent de façon significative à l'acidité du sol.

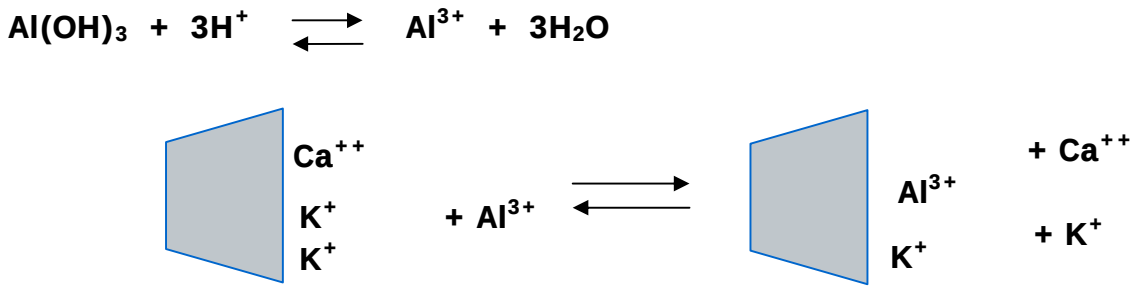
La transformation et l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes sont une source de l'acidité du sol. Puisque la plupart des plantes captent plus de cations que d'anions, H^+
est émis par les plantes et il en résulte un équilibre ionique, mais aussi une diminution en pH de la solution du sol. Une étude a montré que le pH de la solution du sol proche de la racine diminue de 7,5 à 5,5 quand les ions d'ammonium sont fournis comme source d'azote. Les ions hydroxyles sont émis par les racines des plantes quand les anions sont captés, et ainsi l'effet net de l'assimilation des

[1] La toxicité en Al, la toxicité en manganèse, ou les déficiences en nutriments qui sont communes dans les sols acides non traités peuvent sévèrement faire baisser le rendement des cultures même si l'engrais NPK est appliqué.

éléments nutritifs sur le pH du sol dépendra de plusieurs facteurs d'assimilation des éléments nutritifs des plantes à partir de la solution du sol[2]

Le lessivage, qui est un mouvement d'eau de haut en bas à travers le sol, poussent les cations et les anions vers le bas. La neutralité électrique (l'équilibre des charges positives et négatives dans la solution du sol) doit être maintenue, et donc si les cations tels que le sodium (Na^{+}), le potassium (K^{+}), le calcium (Ca^{+2}), et le magnésium (Mg^{+2}) se dirigent vers le bas à un taux plus élevé que les anions tels que le nitrate (NO_3^{-}), le chlorite (Cl^{-}) et le bicarbonate (HCO_3^{-}), le pH dans la zone de la racine diminuera, car une nette augmentation en H^{+} se produira, maintenant la neutralité électrique de la solution du sol.

Les minéraux argileux, oxydes d'Al et de Fe, et la MO sont tous des sources de H^{+} dans la solution du sol qui résulte de la dissociation du H^{+} de ces substances. Le tamponnage, ou la tendance à minimiser le changement du pH dans la solution du sol, est aussi fourni par ces substances, qui ont des groupes fonctionnels qui peuvent accepter et perdre H^{+}. Les sols avec une quantité élevée d'argile, de MOS, ou d'oxydes de Al ou de Fe ont une plus grande capacité de tamponner le pH du sol que les sols sablonneux ou des sols pauvres en MO. *Les hydrolyses de l'Al et du Fe* sont des sources de l'acidité du sol, car au fur et à mesure que le pH du sol diminue, l'hydroxyde d'aluminium [$Al(OH)_3$] réagit avec H^{+} dans une réaction réversible, qui apporte une large proportion croissante d'Al dans la solution du sol comme Al^{+3}, qui est toxique aux plantes. Il réduit la croissance et le développement des racines.



Les ions d'Al^{3+} solubles entrent en réaction d'échange avec les cations sur le complexe d'échange de cations du sol (CEC) (lié aux particules d'argile et de MO négativement chargés), en remplaçant les cations essentielles d'éléments nutritifs des plantes tels que Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^{+}, et les métaux à micro-éléments nutritifs cationiques comme le cuivre (Cu), le fer(Fe), et le zinc(Zn) du complexe d'échange cationique. Ceci résulte en une haute saturation en Al, une proportion plus élevée de sites d'échange occupés par Al.

La Figure 1 illustre la relation entre la saturation en Al du CEC et le pH du sol pour un sol au Burundi. Le graphique varie entre les sols et leur minéralogie, la teneur en Al, les niveaux de CEC, etc.

---

[2] On peut se demander pourquoi la croissance des plantes et la minéralisation des produits (matière organique, voir ci-dessus) causent l'acidification du sol. V.3 et VII.3 formulent une réponse partielle ; ils traitent aussi de « l'effet de chaulage » de l'MO. Voir aussi l'information sur le pouvoir tampon de la MOS

Les oxydes de Fe peuvent subir l'hydrolyse comme ceux d'Al, mais comme l'acidité du sol est tamponnée par les réactions de l'hydrolyse d'Al, Fe^{+3} ainsi que les hydroxydes solubles de Fe ne sont produits que lorsque la plupart de l'Al du sol a réagi. Les hydroxydes d'Al et de Fe apparaissent comme des colloïdes, des amorphes et des cristallines et ils couvrent les surfaces d'argiles et d'autres minéraux.

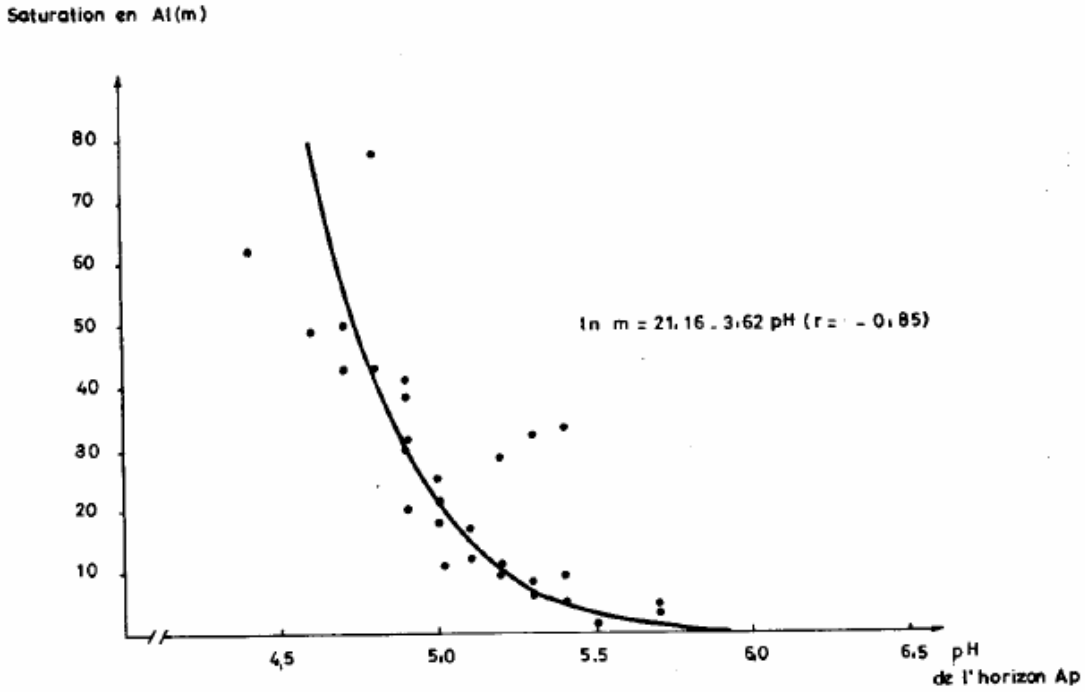


Figure 1. Relation entre la Saturation en Aluminium du CEC et le pH de l' Horizon Ap des Kaolisols Humides dans la Région de Mugamba au Burundi (Schalbroeck and Opedecamp, 1985)

Les *sels solubles* obtenus à partir de la dissolution des minéraux du sol, à partir de l'addition d'engrais ou de fumiers ou à partir de la décomposition de la MO peuvent résulter en une diminution du pH du sol avec la production du H^+. Les taux élevés d'engrais appliqués en bandes dans les sols avec un pH <5,0 peuvent résulter en un taux d'Al^{+3} soluble plus élevé, qui est toxique aux plantes, diminuant ainsi la croissance des plantes. *Les engrais* diffèrent dans leurs effets sur le pH du sol. Les engrais contenant l'azote (N) ou le soufre (S) peuvent diminuer le pH du sol lorsque le N ou S est oxydé par les micro-organismes du sol. L'équivalant du carbonate de calcium ($CaCO_3$) aux engrais contenant N ou S est le poids du $CaCO_3$ requis pour neutraliser l'acidité dans l'engrais. Mesuré du plus bas (moins acidifiant) au plus haut (plus acidifiant) équivalant de $CaCO_3$, les engrais suivants acidifient les sols: ammoniac d'anhydre (3,6 hg/kg), urée (3,6), nitrate d'ammonium (3,6), phosphate de diammonium (5,4), thiosulfate d'ammonium (5,4), sulfate d'ammonium (7,2), phosphate de monoammonium (7,2), et le soufre élémentaire (7,2) (Adams, 1984; VII.1.3). D'autre part, le nitrate d'ammonium de calcium (CAN) a un effet moins ou nullement acidifiant en fonction du nitrate d'ammonium : proportion de $CaCO_3$ dans le CAN. D'où

il peut être une source préférée de N dans des endroits où la chaux n'est pas disponible. *Les effets à long terme* de l'acidification du sol seront plus sévères sur des sols sablonneux, et généralement moins sévères, tous les autres facteurs étant égaux, sur des sols de texture moyenne. Des sols à texture lourde ont généralement une plus grande CEC (la capacité des solides dans le sol de se maintenir librement par des cations électrostatiques chargés en équilibre avec les cations dans la solution du sol), sont mieux tamponnés et souffriront moins des effets à long terme de l'acidification.

II.2. Les Sols Tropicaux par rapport aux Sols Tempérés

Une nuance significative relative à la fin du paragraphe précédent concerne la différence entre les sols des tropiques et ceux des régions tempérées. Dans les tropiques, le pH du sol est souvent plus bas que dans les régions tempérées. Parmi les cations adsorbés, l'Al prend une large proportion. A cause de ceci et de la présence des (hydr)oxydes d' Al et du Fe , la structure physique (stabilité) est bonne. Le plus important objectif du chaulage dans les tropiques est la mitigation de la toxicité aluminique. Lorsque le pH de l'eau est au dessus de 5,0–5,2, la concentration des ions d'Al dans le sol est suffisamment basse et les cultures ne sont pas (sérieusement) entravées par l'Al. Dans les tropiques, l'acidité du sol est surtout liée aux vieux sols, fortement altérés (pluviométrie > évapotranspiration), composés pour la plupart en dehors des oxydes et des hydroxydes d' Al et de Fe ; ceux-ci sont des sols rouges ou jaunes bruns avec une texture relativement élevée. Lorsque le pH des sols tempérés est accru par le chaulage jusqu'aux niveaux dépassant 6–6,5, la structure du sol s'améliore. Cependant, dans le cas des sols tropicaux avec des niveaux élevés d'oxydes d'Al et de Fe , le chaulage pour accroître le pH a de tels niveaux conduit à une dégradation de la structure et à une augmentation progressive de la possibilité d'être érodé; le $Al(OH)_3$ à solubilité lente est formé. Un second risque est la distorsion de l'équilibre des cations du sol (Mg, K, et NH_4 en particulier) à travers des quantités élevées de Ca. Même en essayant d'atteindre les niveaux de pH de 5,2–5,5, les risques existent pour les petits agriculteurs qui n'ont pas d'équipement pour mélanger la chaux de façon homogène dans les premiers 30 cm ou plus dans le sol; localement, le pH de la couche supérieure du sol peut atteindre des niveaux trop élevés et qui favorisent l'érosion du sol.

Le problème le plus sérieux des sols acides concerne la toxicité en Al (voir II.3); Al^{3+} devient soluble et occupe progressivement le CEC quand le pH descend. Ce fait et la particularité des sols tropicaux décrits en haut impliquent que dans les tropiques, il est plus sage de se focaliser sur l'application de la chaux pour la correction de la toxicité en Al au lieu d'essayer d'amener le pH du sol au point de la neutralité. C'est pourquoi ce document se focalise sur la diminution ou la suppression de la toxicité en Al.[3]

Une autre différence importante entre les sols des régions tempérées et des régions tropicales est la nature de la charge de la surface du sol. La source la plus commune de la charge de la surface sur les colloïdes du sol provient des imperfections dans la structure cristalline. Ces imperfections résultent en une charge négative permanente sur les colloïdes du sol, car les éléments d'une plus basse valence (charge) se substituent aux plus élevés (par ex. Al^{3+} pour Si^{4+} et Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+}). Les sols faiblement altérés des régions tempérées ont une charge de surface pareille—surtout

[3] Pour de fortes augmentations du pH, qui peuvent être requises sur des sols acides des régions tempérées, des guides disponibles devraient être utilisés. Les exemples sont *The Western Fertilizer Handbook* (Soil Improvement Committee, 1985) et *Nutrients in Soil Plant Relationships* (Janssen, 1999).

une charge négative fixée. Les sols avec les oxydes et les hydroxydes d'Al, Fe, Mn, Si, et Ti, et les kaolinites—communément sols des tropiques—peuvent avoir soit une charge de surface positive, soit une charge de surface négative, d'où une charge variable. Le signe et l'ampleur de la charge de surface sont déterminés seulement par l'ion adsorbé en excès sur la surface hydroxylée. Il est possible d'augmenter la capacité de rétention des cations (charge de surface négative) des sols variablement chargés par l'abaissement du pH au point zéro de charge nulle (pH_o). Au point zéro de la charge, le sol a une charge nette de zéro. Le pH peut être abaisse par l'application des silicates et des phosphates (option pour le phosphate naturel comme source de P et de l'amendement du sol). L'Al, d'autre part, a un effet contraire (Singh and Uehara, 1998).

$$\text{Charge de Surface}_{\text{variable}} = \text{Constante } (pH_o - pH)$$

Plus important encore, l'équation montre que le pH dans des sols à charge variable détermine l'ampleur de la charge nette ainsi que le signe.

Ainsi, l'augmentation de pH suite au chaulage résulte en une plus basse saturation en Al suite a la précipitation de $Al(OH)_3$ ainsi qu'une CEC plus élevé. Le pouvoir tampon du pH des sols variablement chargés augmente aussi exponentiellement suivant l'augmentation de la différence absolue entre pH_o et pH. Le pH_o de la plupart des sols variablement chargés se situe entre 4,8 et 5,5; ainsi, il n'est pas pratique (exigence de chaux excessive) d'élever le pH du sol au dessus de 5,5.

Un pourcentage important des sols de la RGLAC sont acides. Comme conséquence partielle, les déficiences en azote (N) et en phosphore (P) sont répandues tandis que les déficiences en potassium (K) et magnésium (Mg) sont aussi observées.

II.3. Problèmes de Nutrition des Plantes dans les Sols Acides

Les effets de l'acidité des sols, de l'acidification, ainsi que du chaulage peuvent être classés en trois principales catégories qui ne peuvent pas être toujours bien distinguées : la disponibilité des éléments nutritifs et des éléments toxiques, l'activité biologique[4] et la structure du sol. La première catégorie sera traitée ici.

La disponibilité des éléments nutritifs essentiels des plantes est affectée par le pH du sol. Dans les sols acides, il y a des problèmes de déficiences en éléments nutritifs des plantes et de toxicité de trois éléments (Al, Mn et H).[5] L'eau est essentielle pour la vie des plantes comme solution du sol parce qu'elle apporte tous les éléments nutritifs à travers un flux en masse et/ou une diffusion vers les racines. Le N, après H et O, est l'élément du sol le plus requis en grande quantité pour la croissance de la plante. Les plantes absorbent la plupart de N sous forme de nitrate (NO_3^-), mais elles absorbent aussi N sous forme d'ammonium (NH_4^+). Ce dernier est de préférence absorbé à un pH élevé (Adams, 1984). Le nitrate N peut être plus disponible que l'ammonium N, car NO_3^--N est mobile dans le sol et il peut se déplacer vers les racines de la plante avec l'eau du sol, puisque il est négativement chargé. L'ammonium N, d'autre part, est relativement immobile, étant attiré aux

[4] La micro et macro flore et faune du sol, la minéralisation du MOS, la nitrification, la fixation biologique de l'azote, etc. Les micro-organismes forment des agents de cimentation tels que les polysaccharides par lesquels les particules du sol sont liés les uns aux autres. Au fur et à mesure que le développement des racines s'accroît, il stimule encore plus la cohésion des particules du sol et il augmente la porosité et le contenu de la matière organique du sol.

[5] Fe est un quatrième élément toxique possible. Il peut jouer un rôle dans un environnement anaérobique de cultures irriguées.

surfaces négativement chargées de la CEC du sol. Dans le processus de nitrification, l'azote est converti par l'activité microbienne de l'ammonium N en nitrate N dans des réactions dépendantes de la température et du pH et catalysées par des micro-organismes. La marge optimale de l'oxydation de l'azote NH_4^+ au NO_3^- se situe entre 5 et 8 pH. Dans les sols acides en dessous de 5 pH, la nitrification est sévèrement réduite. Le résultat est que N dans le sol devient moins disponible aux plantes. A un pH du sol <5, la nitrification et la minéralisation (conversion du N de molécules organiques en formes inorganiques par l'activité microbienne) sont diminuées, rendant ainsi N moins disponible aux plantes. Le chaulage des sols avec un pH moins de 5 résulte en une activité microbienne hétérotrophique, aboutissant en une plus grande disponibilité des formes minérales de N (NH_4^+ et NO_3^-) pour l'assimilation par les plantes.

Sur des sols avec un bas pH (pH <5) qui contiennent de grandes quantités d'oxydes d'Al et de Fe, P (un élément nutritif essentiel qui se trouve dans des composés anioniques) est déficient dans la solution du sol parce qu'il est précipité avec ou adsorbé à la surface d' Al et de Fe comme des composés insolubles de Fe/Al-P, sur la surface des minéraux d'oxyde de Fe/Al. Le chaulage des sols pareils précipite Al comme $Al(OH)_3$ et Fe comme $Fe(OH)_3$ et élimine ainsi la toxicité en Al. Cependant, la disponibilité du P peut ne pas augmenter car $Al(OH)_3$ et $Fe(OH)_3$ peuvent aussi adsorber le P. Le chaulage augmente les charges négatives de surface des oxydes de minéraux de Fe/Al variablement chargés, qui aboutit à une réduction de l'adsorption de P. *(Note: La forme ionique du nutriment P dépend de la source du P; par ex., $H_2PO_4^{-1}$ se trouve dans les engrais de P solubles , HPO_4^{-2} dans le phosphate dicalcique, et PO_4^{-3} dans l' apatite).*

Plusieurs autres éléments nutritifs essentiels, qui sont présents dans les sol comme cations, sont déficients dans les sols acides avec un pH<5,0 et un faible pourcentage de saturation en base; le pourcentage de CEC qui est occupé avec Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^+, et Na^+ échangeables. Ils incluent le K, le Ca, le Mg, et la molybdène (Mo). La correction des déficiences en éléments nutritifs dans les sols acides peut être réalisée par plusieurs moyens: chaulage, addition de matière organique, et la fertilisation avec des engrais minéraux.

La croissance des plantes, et surtout la croissance des racines, dans les sols acides est retardée par les toxicités de Al, de manganèse (Mn), et de H^+. Le degré de toxicité dépend de l'élévation de la concentration de l'Al^{3+} soluble ou échangeable (y compris sa contribution à la saturation en CEC) et de la faible valeur de pH. Les toxicités d'Al et de Mn deviennent visibles dans la croissance de plante quand le pH est moins de 5,0. L'Al échangeable et les concentrations de Al et Mn dans la solution augmentent au fur et à mesure que le pH diminue. A un pH <4,0, la toxicité de H^+ a été observée. Les toxicités d'Al, Mn, et H^+ doivent être corrigées en enlevant Al (et Mn) de la CEC et de la solution du sol. Ceci implique une combinaison du remplacement de Al^{3+} occupant la CEC par Ca^{2+} (Mg^{2+}, K^+) et l'augmentation du pH du sol, conduisant à la précipitation et à la neutralisation de l'excès de H^+ par la formation d'eau. La sélection de cultures et de leurs variétés qui sont relativement tolérantes aux sols acides, telles que les pommes de terres, peut être utilisée pour produire sur des sols acides, où des cultures sensibles ne croîtront pas normalement. Les cultures et les variétés tolérantes à l'acidité peuvent tolérer des concentrations d'Al élevées et des concentrations plus basses d'éléments nutritifs essentiels plus que la plupart d'espèces de cultures ne le peuvent (voir VII.2). Elles réussissent à (plutôt) bien s'enraciner malgré l'acidité du sol, les rendant aussi plus tolérant à la sécheresse. Le développement des racines retardé, limité, et superficiel des cultures et variétés sensibles cause une sérieuse diminution de l'accessibilité à l'eau du sol (surtout pour les sous-sols acides).

II.4. Disponibilité des Eléments Nutritifs comme une Fonction du pH du Sol

Puisque plusieurs phénomènes chimiques et biologiques complexes dans les sols dépendent, d'une part, du pH du sol, la disponibilité des éléments nutritifs essentiels varie avec le pH du sol. La figure 2 représente un survol approximatif.

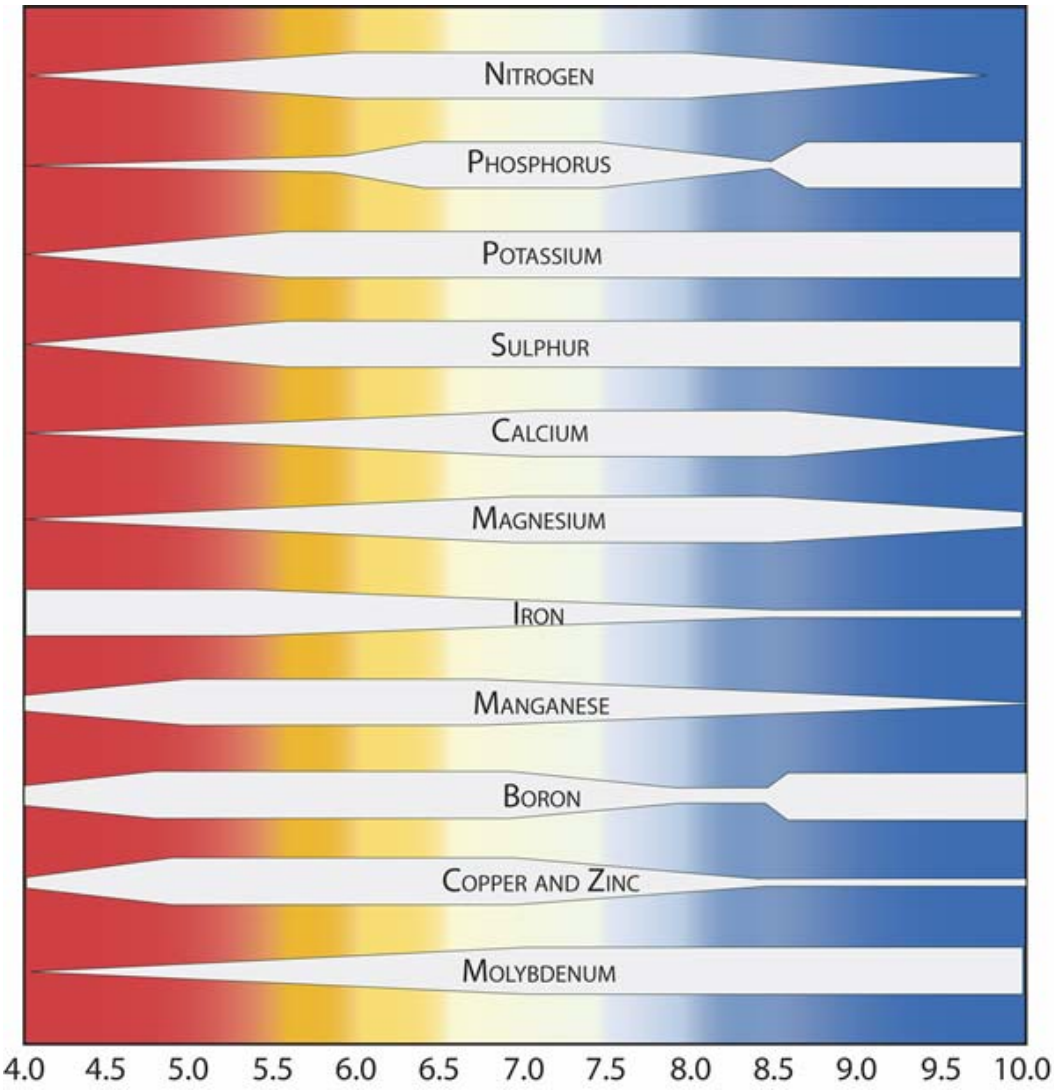


Figure 2. La Disponibilite des Elements nutritifs Essentiels varie selon le pH du Sol.

Source: National Sustainable Agriculture Information Service (http://attra.ncat.org/attra-pub/organic_soil.html

On observe une différence entre la disponibilité d'éléments nutritifs du sol et celle d'engrais en relation avec le pH du sol. Il est possible qu'une culture à un pH bas absorbera une plus grande fraction de, par exemple, N,P,et K provenant des dons d'engrais, que celle indiquée par

la figure 2 pour les valeurs du pH en dessous de 5. La croissance des cultures dépend, cependant, des éléments nutritifs des deux sources du sol et engrais et les dons d'engrais sont souvent loin d'être optimaux concernant le moment et la méthode d'application. En particulier, lorsque la toxicité en Al conduit à un mauvais développement des racines, la chance d'absorber assez d'éléments nutritifs (et l'eau, voir ci-dessus) pour une croissance maximale est limitée. Pour accroître la disponibilité des éléments nutritifs essentiels dans les sols acides, il est nécessaire de corriger la toxicité en Al en augmentant le pH du sol.

III. L'Ampleur de l'Acidité du Sol et la Gestion des Sols Acides dans la Région Africaine des Grands Lacs

Le projet CATALIST est en train d'être exécuté dans des régions sélectionnées au sein de la RGLAC. La première carte en appendice A montre les limites administratives du Rwanda, du Burundi, et des parties de la RDC, de la Tanzanie et de l'Ouganda où CATALIST exécutera le travail agronomique. La deuxième carte présente une impression globale de la présence de différentes classes de pH des sols acides, et la troisième concerne les principaux types de sol dans la région. Le pH généralisé associé à de larges zones de terre au Burundi, RDC, Rwanda, Tanzanie, et Ouganda est présenté par les cartes du pH du sol dans l'appendice B. Les cartes devraient être utilisées avec prudence ; une différence existe entre les sources des cartes et les méthodes utilisées et la précision des cartes. La comparaison entre la partie sud du Rwanda et la partie nord du Burundi montre clairement que quelque chose est faussé ; la frontière semble déterminer les changements de pH. Mais, par exemple, à l'ouest, le sol et le paysage ne changent pas de façon significative.

Même si les cartes de pH du sol dans l'appendice A présentent une étendue spatiale des sols des classes de pH, elles sont simplement des généralisations. Les classes de pH des unités de cartes graphiques décrites dans la légende de chaque carte sont des généralisations à résolution basse. A cause des différences locales au sein des sols d'une même classe de pH, les cartes ne sont pas adéquates pour déterminer si le pH du sol de n'importe quelle parcelle a réellement le pH de la classe indiquée sur la carte. L'échantillonnage du sol et le test du pH et de la toxicité en Al sont requis pour déterminer si l'acidité du sol est un problème et dans quelle mesure la toxicité en Al ou l'acidité du sol devrait être corrigée. Cependant, seuls des projets comme CATALIST peuvent réaliser ceci pour le moment. Dans la région, aucun système n'existe pour un échantillonnage régulier et général du sol ou pour mesurer la toxicité en Al et le pH. Il prendra du temps aussi pour convaincre les agriculteurs que dépenser de l'argent pour ces analyses vaut la peine. En plus, on ne sait pas encore si l'échantillonnage, les analyses et le chaulage devraient être promus, aussi longtemps que la faisabilité financière n'est pas connue (voir VIII).

En contradiction avec ces cartes qui ont une précision limitée, on peut s'attendre à ce qu'une forte corrélation existe entre l'acidité du sol et les zones agro-écologiques précises, qui sont des combinaisons du sol et du climat. Ceci sera un des instruments pour conseiller les agriculteurs qui n'ont pas accès aux systèmes d'échantillonnage et d'analyses du sol. L'instrument exploitera la connaissance et l'expérience obtenues pour des combinaisons similaires du sol et du climat.

L'information écrite sur l'acidité du sol au Burundi, au Rwanda, à l'Est de la RDC, à l'Ouest de la Tanzanie, et au Sud de l'Ouganda va suivre. Le Chapitre VIII explique quand et où promouvoir la correction de la toxicité en Al avec des intrants extérieurs tels que la chaux, et quand et où elle ne devrait pas être faite. Ces recommandations seront basées sur les premières impressions ci-haut mentionnées de la faisabilité financière pour utiliser de tels intrants et sur l'information écrite ; elles prendront en compte les facteurs tels que le type du sol, le climat, les cultures typiques et les

mauvaises herbes dans certaines régions, ainsi que la connaissance autochtone, l'expérience et le comportement des agriculteurs.

III.1. Au Burundi

Approximativement 1 million d'ha des 3 million d'ha de sols cultivés au Burundi sont acides (pH <5,0) ; ces sols acides requièrent un traitement pour augmenter les rendements des cultures (Ntiburumusi, 1989). Les sols de la région de Mugamba sont toxiques en Al et Mn et ils sont déficients en bases, en l'occurrence Ca^{+2}, Mg^{+2}, et K^{+}, et en micro- éléments nutritifs tels que Cu et Zn. La déficience en Fe est rare dans les sols acides à cause de la présence importante des oxydes de Fe. Les sols acides sont également déficients en P suite à son adsorption aux oxydes d'Al et de Fe ; certains sols acides sont pauvres en P total, mais pas tout juste en P disponible. La déficience en soufre (S) peut avoir lieu dans des sols sablonneux peu profonds avec un faible taux de MO.

Dans les zones la région de Mugamba, où les kaolisols acides et infertiles prédominent, le triticale fut trouvé plus tolérant à l'acidité du sol et à la toxicité en Al que ne l'était le blé. Le blé et le maïs sont cultivés dans une zone relativement froide et pluvieuse du Burundi située entre 1.400 et 2.200 m d'altitude ; ici, le plus important facteur limitant l'intensification agricole est l'acidité du sol. A cause de la pression humaine sur la terre, les pâturages sont transformés en champs, et le fumier devient moins disponible ; par conséquent un traitement de 4 t/ha de fumier et 2 t/ha de chaux a été testé. Dans ce traitement, le 2 t/ha de chaux vise à corriger partiellement la toxicité en Al.

Sur un Oxisol à Karuzi (1 600 m) au Burundi, le maïs et le haricot ont reçu de l'engrais adéquat et des applications de 3 et 6 t/ha d'arbustes émondés et de matière d'arbre ; le rendement accru a été attribué à l'amélioration de l'acidité du sol et à la saturation abaissée en Al de CEC. Ces taux d'addition semblent faisables dans des systèmes d'agroforesterie.

L'Al est toxique aux cultures, et la saturation en Al de beaucoup de sols au Burundi est un sérieux obstacle pour atteindre une croissance et des rendements accrus de cultures. Les chercheurs de la Faculté des Sciences Agronomiques à Bujumbura ont mené une recherche pour déterminer si les matières localement disponibles (c'est-à-dire le fumier, la chaux, et le phosphate naturel acidulé [PN]) pourraient être utilisées pour augmenter le rendement du maïs sur des sols fortement acides (pH 4,0). Le fumier et la chaux ont réduit la quantité de l'Al échangeable, et les sources du P soluble (superphosphate triple et simple) ont été remplaçables par le PN partiellement acidulé provenant des gisements de Matongo au Burundi (Rwigema et al., 1993).

Au Burundi, la chaux agricole commerciale ($CaCO_3$) est rare et chère—plus de US $100/t en 1999, [6] qui est environ un cinquième du revenu annuel de l'agriculteur local moyen (voir VIII pour des prix plus récents). Ceci nécessite l'utilisation d'autres matières localement disponibles pour améliorer l'acidité des Oxisols utilisés pour cultiver. (Van den Berghe and Hue, 1999). Les expériences faites avec le sorgho ont montré que l'application de la chaux du Verrundi a réduit l'Al échangeable, a augmenté la croissance des plantes et, en accroissant le pH, a augmenté le P disponible. L'application des composts a eu des résultats similaires ; les composts ont été plus efficaces pour corriger l'acidité du sol quand ils étaient frais et enrichis de certains éléments nutritifs lors du compostage. Un rendement équivalent de sorgho a été réalisé avec environ 20 t de compost par hectare, comparé avec le sorgho dans les sols acides traités avec $CaCO_3$ appliqué à un

[6] Le prix actuel est 160 $/t

taux de 0,6–1,7 t/ha. La plupart des agriculteurs ne seront pas capables d'être en mesure d'appliquer 20t/ha de compost, parce que les sources de compost sont limitées. L'exigence de main d'œuvre est aussi haute si on la compare à la main d'œuvre nécessaire pour appliquer environ 1 t/ha de chaux.

III.2. En République Démocratique du Congo

Le déficit chronique d'alimentation au Sud Kivu est dû à deux facteurs: (1) les sols sont épuisés (fertilité basse) et (2) il y a peu d'opportunités pour les membres des ménages ruraux de trouver de l'emploi (Failly, 2000). Il y a un souvenir encore vif des famines de 1920–1940 et 1945 dans cette partie de la RDC. La haute densité de la population a transformé la campagne en un patchwork de petites parcelles où les sols ne sont plus laissés en jachère. En plus, un système foncier féodal persiste et dicte la possession et l'utilisation de la terre. Dans un projet de développement intitulé Projet Kabare, pour environ 30 ans, l'étendue moyenne d'une parcelle de terre cultivée par famille était d'environ 0,86 ha (mode: 0,63 ha), et les parcelles de terre cultivées par les femmes étaient environ 40% plus petites que celles cultivées par les hommes. Sur 176 ménages, 80% partageaient 50% de la terre arable et 2% de ménages contrôlaient 16% de toute la terre cultivée. Le contrôle de la plus grande partie de la terre au sud Kivu est héréditaire, ce qui favorise le pouvoir coutumier des autorités « modernes » de l'Etat. Cette situation décourage la conservation du sol, encourage le travail manuel et résulte en une érosion sévère du sol. Le manque de disponibilité des engrais chimiques, de variétés améliorées et de produits pour la protection des cultures signifie que la seule méthode disponible à la plupart des agriculteurs au Sud Kivu pour améliorer les sols acides est l'utilisation de la MO. La toxicité en Al répandue des sols acides est un obstacle sérieux à la production accrue de cultures. Pendant plusieurs années, les populations de l'arrière-pays au Sud Kivu ont été capables de pallier leur déficit alimentaire en achetant des haricots dans la Vallée de Sake et le maïs dans le territoire de Lubero dans la partie sud du Nord Kivu. Cependant, les petits producteurs au Sud Kivu deviennent marginalisés, car la concentration du commerce se dirige de plus en plus vers peu de commerçants qui achètent de larges quantités et les apportent à Bukavu par le lac. Bukavu a commencé de dépendre de la nourriture produite sur l'île Idjwi et les régions de production agricole riveraines de Kalehe où le manioc et les bananes sont les cultures principales. Suite à la guerre civile, l'élevage a souffert; la viande du bétail et de la volaille a disparu des régimes alimentaires de la plupart des gens au Sud Kivu. La situation au Nord Kivu n'est pas très différente, la terre en friche a disparu et la surexploitation causée par la surpopulation et les droits fonciers ont limité la terre disponible pour les petits agriculteurs. La portion de terre au Nord Kivu qui a des sols acides est plus restreinte qu'au Sud Kivu, car la distribution de meilleurs sols est plus favorable (voir cartes en Appendice A).

Il y a plusieurs opportunités pour améliorer la gestion des sols acides au Sud Kivu. Les plus importants gisements de chaux se trouvent au Katana, au nord de Bukavu , et au Mushinga, au sud de Bukavu ; ces gisements de chaux ne sont pas utilisés pour l'agriculture mais ils sont utilisés principalement dans l'industrie de construction et pour la production de produits pharmaceutiques par Pharmakina. Au Nord Kivu, les dépôts de chaux sont à Kasugho, au sud-ouest de Lubero et à Katana.

III.3. Au Rwanda

On estime que les sols acides occupent deux tiers des sols cultivés du Rwanda ; des problèmes sérieux apparaissent sur environ la moitié de ces sols ayant le plus bas pH (Roose et al., 1988). L'efficacité de la culture en couloirs avec des arbustes légumineux sur des sols acides a été

objet d'investigation au Rwanda entre 1983 et 1989. Les augmentations des rendements du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) et du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) ont été très grandes avec *Cassia spectabilis*, mais celles du maïs (*Zea mays* L.) ont été faibles ; les rendements de patates douces (*Ipomoea batatas* [L.] Lam) ont été moindres avec les traitements de cultures en couloirs qu'avec le contrôle.

L'agroforesterie comme moyen de restaurer les sols acides en érosion a été examinée par des tests sur le Plateau Central (Station Rubona de l'ISAR près de Butare) et dans la savane à l'Est (Station Karama de l'ISAR) sur de basses altitudes. Pour atteindre une production plus élevée de maïs et de grains de haricot (2.300 kg/ha par an) et de grains de sorgho (1.500 kg/ha par an), il était nécessaire de corriger le pH (3 t/ha de chaux par 3 ans) et d'ajouter 3–10 t/ha de fumier par 2 ans et d'engrais(40–100 kg/ha de N par an, 30–80 kg/ha de P_2O_5 par an, et 20–200 kg/ha de K_2O, selon les besoins des plantes et les déficiences du sol). Les résultats montrent qu'à part le fumier, l'addition de chaux et d'engrais est nécessaire pour augmenter les rendements de façon significative sur les sols acides du Plateau Central et des basses terres du Rwanda. Combiné avec l'agroforesterie, l'érosion du sol devient aussi basse que dans le cas des végétations naturelles.

III.4. En Tanzanie

Sur base de l'analyse de systèmes de productions agricoles pour une période de 30 ans en Tanzanie, on prévoit que la productivité des sols de la Tanzanie va baisser sauf si les actions sont entreprises pour renverser plusieurs processus. Le principal facteur qui cause le déclin dans la productivité est la réduction de la disponibilité de éléments nutritifs par le minage et l'érosion des sols. Une édification de l'acidité du sol est aussi une menace pour la productivité agricole, surtout si des engrais fortement acidifiant sont utilisés. Il a été observé que l'application d'engrais a déjà contribué à l'acidification de certains sols en Tanzanie.

III.5. En Ouganda

Certains sols dans la Province Sud de l'Ouganda ont un pH de moins de 6,0 (voir cartes en appendice A). Certains, mais pas tous les sols des districts de Bushenyi, Kiruhura, Lyantonde, Mbarara, Rukungiri, Kanungu, Ntungamo, Kisoro, Kabale, Isingiro, et Rakai sont des sols acides qui ont besoin d'amélioration. De petites ressources calcaires sont situées prés de Ndorwa, Kitumba, Bubale, Kigata, et Kigararma (tous dans la proximité de Kabale) et Kisiizi, Rubabo, et Rwonye dans le District de Rukungiri.

En Ouganda, il a été montré que la disponibilité du P peut être accrue quand les sols acides sont chaulés, ce qui aboutit à des rendements supérieurs de haricots et de grains de coton. La proportion du Ca:K est important pour le coton, et la fertilisation par le K devrait être prise en considération lorsque le chaulage des sols est utilisé pour cultiver le coton, comme pour les sols ferralitiques en Ouganda.

La plus grande partie de l'information sur le sol discutée ci-haut pour la RGLAC a été obtenue dans les années 1980 et 1990. Au cours des 20 dernières années, les pressions de la population accrue ont conduit à l'intensification des cultures sans intrants ou avec des intrants inadéquats, aboutissant au minage d'éléments nutritifs du sol et à l'acidité accrue du sol. Ainsi, l'actuelle acidité du sol et les conditions de fertilité du sol sont pires qu'elles ne sont rapportées.

IV. Diagnostic de l'Acidité du Sol et de la Toxicité en Al

Les recommandations finales concernent la correction de la toxicité en Al, car la RGLAC est située dans les tropiques. Cependant, puisque la toxicité en Al est un dérivé de l'acidité du sol, les chapitres IV et V discuteront de l'acidité du sol à côté la toxicité en Al.

IV.1. Comment Echantillonner et Tester le Sol

Le sol doit être échantillonné dans différents endroits (trois à cinq) d'un champ, et les échantillons doivent être prélevés dans les premiers 30 cm. Une fois que les échantillons sont prélevés, ils doivent être mélangés ; un échantillon composite doit être analysé avec une «trousse de sol » ou envoyé à un laboratoire pour déterminer le pH (1:1 de la suspension sol:eau), la toxicité en Al et la saturation de la CEC par l'Al.

IV.2. Comment Déterminer le pH du Sol

Il y a plusieurs moyens de déterminer le pH du sol. Le tamponnement du pH est le plus souvent utilisé pour estimer la chaux nécessaire, et c'est une mesure pour connaître l'acidité du sol active et en réserve. Gavlak et al. (2003) décrivent quatre procédures de laboratoire et des calculs qui peuvent être utilisés pour recommander les taux d'application de la chaux. Ces méthodes sont :

1. **Besoin en Chaux par Tampon de pH SMP** — Des courbes de calibration standard sont établies pour le chaulage basé sur une valeur SMP pour un pH désiré pour des groupes de sol dans une zone géographique. La calibration locale de la méthode est désirable au cas où la méthode SMP serait être utilisée dans la RGLAC.

2. **Besoin en Chaux par Tampon de pH Woodruff** — La méthode Woodruff est mieux adaptée aux sols avec peu d'Al échangeable ayant de l'acidité associée aux applications d'azote ammoniacal.

3. **Besoin en Chaux par Tampon de pH Adams et Evans**— La méthode Adams et Evans peut détecter de petites différences dans le besoin de la chaux qui mènent à des changements larges en pH. La procédure peut généralement être reproduite avec une précision de 0,10 unités de pH.

4. **Besoin en Chaux par Tampon de pH Mehlich**— La méthode du tampon Mehlich est particulièrement bien adaptée pour déterminer le besoin de la chaux pour neutraliser des sols très acides.

Cependant, le plus simple 1:1 suspension sol: eau pour mesurer le pH est recommandé pour des projets, comme CATALIST, qui ne se focalisent pas sur la recherche. Malgré que cette méthode ne détermine que l'acidité active du sol et non l'acidité en réserve (Al^{3+} et H^{+} sur la CEC), elle mesure l'acidité de la solution du sol et peut être utilisé pour estimer le besoin en chaux. C'est une méthode simple et peu coûteuse pour estimer l'acidité du sol. Elle n'est pas aussi appropriée que les méthodes plus compliquées ci-dessus, mesurant le pouvoir tampon qui inclue l'acidité active et l'acidité en réserve, mais qui exigent un laboratoire chimique. Cependant, elle peut être utilisée

comme une base pour estimer le besoin de corriger l'acidité du sol et, avec des données et des calculs appropriés, comme une base pour estimer le besoin en chaux.

IV.3. Comment Déterminer la Toxicité en Al

L'acidité du sol limite l'assimilation des éléments nutritifs, la croissance des plantes à travers les ions d'Al^{3+}, Fe^{2+}, H^{+}, et Mn^{2+} solubles et échangeables (II.3) et par les déficiences de Ca, Mg, et P. Ce document se limite à l'acidité du sol comme tel (H^{+}) et à la toxicité en Al. Fe^{2+} ne reçoit pas l'attention, car Al^{3+} a une plus forte affinité pour la CEC. Quand la toxicité en Al est supprimée, la toxicité de Mn et Fe sera également traitée. Le riz irrigué sur des sols acides peut faire exception ; la toxicité en Fe peut y empêcher la croissance des plantes.

La toxicité en Al est causée par l'Al^{3+} échangeable (remplaçant d'autres cations sur la CEC) et l'Al^{3+} soluble qui est en équilibre avec l'Al^{3+} absorbé à la CEC. La somme totale est en rapport avec le degré de l'acidité du sol (concentration de H^{+}). Le degré de toxicité en Al est quantifié par l'extraction de Al^{3+} + H^{+} avec un sel neutre non tamponné. Un échantillon de sol doit être extrait avec du KCl de1M, et la quantité de Al^{3+} + H^{+} doit être déterminée par titrage. Dans les sols acides tropicaux, la plus grande partie de l'acidité du sol est attribuée à Al^{3+}**.** La procédure actuellement utilisée dans la plupart de laboratoires est l'absorption atomique, qui analysera seulement Al^{3+}, en négligeant H^{+}**.**

V. Correction de la Toxicité en Al et de l'Acidité du Sol.

Avant de traiter la correction de la toxicité en Al et de l'acidité du sol, les produits qui peuvent être utilisés pour la correction et leurs "efficiences en chaulage" relatives seront discutés (V.1). La variation dans l'efficience en chaulage des ressources de chaulage localement disponibles est montrée dans V.2, qui donne les résultats des analyses des échantillons obtenus principalement au Rwanda. Certains échantillons du Burundi sont également traités.

Malgré le fait que la RGLAC se situe dans les tropiques, la correction de l'acidité du sol sera traitée en combinaison avec la présentation des matières de chaulage, même avant de traiter la correction de la toxicité en Al (V.3). Ceci est fait parce qu'il est souvent plus facile et moins chère de mesurer le pH du sol que de mesurer la toxicité en Al dans la région. Ceci permet aux agronomes de formuler d'abord des recommandations approximatives. La toxicité en Al disparaît quand le pH du sol atteint 5,0–5,5. Les quantités de chaux requises pour augmenter un pH donné jusqu'au niveau de 5,2 pH sont présentées dans V.1 et V.3.3. Elles seront aussi utilisées pour estimer la limite supérieure des coûts de chaulage (VIII.2).

V.1. Matières pour Corriger la Toxicité en Al et l'Acidité du Sol

Les matières de chaulage ont un effet alcalin: l'anion est soit OH^{-}, soit CO_3^{2-}, soit SiO_4^{4-}. Ceux-ci sont les anions qui forment des combinaisons non dissociées ou difficilement dissociées avec H^{+} (en d'autres termes, les anions qui éliminent les protons). En fait, le cation n'intéresse pas pour l'augmentation[7] du pH. En pratique, le Ca est surtout le cation; il est quelquefois combiné avec Mg et dans peu de cas avec K. Plusieurs facteurs influencent l'efficacité de matières de chaulage pour

[7]Groupe Chaulage du COMIFER, 2000.

corriger la toxicité en Al et l'acidité du sol, et plusieurs matières peuvent être utilisées à cet effet. Les recommandations suivantes peuvent rendre capables le producteur agricole de choisir parmi des alternatives de gérer la toxicité en Al et l'acidité du sol d'une manière économique.

V.1.1. Comment Calculer le Besoin en Chaux pour le Calcite ou $CaCO_3$

Il y a plusieurs méthodes pour estimer le besoin en chaux. Yamoah et al. (1990) ont utilisé des analyses chimiques des sols et des modèles mathématiques pour estimer le besoin en chaux. Ils ont trouvé qu'il y avait un niveau très élevé de confiance en prévoyant le besoin en chaux comme une fonction linéaire de l'Al extractible (l'Al échangeable sur la CEC + l'Al soluble). Une telle méthode exige un laboratoire chimique ainsi que des réactifs et des procédures spéciaux pour déterminer l'Al extractible (V.3). On a trouvé qu'une relation moins claire existe entre le pH du sol et le besoin en chaux. En comparant leurs résultats avec ceux d'autres chercheurs, Yamoah et ses collègues ont trouvé que leurs méthodes, qui ont produit des équations de relation entre le besoin en chaux et soit l'Al échangeable soit le pH du sol, étaient semblables, mais, en moyenne, moins précises que les estimations de besoin en chaux par des méthodes plus compliquées d'autres chercheurs (IV.2). A cause de sa simplicité et du manque dans la région d'un échantillonnage de sols systématique et des pratiques d'analyses, il est suggéré que le pH du sol (sol:eau1:1) et une équation dérivée de celle que Yamoah et ses collègues ont établie devraient être utilisés dans la RGLAC. Ces derniers ont estimé le besoin en chaux pour corriger l'acidité du sol en utilisant 110 échantillons[8] du sol Rwandais et le modèle ACID4. Leur formule, **$Y = 16{,}988 - 2{,}727\ X$**, où Y = besoin de chaux en tonnes par hectare de $CaCO_3$ et X = pH d'eau, a deux faiblesses. Tout en acceptant le modèle ACID4, leur formule décrit une ligne droite où une forme en S devrait être plus logique (Figure 10 in Yamoah et al., 1990), et la formule calcule les besoins en chaux pour les corrections de pH jusqu'au niveau de 6,2 pH.

Il est proposé que pH (H_2O) 5,2–5,5 soit utilisé comme maximum (saturation en Al 0%–30%, rendant possible même aux cultures sensibles de croître sans problèmes sérieux). Ainsi, la formule a besoin d'être adapté aux recommandations de chaux augmentant le pH à un niveau de 5,2–5,5. La précision de la formule implique aussi que le pH anticipé aura une erreur d'au moins $\pm$ 0,2 unités. En conséquence, la recommandation de chaux calculée a une précision de $\pm$ 0,5 t/ha de chaux.

La formule de Yamoah et al. (1990) et la formule adaptée (voir V.3.3) déterminent le besoin en chaux (BC) afin de changer le pH pour les premiers 15 cm du sol. Les facteurs tels que la texture du sol et le pouvoir tampon du pH sont négligés. Par exemple, un sol sablonneux et un sol argileux avec un pH initial de 4,8 pH exigeraient la même quantité de chaux selon l'équation; les deux sols chaulés résulteraient en différentes valeurs de pH, le sol sablonneux chaulé ayant le pH de sol de loin plus élevé que le sol argileux chaulé.

Les "efficiences de chaulage" des matières traitées ci-dessous en V.1.2 et V.1.3 concernent la correction de l'acidité du sol et la toxicité en Al. L'effet de chaulage de la calcite pure, le $CaCO_3$, est utilisé comme standard et il est fixé à 100%. L'effet de chaulage d'autres matières est exprimé par rapport à ce standard, ou en l'Equivalent de Carbonate de Calcium (ECC). Les valeurs ECC

[8] Les échantillons du Plateau Central et des Hautes terres du Buberuka, aux altitudes de 1500 m à 2600m et une pluviométrie se situant entre 1100 mm et 1600 mm.

relatives sont inclues dans les descriptions des matières de chaulage ci –dessous (Havlin et al., 2005).

V.1.2. Matières Inorganiques pour le Chaulage.

L'oxyde de calcium est la seule matière à laquelle le terme « chaux » peut être appliqué correctement (Havlin et al., 2005), mais « chaux » et « chaulage » sont devenus des termes génériques. « Chaux » fait référence aux matières inorganiques qui peuvent être ajoutées aux sols acides pour augmenter la réaction (pH) du sol. Le « chaulage » est l'addition de matières inorganiques au sol pour augmenter le pH d'un sol acide. Les matières courantes de chaulage comprennent les oxydes de Ca et Mg, les hydroxydes, les carbonates, et les silicates. Le « Calcaire » est un terme générique qui fait référence au calcite et dolomite (voir ci-dessous). Le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et d'autres sels neutres ne peuvent pas neutraliser H^+, ainsi ils ne sont pas des matières de chaulage. En effet, les sels neutres tels que le gypse abaissent le pH du sol des sols acides, car le Ca^{+2} issu du gypse dissous peut déplacer le H^+du complexe de CEC, ainsi augmentant l'acidité active de la solution du sol et diminuant le pH du sol. L'application de gypse sur les sols tropicaux peut aussi résulter en une basse charge de surface et par conséquent en une basse CEC. L'efficacité des matières de chaulage sera exprimée comme ECC; certains utilisent, cependant, l'équivalent de l'oxyde de calcium (voir Tableau 1). Le phosphate naturel (PN) peut être utilisé comme matière de chaulage, parce que la dissolution du PN consomme des protons et l'adsorption du P résulte en une augmentation de la charge de surface et de la CEC. L'efficacité relative agronomique des sources de PN est aussi plus élevée dans les sols acides. En tenant compte de ce qui est ci-dessus et du bas statut du P dans les sols de la région, l'utilisation du PN comme un amendement et comme source du P devrait être explorée de façon plus poussée.

Oxyde de calcium

L'oxyde de calcium (CaO) est une poudre blanche faite en chauffant la calcite ($CaCO_3$) dans un four, éliminant ainsi le dioxyde de carbone (CO_2). Le CaO est la plus efficace de toutes les matières de chaulage, mais il est caustique et doit être transporté dans des sacs en papier. Le CaO pur a un équivalent de carbonate de calcium de 179% (ECC = 179%), comparé avec le pur $CaCO_3$ (ECC = 100%). L'oxyde de calcium est aussi connu comme chaux non éteinte, chaux brûlée ou chaux rapide. Au Rwanda, il est désavantageux d'utiliser CaO pour corriger l'acidité du sol pour plusieurs raisons (Beernaert, 1999).

Hydroxyde de Calcium

L'hydroxyde de calcium [$Ca(OH)_2$], aussi connu comme chaux éteinte, chaux hydratée ou ciment, est une poudre blanche qui est difficile à manier. L'hydroxyde de calcium neutralise rapidement l'acide. ECC = 136%.

Carbonates de Calcium et de Calcium-Magnésium

$CaCO_3$ ou calcite (le standard), et le carbonate de calcium-magnésium [$CaMg(CO_3)_2$] ou dolomite, sont aussi appelés calcaire calcique ou calcaire dolomitique. Ils sont groupés ensemble comme « calcaire ». Du point de vue de la nutrition des plantes, quand on utilise le calcaire pour corriger l'acidité du sol, il est important de savoir si c'est le calcite ou le dolomite, parce que le dolomite ajoute au sol à la fois le Ca et le Mg, tandis que le calcite ajoute seulement le Ca. Les dolomites se trouvent au Rwanda mais actuellement seul le calcaire calcique et le travertin sont exploités (voir ci-dessous). L'ECC du pur calcite est théoriquement 100% (le standard) ; l'ECC de dolomite pure est 100%; cependant, l'ECC de la plus grande partie de la chaux agricole, qui a des

impuretés, est 80%–95% ou moins. Une exploitation limitée de la dolomite se fait à Butare, en province Rutana, au Sud-Est du Burundi.

Marne

Les gisements mous, non consolidés du carbonate de calcium sont connus comme marne. Le marne est humide et souvent mélangé avec des impuretés. L'ECC = 70%–90%.

Silicates de Calcium

Les silicates de calcium se trouvent dans des scories de sous produits de fabrication de fer et sont trouvés dans certains gisements naturels. ECC = 86%.

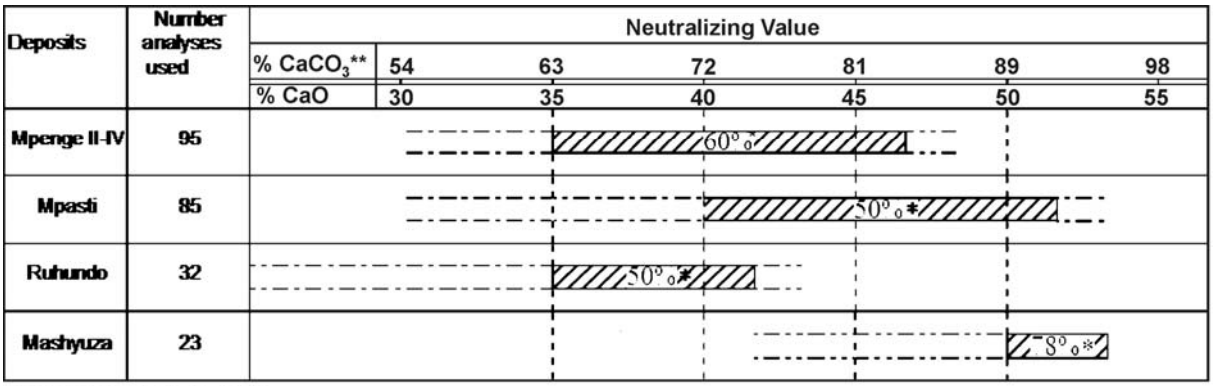
Travertin

Le Rwanda a plusieurs gisements de travertin, qui sont de récentes formations de l'Age Pléistocène. Ce sont des roches compactes, molles qui sont facilement extractibles, mais elles ont une proportion de Ca^{+2}/Mg^{+2} plus élevée que l'optimale de 4–5 (Beernaert, 1999). La fertilisation avec du Mg a été trouvée nécessaire quand les sols acides étaient récupérés en utilisant le travertin comme matière de chaulage au Rwanda. Puisque le Rwanda a des gisements de dolomite, Beernaert a recommandé que des mélanges de 65%–80% de travertin avec 35%–20% de dolomite soient utilisés pour neutraliser l'acidité du sol et pour fournir des quantités adéquates de Ca et Mg. Beernaert suggère que les roches volcaniques des Virunga aussi pourraient être utilisées avec le travertin, comme une alternative à la dolomite, pour neutraliser l'acidité du sol et fournir le Mg nécessaire pour la nutrition des plantes. Beernaert recommande que le travertin soit appliqué avec la dolomite ou les roches volcaniques plus les engrais contenant le P et le K, au lieu d'appliquer la roche volcanique seule. La composition chimique du travertin lui permet de neutraliser l'acidité dans les sols ; les travertins au Rwanda, tout en neutralisant le sol, sont apparemment des sources adéquats de Ca, mais ils sont des sources inadéquates de Mg, [9] pour la nutrition des plantes une fois que l'acidité du sol a été neutralisée. ECC = 52%–78%.

La capacité de neutralisation de certains travertins Rwandais, exprimée comme équivalence de CaO et $CaCO_3$, varie à la fois dans la mine et parmi les mines(Tableau 1).

[9] Lors du chaulage des sols et de l'utilisation du superphosphate, le Ca offert est fortement fixé par les oxydes de Al et Fe d'argiles tout en éliminant d'autres cations du CEC(K^+, Mg^{2+}, et NH_4^+). Ces derniers sont facilement perdus à travers le lessivage. Par conséquent, un chaulage limité avec la dolomite en combinaison avec le phosphate d'ammonium au lieu du superphosphate est recommandé pour des sols tropicaux fortement désagrégés.

Tableau 1. La Capacité de Neutralisation de Certains Travertins Rwandais, Exprimés comme CaO et $CaCO_3$



Source: SOFRECO, 1999

*Percentage of chemical analyses within the range of CaO content indicated 35 = minimum CaO content required by norms.
**$CaCO_3$ equivalent of CaO neutralizing values reported by SOFRECO, 1999, are based on neutralizing value of $CaCO_3$ = 100 and neutralizing value of CaO = 179 (Tisdale and Nelson, 1966).

**Légende du Tableau 1. ***Un taux de 35% CaO est considéré comme le taux minimal de CaO requis par les normes.
**Les valeurs neutralisantes de l'équivalent $CaCo_3$ de CaO rapportées par SOFRECO, 1999, sont basées sur la valeur neutralisante de $CaCo_3$ fixée à 100, ce qui fait que la valeur neutralisante de CaO=179 (Tisdale and Nelson, 1966).

Toutes les données du Tableau 1 indiquent que les travertins ont une valeur neutralisante moindre que celle du pur $CaCO_3$. Les valeurs de l'équivalent CaO, indiquées par Beernaert, sont calculées et n'indiquent pas qu'il y a du CaO dans les travertins énumérés dans le tableau. Les travertins peuvent être calcinés en les chauffant pour partiellement ou complètement éliminer le CO_2 du $CaCO_3$, qui est une composante des travertins[10]. La production du CaO en chauffant suffisamment le $CaCO_3$ pourrait accroître la capacité neutralisante des travertins par unité de poids.

V.1.3. Différentes Matières de Chaulage

Quelques-unes de nombreuses matières de chaulage variées comprennent la vase provenant des usines de traitement d'eau, de chaux ou de poussières/résidus des tubes de fabrication de ciment, de la chaux de pulpe, du carbure de calcium, conserverie de chaux, de chaux d'acétylène, de cendres volantes générées par les usines de fabrication de charbon et des cendres de bois[11]. Certaines de ces diverses matières de chaulage pourraient être utilisées pour corriger l'acidité de certains sols dans la RGLAC. Les cendres de bois ont un ECC de 40% à 80%. Puisque la biomasse compose 94% de toutes les sources d'énergie, les cendres ne sont pas négligeables comme matière de chaulage.

[10] Le Rwanda a des fours traditionnels qui continuent à fonctionner.
[11] Un avantage additionnel d'utiliser les cendres de bois est la contribution du charbon (restes) au CEC du sol (Glaser et al., 2002).

V.2. Propriétés Chimiques et Physiques des Echantillons de Chaux et de Travertin.

En 2007, 25 échantillons de chaux et de travertin Rwandais ont été collectés par le personnel de CATALIST au Rwanda et envoyés au siège de l'IFDC où ils ont été analysés concernant ce qui suit (la marge des valeurs entre parenthèses) :

- Taux d'humidité telle que reçue au laboratoire (0,3%–32,5%, sur base du poids sec)
- Facteur de finesse (telle que décrit dans la section ci-dessous sur le facteur de finesse, 28,4–97,7)
- ECC (59,7%–126% $CaCO_3$)
- Ca (24,3%–50,9%)
- Mg (0%–0,89%)
- Cu (0–8 ppm)
- Fe (6–1.800 ppm)
- Mn (0,003%–0,111%)
- Zn (6–38 ppm)

En 2008, 27 échantillons additionnels comprenant 3 du Burundi ont été collectés et analysés à IFDC avec les résultats suivants:

- Taux d'humidité (0,2%–20,4%)
- Facteur de finesse (28,4–97,0)
- ECC (73,8%–127% $CaCO_3$)
- Ca (19,9%–49,2%)
- Mg (0,2%–12,2%)

Les données sont présentées dans les tableaux en Appendice B. Le $CaCO_3$ de niveau réactif a été utilisé comme standard pour déterminer l'ECC, l'humidité et le facteur de finesse. Les données révèlent plusieurs facteurs qui devraient être prises en compte par les acheteurs de chaux ou travertin pour traiter les sols acides. Par exemple, la matière qui contient 20%–30% d'eau a moins de valeur neutralisante par unité de poids que si la matière était sèche. Tous les calculs des taux de chaulage ci-dessous sont sur base du poids sec. Les déterminations du facteur de finesse, l'ECC et les contenus de constituants chimiques de toutes les matières rapportées en Appendice B ont été faites sur la matière sèche obtenue en séchant dans une étuve après que les déterminations d'humidité ont été faites. Les prix de transport par ECC pour les matières de chaulage augmentent avec la diminution des valeurs d'ECC. Les matières avec un facteur de finesse élevé réagiront plus rapidement dans le sol et neutraliseront l'acidité du sol plus rapidement que les matières avec un facteur de finesse plus bas. La chaux ou le travertin peuvent être considérés aussi comme des sources d'éléments nutritifs essentiels des plantes, car ils contiennent les cations et ils se dissolvent dans le sol, en neutralisant l'acidité du sol. On s'attendrait à ce que le chaulage dégage de tels micros éléments nutritifs pour l'interaction avec la CEC du sol et pour l'assimilation par les plantes. Puisque c'est un nutriment de plante essentiel pour la croissance des plantes, la fertilisation avec le Mg serait requise quand l'acidité du sol est contrôlée par des matières de chaulage qui ne contiennent pas le Mg (en quantité suffisante). La fertilisation suivant l'application de la chaux et la neutralisation de l'acidité du sol devrait tenir en compte la capacité de la matière de chaulage de fournir les éléments nutritifs essentiels tels que ceux en Appendice B.

En observant les données en Appendice B, le géologue[12] de l'IFDC conclue que tous les échantillons avec plus de 40% de calcium ont été calcinés (brûlés) et probablement éteints (traités avec de l'eau après avoir été calcinés). Le $CaCO_3$ pur (calcaire) contient 40% de Ca et l'augmentation du contenu en Ca du calcaire nécessite l'élimination du carbone comme composés gazeux. Sur 25 matières de chaulage échantillonnées en 2007 (Appendice, Tableau C-2), celles qui ont été probablement calcinées (et peut-être éteintes) sont les Nos. 1, 2, 12, 13, 18, 19, 20, 22, et 23. Ces échantillons ont, comme prévu, un ECC > 100%. Sept échantillons additionnels (No. 5, 6, 8, 14, 21a, 24, et 25), qui ont un ECC relativement élevé, peuvent avoir été calcinés, mais il n'est pas possible de le déterminer avec les données de l'ECC seulement —même si le contenu Ca est < 40%.

Sur les 27 matières de chaulage échantillonnées en 2008, les échantillons suivants ont été probablement calcinés: No. 12, 13, 18, 19, 20, 22, et 23. En plus, les échantillons suivants de 2008 avec un ECC de 90% peuvent avoir été calcinés : No. 8, 14, 21a, 21b, 21c, 24, 25, et 26. Les échantillons qui ont été collectés des mêmes sources en 2007 et 2008 ont donné des résultats similaires dans les deux ans. Les trois échantillons du Burundi collectés en 2008 sont la dolomite contenant à la fois $CaCO_3$ et $MgCO_3$ (Appendice B).

V.2.1. Classification des Matières de Chaulage par Méthode Statistique

Une méthode statistique a été utilisée pour grouper les matières de chaulage—25 échantillons en 2007 et 27 échantillons en 2008—dont les propriétés sont présentées en Appendice B (Tableau B-2). L'analyse a été faite en deux étapes. Premièrement, les caractéristiques de la chaux avec une haute puissance discriminatoire ont été identifiées en utilisant le facteur d'analyse multi varié. Ces caractéristiques sont, par ordre d'importance: % $CaCO_3$, contenu d'humidité, facteur de finesse (FF), % Ca, % Mg, ppm Fe, et % Mn. Ensuite, les échantillons des matières de chaulage ont été classifiés en utilisant seulement les caractéristiques identifiées dans la première étape. L'analyse de cluster a été utilisée pour la classification qui a abouti à quatre groupes de matières de chaulage. Les micro-éléments nutritifs n'ont pas été analysés pour des échantillons qui ont été collectés en 2008. Les groupes et leurs caractéristiques moyennes sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Les Moyennes d'une Série de 52 Echantillons de Matières de Chaulage collectés en 2007 et 2008

Groupe	Taille du Groupe	Moyenne		
		ECC	Taux d'Humidité	Facteur de finesse
		(%)	(%)	
1	8	76	17,4	52
2	20	88	3,4	47
3	10	102	2,5	65
4	14	120	2,9	87

12 Van Kauwenbergh, S. J.,Communication personnelle, 16 octobre 2007

C’est le groupe 3 qui comprend les trois échantillons de dolomite du Burundi. A cause de son taux élevé de Mg, la dolomite sera préférée à d’autres membres du Groupe 3.

Le classement par l’analyse de cluster pour les trois caractéristiques plus importantes — ECC, taux d’humidité et facteur de finesse — est aussi montré dans la Figure 3.

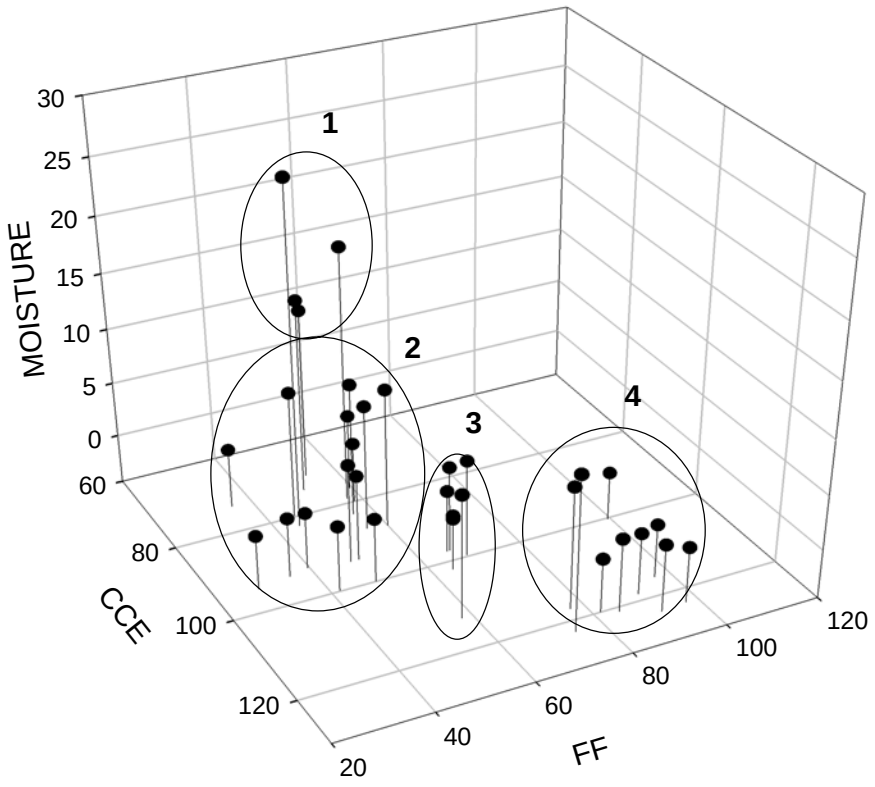


Figure 3. Distribution d’Echantillons de Chaux comme Fonction de l’Equivalent de ECC, Taux d’Humidité et Facteur de Finesse (FF)

Les Tableaux 3 et 4 présentent les caractéristiques moyennes des 4 groupes de matière de chaulage collectée en 2007 et 2008, respectivement. Comme les plus significatives caractéristiques des quatre groupes dans les Tableaux 2–4 le montrent clairement plus de la moitié des échantillons de matières de chaulage disponibles au Rwanda ont une capacité neutralisante moins élevée que le CaO_3 pur (groupes 1 et 2, moyen de l’ECC < 100%). Les échantillons avec un ECC > 100% (groupes 3 et 4) ont une plus grande capacité neutralisante que le CaO_3. Les groupes d’échantillons avec un ECC < 100% ont généralement aussi un facteur de finesse moins élevé que les groupes avec un ECC > 100%. Ceci implique que les matières de chaulage des groupes 1 et 2, qui ont une

capacité neutralisante inférieure à 100% d'ECC, prendront également plus longtemps pour réduire l'acidité du sol, que les échantillons des groupes 3 et 4. A cause de ces différences, les matières de chaulage des groupes 3 et 4 sont d'une plus haute qualité que celles des groupes 1 et 2. En considérant seulement l' ECC et le facteur de finesse, la qualité s'accroît du groupe 1 au 4. En plus, les matières de chaulage du groupe 1 ont un taux élevé d'humidité, ce qui implique qu'une quantité plus grande sera requise pour contrôler l'acidité du sol.

Table 3. Les Caractéristiques Moyennes des 4 Groupes d'une Série de 25 Echantillons de Matières de Chaulage Collectées en 2007

Groupe	Taille du Groupe	Moyenne						
		ECC	Taux d' Humidité	Facteur de Finesse	Ca	Mg	Fe	Mn
		(%)	(%)		(%)	(%)	(ppm)	(%)
1	4	75	18,3	56	29	0,6	472	0,09
2	9	88	3,9	52	34	1,1	612	0,05
3	4	99	4,6	65	38	1,1	308	0,06
4	8	120	2,1	86	45	1,5	148	0,03
Réactif du $CaCO_3$		100	0	99	40			

Tableau 4. Les Caractéristiques moyennes des 4 Groupes d'une Série de 27 Echantillons de Matières de Chaulage Collectées en 2008

Groupe	Taille du Groupe	Moyenne				
		ECC	Taux d' Humidité	Facteur de Finesse	Ca	Mg
		(%)	(%)		(%)	(%)
1	4	78	16,6	47	30	0,9
2	11	89	3,5	47	35	1,3
3	6	105	1,9	64	32	6,6
4	6	121	4,9	87	44	1,9
Réactif du $CaCO_3$		100	0	99	40	

Les échantillons de matière de chaulage avec moins de 100% d'ECC ont généralement un contenu de fer substantiellement plus élevé que les échantillons avec un ECC > 100% (Tableau 3). De même, la chaux de basse qualité (groupe 1) a aussi un contenu élevé de Mn.

Tous les échantillons de chaux dans le Groupe 4 sont produits pour usage industriel (par ex. purification d'eau ou construction). Toutes les sources de chaux des groupes 1 et 2 sont utilisées comme de la chaux agricole (Appendice B, Tableau B-2). En plus, au moins trois sur cinq sources du groupe 3 sont aussi disponibles pour un usage agricole. Cependant, il n'est pas connu si en effet cette chaux de haute qualité est utilisée par les agriculteurs. Par exemple, la dolomite des mines de Butare au Burundi est utilisée pour le chaulage surtout par des projets financés de l'extérieur.

Les groupes 1 et 2, dans lesquels se trouvent toutes les chaux pour usage agricole, le travertin original peut être aussi efficace que la chaux chauffée ou la chaux vendue pour usage

agricole. La production de la chaux agricole (ou des matières de chaulage calcinées ou chauffées en général) nécessite de l'énergie. L'on s'attendrait à voir une amélioration plus générale du travertin original suite au chauffage. Etant donnée la déforestation rapide de la sous- région, il y a un prix écologique important à payer pour produire la chaux avec une plus grande capacité neutralisante que celle du $CaCO_3$ (càd, avec un ECC > 100%). Le facteur de finesse de la chaux et du travertin de tous les groupes pourrait être accru par le broyage additionnel des matières. Un tel traitement pourrait augmenter la vitesse de réaction de ces matières pour augmenter le pH du sol, mais il exige aussi de l'énergie supplémentaire.

Parmi les échantillons ci-dessus, 8 sur 25 échantillons en 2007 et 11 sur 27 en 2008 étaient du travertin original, représentant trois des quatre sources présentées dans le Tableau 1, la petite réserve de Ruhundo n'étant pas échantillonnée. Malgré le petit nombre, la qualité moyenne des caractéristiques s'accorde avec les données de la littérature du Tableau 1 : le travertin de Mpatsi (Kibuye) a un ECC moyen plus élevé que celui de Mpenge (Ruhengeri) ; l' ECC de 94% pour Mashyuza (Bugarama) est significativement plus élevé que les deux autres (Appendice B). Le taux d'humidité moyen du travertin de Mashyuza n'est que 2%, mais le facteur de finesse moyen des échantillons de ce gisement est seulement 40%. Un broyage supplémentaire améliorera grandement l'efficacité de chaulage. Le broyage pour obtenir un facteur de finesse de 60% serait plus bénéfique que la calcination. Le travertin de Ruhengeri a non seulement un ECC bas(Tableau 1; Appendice B) mais aussi un contenu élevé d'humidité (15%). Le travertin de Bugarama (Mashyuza) a aussi de façon significative un Mg (1,74%) plus élevé comparé avec 0,99% pour Ruhengeri et 0,25% pour Mpatsi (Appendice B). L'utilisation du travertin or dolomite de Bugarama fournira aussi Mg—un nutriment de plante essentiel— et fournira l'équilibre de cation du sol.

V.3. Corriger la Toxicité en Al[13]

V.3.1. L'Approche

Le but du chaulage dans les tropiques est de rendre l'Al inoffensif. Pour calculer la quantité de chaux qui doit être appliquée, les données suivantes sont requises :

a. Quantité réelle de l'Al échangeable (IV.3).
b. Proportion désirée (voir ci-dessous) 100 x Al/CECE (CECE = capacité d'échange cationique effective).
c. Quantité de chaux requise par unité d'Al.
d. Equivalent du carbonate de calcium de la matière de chaulage utilisée (V.1 et V.2).

Cochrane et al. (1980) ont dérivé une équation pour calculer la quantité requise de chaux. Pour ceci, le nombre d'analyses requises a été gardé aussi petit que possible. Les concentrations d'Al, Ca, et Mg sont mesurées en un extrait de KCl d'1 M , et le résultat est exprimé en mmol (p^+) par 100 g de sol. La somme de ces trois cations est presque égale à la CECE, car les quantités des K et Na échangeables sont très petites (0,01–0,05 mmol par 100 g du sol). La proportion requise 100 x Al/CECE est indiquée par DESA (Degré Exigé pour la Saturation en Al), d'où

$$DESA = \frac{100\ Al\,\mathrm{d}e\,\mathrm{si}\,re}{\mathrm{Al} + \mathrm{Ca} + \mathrm{Mg}}, \text{ou} 100 \text{ x Al/CECE}$$

Al exigé= DESA (Al+Ca+Mg)/100, où Al, Ca, Mg, et Al exigé sont exprimés en mmol (p^+) par 100 g de sol.

---

[13] L'information présentée est principalement basée sur les données et la documentation obtenues de Bert Janssen, WUR, Wageningen.

L'on s'attendrait à ce que l'application de chaux soit suffisamment élevée pour neutraliser la quantité d'Al qui correspond à la différence entre la quantité réelle et la quantité exigée: mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ = mmol (p^+) Al^{3+} réel- mmol (p^+) Al^{3+}exigé.

Il a été cependant démontré, de façon empirique, que par mmol (p^+) Al^{3+}, non pas 1 mais 1,5 mmol (p^+) $CaCO_3$ est requis. Comme résultat de l'augmentation du pH causé par la chaux, la CECE augmente (dissociation plus poussée des groupes –OH et –COOH) et cette augmentation en CECE diminue jusqu'à environ .5 mmol (p^+) par mmol (p^+) Al échangé. La quantité de chaux requise est ainsi égale :1,5 (mmol (p^+) Al^{3+} réel- mmol (p^+) Al^{3+}exigé).
Si mmol (p^+) Al^{3+} réel est substitué par Al (= déterminé par le KCl d'1 M), et Al^{3+} exigé par l'expression ci-dessus, il est vrai que:

1 mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ = 1,5 (Al - DESA (Al+Ca+Mg)/100)

Cette équation peut être élaborée encore plus pour la pratique. Les premiers 15 cm du sol de 1 ha ont une masse d'environ $2{,}10^6$ kg.[14]. Ainsi, 1 mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ par 100 g de sol correspond à $2{,}10^7$ mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ par hectare. Comme 1 mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ correspond à .50 mmol $CaCO_3$, $2{,}10^7$ mmol (p^+) $Ca^{2+}CO_3^{2-}$ correspond à 10^7 mmol $CaCO_3$ = 10^9 mg $CaCO_3$ = 1 t $CaCO_3$ (la masse molaire relative de $CaCO_3$ est égale à 100: 40 + 12 + 16 x 3). Ainsi, l'application de la chaux exprimée en tonnes de $CaCO_3$ par hectare est aussi égale à:
1,5 (Al - DESA (Al+Ca+Mg)/ 100), avec les ions exprimés en mmol (p^+) par 100 g de sol.

BC ($CaCO_3$ t/ha) = 1,5 (Al - DESA (Al+Ca+Mg)/100) **Equation V.3-1**

BC = besoin en chaux exprimé en tonnes de $CaCO_3$ tonnes par hectare
DESA = degré exigé de saturation en Al (où désirée) (%)
Al = Al extractible (Al échangeable + soluble) en mmol/100 g sol
Al + Ca + Mg est une approximation pour la CEC efficace (CECE)

V.3.2. La Saturation en Al Désirée

Il y a plusieurs raisons pour ne pas entièrement corriger la toxicité en Al ; au lieu de déterminer la chaux requise pour l'élimination de tout l'Al échangeable, on peut décider d'accepter un certain pourcentage de saturation en Al de la CECE :

- Les différentes cultures agricoles et horticoles ont des exigences différentes par rapport au pH. Le pH optimal est un compromis pour lequel les systèmes de production, la disponibilité des éléments nutritifs, la vie du sol, la structure du sol et les risques de pestes et maladies ont été pris en compte.
- Il apparaît que les cultures et leurs variétés diffèrent en sensibilité pour l'Al (VII.2); l'Al extractible total tel que déterminé dans IV.3 devrait être corrigé pour les systèmes de production basés sur les cultures sensibles.
- Un pourcentage désiré de saturation en Al pourrait être choisi dans des endroits où le chaulage est coûteux et où les agriculteurs cultivent des cultures qui sont plus tolérantes à l'Al (VII.2).

Ainsi l'équation V.3-1 pourrait être utilisée pour atteindre le taux de chaux recommandé. Pour les cultures sensibles, la proportion 100 x Al/CECE doit être ramenée à environ 30(DESA = 30%), ce

[14] Corriger la toxicité en Al dans les premiers 15 cm du sol implique cependant que l'enracinement de la culture sera superficiel pour des cultures (relativement) sensibles; le sous-sol sera difficilement accessible par les racines. Si c'est rentable, les premiers 30 cm devraient être traités.

qui est en accord avec un pH(H_2O) d'environ 5,1 et une concentration en Al dans la solution du sol de 40 micro-mol (µmol; p^+) Al^{3+} par litre ou 40 x 9/1000 = 0,36 mg/l. Pour les cultures tolérantes à l'acidité, les valeurs sont aussi élevées que : 70 (DESA = 70%) pour 100 x Al/CECE; càd un pH (H_2O) de 4,6, et 190 µmol ou 1,7 mg Al^{3+} par litre de solution du sol, sont acceptables.

Une approche plus facile et plus approximative calcule le besoin en chaux ($CaCO_3$ pur) en relation directe avec la quantité totale de l'Al toxique, avec ou sans les ions H^+ (selon la procédure utilisée dans le laboratoire ; voir IV.3) :

BC (t/ha de $CaCO_3$) = facteur x mmol (Al + H^+)/100 g sol **Equation V.3-2**

ou = facteur x mmol Al/100 g sol (voir IV.3)

Pour éviter de chauler excessivement, un facteur d'adaptation est proposé qui prend en compte le sensibilité en Al des cultures :
Facteur = <1 pour les cultures tolérantes à l'Al
= 1,0 pour les cultures modérément tolérantes à l'Al
= 1,5 pour les cultures sensibles à l'Al

L'équation ci-dessus suppose que la toxicité en Al est éliminée et, pour les cultures sensibles à l'Al, elle suppose que la saturation en Al est proche de 0%. L'approche ne prend pas non plus en compte l'effet de la saturation réelle en Al du sol ; il ne considère que l'Al extractible. Cependant, le sol avec le même Al extractible peut avoir les valeurs de saturation très différentes et ainsi avoir un impact différent sur la performance des cultures.

V.3.3. Alternative au cas où seul le pH (H_2O) peut être mesuré

La grande majorité d'agriculteurs et d'agronomes de la région n'ont pas accès aux analyses de laboratoires de la toxicité en Al et la saturation en Al de la CECE, mais ils peuvent faire une détermination simple et peu coûteuse de pH (H_2O). Ils pourraient appliquer la méthode pour corriger l'acidité du sol qui est présentée dans V.1.1, pour les sols avec un pH (H_2O) < 5,5.

Le besoin en chaux pour corriger l'acidité du sol est estimé en utilisant les données de ACID4 (Yamoah et al., 1990), le Système d'Expert NuMaSS (Osmond et al., 2002), et la base de données PRDSS. L'équation a été développée en utilisant seulement les quantités de chaux nécessaires pour ramener le pH du sol à 5,2–5,5.

BC (t/ha de $CaCO_3$) = 16,0 – 2,87 pH(H_2O) **Equation V.3-3**

L'équation V.3-3 reflète une pente plus élevée, moins de tamponnement du pH, ainsi que moins de besoin en chaux que la recommandation originale d'ACID4 (Yamoah et al., 1990), qui était basée sur le chaulage à pH 6,2.

VI. Comment Calculer les Taux de Chaulage pour le Calcite ($CaCO_3$), l'Oxyde de Calcium (CaO) et de la Chaux Agricole Rwandaise

Premièrement, les trois méthodes (VI.1) seront comparées, en calculant les taux de chaulage pour le $CaCO_3$ pur basé sur l'Al^{3+} désirable (équation V.3-1), l'Al^{3+} échangeable (V.3-2), et le pH(H_2O) (V.3-3). Dans la suite, seule la dernière et plus simple formule sera employée comme illustration. D'abord, les BC pour CaO et pour la chaux agricole Rwandaise d'une qualité relativement haute et relativement basse sont dérivés (VI.2). VI.3 montre comment le facteur de finesse devrait être pris en considération, et VI.4 répond aux questions pratiques telles que comment et quand appliquer la chaux, sur quelle profondeur et avec quelle fréquence.

VI.1. Comparaison des BC en Utilisant les Trois Formules

Pour cette comparaison, les sols les plus acides observés par Yamoah et al. (1990) ont été utilisés et les BC pour les cultures sensibles ont été estimés. Les sols les plus acides se retrouvent dans ce qu'on appelle la zone agro écologique 3 (altitude 1.500–1.800 m; précipitation > 1.400 mm/an). Ces sols ont, en moyenne, un pH de 4,9, l'Al échangeable de 3,0 mmol/100 g sol, une CECE (Al^++Ca^++Mg^+) de (3,0+1,8+0,6) = 5,4, et une saturation en Al de 50%.

Saturation en Al exigée

Pour les cultures sensibles, la saturation en Al désirée doit être $\leq$ 30%. La valeur de 30% est utilisée pour le DESA dans la perspective des prix de chaulage, la pauvreté des petits propriétaires, et en supposant une culture modérément tolérante à l'Al. En utilisant l'équation V.3-1, le besoin en chaux (BC), exprimé en t/ha de $CaCO_3$ et avec les ions exprimés en mmol (p^+) par 100 g de sol, est:

BC = 1,5 [Al - DESA (Al+Ca+Mg)/100],
= 1,5 [3,0 – 30 (3,0+1,8+0,6)/100] = 2,1 t/ha $CaCO_3$.

Al^{3+} extractible

Le besoin en chaux ici est déterminé sur base de l'Al extractible en utilisant l'équation V.3-2.

BC (t/ha de $CaCO_3$) = facteur x mmol Al/100 g sol
= 1,5 x (3) = 4,5 t $CaCO_3$/ha

L'équation suppose que pour les cultures sensibles, la saturation en Al est ramenée à 0, càd, tout l'Al extractible est neutralisé. Même pour une culture modérément tolérante (facteur =1), la recommandation de la chaux sera de 1x3 = 3 t/ha de $CaCO_3$. Ainsi, l'approche de l'Al extractible conduira à des BC plus élevés que l'approche de saturation exigée en Al. Si la saturation en Al du sol est connue, alors le BC pour atteindre 30% DESA implique que seulement 1,38 sur 3 mmol d'Al est neutralisé. D'où, le BC pour atteindre 30% de saturation en Al est :

BC (t/ha de $CaCO_3$) = 1,5 x 1,38 Al/100 g sol = 2,1 t/ha

Si l'information nécessaire pour utiliser l'approche de saturation en Al désirée (Equation V.3-1) est connue, alors il est approprié de n'utiliser que l'approche de l'Al extractible (Equation V.3-2) pour prévoir le BC.

pH (H_2O)

BC = 16,0 – 2,87 pH

BC = 16,0 – 2,87 x 4,9 = 1,9 t/ha

Etant donné l'accord proche entre les méthodes, il peut être plus pratique d'utiliser les mesures du pH du sol (Equation V.3-3) pour estimer le besoin en chaux, particulièrement dans la RGLAC étant donné le manque d'information sur l'Al et la CECE. A cause de la généralisation impliquée dans l'emploi d'un large éventail de sols pour développer l'approche du pH du sol, cette généralisation peut sous estimer ou surestimer les prévisions de besoins en chaux pour les conditions extrêmes du pouvoir tampon du pH du sol et de la tolérance des cultures. L'équation basée sur le pH sera plus raffinée au fur et à mesure que les données sur terrain deviennent disponibles, en respectant particulièrement les cultures différentes.

VI.2. Utilisation de l'Equivalent du Carbonate de Calcium (ECC)

Dans le paragraphe précédent, le BC a été estimé pour la chaux standard, le $CaCO_3$ pur (VI.1). En utilisant l'approche du pH du sol (Equation V.3-3) et le même sol de l'exemple du paragraphe précédent, il sera illustré comment, pour d'autres matières de chaulage, le BC est dérivé du BC pour le $CaCO_3$ pur. Trois exemples sont présentés: l'utilisation du CaO, la matière avec l'ECC le plus élevé (179; V.1.2), et l'utilisation de la chaux agricole Rwandaise relativement bonne et relativement pauvre. Parmi les huit chaux agricoles qui ont été échantillonnées et analysées (V.2), l'ECC le plus élevé qui a été trouvé est 113 ; le plus bas est 73 (Appendice B)

En supposant que 100% des particules des chaux sont inférieures à 0,25 mm de diamètre (facteurs de finesse égaux), tous les taux de chaulage sont premièrement calculés (t/ha) sur base des différences de ECC seulement.

Dans l'équation V.3-3, **BC = 16,0 – 2,87 pH** a été utilisé pour estimer le besoin en $CaCO_3$ pur pour augmenter le pH de 4,9 à 5,5

BC = **16,0 – 2,87 * 4,9** = 1,9 t/ha $CaCO_3$ (pur)

Ensuite, pour calculer le taux équivalent de l'application d'une autre matière de chaulage, Z, en connaissant l' ECC, utilisez: $BC_Z = (BC_{CaCO_3} \div ECC_Z/100)$. Dans le cas de CaO, ceci conduit au BC_{CaO} de 1,9/(179/100) = 1,1. t/ha de CaO. Pour la meilleure et pour l'une des chaux agricoles de plus basse qualité qui ont été échantillonnées, avec des valeurs de ECC de 113 et 74, les BC sont, respectivement, 1,9 /(113/100) = 1,7 t/ha, et 1,9/(74/100) = 2,6 t/ha.

En pratique, il y a même une plus grande différence dans les quantités requises pour les deux types de chaux agricole. Les valeurs de l' ECC ont été déterminées sur base du poids sec. Cependant, lors des analyses, la chaux de la qualité la plus élevée avait un contenu en eau de 6,8%, et la plus basse avait 13,3%. Ceci implique que, en effet, le BC de la meilleure chaux agricole est1,7 x 100/(100 – 6,8) = 1,8 t/ha; le BC de plus basse qualité est 2,6 x 100/(100 – 13,3) = 3,0 t/ha. Cette correction est utile, sachant que l'un des échantillons de chaux avait un contenu d'eau moyen de presque 21%.

Ces calculs aboutissent à des taux estimés d'application des trois matières de chaulage nécessaires pour ajuster le pH du sol à 5,2–5,5, étant donné que la taille d'une particule de toutes les trois matières de chaulage est identique et inférieure ou égale à 0,25 mm de diamètre. Les taux de chaulage sont calculés de façon estimative, car l'efficacité des matières de chaulage variera en pratique, selon les variables tels que:

- La régularité d'application au sol
- Le degré de l'incorporation de la chaux dans le sol (la chaux qui est simplement répandue n'interagit pas rapidement avec le sol dans les premiers 30 cm et cause des valeurs de pH localement élevées, l'érosion inhérente du sol [II.2], et le lessivage de chaux avec les précipitations de pluie).
- Le FF (dépendant des tailles des particules de chaque matière de chaulage; taille de particule plus fine = plus grande réactivité).

VI.3. Comment calculer le BC, en tenant compte du facteur de finesse

Dans l'ensemble, la qualité de la chaux dépend de l'ECC efficace, du taux d'humidité, du contenu des éléments nutritifs essentiels, et du FF. Des particules plus fines sont plus réactives et plus efficaces pour neutraliser l'acidité du sol que les particules grossières. La chaux, qui est principalement composée de particules fines (<60 maille), est la plus réactive ; par conséquent, elle épuise sa capacité neutralisante plus rapidement que la chaux avec un éventail de tailles de particules. Pour que les particules non raffinées deviennent efficaces, plusieurs années peuvent être requises. Lors de l'analyse de la matière de chaulage, les particules peuvent être groupées dans différentes classes de taille.

Une fois que le taux de chaulage a été établi (VI.1 et VI.2), la chaux de différentes sources devrait être analysée pour déterminer sa qualité du point de vue de la taille de particule. Différents pays et même différents Etats au sein des pays peuvent avoir différents standards de FF pour le calcaire agricole. La suite est une méthode pour déterminer le FF qui est largement utilisée pour évaluer l'efficience de la chaux agricole aux Etats-Unis. Le FF est déterminé pour de la matière séchée dans l'étuve et il constitue la moyenne pesée des classes des tailles de particules et leurs facteurs d'efficience respectifs (Tableau 5).

Tableau 5. Relation Entre la Taille de Particule et le Facteur d'Efficience.

Taille de Particule	Taille d'Ouverture	Facteur d'Efficience
(maille)	(mm)	
>8	>2,36	0
8–60	2,36–0,25	0,5
<60	<0,25	1,0

Source: Havlin et al., 2005.

Pour comparer deux matières de chaulage, sur base à la fois de leur capacité neutralisante et leur facteur de finesse, calculez le taux d'application total en tenant en compte le taux tel que calculé ci-dessus en tonnes par hectare, il faut ensuite calculer le FF (s'il n'est pas connu), sur base des données obtenues en analysant la matière de chaulage et utiliser ensuite le BC et FF pour calculer le taux de chaulage adapté, BC_{FF}, en tonnes par hectare, qui prend en compte à la fois la capacité neutralisante et la distribution de la taille de particules de la matière de chaulage. Le FF est un index qui indique la période approximative dans laquelle la chaux dissoudra et neutralisera l'acidité du sol. Un FF de 100 indique que toute la matière échantillonnée est inférieure à 0,25 mm de diamètre et devrait se dissoudre relativement vite. Les valeurs de FF inférieures à 100 indiquent un mélange de particules des différentes classes de taille (comme indiqué dans le Tableau 5) ; plus le FF est bas, plus la période sera longue pour que les particules de la matière de chaulage se dissolvent. Les matières de chaulage avec des valeurs de FF élevées sont plus réactives que les matières de chaulage avec de basses valeurs de FF.

Si deux matières de chaulage sont analysées pour comparer leur efficacité relative, on tient compte de la distribution de leurs tailles de particule. Pour cela, le pourcentage passant ou retenu dans le tamis est mesuré pour les particules de mailles >8, de 8–60 mailles, et de <60 mailles, en utilisant un tamis dont "la maille" est le nombre de trous par pouce. Un tamis de 60 mailles a 60 trous par pouce; ainsi une particule passant dans un tamis de 60 mailles pourrait avoir un diamètre de<0,0098 inch, ou <0,25 mm. Les rendements moyens de six différentes cultures obtenues pendant 6-8 ans ont montré que quand le pourcentage de chaux passant dans un tamis de 60 mailles était inférieur à 20%, le rendement moyen était 60% du rendement le plus élevé, qui a été réalisée quand plus de 80% de chaux utilisée ont passé dans un tamis de 60 mailles (Havlin et al. 2005, citant Barber, 1984).

Calcul du facteur de finesse: [pourcentage de chaux de >8mailles × 0 efficience] + [pourcentage de chaux de 8–60 mailles × 0,5 efficience] + [pourcentage de chaux de <60 mailles × 1,0] = FF total (FF, la somme des trois facteurs)

Le degré de carbonate de calcium effectif (ECC) d'une matière de chaulage= ECC × FF. En faisant ce calcul après avoir calculé le besoin en chaux, on peut estimer l'efficacité de la matière de chaulage broyée comparée avec d'autres matières de chaulage. La taille des particules est un aspect crucial de la réactivité de la chaux. Les acheteurs de chaux sont poussés à prendre des échantillons de chaux en vente et à calculer la quantité requise (ECC) avant de l'acheter. La chaux fine neutralise l'acidité du sol plus rapidement que la chaux de texture grossière.

Pour calculer le taux d'application de la matière de chaulage, prenez en compte le FF (BC_{FF}). Une fois que le taux basé sur l'efficacité relative, BC, a été déterminé, il faut diviser BC par FF exprimé comme une fraction. Les valeurs BC des deux qualités de matière de chaulage (haute et basse qualité de chaux agricole) obtenues à la fin de VI.2 sont 1,8 t/ha et 3,0 t/ha, respectivement. Les FF respectifs des deux matières sont 58% et 51% (Appendice B), ou—exprimé comme fractions—0,58 et 0,51. Ainsi, les quantités de matière de chaulage requise pour augmenter rapidement le pH de 4,9 à 5,2 sont, respectivement, 1,8/0,58 = 3,1 t/ha et 3,0/0,51 = 5,9 t/ha. Pour un effet similaire, on a besoin de presque 2 fois plus de chaux agricole de basse qualité que de chaux agricole de haute qualité.

VI.4. Autres Questions Pratiques

VI.4.1. Comment Appliquer la Chaux

Quand les matières d'application de chaux ont été choisies et que le BC_{FF} a été estimé, la chaux doit être appliquée. Les études ont montré que si la chaux est appliquée à la surface et non incorporée dans le sol, elle peut prendre 10 ans pour élever le pH du sol à une profondeur de 15 cm. La réactivité de la chaux avec l'acidité du sol est fortement augmentée lorsqu'elle s'est incorporée dans le sol de façon homogène. Plus la chaux est profondément incorporée dans le sol, plus grand sera le volume du sol qui a une augmentation du pH. La croissance des racines sera plus grande dans de plus larges volumes de sol traités avec la chaux. On doit remarquer, cependant, que la formule proposée et les BC estimés (V.3 et VI.1–3) concernent les premiers 15 cm du sol supérieur seulement. Traiter le sol à une profondeur de 30 cm, par exemple, implique que le pH, la toxicité en Al, etc. doivent être mesurés pour les premiers 30 cm et que le BC peut devenir deux fois plus élevé

Pour les agriculteurs à pauvres ressources, appliquer 2–4 t de chaux/ha sur base des critères ci-dessus peut ne pas être possible. L'option de bander ou d'appliquer la chaux dans le trou de plantation à une profondeur d'au moins 15 cm au taux recommandé (mais dans peu d'endroits) devrait être évalué. Le temps d'application (VI.4.2) devient plus critique pour une telle application.

VI.4.2. Temps et Profondeur de l'Application de la Chaux.

De préférence, la chaux devrait être répandue uniformément au taux prescrit sur le sol et devrait être incorporé à une profondeur d'au moins 15 cm le plus longtemps possible avant la plantation[15]. En particulier, les formes caustiques de la chaux —CaO et $Ca(OH)_2$— devraient être appliquées et incorporées dans le sol bien avant la plantation pour éviter l'endommagement des semences. L'incorporation de la chaux peut se faire en utilisant le travail manuel, la traction animale, ou un tracteur. Si le travail manuel est utilisé, il est recommandé que la chaux soit incorporée à une profondeur de 15 cm. Si la traction animale ou la culture à l'aide d'un tracteur est faite, la chaux devrait être incorporée à une profondeur de 30 cm (voir note en bas de page 14 et le commentaire ci-dessus). Ceci donnera à la chaux une chance de neutraliser l'acidité du sol avant la plantation. Les calendriers culturaux pour le Rwanda, la Tanzanie et l'Ouganda (Appendice D) peuvent être utilisés pour planifier le temps pour l'application de la chaux pour plusieurs cultures dans ces trois pays.

VI.4.3. Fréquence de l'Application de la Chaux

L'acidification des sols est un processus naturel qui peut être accru ou abaissé par les activités humaines. En supposant que la chaux de qualité suffisante est utilisée, il est suggéré que le chaulage soit fait tous les 3 ans dans les tropiques humides (Tropsoils, 1987). Cependant, les agriculteurs considéreront en fin de compte les aspects économiques du chaulage et, par exemple, la sensibilité de la culture de la saison suivante. En outre, la fréquence de l'application dépend de plusieurs facteurs, qui peuvent varier selon les paysages et les systèmes de production. Un facteur clé est le lessivage des cations basiques; l'acidification du sol a lieu là où la précipitation de pluie est significativement plus élevée que l'évapotranspiration, et son effet augmente

[15] Dans des régions avec une seule saison culturale, le chaulage 6 mois avant la plantation est recommandé.

proportionnellement à la capacité de stockage des sols pour l'eau et pour les éléments nutritifs.[16] Par conséquent, la fréquence du chaulage dépend de la texture et du pouvoir tampon du sol. La fréquence du chaulage devra augmenter des argiles de texture fine et des terres grasses aux sols grossiers, sablonneux, et des sols avec un taux de MOS élevé aux sols avec un taux bas. Cependant, la quantité de chaux requise est inversement proportionnelle à la fréquence. Ainsi, si les taux d'application de la chaux sont bas et que le pH du sol s'est élevé à 5,2 ou moins, alors l'application de la chaux peut être plus fréquente (une fois par an). Et, en changeant d'une culture plus tolérante à l'acidité à une culture moins tolérante (par ex., de la pomme de terre au blé), alors le chaulage peut être nécessaire. Le bandage ou l'application de la chaux dans les trous de plantation ou les tertres peut exiger les applications de la chaux annuellement ou saisonnièrement. Les taux bas de la chaux accroissent ainsi la fréquence du chaulage et les coûts de la main d'œuvre, mais aussi répandent les coûts et les risques.

Le lessivage n'est pas la seule voie de perdre les cations tels que K, Ca et Mg; l'exportation des produits et des sous produits à partir des champs concerne aussi une perte qui provoque l'acidification. Ceci est particulièrement vrai quand les sous produits ne retournent pas au champ sous forme de fumier ou de composte.[17]Pourtant, d'autres pratiques agricoles influencent le taux de l'acidification du sol (en d'autres mots, la fréquence du chaulage). L'utilisation intensive des engrais azotés contenant le soufre accélère l'acidification; le nitrate du calcium d'ammonium (CAN) est une source alternative de N avec un léger effet de chaulage (VII.1.3). La lutte efficace contre l'érosion peut aider à empêcher un sous-sol plus acide de devenir le sol supérieur. Cependant, quand les terrasses (radicales) sont utilisées pour stopper l'érosion, sans accorder une attention efficace au stockage et l'utilisation élevée d'eau (gestion de MOS et intensification des cultures), le lessivage peut être renforcé, causant une acidification accrue.

Plusieurs facteurs affectent la fréquence du chaulage; ainsi, le sol, particulièrement les sols sableux devraient être échantillonnés tous les 2 ans (comme expliqué ci-dessus) si les moyens sont disponibles. La détermination de l'Al échangeable et la saturation en Al ou au moins un simple test du pH (H_2O) du sol devraient être faits. Ensuite, en utilisant les critères et les calculs ci-dessus décrits, on peut déterminer si la chaux devrait être réappliquée et à quel taux elle le devrait. Les sols de texture moyenne (par ex., des limons) et les sols de texture fine devraient être échantillonnés et le pH déterminé tous les trois ans. Le taux d'application sera encore déterminé en utilisant les calculs ci-haut décrits. Le chaulage excessif devrait être évité ; le pH (H_2O) devrait certainement ne pas devenir 6 ou plus élevé (II.2).

[16] Avec l'aridité croissante, non seulement le lessivage diminue, mais aussi les sols contiennent plus de carbonates, contrecarrant ainsi une acidification éventuelle.

[17] A partir des produits venus d'entreprise d'agriculture mixte au Nord-Est de Victoria (Australie), le foin exigeait la plus grande quantité de chaux (270–1.260 kg $CaCO_3$/ha/an) pour remplacer l'alkali perdu du sol. Par comparaison, l'enlèvement de produits céréales exigeait beaucoup moins de chaux (7–20 kg $CaCO_3$/ha/an) pour remplacer l'alkali perdu, comme l'a fait l'enlèvement de la laine et de l'agneau (0,8 et 6,0 kg $CaCO_3$/ha/an, respectivement).

VII. Vivre Avec les Sols Acides.

« La gestion durable d'un agro écosystème devrait viser à équilibrer les apports de l'acidité avec les additions d'alcalinité à partir des sources à la fois intérieures et extérieures. Les sources extérieures d'alcalinité comprennent les additions de chaux et de matière organique, alors que la plus importante source intérieure de la capacité neutralisante d'acidité du sol est la désagrégation minérale » (Wong et al., 2004).

VII.1. Nutrition des Plantes

VII.1.1. Principes

Les plantes exigent 17 éléments nutritifs essentiels qui font partie de la composante essentielle de la plante ou qui sont nécessaires pour la plante pour compléter son cycle de vie. Ces éléments sont le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le soufre (S), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le bore (B), le chlore (Cl), la molybdène (Mo), et le nickel (Ni). Le carbone est absorbé par la plante comme une composante du dioxyde de carbone gazeux à travers les feuilles. L'hydrogène et l'oxygène sont principalement absorbés comme de l'eau à travers les racines, comme l'est le reste des éléments nutritifs essentiels. La Loi du Minimum développée par le chimiste agricole Justus von Liebig, à l'aube des années 1800, stipule que l'élément essentiel le plus limitatif à la croissance de plantes déterminera le taux auquel la plante croit. Par exemple, certains sols acides sont déficients en Mo, un nutriment de plante nécessaire en très petites quantités. Cette déficience peut être tout juste aussi limitative à la croissance de la plante qu'une déficience en N, qui est le nutriment minéral dont les plantes ont le plus besoin après H et O.

Dans les sols acides, les déficiences en P, Ca, Mg, et Mo sont courantes. La déficience en N peut aussi se produire si les processus de minéralisation et de nitrification sont entravés suite au pH bas (pH < 4,5). Les toxicités des ions d'Al et de H sont courantes pour les plantes cultivées dans des sols acides ; la toxicité en Mn est moins fréquemment observée dans la région, et la toxicité en Fe se produit chez le riz irrigué. Ces déficiences et toxicités diminuent l'assimilation d'autres éléments nutritifs essentiels, tels que le N et le K. En utilisant les matières de chaulage, les anions tels que OH^-, CO_3^{2-}, ou SiO_4^{4-} forment des combinaisons non dissociées ou difficilement dissociées avec H^+ ; en d'autres mots, les anions éliminent les protons. En effet, le cation n'est pas objet d'intérêt pour l'augmentation du pH (VI.1; Groupe Chaulage du COMIFER, 2000). Si le calcaire dolomitique [$CaMg(CO_3)$] est utilisé pour augmenter le pH du sol, alors Mg^{+2} déplacera aussi les cations Al^{3+} et H^+ sur le CEC. Beernaert (1999) a noté que le travertin au Rwanda a un taux très bas de Mg ; il recommande un mélange de travertin et de dolomite ou une addition du sol volcanique ou de l'engrais magnésien pour répondre aux besoins en Mg des cultures sur des sols remédiés avec le travertin. Comme discuté (V.2.1), le taux moyen du Mg de travertin variait de 0,25% à 1,74% (Appendice B, Tableau B-2). De telles différences peuvent être importantes dans des sols très pauvres en Mg échangeable. On devrait noter que la récupération des sols fortement acides avec de la chaux aboutira à la saturation avec Ca^{+2} de la plus grande partie de la CEC. Il est essentiel que d'autres cations importants comme Mg^{+2} et K^+ soient ajoutés au sol pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes cultivées dans les sols récupérés.

VII.1.2. Fertiliser les Sols Corrigés pour l'Acidité du Sol.

Comme indiqué ci-dessus, certains éléments nutritifs des plantes sont ajoutés aux sols à travers le chaulage. Cependant, le chaulage ne devrait pas remplacer la fertilisation du sol. Ce risque existe, car à travers le pH accru, les processus biologiques sont intensifiés, et à travers la minéralisation de la MOS, les éléments nutritifs tels que N et P deviennent disponibles au coût d'un statut dégradant de la MOS. Ceci est a la base de l'expression Néerlandaise dérivée du chaulage des sols sans la fertilisation du sol : « Parents riches, enfants pauvres. »[18]

Puisque P a été perdu à partir de la solution de sol par adsorption avec Al dans les sols acides, il est important de fertiliser avec P quand les sols acides sont remédiés en rehaussant le pH. Accroître le pH du sol n'amènera pas rapidement P dans la solution de sol, parce que les composés du phosphate d'Al sont très insolubles. N est normalement peu disponible dans tous les sols cultivés et devrait ainsi être ajouté ; parce que K sera probablement très peu fourni dans le sol acide, il n'y aura vraisemblablement pas de K adéquat pour la croissance des cultures. Par conséquent, il est important de fertiliser avec N, P, et K. Les apports de MO contrebalancent la quantité de la MOS minéralisée, provoquée par l'augmentation en pH. Entre-temps, elles peuvent fournir des quantités relativement petites, mais importantes, des éléments nutritifs essentiels des plantes.

VII.1.3. Choix d'Engrais Inorganiques

Le N et le S des engrais sont oxydés par des micro-organismes du sol; les ions d'hydrogène sont produits lors de l'oxydation. Par conséquent, le pH du sol diminue comme résultat de l'utilisation des engrais qui fournissent ces deux éléments nutritifs essentiels des plantes, sans lesquels les plantes ne peuvent pas croître et produire la nourriture, l'alimentation et la fibre utiles. Les engrais avec N et S devraient être choisis pour minimiser l'acidification des sols. Un index utile de l'acidification qui résultera de l'utilisation de différents engrais contenant N ou S est sur la liste du Tableau 6, qui indique le nombre de kilogrammes de calcite, $CaCO_3$, nécessaires pour neutraliser l'acidité produite par l'oxydation d'un kilogramme de N ou S à partir d'un engrais (Havlin et al., 2005).

Sans alternative de choix d'engrais, on doit accepter que l'intensification aille de pair avec une certaine acidification, augmentant la fréquence de chaux nécessaire. Cependant, à part l'engrais azoté d'urée acidifiant, CAN est disponible. CAN est une source de N qui a un effet (limité) de chaulage mais CAN est plus cher que l'urée. Les bénéfices à court et long terme détermineront le choix des agriculteurs.

[18] Le verbe Néerlandais "uitmergelen" a la même racine ("mergel" = matière de chaulage). Il est utilisé pour des personnes qui sont devenues extrêmement maigres et il concerne une comparaison avec un sol complètement épuisé

Tableau 6. Quantité de $CaCO_3$ en Kilogrammes Nécessaires pour Neutraliser l'Acidité Produite par l'Oxydation d'un Kilogramme de N ou S Fourni à partir des Engrais.

Source de l'Engrais	$CaCO_3$ (kg) Appliqué pour Neutraliser l'Acidité Par kg de N ou de S
Ammoniaque anhydreux	3,6
Urée	3,6
Nitrate d'ammonium	3,6
Phosphate de diammonium	5,4
Thiosulfate d'ammonium	5,4
Sulfate d'ammonium	7,2
Phosphate de monoammonium	7,2
Soufre élémentaire	7,2

Dans II.1, il a été souligné que les sels solubles, par. ex. à partir de l'apport d'engrais, peuvent remplacer Al^{+3} sur le complexe d'échange des sols acides, aboutissant à une diminution plus forte du pH du sol par l'hydrolyse d'Al^{+3}, avec la production de H^+ . Les taux élevés d'engrais appliqués en bandes dans les sols avec pH <5,0 peuvent résulter en un taux d' Al^{+3} soluble toxique plus élevé, diminuant ainsi la croissance des plantes. L'application d'engrais en bandes à des taux élevés devrait être évitée sur les sols acides. Cependant, dans beaucoup de sols acides, de grandes quantités d'engrais P appliqués sont fixées ; dans de telles conditions, l'application de P en bandes est recommandée.

VII.2. Cultures et Variétés Tolérantes

Le thé ainsi que les patates douces sont deux cultures fréquemment observées dans la RGLAC, une région connue pour ses sols acides. Des cultures, des plantes fourragères, et leurs variétés diffèrent dans leur tolérance à l'acidité du sol et à la toxicité en Al. Un mécanisme clé est les exsudats racinaires, le nitrate ou le malte en réponse à l'exposition des racines à l'Al toxique, formant les complexes avec l'Al dans le rhizosphère (Wong et al., 2004). Tandis que d'autres mécanismes de tolérance existent[19], toute la tolérance à l'Al rend les plantes capables de développer un système racinaire et de pénétrer le sous-sol. Ceci est aussi le cas après que le chaulage eut atteint le sous sol.

En plus du thé et de la patate douce, la pomme de terre est aussi une culture plutôt tolérante, capable d'une croissance optimale dans une étroite marge de pH de 5,0 à 5,4. Le maïs et le blé, d'autre part, exigent une marge de pH du sol de 5,5–7,0. Le riz cultivé dans un milieu inondé répond rarement au chaulage. L'inondation même des sols acides aboutit aux augmentations de pH du sol. Au Burundi, on a trouvé que le triticale était plus tolérant aux sols acides et à la toxicité en Al que le blé (III.1). Comparé à d'autres cultures Hawaïennes, l'ananas se présente comme une culture tropicale qui peut bien produire dans une marge de pH de 4,7–5,7 (Tableau 7).

[19] Dans le cas du maïs et du sorgho, il a été découvert que les différences dans la réaction à l'acidité du sol sont liées à l'accessibilité du Mg (Tan, 1993)

Tableau 7. Les pH de Croissance Optimale pour Plusieurs Cultures Hawaïennes

Culture	pH
Alfalfa	6,5–7,5
Canne à sucre	6,0–7,0
Gingembre	6,0–7,0
Avocat	6,0–6,5
Taro	5,5–6,5
Macadamia	5,0–6,5
Camelia	4,5–5,5
Ananas	4,7–5,7
Azalea	4,5–5,0

Source: Hue et Ikawa.

La myrtille est la plus tolérante pour les sols acides parmi les cultures cultivées dans des climats tempérés (Figure 4), dont certaines peuvent être cultivées sous les tropiques (tel que le maïs, le sorgho, et la pomme de terre). La figure illustre aussi la tolérance relative du sarrasin et de la pomme de terre, deux cultures qui sont produites dans la région Rwandaise qui a les sols les plus acides.

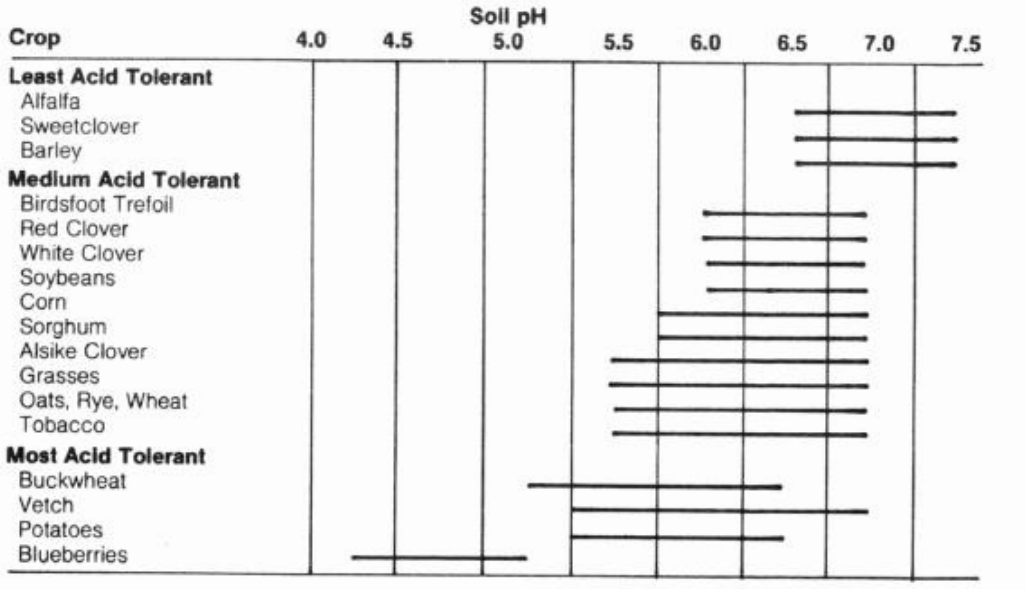


Figure 4. Les pH Optimaux de Croissance pour les Cultures Fourragères et d'Autres Cultures aux Etats-Unis (Purdue Forage Information)

Puisque le potentiel génétique de différentes espèces de plante diffère concernant la tolérance à l'acidité du sol et à l'Al, une recherche considérable a été faite pour catégoriser la tolérance des variétés

de plante. Les cultures peuvent être classées suivant leur sensibilité au pH dans trois groupes (Janssen, 1999):

- Les cultures avec une préférence pour les conditions alcalines neutres ou faibles : tomate, céleri, arachide, orge, beaucoup de légumes et fleurs à bulbes, coton, betterave, haricot et lucerne.
- Cultures avec une préférence pour les conditions acides allant du neutre au faible : maïs, trèfle, , artichoke, navet, blé, graine de soya, avoine, et petit pois.
- Les cultures avec une préférence pour les conditions acides faibles: pomme de terre, seigle, lupin, et tabac

Dans V.3.2, le dernier groupe est toujours divisé en cultures et variétés tolérantes et modérément tolérantes. Dans des endroits où les sols acides sont endémiques et où la chaux et d'autres intrants externes ne sont pas (assez) profitables, les agriculteurs se focaliseront sur de tels cultures et variétés. Il est recommandé que les agronomes et les vulgarisateurs soient capables de classifier les cultures et varietes dans la RGLAC en rapport avec leur tolérance à la toxicité en Al. Un contact intensif avec les producteurs sera un instrument indispensable.

Meda and Furlani (2005) ont étudié un nombre de légumineuses tropicales et deux variétés de maïs, qui diffèrent dans la tolérance à la toxicité en Al. Ils ont utilisé l'allongement relatif net des racines des plantes cultivées dans des solutions d'éléments nutritifs avec différents niveaux d'Al (Figure 5 et Tableau 8). La plus tolérante des 22 variétés testées montre que l'allongement net de la racine moyenne est presque trois fois plus haut que celui de la variété la plus sensible après seulement 9 jours. Pour une réduction de 50% de l'allongement net moyen de la racine, une concentration en Al huit fois plus grande est requise pour la variété la plus tolérante en comparaison avec la plus sensible.

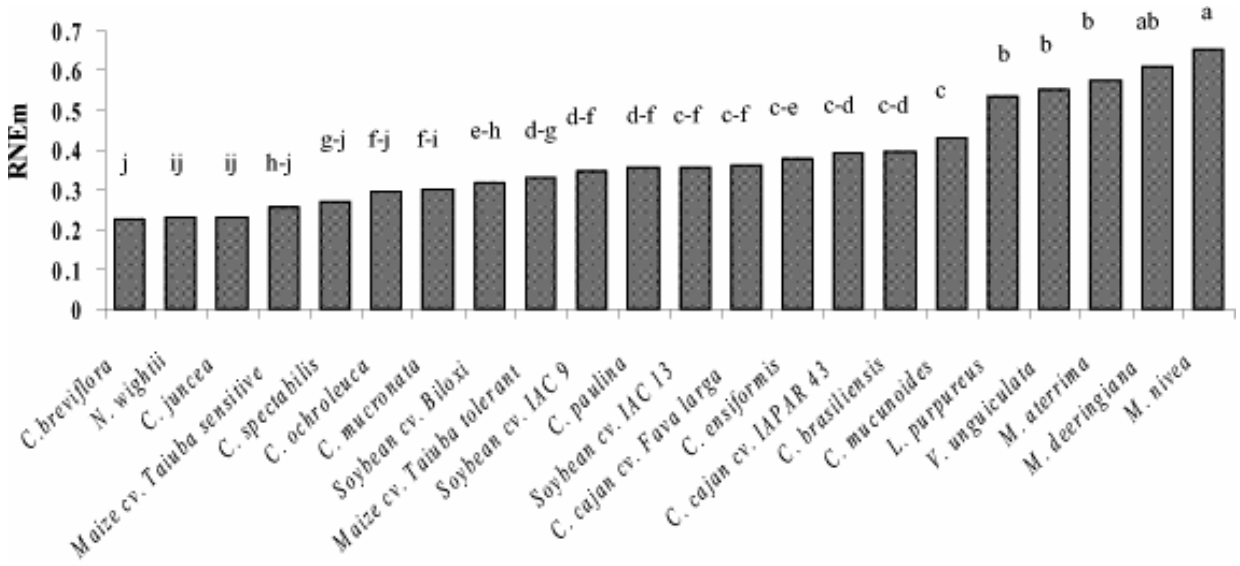


Figure 5. Allongement Relatif Net de la Racine Moyenne pour 20 Espèces de Légumineuses et 2 Variétés de Maïs

Tableau 8. Réaction à la Toxicité en Al et les Valeurs Critiques de la Concentration en Al[Al]$_{50}$ et de l'Activité d'Al {Al}$_{50}$ pour une Réduction de 50% de la Longueur Nette de la Racine de 20 Espèces de Légumineuses et 2 Variétés de Maïs

Plant material	[Al]$_{50}$	{Al}$_{50}$	Reaction to Aluminum
Crotalaria juncea	39	11	sensitive
Maize cv. Taiuba sensitive	39	11	sensitive
Crotalaria breviflora	42	12	sensitive
Neonotonia wightii	43	12	sensitive
Crotalaria mucronata	58	15	moderately tolerant
Crotalaria spectabilis	65	16	moderately tolerant
Maize cv. Taiuba tolerant	68	17	moderately tolerant
Canavalia ensiformis	73	18	moderately tolerant
Crotalaria ochroleuca	75	18	moderately tolerant
Soybean cv. Biloxi	80	19	moderately tolerant
Crotalaria paulina	88	21	tolerant
Soybean cv. IAC 13	92	21	tolerant
Cajanus cajan cv. Fava larga	95	22	tolerant
Calopogonium mucunoides	97	22	tolerant
Soybean cv. IAC 9	100	23	tolerant
Canavalia brasiliensis	104	23	tolerant
Cajanus cajan cv. IAPAR 43	111	25	tolerant
Lablab purpureus cv. Rongai	189	37	highly tolerant
Vigna unguiculata	192	38	highly tolerant
Mucuna aterrima	229	44	highly tolerant
Mucuna deeringiana	262	49	highly tolerant
Mucuna nivea	334	59	highly tolerant

Le Tableau 9 montre une série de cultures et d'espèces fourragères (ou leurs variétés) qui tolèrent les conditions de sols acides et exigent un chaulage minimal. Il est montré trois classes qui (de gauche à droite) ont un niveau de tolérance descendant. En d'autres mots, pour maintenir le pH et la saturation en Al acceptable, des niveaux croissants de chaulage de maintenance sont requis.

Tableau 9. Cultures et Espèces Fourragères qui Tolèrent les Conditions des Sols Acides et Exigent un Chaulage Minimal.

pH du sol	4,5–4,7	4,7–5,0	5,0–5,3
Saturation en Al échangeable (%)	68–75	45–58	31–45
Taux de chaux (t/ha)	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–2,0
Cultures appropriées (les variétés tolérantes fournies sont utilisées)	riz de hautes terres manioc, mangue cashew, agrume ananas Stylosanthes Centrosema Paspalum Cajanus cajan Lablab purpureus Mucuna spp.	doliques plantains maïs	maïs graines de Phaseolus sorgho blé

Adapté de ***NuMaSS Expert System (Osmond et al., 2002).***

VII.3. Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols

VII.3.1. Amendements des Sols plus Engrais Inorganiques

Le chaulage ainsi que l'utilisation d'engrais inorganique, de fumier et d'autres sources de la MO devraient être combinés (VII.1.2). L'exemple Rwandais d'une recherche du passé (III.3) combine ces trois intrants de production dans un contexte d'agroforesterie. En effet, une recherche similaire existe pour le Burundi et le Kivu (par ex., Wong et al., 1995). Elle peut être considérée comme faisant partie de la recherche qui a conduit à la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS), une approche qui implique une production agricole accrue et une maintenance ou une amélioration de la qualité des sols. La meilleure exploitation de cette recherche est d'optimiser la combinaison d'intrants et de traitements pour recevoir une réponse maximale avec un minimum d'intrants et de coûts à travers de la synergie. Utiliser tout simplement les intrants et traitements ensemble ne sera pas économique et risquera à long terme de menacer la qualité du sol.

Dans les paragraphes suivants, différentes technologies de la GIFS pour combattre la toxicité en Al et l'acidité seront présentées. Une riche source d'information a été Wong et al. (2004), qui a développé une stratégie de "gestion intégrée de l'acidité du sol" (GIAS). Ils considèrent que cette stratégie est " un soutien important pour les systèmes de production à utilisation basse d'intrants communément pratiqués dans les tropiques." Les principaux problèmes dans l'application de la stratégie dans les régions telle que la RGLAC sont la surexploitation des ressources naturelles par d'extrêmes surpopulations, les petites surfaces des exploitations agricoles dominantes, la disparition inhérente d'espèces pérennes, y compris les arbustes et les arbres, et un revenu bas. Par conséquent, les agriculteurs avec des systèmes de production à utilisation basse d'intrants ont un accès extrêmement limité aux résidus de plantes, aux déchets organiques, au fumier, aux émondes d'arbres et à d'autres sources de MO en comparaison avec leurs besoins. Même si les sources de

MO requise sont disponibles, les petits agriculteurs n'ont pas de moyens pour s'en procurer ; par exemple, acheter le fumier comme une source de N peut coûter plus cher que d'acheter l'engrais inorganique par unité de N (par ex., Gikongoro, Province du Sud, Rwanda). En parallèle, les coûts des sources de MO peuvent être plus élevés que les coûts de la chaux exprimés par unité équivalente d'alcalinité. Par conséquent, les technologies de la stratégie GIAS sont proposées ci-dessous dans le contexte de GIFS, avec un accent sur l'accès amélioré aux intrants externes[20], au lieu de les remplacer au moins partiellement.

VII.3.2. Gestion de la Matière Organique

L'utilisation du fumier et d'autres sources de MO est testée et suggérée dans la lutte contre les sols acides. Un rendement équivalent de sorgho a été réalisé sur des sols acides avec environ 20 t/ha de composte comparé avec le sorgho traité avec 0,6–1,7 t/ha de $CaCO_3$ (III.1). Dans une dissertation complète concernant le traitement de l'acidité des sols avec MO au Rwanda, Mbonigaba (2007) offre d'abondantes preuves que la MO peut être utilisée pour améliorer plusieurs caractéristiques des sols acides. Dans une expérience menée au Rwanda, 30t/ha de composte composé de MO végétative, de déchets ménagers, et de fumier bovin a été ajouté au sol acide. Après 5 mois, comparé au traitement du témoin, la quantité de l'Al^{+3} échangeable a baissé de 3,77 à 2,44 cmol/kg, et Al^{+3} + H^+ a baissé de 4,0 à 2,7 cmol/kg. Pendant la même période, la quantité massive de MO ajoutée comme compost a élevé le pH du sol seulement de 4,4 à 4,6. Dans une expérience citée par Mbonigaba (2007), l'application de 150 t/ha de déchets organiques urbains sur un sol acide a élevé son pH de 3,3 à 6,7 après 18 mois.

Il est improbable que les agriculteurs dans la RGLAC auront accès à d'aussi grandes quantités de MO et qu'ils seront désireux et capables de la répandre sur leur terre. Par ailleurs, des exemples de MO causant la diminution du pH du sol existent. Pour l'utilisation optimale de fumier et d'autres sources de MO, la complexité des effets négatifs et positifs devrait être comprise. Wong et al. (2004) présentent un document efficace pour une meilleure compréhension.

MO et Acidification du Sol

Deux formes d'acidification dans lesquelles MO joue un rôle sont discutées dans II.1. La production de la MO est l'une d'entre elles ; la transformation des éléments nutritifs et l'assimilation des plantes sont des sources de l'acidité du sol. Puisque la plupart des plantes assimilent plus de cations que d'anions, H^+est extrudé par les plantes, aboutissant à un équilibre ionique, mais aussi à une diminution en pH de la solution de sol. Exporter des champs les produits des cultures (graines, fruits,etc.) et les sous-produits cause un gain net « permanent » de H^+ (édification graduelle de l'acidité du sol) ; l'exportation des matières végétales cause l'acidification.

L'Acidification se produit aussi lorsque la MO(S) est dégradée.
La MOS est une source de CO_2; lorsque les micro-organismes dans le sol décomposent la MO, le gaz de CO_2 dégagé de la décomposition se combine avec de l'eau dans le sol pour produire H^+ et le bicarbonate $(HCO_3)_2$. L'acidité produite à partir du CO_2 dans le sol est plus grande que l'acidité produite à partir du CO_2 dans l'atmosphère. La MOS contient aussi des acides organiques et des

[20]Les facteurs de production tels que les engrais inorganiques et les amendements comme la chaux.

groupes carboxyliques et phénoliques réactifs qui sont des sources d'acidité (H^+). Finalement, une minéralisation plus poussée de l'ammonium au nitrate dégrade le N organique et cause l'acidité.

MO et Pouvoir Tampon

Les minéraux d'argile, les oxydes d'Al et de Fe, et la MO(S) sont des sources de H^+ dans la solution de sol qui résulte de la dissociation du H^+de ces matières (voir II.1 et ci-dessus: "Acidification de MO et du Sol"). Cependant, le tamponnement est aussi fourni par MO(S) et d'autres matières, qui ont des groupes fonctionnels qui peuvent accepter et perdre H^+. Les sols avec un taux de MOS élevé, l'argile ou les oxydes d'Al ou de Fe ont un plus grand pouvoir tampon de sol que les sols sablonneux ou les sols pauvres en MO. Avec un pouvoir tampon croissant suite au MOS, la CEC augmente aussi, par conséquent, la CECE pourrait s'améliorer. La contribution de MOS est typiquement un effet à court et moyen terme ; sur une période longue, la désagrégation des minéraux du sol tamponne le pH du sol et, en faisant ainsi, dégage des éléments nutritifs tels que K, Mg, et Ca (Wong et al. 2004; voir VII.3.3).

Plus le pouvoir tampon du sol est élevé, plus la chaux est requise pour changer le pH du sol. Plus de chaux est nécessaire pour augmenter le pH d'un sol avec un haut, plutôt qu'un bas, statut de MOS ; plus de chaux est nécessaire pour changer le pH d'un sol argileux qu'un sol sablonneux[21].

MO comme Matière de Chaulage

Les acides organiques sont mentionnes ci-dessus comme une source de l'acidité du sol. Cependant les mêmes acides contribuent a la correction de la toxicité en Al, *en formant des complexes avec* H^+ *et* Al^+; l'acidité du sol et la toxicité en Al ne sont tout simplement pas proportionnelles[22]. Wade et al. (1986) ont cultivé du soja (une culture sensible) sur des sols d'une forêt pluvieuse qui avait été récemment défrichée. Le chaulage n'avait pas un effet important de rendement accru ; la toxicité en Al fut supprimée à cause de tous les acides organiques qui avaient été produits dans le processus de dégradation de la MOS. Wong et al. (2004) soulignent que cet effet de la MO a deux avantages en comparaison avec la chaux : (a) parce que la chaux cause une plus haute solubilité en Al, des valeurs plus élevées en pH sont requises pour diminuer la toxicité en Al, et (b) la chaux a un effet limité sur l'acidité du sous-sol, alors que les composantes de type fulvate de la MO humifiée devraient accroître le pH du sous-sol eu égard à leur mobilité.

La MO peut aussi avoir un effet de chaulage quand elle contient des concentrations considérables d'alcalinité et des cations y relatifs. A cause de ceci, le fumier a fréquemment un pH plutôt élevé (7-9). Recycler la MO sur le sol peut ajouter d'autres cations au sol et renverser le processus d'acidification. Une expérience d'incubation de laboratoire a été menée pour faire l'investigation de l'effet d'ajouter une gamme d'amendements organiques à un sol acide sur le pH et l'Al échangeable

[21] Pour un sol sur la terre grasse, le BC peut être deux fois plus élevé que pour un sol sablonneux si l'augmentation du pH est la même. Pour une terre grasse argileuse, le BC peut même être quatre fois plus élevé que pour le sable. Mais à cause du pouvoir tampon élevé, ça prend aussi beaucoup plus de temps avant que le pH ne retourne à son niveau original avant le chaulage.

[22] Wong et al. (2004) montrent la complexité concernant l'effet de chaulage de la MO, en mentionnant la complexation des protons par les anions organiques, la décarboxylation microbienne des anions organiques et l'ammonification des matières de plantes ayant un taux élevé en N.

et soluble (Naramabuye et Haynes, 2006). Les déchets comprenaient les matières de plantes (maïs, sorgho, herbe kikuyu, graines de soja, résidus de trèfle rouge, et émondes d'acacia), les fumiers animaux (kraal, pâture et viande de bœuf, porc, poule pondeuse et poulet à rôtir), compost ménager, boue d'eaux usées, et les déchets industriels de gâteaux des filtres. Les amendements ont été analysés pour un certain nombre de facteurs, qui ont été proposés comme ceux qui prédisent l'effet de chaulage des résidus organiques spécifiques. L'alcalinité de la cendre et le contenu des cations basiques ont été des facteurs en très étroite corrélation avec les augmentations du pH de sol. L'alcalinité de la cendre a été proposée comme un facteur de laboratoire convenable pour prédire le potentiel de chaulage des matières organiques[23].

On doit se rendre compte que le fumier et d'autres sources de MO ne peuvent pas être considérées comme des matières de chaulage à part si elles ont été produites au champ pour être traitées[24]. Dans ce cas, les cations qui sont enlevés par le moissonnage sont ramenés, un processus qui sera toujours accompagné de pertes (par ex., les grains et les fruits ne sont pas compostés). Le fumier, le compost, et d'autres sources de MO avec une alcalinité adéquate et un contenu de cations peuvent être considérés comme de réelles matières de chaulage s'ils sont produits en dehors des champs à chauler (bords de routes, buisson, pâturages, la volaille nourrie avec des concentrés, etc.). Par exemple, Nabahungu et Ruganzu (2001) ont utilisé *Tithonia diversifolia* au Rwanda pour corriger les sols acides utilisés pour cultiver les haricots volubiles et le maïs au Rwanda. Le rendement de haricots et la biomasse de maïs a augmenté de façon significative avec 4 t/ha de *Tithonia diversifolia,* combiné avec 0, 0,5 ou 1,0 t/ha de travertin, comparé avec le témoin auquel aucun amendement de sol n'a été appliqué.

Equilibre

La MO semble être à la base des processus qui d'une part contribuent à l'acidification et d'autre part ralentissent ou corrigent l'acidification. Certains processus ont des effets à court terme et d'autres des effets à moyen ou long terme. Différentes matières végétales contribuent aussi aux différences observées. Il est par conséquent difficile de déterminer l'effet d'un traitement individuel de MO. Cependant, une forme de généralisation est possible. Des activités anthropogéniques augmentent et accélèrent l'acidification du sol, malgré le fait que le contraire se produit temporairement[25], comme dans le cas du défrichement de forêt discuté ci-haut (Wade et al., 1986). Un processus a été déjà traité: l'utilisation des engrais inorganiques acidifiant contenant N et/ou S (VII.1.3). Pire est, cependant, l'exportation de la MO sous forme de plantes ou de matière animale dérivée de plantes (voir ci-haut : « MO et l'Acidification du Sol ») et la diminution y relative dans le statut de la MOS. Ce dernier se produit dans une agriculture non durable, avec des équilibres négatifs des éléments nutritifs et de la MO du sol. Un équilibre négatif de la MOS cause une diminution progressive dans la capacité de rétention d'eau et des éléments nutritifs du sol et une

[23] L'alcalinité en cendre est proposée parce qu'elle est relativement simple à mesurer, et les valeurs reflètent le contenu initial des anions organiques acides, la matière de l'humus et le $^{CaCO}{}_{3}$ dans les déchets (Narabuye and Haynes, 2006).

[24] L'agroforesterie est une exception (VII.3.3).

[25] L'acidité décroissante due aux pertes de MOS n'est que temporaire, car le sol est en train de perdre son pouvoir tampon et de neutraliser l'acidité.

augmentation inhérente dans le lessivage. Le lessivage de nitrate[26] semblait avoir, de loin, la plus grande contribution à l'acidification du sol des régions tropicales à des précipitations élevées (>2.000 mm/an). L'acidification liée à la production du nitrate ne peut plus être neutralisée quand le nitrate est lessivé sous forme de sel neutre. Ses effets sont les plus élevés dans des systèmes intensifs non durables (Wong et al., 2004).

Wong et al. (2004) présentent aussi un exemple du contraire: la détoxification d'Al en utilisant une forme d'agroforesterie conduisant à une augmentation de la MOS. Neuf ans après le début d'une expérience de méthode de culture en couloirs avec des haies fruitières dans les tropiques, utilisant cinq espèces différentes d'arbres et leurs émondes[27], des échantillons de sol ont été pris (0–15 cm couche supérieure du sol) et analysés. La contribution annuelle d'environ 8,5 t/ha de MO avait augmenté le contenu de la MOS dans des parcelles à des degrés différents (2,00%–6,25%). Une corrélation positive existait avec le pH et la CECE, et une corrélation négative existait avec la saturation en Al et la concentration de l'Al échangeable.

L'effet positif de la MO sur l'acidité du sol est en rapport avec l'assimilation supérieure de cations comparés aux anions ci-haut mentionnée. La matière de plante vivante ou morte contient des groupes fonctionnels anioniques—ce qu'on appelle alcalinité— qui sont liés aux cations basiques. Le degré d'alcalinité détermine l'effet de chaulage de MO (voir V.1). Sa liaison avec les cations basiques (Ca^+, Mg^+, K^+, et Na^+) implique cependant que la concentration totale de ces cations de base est étroitement liée à la capacité de la matière de la plante de neutraliser l'acidité du sol. Ceci est utilisé pour quantifier l'alcalinité de MO à travers l'utilisation de la cendre. « L'alcalinité de la cendre » peut être mesurée, ou estimée à partir de tableaux publiés (Drechsel and Zech, 1991; Palm et al., 2001).

La matière de plante contient des concentrations d'alcalinité différentes en rapport avec le lieu de production et les propriétés des espèces de plantes. Même sous le même climat, les sols peuvent différer en pH. Les plantes produites sur des sols avec un pH supérieur à 7 ont en moyenne un plus grand taux d'alcalinité que les plantes produites sur des sols avec un pH inférieur à 7. En d'autres mots, la MO dérivée des premières plantes a une plus grande capacité de chaulage que la MO dérivée de ce dernier. Le premier type de MO peut être utilisé pour transférer l'alcalinité aux sols acides, en acidifiant progressivement les sols basiques où elle est produite. En outre, la désagrégation des minéraux du sol permet l'accumulation d'alcalinité dans la biomasse des plantes. Certaines espèces jouent un rôle actif dans la désagrégation du sol et seront par conséquent relativement de (bonnes) productrices de MO élevée en alcalinité. Un effet similaire se produit quand des espèces avec des racines profondes ramènent les cations lessivés à la surface du sol. Ce processus, quelquefois appelé « pompage des éléments nutritifs », est exploité en agroforesterie (VII.3.3).

Il y a une distinction entre ce qu'on appelle pompage des éléments nutritifs et le transfert d'alcalinité à partir d'ailleurs. Le pompage des éléments nutritifs diminue la vitesse de l'épuisement du sol et la diminution de l'acidification y relative ; l'alcalinité qui est ramenée à la surface du sol

[26] Les principales sources du nitrate sont la MOS minéralisante, l'urée, et les engrais d'ammonium.
[27]Les arbres qui constituent l'arbre de haie ont été émondés pendant la saison culturale et toute la biomasse émondée était retournée dans les couloirs comme paillis.

est un élément du champ ou de la ferme qui serait autrement perdu. Le transfert d'alcalinité de l'extérieur de la ferme peut mener à une réelle correction positive de l'acidité du sol; il concerne un intrant extérieur, comparable à la chaux. Dans ce contexte, on doit distinguer entre les sources de MO, et l'alcalinité inhérente, qui sont produites sur la ferme ou qui sont apportées d'ailleurs (déchets organiques, fumier, composte, paille, autres sous-produits agricoles, etc.) L'utilisation de ses propres produits, aussi efficacement que possible, diminue la vitesse d'acidification liée à l'exploitation agricole (production et exportation de MO et de l'alcalinité qu'elle contient à partir des champs et des fermes). L'utilisation des mêmes produits obtenus d'ailleurs augmente l'alcalinité et mène à un certain degré de neutralisation de l'acidité.

Les différences clé entre la MO et la chaux sont le taux d'alcalinité limité et la disponibilité limitée de MO (VII.3.1). Dans le premier exemple dans VII.3.2, un rendement équivalent de sorgho a été réalisé avec environ 20t/ha de compost et avec 0,6–1,7 t/ha de $CaCO_3$ de. En d'autres mots, 1 t de compost avait une efficience de chaulage variant entre 0,03 et 0,08 t/ha de l'équivalence de $CaCO_3$. Dans le second exemple, 30 t/ha de compost conduit à une diminution de la toxicité en Al de 3,77 à 2,44 cmol/kg. En utilisant l'équation V.3-2, pour neutraliser 1,33 cmol/kg de la toxicité en Al afin d'estimer l'efficience de chaulage du composte:

BC = facteur x 1,33

Une valeur de 1,3 t/ha de chaux est requise pour des cultures modérément tolérantes (facteur =1) et 2 t/ha pour des cultures sensibles à Al (facteur = 1,5). Ainsi, 1 t/ha de compost a un ECC de 0,04–0,07 t/ha.

Une estimation approximative de la disponibilité moyenne de MO est facilement faite dans la RGLAC, où la plus grande partie de la terre est cultivée et/ou surexploitée. Le rendement moyen de céréales est de 1 t/ha/saison et, l'index du rendement étant d'environ 25%, 3 t/ha du sous-produit paille. En d'autres termes, 1 ha produit annuellement en deux saisons 6 t/ha de MO à côté des 2 t/ha de grains. Cent pour cent du recyclage des sous-produits dans les champs où il est produit aide à diminuer le taux d'acidification, particulièrement pour l'acidité qui est causée par l'exportation de récolte et par les pertes d'érosion et de lessivage. Cependant, l'alcalinité de MO fraîchement produite comme la paille sera un facteur inférieur à l'alcalinité du compost ou du fumier. Ceci est même le cas quand la même MO est utilisée pour produire le fumier ou le compost ; pendant le processus de production, l'alcalinité sera concentrée. Le fumier bien géré aura deux ou trois fois la concentration, et le compost peut même avoir cinq fois la concentration.[28] Lors de cette concentration, la quantité de MO diminue plus ou moins proportionnellement. Les pertes de MO et/ou des éléments nutritifs pendant les processus de transformation mèneront aux pertes en alcalinité. Du point de vue du contrôle de l'acidité, l'utilisation optimum des sous-produits de cultures est le recyclage sur place; économiquement, la transformation en fumier ou d'autres utilisations peuvent être plus intéressantes. Il augmente, cependant, le risque d'acidification, vu le

[28]Le poids de la paille est exprimé en matière sèche, alors que les quantités de fumier ou composte utilisées sont souvent exprimées comme « matière fraîche » sans correction pour les quantités d'eau qu'elle contient.

travail requis pour retourner le sous-produit sous forme de fumier ou compost au champ où il a été produit.

La conséquence pratique de ce qui a été décrit est que la MO est rarement une solution pour les sols acides des petits agriculteurs pauvres. A l'exception des bords de routes, ils n'ont pas de terres désertes, de pâturages, ou de forêts ou ils peuvent collecter, à la main ou avec l'utilisation du bétail, la MO pour le transfert d'alcalinité en vue d'améliorer leurs champs. Ils peuvent seulement essayer, en utilisant les sous-produits de leurs propres cultures, de maintenir la vitesse d'acidification aussi basse que possible. Comme la chaux et les engrais, l'utilisation de la MO pour son potentiel de chaulage est une solution pour les riches, qui ont des terres, du bétail, et/ou du capital.

VII.3.3. L'Agroforesterie

Le rôle positif que peut jouer l'agroforesterie dans l'amélioration des sols acides a été illustré dans III.1, III.3, et VII.3.2, mais les processus à travers lesquels ce rôle est réalisé n'ont pas encore été traités. Cependant, dans le cas de l'agriculture des tropiques humides (VII.3.2), il est devenu clair que les exportations agricoles accrues et l'élimination de composantes en bois du système de production conduisent à une diminution de MOS, au lessivage de nitrate accru, et à l'acidification. Plus de 8,8 kmol/ha de H^+ sont perdus annuellement à partir du premier 1 m du profil du sol en Yurimaguas, Pérou, à 2.200 mm/an de précipitation, par une agriculture intensive avec beaucoup d'intrants (Wong et al., 2004). Le contraire se passe dans une agroforesterie de palmiers, avec du riz et des légumes cultivés en dessous; le taux d'acidification est négatif : < -4,0 kmol/ha de H^+. La culture itinérante, l'agriculture à peu d'intrants externes, et l'agroforesterie à plusieurs strates sans intrants externes montrent tous l'acidification, mais bien plus basse que dans le cas de l'agriculture intensive. Entre-temps, la productivité et par conséquent l'exportation de produits agricoles ont été bien plus basses. Les processus causant ces différences seront discutés ci-dessous, aussi bien que le fait que l'agriculture intensive avec beaucoup d'intrants externes devient moins acidifiante et par conséquent plus durable si elle est exécutée dans un contexte d'agroforesterie.

L'Agroforesterie, Une des Technologies de la GIFS

L'agroforesterie est une des technologies de la GIFS et une forme de gestion de MO dans l'agriculture (VII.3.2). C'est une forme très efficace, qui donne, en moyenne, des MO disponibles en plus grande quantité et de meilleure qualité que d'autres technologies. Les espèces ligneuses, les arbustes et les arbres sont des sources de cette MO. Leur production de MO est élevée à cause de leur vie pérenne, conduisant à une accumulation progressive d'éléments nutritifs dans les plantes et dans les sols environnants. Leur MO est relativement bonne (niveau d'alcalinité) à cause de l'enracinement (relativement) profond et du « pompage » y relatif des cations qui sont perdus par le lessivage ou produits par la désagrégation du sol. L'agroforesterie est plus difficile à gérer que d'autres technologies parce que la compétition des arbustes et des arbres avec les cultures rend les bénéfices trop bas à cause de la production décroissante des cultures.

Différentes Formes d'Agroforesterie

Les agriculteurs peuvent bénéficier de différentes manières des arbres pour des objectifs agricoles; optimiser de tels objectifs exige différents systèmes de gestion pour la composante arbre[29] du système de production (Breman and Kessler, 1995). Dans le contexte de la lutte contre l'acidification du sol, deux formes principales doivent être distinguées, sur base de la présence des espèces ligneuses dans le champ et en dehors du champ. Dans le premier cas, le taux d'acidification diminue a cause de la présence des espèces ligneuses; dans le second cas, le transfert de MO à partir des espèces ligneuses peut contribuer à la correction de l'acidité du sol des champs (voir "MO comme Matière de Chaulage" dans VII.3.2). Pour une certaine ferme, le cas le plus intéressant du point de vue de la correction de l'acidité du sol est d'obtenir la MO à partir d'espèces ligneuses en dehors du champ. L'acidification qui accompagne le transfert de MO se produit ailleurs et il n'y a jamais de compétition ni pour l'espace (sur les boisements de la ferme), ni pour la lumière, l'eau ou les éléments nutritifs (arbres dans les champs).

Dans III.1, un exemple Burundais de transfert latéral de la MO à partir des espèces ligneuses est mentionné: 3–6 t/ha d'émondes à partir de simples supports des arbres d'agroforesterie ont été appliqués sur des champs avec du maïs ou des haricots bien fertilisés. Vraisemblablement à cause de la basse acidité du sol et de la basse toxicité en Al, les rendements de maïs et de haricot des champs avec des émondes ont été significativement plus grands que sans ces émondes ; ces dernières ont rendu les engrais plus efficaces (Wong et al., 1995). Les espèces ligneuses avec une grande productivité et une grande alcalinité en cendre seront les plus efficaces pour de tels traitements. Cependant, à cause du faible effet de chaulage, peu d'agriculteurs auront l'énergie et le temps de transporter la MO à leurs champs, même pour des espèces produisant beaucoup de MO avec une alcalinité en cendre très élevée (voir Equilibre dans VII.3.2). Il y a même peu de chance qu'ils utiliseront l'espace pour les boisements qui produisent la MO concernée. Il existe une chance, cependant, que les agriculteurs avec du bétail planteront des arbustes fourragers ou laisseront le bétail paître sur les bords des routes, sur les terres en friche, ou en brousse. Dans ces cas, l'alcalinité provenant des espèces ligneuses peut être apportée au champ sous forme de fumier, dont la biomasse sera de la moitié à un tiers de la biomasse originale.

L'autre forme d'agroforesterie concerne la présence des espèces ligneuses sur le champ. Trois formes secondaires peuvent être toujours distinguées: "le parc à bois", "l'agriculture en couloirs" ou "la culture intercalaire de haies" (voir un exemple dans "Equilibre" dans VII.3.2) et la "rotation des boisements". Dans le cas du parc à bois, les types d'arbres appropriés sont distribués de façon homogène dans le champ et gérés de manière à limiter le mieux possible la compétition (Breman and Kessler, 1995).[30] Dans le cas de l'agriculture en couloirs ou de la culture intercalaire de haies, les rangées des espèces ligneuses sont alternées avec les bandes de cultures. Pour éviter une compétition extrême, les espèces ligneuses sont coupées deux à trois fois pendant la saison culturale, et les coupes sont utilisées comme paillis dans les bandes de cultures. La rotation des boisements fait partie du système de production et constituent une des quatre ou cinq cultures

[29]La distinction entre les arbustes et les arbres est souvent utile. Cette distinction n'est faite que quand elle est utile. Sinon, les termes « arbres » ou « espèces ligneuses » seront utilisés.

[30]Voici les éléments clé de la gestion : les arbres sont distribués de façon homogène; la couverture totale des cimes d'arbres n'est pas plus de 20%–25%; la hauteur du tronc d'arbre est au moins deux fois le diamètre de la cime ; autant que possible, la biomasse produite est recyclée ; et les racines superficielles sont coupées.

rotatives. Leur rotation se passe, cependant, seulement une fois tous les 4-5 ans ; les jeunes arbres sont seulement coupés ou même déracinés, le bois est récolté, et les branches et les feuilles sont laissées dans le champ.

Tableau 10. Comparaison de Différents Systèmes d'Agroforesterie Contribuant à la Lutte Contre l'Acidification.

	Enracinement Profond [a]	Production de Biomasse[b]	Compétition avec la Culture	Taux d'Alcalinité[c]	Taux d'Acidification du Champ
Espèces ligneuses en dehors du champ					
Sur le champ	+++	+++	++[d]	+++	-
Ailleurs	?[e]	?[e]	-	?[e]	-
Espèces ligneuses dans le champ					
Parc à bois	+++	+++	+	+++	+
Rotation de Boisement	++	++	++[d]	++	++
Culture en couloirs	+	++	++	+	+++

-, +, ++, +++ = absent ou négatif, relativement bas, moyen, et élevé

a. Enracinement tel qu'il est influencé par la gestion; en d'autres termes, la propriété des variétés n'est pas prise en compte.

b. Par unité de surface au cours de plusieurs années

c. De la MO produite.

d. Compétition directe limitée, mais sérieuse compétition pour l'espace.

e. Suivant la source de MO ligneuse obtenue en dehors de la ferme.

Le Tableau 10 compare deux formes d'agroforesterie et leurs formes secondaires qui peuvent jouer un rôle dans la lutte contre l'acidification. Les deux premières formes secondaires qui sont à la base du transport de l'alcalinité au champ peuvent diminuer l'acidité du sol; les trois dernières peuvent diminuer le taux de l'acidification. Les trois dernières concernent les formes secondaires qui sont basées sur la présence des espèces ligneuses dans les champs. Parmi les trois, le parc d'agroforesterie diminuera le plus le taux d'acidification, et la culture en couloirs vraisemblablement le moins. La différence est causée par la différence dans l'enracinement, dans la production de biomasse, et dans leur influence sur l'environnement. Seuls les arbres du parc à bois ont le temps de développer des racines profondes pivotantes et un système étendu de racines. Dans le cas de la culture en couloirs, il n'y a pas de racines pivotantes qui se développent et le développement du système racinaire est relativement limité à cause des coupes régulières au dessus du sol.

Dans un parc à bois bien géré, la compétition entre les arbres et les cultures sera plus basse que pour la rotation de boisement ou l'agriculture en couloirs. Malgré la compétition et la contribution limitée dans la lutte contre l'acidification du sol, les agriculteurs peuvent préférer la culture en couloirs ou la rotation des boisements, parce que certaines autres valeurs des produits d'arbre pourraient compenser pour les pertes en rendement de cultures. La rotation des boisements est pratiquée tout près des villes, avec des marchés pour le charbon et les morceaux de bois (Toose

et al., sous presse). La culture en couloirs peut être appréciée, par ex., pour leur production de fourrage.

Définition de l'Agroforesterie

Dans ce rapport, les arbres et/ou les arbustes doivent contribuer aux cultures et à l'intensification de la production agricole. En d'autres termes, ici, l'agroforesterie concerne les systèmes de production agricole dans lesquels les arbres sont présents et suffisamment bénéfiques pour compenser leurs effets négatifs sur les cultures qui résultent de leur compétition pour la lumière, les éléments nutritifs, et l'eau. L'agroforesterie est, dans ce contexte, une "épée à double tranchant": elle soutient la lutte contre l'acidification à travers la « fourniture » d'alcalinité comme décrit ci-haut, et elle rend l'utilisation de engrais inorganiques plus efficace et plus profitable comme décrit dans Breman and Kessler (1995) C'est une technologie de la GIFS qui inclue GIAS (Wong et al., 2004) comme une de ses composantes efficaces. Quand elle est bien gérée, elle rend les cultures plus productives suite à l'enracinement de cultures améliorées, à la capacité de stockage d'eau et des éléments nutritifs, et à l'accessibilité améliorée des éléments nutritifs et de l'eau. L'efficience améliorée inhérente des engrais et d'autres intrants rend leur utilisation plus profitable.

Rôle des Arbres dans les Systèmes d'Agroforesterie.

Wong et al. (2004) soulignent que deux propriétés rendent les espèces ligneuses particulièrement efficaces pour la GIAS: haute productivité et un taux élevé de cations (presque équivalent au taux d'alcalinité). Ils indiquent que les forêts naturelles tropicales, végétation dominante pour les régions sensibles à l'acidification du sol, montrent elles-mêmes une acidification limitée. Ils doivent ceci à l'exportation limitée de la MO, la large diversité des espèces, et le lessivage limité dû à l'immobilisation des éléments nutritifs (système racinaire étendu et permanent) et un stockage important des éléments nutritifs dans la biomasse (vivante et morte). On appelle les agro-écosystèmes basés sur les arbres des « mimiques économiques d'écosystèmes naturels »

Les quantités de cations basiques (Ca^+, Mg^+, K^+, et Na^+) qui sont dégagées par les arbres dans la couche supérieure du sol des forêts, et qui aident à éviter une acidification considérable, sont relativement restreintes. Dans une forêt en Ecosse, elle varie entre 0,2 et 3,2 keq/ha/an dans les premiers 50 cm, selon le matériel parental des sols (Guicharnaud and Paton, 2006). Kolka et al. (1996), pour une forêt aux Etats-Unis, ont mesuré 0,2–0,5 keq/ha/an, selon la texture du sol. Les valeurs pour les systèmes d'agroforesterie seront une fraction de celles observées dans les forêts, parce que la couverture totale de la composante de l'arbre des systèmes ne devrait pas dépasser 20%-25%.

Breman and Kessler (1995) décrivent en détail la différence entre les espèces ligneuses et les cultures annuelles, et la manière dont les cultures en agroforesterie partagent une partie de la « plus-value » des espèces ligneuses qui font partie du même système de production. La pérennité, les larges dimensions génétiquement déterminées, une longue vie, et une recirculation efficace interne et externe d'éléments nutritifs diminuent les pertes en éléments nutritifs et causent une accumulation des éléments nutritifs. Par conséquent, dans des systèmes bien gérés, le taux de la MOS est bien plus élevé que pour les cultures annuelles. Le bénéfice principal pour les cultures est une plus grande efficience de l'utilisation des éléments nutritifs et d'eau à cause de la diminution des pertes en éléments nutritifs et en eau (à travers le ruissellement et le lessivage). Ramener les

éléments nutritifs lessivés à la surface (« pompage des éléments nutritifs ») est seulement une petite fraction des contributions positives des arbres, mais une contribution relativement importante dans le cas de GIAS (voir ci-haut)

Puisque une contribution principale des arbres dans les systèmes d'agroforesterie est la diminution des pertes en éléments nutritifs, le rôle positif des arbres augmente quand la disponibilité des éléments nutritifs est élevée. Dans le parc à bois d'Acacia Faidherbia en Afrique de l'Ouest semi aride, la disponibilité de N pour le mil ou le sorgho est d'environ 25kg/ha à cause de la présence des arbres d'Acacia, comparé avec $\leq$ 20 kg/ha pour les champs sans arbres. Si l'engrais inorganique est utilisé pour offrir à la culture 100 kg/ha de N supplémentaire, le N de l'engrais est aussi utilisé avec une efficience d'au moins 25% de plus (Breman and Kessler, 1995). Au lieu d'environ 5 kg/ha N supérieur, la culture reçoit 5 + 25 = 30 kg/ha N supérieur. L'agroforesterie qui rend les éléments nutritifs externes plus efficaces est plus bénéfique pour les agriculteurs que l'agroforesterie qui vise la diminution de l'utilisation des éléments nutritifs externes. L'agroforesterie qui prend en considération l'accessibilité accrue pour les petits agriculteurs des engrais inorganiques conduit à un bien plus grand rendement des cultures et une biomasse globale, vivante ou morte, plus élevée (culture plus arbres, litière, et MOS).

De la même façon, l'agroforesterie qui cherche à rendre le chaulage plus efficient sera plus rentable que l'agroforesterie comme une alternative pour le chaulage. Les quantités absolues d'alcalinité qui sont requises pour corriger la toxicité en Al dans la région sont extrêmement élevées en comparaison à l'alcalinité qui peut être offerte par la MO des arbustes et des arbres (comparez les indications de besoins en chaux dans V et VI avec l'offre potentielle de l'équivalence de chaux par MO dans « Equilibre » dans VII.3.2). Pour les bénéfices complets et plus durables de l'agroforesterie plus chaulage, les engrais inorganiques doivent être une composante clé du paquet (par ex.., VII.1.2 et VII.3.2); sans eux, la chaux conduira avec le temps à l'épuisement du sol (Note en bas de page 18). L'utilisation des engrais inorganiques sera aussi bénéfique pour les arbres, qui deviendront plus larges que s'ils sont dans des conditions naturelles, produiront plus de biomasse, et conduiront à plus de litière et de MOS. En d'autres termes, alors que leur couverture dans les systèmes d'agroforesterie ne devrait pas dépasser 25%, leur effet peut être plus grand que celle d'un quart d'une forêt naturelle (voir ci-dessus).

A part la couverture et l'utilisation d'engrais inorganiques, les propriétés des espèces d'arbres de l'agroforesterie jouent un rôle clé dans leur ultime contribution à la lutte contre l'acidification du sol. Les propriétés positives indiquées par Breman and Kessler (1995) sont la forme (les arbres, pas les buissons), le modèle et la densité de l'enracinement (enracinement extensif mais pas trop superficiel), et le taux de minéralisation de la MO (pas trop rapide, pour aider à édifier la MOS). Ils devraient avoir ajouté "un contenu élevé de cations basiques" au cas où le système d'agroforesterie doit aussi servir à la gestion de l'acidité du sol. Peu de choses semblent être connues à propos de ces propriétés en rapport avec les espèces d'arbres dans la région. Même pour les espèces qui sont utilisées dans l'agroforesterie, l'information relative à ces propriétés d'arbres n'a pas été trouvée. Une exception intéressante est le bananier. Ce n'est pas une espèce ligneuse, mais c'est une espèce pérenne qui produit une quantité élevée de biomasse qui donne de la stabilité à beaucoup de systèmes de production dans la région. Le bananier est connu pour son taux élevé en K et il joue vraisemblablement un rôle important dans le maintien en la circulation du K, au lieu de le perdre du système par le lessivage. L'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) a illustré son importance en étudiant la production du café et de la banane en monocultures

et en combinaison ; ensemble, les deux espèces ont une production totale plus élevée que la somme d'une production séparée (Van Asten et al., 2008).

Problèmes concernant l'Agroforesterie

Malgré le rôle positif que l'espèce ligneuse peut jouer, dans beaucoup de cas, les agriculteurs préfèrent l'élimination des arbustes et des arbres de leurs champs. La compétition avec les cultures pour la lumière, les éléments nutritifs et l'eau est une raison importante. Le Tableau 10 montre que pour les différents types d'agroforesterie, le système de parc à bois a le degré de compétition le plus bas avec les cultures. La note en bas de page 30 résume les instruments de gestion clé pour la diminution de la compétition arbre-culture dans un parc à bois.

Un autre problème dans l'utilisation de l'agroforesterie pour lutter contre l'acidification du sol est la sensibilité des espèces d'arbres et de buissons à l'acidité du sol. Encore, une connaissance limitée existe sur les propriétés des variétés potentielles d'agroforesterie. Yamoah et al. (1989) ont étudié la performance des arbustes en allées dans la région des hautes terres du Rwanda Ils ont déterminé que *Sesbania sp.* croissait plus rapidement que *Leucaena sp.* dans le Plateau Central et dans la Région Montagneuse de Buberuka. Le pH du sol était 4,3 dans la région du Plateau Central et 4,8 dans la Région Montagneuse de Buberuka. L'application de seulement 0,75 t/ha de chaux a augmenté la croissance de tous les arbustes. *Calliandra sp.* et *Leucaena sp.* ont répondu le mieux à l'application de la chaux et *Sesbania sp.* fut l'arbuste qui a le moins répondu. En d'autres mots, *Sesbania sp.* semble le plus tolérant à l'acidité du sol.

Enfin, le système foncier peut être un sérieux goulot d'étranglement, particulièrement en RDC. La plantation d'espèces ligneuses n'est pas souvent appréciée par les propriétaires de terres. Au cas où elle est acceptée, des contrats spéciaux doivent être établis, et les coûts de l'utilisation de la terre augmentent considérablement.

VII.3.4. Intégration Agriculture-Elevage et le Rôle des Légumineuses

Des parallèles forts existent entre l'intégration agriculture-élevage et l'agroforesterie dans l'appui au contrôle de l'acidité du sol pour la production agricole :

- La MO qui est apportée de l'extérieur du champ sous forme de fumier contribue à la diminution de l'acidité du sol ; le fumier qui est produit à partir de la MO de la ferme (par ex., les sous produits des cultures) diminue le taux d'acidification. Seul le fumier produit à partir du fourrage extérieur concerne l'alcalinité externe (et les éléments nutritifs; voir ci-dessous). L'alcalinité qui est obtenue de cette manière dépend non seulement du nombre d'unités de bétail tropical (UBT) impliquées dans le transport, mais aussi du fourrage disponible et accessible et des espèces de bétail. Vraisemblablement, le taux d'alcalinité du fumier augmente avec le fourrage allant des plantes annuelles aux espèces ligneuses en passant par les espèces herbacées pérennes. Vraisemblablement, le fumier des brouteurs tels que les chèvres a un taux d'alcalinité plus élevé que celui de ceux qui pâturent comme les bovins.
- Beaucoup plus de MO est disponible quand l'intégration agriculture-élevage est utilisée pour rendre les engrais inorganiques économiquement faisables plutôt que pour limiter l'utilisation d'engrais inorganiques. Il a été montré pour le Rwanda que la densité du bétail augmente avec la fraction de terre sous cultures. Ceci est typique pour l'agriculture limitée par le manque d'éléments nutritifs : le bétail sert principalement le transport des éléments nutritifs à la ferme. Avec l'occupation croissante de la terre par les cultures et la croissance plus que proportionnelle du bétail,

ce dernier perd progressivement sa fonction de production et d'épargne, alors que la terre est épuisée et dégradée (Breman et al., 2007). Seule l'utilisation d'engrais inorganiques peut stopper le processus, en augmentant la quantité et la qualité du fourrage et en permettant des densités animales plus élevées et/ou une production animale supérieure.
Il est impossible de maintenir de façon durable une seule vache sur une ferme moyenne de 0,7 ha si la pâture n'est pas possible en dehors des 0,7 ha ; mais plusieurs vaches peuvent être tenues et elles peuvent bien produire sur les 0,7 ha quand les engrais inorganiques sont utilisés. En d'autres mots, l'intégration agriculture-élevage peut jouer un rôle dans le contrôle de l'acidité du sol si le pâturage en dehors de la ferme est possible et/ou si les engrais inorganiques sont utilisés. Par UBT, quelque plus de 1 t de fumier (matière sèche) deviennent disponibles, dont le taux d'alcalinité sera 2-3 fois plus élevé que celui en provenance des sous produits des cultures.

Au Rwanda, il a été trouvé qu'à cause de la déficience en P et d'une forte acidité du sol, la chaux et l'engrais P étaient nécessaires pour augmenter les rendements de sorgho. Sur des sols ferralitiques acides et très pauvres (Ultisols), les rendements ont été limités par le manque de P et l'acidité, malgré la conservation du sol et de l'eau et l'application de 10 t/ha de fumier de bétail et de 6 t/ha de paillis légumineux. Roose et Ndayizigiye (1997) ont conclu que le sol acide déficient en N, P, et Ca ne pourrait pas être adéquatement fourni avec P par l'utilisation du fumier. L'engrais P et la chaux ont été aussi requis.

Une étude sur la rotation de cultures et les amendements du sol dans la Crête Congo-Nil au Rwanda (Rutunga and Neel, 2006) a trouvé que, sur une période de 9 ans, il n'y avait que très peu ou pas de rendement sans engrais. L'application d'engrais a augmenté les rendements, avec les pommes de terre et l'éleusine répondant le mieux. Le chaulage était absolument nécessaire pour obtenir des rendements acceptables en utilisant l'engrais NPK (c.à.d, urée, triple superphosphate, et différentes formules de NPK), et un taux élevé de fumier de ferme riche a montré des effets positifs sur les rendements jusqu' à 4 ans après son application. Un, 4,5, et 8 t/ha de chaux brûlée (39,2% CaO, 4,0% MgO) appliquée trois fois dans 8 ans ont élevé le pH du sol à 6,5. Dans ces conditions de l'expérience de Mata, les effets de 2 t/ha de chaux brûlée sont restés significatifs jusqu' à trois ou quatre saisons. Les effets des engrais NPK ont duré une année, et 35 t/ha de fumier avaient des effets discernables, positifs sur le rendement pour quatre saisons consécutives. Après une dose basale de chaux, avec des applications subséquentes de 8 t/ha de fumier après 2, 4, et 7 ans, le pH du sol acide a augmenté de 4,7 à 5,2.

En utilisant la formule de V.3.3, une dose de 2,31 t de $CaCO_3$ est obtenue pour une telle augmentation en pH. Ou, les 35 t de fumier avaient une valeur de chaulage équivalente à 2,31 t de $CaCO_3$. En d'autres termes, 1 t de fumier a une efficience de chaulage de presque 0,1 ECC/t. Ceci est légèrement plus que les valeurs qui ont été estimées pour le compost sous « Equilibre » dans VI.3.2.

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, un lien entre l'intégration agriculture-élevage et l'agroforesterie peut être créé à travers l'introduction de bandes anti-érosives de graminées pérennes et/ou d'arbustes fourragers. Les arbustes légumineux sont suggérés par Wong et al. (2004), en considérant leur valeur élevée en protéines. Cette suggestion devrait être considérée avec prudence. On doit vérifier premièrement si la protéine est plus limitative que l'énergie pour le système d'élevage concerné ainsi que la quantité et la qualité de fourrage qu'il offre. Quand le fourrage légumineux est nourri aux ruminants alors que l'énergie est limitante, la protéine

supplémentaire est perdue. En outre, Wong et al. (2004) eux-mêmes indiquent: “selon l’espèce de légumineuse, entre 0,2 et 0,7 d’un mole de H+ est excrété par mole de N fixé.” En d’autres mots, la fixation biologique de N contribue un peu à l’acidification du sol.

VII.3.5. Intensification dans un Contexte GIFS x GIAS

Les paragraphes précédents ont montré qu’il n’existe aucune alternative organique efficace pour le chaulage; il n’existe certainement pas une alternative bon marché pour les petits pauvres agriculteurs :

- L’équivalence de chaulage de la MO est 0,1–0,05 pour le fumier et le compost ; pour les sous produits des cultures, la litière, etc., l’équivalence sera généralement plus basse.
- La MO qui est produite sur la ferme ne contribuera pas à la diminution de l’acidification, parce que sa production cause l’acidification. Elle va, cependant, diminuer la vitesse d’acidification.
- Obtenir la MO de l’extérieur de la ferme exige trop de main d’œuvre et/ou d’argent. La MO avec un taux élevé d’alcalinité risque d’être plus coûteuse que la chaux.

Cependant, la gestion optimale de MO est hautement recommandée; elle ne sert pas seulement le contrôle de l’acidité du sol, elle aide aussi à empêcher un épuisement et une dégradation rapides du sol. Si les moyens sont disponibles, la gestion de la MO, la GIAS, le chaulage, et l’utilisation d’engrais devraient être des composantes de la GIFS. Une telle approche de la GIFS conduit à une productivité agricole et une productivité de l’élevage élevées, une efficience élevée de l’utilisation d’intrants, un pouvoir tampon du sol élevé, la disponibilité accrue du bois, et la diminution de l’érosion. Si la chaux et les engrais inorganiques ne sont pas disponibles ou accessibles, une combinaison de gestion optimum de MO et le choix de cultures tolérantes à l’acidité est le meilleur moyen de maintenir la production de la ferme aussi longtemps que possible, malgré l’acidification et l’épuisement du sol. La gestion optimum de MO dans ce cas est, si possible, une combinaison de l’utilisation maximum sur la ferme de sous produits des cultures, de l’agroforesterie, et de l’intégration agriculture-élevage.

VIII. Impressions Préliminaires sur la Faisabilité Financière de la Correction de la Toxicité en Al

VIII.1. Estimer les Bénéfices de la Correction de la Toxicité en Al

Des données systématiques qui montrent les effets du chaulage sur le rendement n’ont pas été identifiées. Même en utilisant la recherche sur Internet, des séries de données très limitées ont été trouvées. Dans des régions tempérées, la rentabilité du chaulage pourrait être trop évidente; dans les pays tropicaux en développement, même l’utilisation des engrais, pour ne pas mentionner le chaulage, est limitée. Cependant, il y a une connaissance suffisante sur le chaulage pour une première estimation de sa rentabilité au Rwanda. La manière dont ceci est faite et les résultats sont montrés ci-dessous.

VIII.1.1. L’Acidité qui doit être Corrigée

Le Tableau 11 présente une image du problème de l’acidité du sol au Rwanda. Le tableau utilise l’ancienne structure administrative pour les statistiques qui ont été utilisées et la carte de

l'acidité du sol (Appendice B). La position de chaque district au sujet de la productivité de huit cultures a été dérivée des statistiques du MINECOFIN (2003), en utilisant (a) la fréquence que les rendements moyens des huit produits agricoles dans un district sont parmi les plus élevés, les moyennes ou les plus basses du pays et (b) les niveaux de rendement relatifs des trois groupes. Gisenyi semble avoir la productivité agricole la plus élevée, et Butare la plus basse.

Les chiffres de l'acidité du sol sont dérivés de la carte du Rwanda sur l'acidité du sol en Appendice B, en estimant la zone relative pour chacune des quatre classes de pH et en calculant la moyenne pesée (dernière colonne). L'avant-dernière colonne (% < 5 pH) présente la zone occupée par les classes avec le pH le plus bas. Guidée par l'échantillonnage et l'analyse de CATALIST, la valeur moyenne du pH de cette classe a été estimée à 4,7.

Tableau 11. Une Comparaison de la Productivité Agricole au Rwanda Par (Ancien) District Avec la Précipitation Moyenne et l'Acidité du Sol

District	Productivité	Précipitations	Acidité du Sol	
	relative (%)	mm/an	% < 5 pH	moyenne de pH
Gisenyi	100	1.000	50	5,8
Ruhengeri	92	1.300	40	5,4
Kibungo	90	900	5	5,7
Kigali	90	1.000	20	5,2
Cyangugu	87	1.300	60	5,1
Umutara	85	900	10	5,3
Byumba	82	1.200	30	5,4
Kibuye	77	1.000	70	4,9
Gitarama	72	1.100	60	5,0
Gikongoro	67	1.300	70	4,9
Butare	64	1.100	20	5,2

Aucune corrélation ne semble exister entre la productivité et les précipitations; les facteurs du sol (fertilité et acidité) dominent fortement sur les précipitations. Cependant, eu égard à l'acidité du sol et le développement limité inhérent des racines, les cultures seront sensibles pour les périodes de sécheresse, dans des régions relativement sèches et même dans celles qui sont plus humides. La lutte contre l'acidité du sol aura des effets positifs à travers une sensibilité plus basse à la sécheresse ainsi que la disponibilité et l'efficience des éléments nutritifs améliorées. Une corrélation claire existe entre la productivité relative et l'acidité du sol. Le graphique représentant cette relation [31] montre, comme attendu, une diminution en productivité plus que proportionnelle, avec un pH décroissant : la productivité liée aux valeurs moyennes de pH de 5,8, 5,4, 5,15, 4,95, 4,8, et 4,7 est, respectivement, 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, et 50%. La corrélation présentée n'est pas entièrement due à l'acidité du sol ; les régions avec les valeurs de pH relativement élevées sont aussi des régions avec une fraction considérable de sol volcaniques fertiles. Par conséquent, la

[31] Le pH est présenté comme une échelle logarithmique

corrélation qui a été trouvée entre le pH et la productivité peut mener à une surestimation du potentiel du chaulage.

VIII.1.2. Augmentation Relative du Rendement à Travers le Chaulage

La disponibilité limitée des données et le manque d'un système d'analyse de l'acidité du sol sont à la base du choix d'utiliser la simple formule dans V.3.3 comme une base pour l'estimation de la rentabilité du chaulage. En d'autres mots, seul le pH du sol est utilisé pour l'estimation, et la quantité de chaux pour atteindre 5,2 le pH (H_2O) est à la base de la rentabilité indiquée. C'est le niveau du pH qui est accompagné par une saturation critique en Al (SCA) de $\leq$ 30%, un niveau acceptable pour beaucoup de cultures. Augmenter le pH de 4,7 à 5,2 exige 2,31 t/ha $CaCO_3$. En considérant le Tableau 11, il mènera à une augmentation de production de 50% à 82% au Rwanda, une augmentation de 64% en comparaison avec la situation de départ. Il est vrai que des rendements plus élevés sont obtenus en utilisant un pH de 5,5 ou même de 6,0 comme niveaux à atteindre par le chaulage. Cependant, l'effet par unité de chaux diminue rapidement au dessus de pH 5,2 , et le risque pour des effets négatifs du chaulage (érosion) augmente.

Les augmentations de rendement dues au chaulage seront estimées pour l'agriculture intensive qui utilise aussi les engrais. VII.1.2 souligne le danger d'utiliser la chaux sans engrais. Néanmoins, les agriculteurs peuvent le faire parce qu'ils manquent les moyens pour les acheter tous les deux ou à cause des bénéfices à court terme qu'ils obtiennent au prix d'une production durable. Pour avoir une idée de ce risque, les augmentations de rendement à travers le chaulage seront également estimées pour l'agriculture extensive sans utilisation significative d'engrais. Ceci est une simple information supplémentaire vu le fait que l'effet du chaulage sur le rendement est souvent présenté comme rendement relatif à différents niveaux de pH ou de toxicité en Al.

Selon les rapports des essais individuels, des variations plutôt larges dans l'augmentation du rendement sont observées. Ceci n'est pas étonnant surtout lorsque ces observations concernent une année ou un nombre limité d'années; par exemple, l'aspect météorologique peut à lui seul causer d'immenses variations. En Maurice, le chaulage de deux variétés de pommes de terre a conduit à une augmentation de rendement de 22% et 8%. CATALIST a obtenu jusqu'à 27% au Burundi (Kayanza), une augmentation moyenne de 16% au Sud du Rwanda (n = 5), et de 19% au Nord (n = 5). Pour le blé, CATALIST a obtenu une augmentation moyenne du rendement de 25% au Nord du Rwanda (n = 5). Particulièrement au Nord du Rwanda (District de Gicumbi), la variation était forte : pour les pommes de terre, l'augmentation du rendement variait entre -10% et +66%, et pour le blé, entre -10% et +93%.

Le chaulage des variétés de maïs tolérantes et sensibles au Cameroun a augmenté le pH de 4,7 à 5,1 et a conduit aux augmentations de rendements de 82% et 209%, respectivement (The et al., 2001). Avec la chaux, les rendements étaient presque égaux (environ 4 t/ha) ; sans elle, la variété tolérante a produit 2,1 t/ha, et la variété sensible, seulement 1,3 t/ha. Les augmentations absolues de rendements à partir du chaulage étaient de 1,7 et 2,7 t/ha, respectivement. L'engrais P diminue la différence entre le rendement du contrôle des cultivars tolérants et celui des cultivars sensibles, elles sont devenues 2,2 et 1,8 t/ha, respectivement. Combiner P et la chaux conduit à un effet presque égal de chaulage, une augmentation de rendement de 93% et 95%, respectivement.

Les synthèses des données de plusieurs années et plusieurs champs forment une meilleure base pour obtenir une impression quantitative à propos de l'effet de chaulage. Janssen (1999) présente les résultats en provenance d'Allemagne sur les rendements relatifs et le pH (KCl) du sol. Seul dans le cas des sols sablonneux, les niveaux de pH (H_20) inférieurs à 5,2 ont été présentés (pH H_20 = pH KCl + 1)[32]. Pour les pommes de terre, le niveau du rendement de 100% a été trouvé au pH$\geq$ 5,5; les rendements étaient de 96% et 82% à 5,0 et 4,5 pH, respectivement. Le blé et le maïs se sont révélés plus sensibles au pH ; leur rendement de 100% a été trouvé à 6,0 pH. Pour le blé, les rendements relatifs étaient de 97%, 83%, et 35% à 5,5, 5,0, et 4,5 pH, respectivement; pour le maïs, les rendements étaient 97%, 85%, et 51%. Ou bien, augmenter le pH de 4,7 à 5,2 a conduit à une augmentation moyenne de production de 88% à 98% pour les pommes de terre, une augmentation de 11% en comparaison avec la situation de départ. Pour le mais, une augmentation de 34% a été obtenue, augmentant le pH de 4,7 à 5,2; pour le blé, une augmentation de 50% a été obtenue.

Wade et al. (1999) présentent des données similaires pour les tropiques (Tableau 12). Ils ont utilisé les niveaux de saturation en Al au lieu du pH. Un graphique tel que la Figure 1 rend possible d'obtenir une idée approximative des valeurs de pH y relatives : pour le cas du Burundi dans la Figure 1, les saturations en Al de 25%, 50%, et 75% ont été les valeurs moyennes relatives à 5,0, 4,7, et 4,6 pH, respectivement.

Tableau 12. Rendements Relatifs en Rapport avec les Niveaux de Saturation en Al et la Saturation Critique en Al (SCA) des Cultures Tolérantes à l'Acidité (Manioc) et des Cultures Sensibles

Culture	No.[a]	SCA[b] (%)	Rendement Relatif[c] (%)		
			25%	50%	75%
Manioc	3	59 (38–69)	95	93	83
Arachide	6	32 (1–47)	93	84	57
Maïs	13	22 (0–55)	87	63	36
Soja	13	13 (0–32)	89	59	30

a. Nombre d'observations.
b. Saturation critique en Al.
c. A trois niveaux de saturation en Al

Le graphique présenté dans la Figure 1 varie avec le sol, le climat, le temps (distribution des précipitations), etc., parce que l'effet de l'acidité du sol sur des cultures varie avec ces variables. Ceci est illustré par la colonne du Tableau 12 qui présente les valeurs de la saturation critique en Al (SCA) pour les différentes cultures ; derrière la valeur moyenne par culture, les valeurs extrêmes sont présentées. Cependant, Dierolf et al. (1999) présentent les valeurs de SCA qui indiquent les différences similaires dans la sensibilité à l'acidité. Pour le soja, le maïs et l'arachide, ils ont trouvé les valeurs SCA de 17%, 30%, et 40%, respectivement.

En utilisant les données de Wade et al. (1999), l'augmentation relative de rendement est estimée lorsque le pH augmente de 4,7 à 5,2 suite au chaulage. Pour le manioc tolérant, le

[32] La relation dépend de la texture du sol, de la minéralogie, et du taux en matière organique

rendement augmente de 93% à 98%, une augmentation de 5% en comparaison avec la situation de départ. Pour l'arachide moins tolérante, le rendement augmente de 84% à 94%, une augmentation de 12% ; pour le maïs et le soja sensibles, l'augmentation est de 60% à 92%, ou une augmentation de 53%.

Les données de Jansen (1999) et Wade (1999) seront utilisées pour estimer l'effet de chaulage. Trois cas seront considérés: les cultures tolérantes, en utilisant la pomme de terre et le manioc comme exemples ; les cultures sensibles, basées sur les données ci-dessus considérant le soya, le maïs, et le blé, et un groupe relativement tolérant. Dans le premier cas, l'augmentation du pH avec la moitié d'une unité, de 4,7 à 5,2, a été choisie parce qu'elle conduit à une augmentation du rendement en comparaison avec la situation de départ de 15%. Ceci est plus proche des valeurs pour les pommes de terre que pour le manioc à cause de la valeur économique des pommes de terre et la tendance à l'intensification de sa production. Pour les cultures sensibles, une augmentation de 50% est utilisée, qui est dérivée de la moyenne approximative de deux valeurs de l'Allemagne et de deux valeurs des tropiques. Pour les cultures relativement tolérantes, 35% est choisi ; c'est une valeur moyenne pour les espèces légumineuses (arachide, dolique, et pois de pigeon) avec l'exception du soja sensible, dérivée de Wade et al. (1999).

Ces augmentations sont plus basses que celles attendues sur la base de la corrélation entre le pH moyen et les valeurs de productivité dans le Tableau 11 (64% en comparaison avec la productivité à pH 4,7, s'élevant à pH 5,2 ; voir ci-dessus). Cependant, en rapport avec ce tableau, il a été déjà souligné que les valeurs de productivité élevée ne sont pas seulement dues aux niveaux relativement élevés mais aussi à la présence des sols volcaniques hautement fertiles.

VIII.1.3. Augmentations Absolues du Rendement par le Chaulage.

Les augmentations absolues de rendements suite au chaulage peuvent être estimées en combinant le Tableau 11 et les rendements moyens de cultures au Rwanda : 1,0 t/ha pour les céréales, 0,7 t/ha pour les haricots, et 7,3 t/ha pour les tubercules. Les rendements moyens sont ceux relatifs à la productivité de 82% (= (Gisenyi + Butare)/2). A un pH de 4,7, la productivité est 50% (voir ci-dessus), ou les rendements de céréales sont 1,0 x 50/82 = 0,6 t/ha; pour les haricots, 0,7 x 50/82 = 0,4 t/ha; et pour les tubercules, 7,3 x 50/82 = 4,5 t/ha. Pour l'agriculture extensive, sans l'usage d'engrais, les augmentations moyennes de rendement avec une dose de 2,31 t/ha de chaux ($CaCO_3$ standard; le pH augmente de 4,7 à 5,2) sont : pour les tubercules tolérantes, 15% de 4,5 t/ha = 0,67 t/ha; pour les haricots moyennement tolérants, 35% de 0,4 t/ha = 0,14 t/ha; et pour les céréales sensibles, 50% de 0,6 t/ha = 0,3 t/ha.

Pour l'agriculture intensive, l'estimation est plus difficile, car les effets des engrais sur les sols acides sans chaulage ne sont pas connus. La Figure 2 ne peut pas être directement utilisée. Elle présente l'accessibilité pour les cultures des éléments nutritifs du sol; elle présente, au plus, le niveau minimum d'accessibilité des éléments nutritifs des engrais. Les engrais solubles sont plus accessibles que les éléments nutritifs du sol; leur accessibilité moyenne dépendra des conditions du sol et des conditions climatiques ainsi que du temps, de la méthode et de la fréquence de l'application des engrais. L'efficience de certains éléments nutritifs tel que l'engrais P sera, cependant, réduite aux pH bas ; le P appliqué sera fixé (lié avec Al et Fe). Ceci influencera particulièrement l'efficience de l'utilisation d'engrais sur les haricots. En utilisant la Figure 2 et en comparant l'accessibilité de P à pH 4,7 en comparaison avec pH 6,0, il a été estimé que seul un

quart de l'engrais P peut être utilisé à pH 4,7. Pour l'estimation du rendement des tubercules, haricots et céréales fertilisés à pH 4,7, l'approche présentée dans le Tableau 13 (Nzohabonayo et al., en prép.) sera utilisée. Ils utilisent la formule d'engrais moyennement rentable pour les pommes de terre, les haricots, et le maïs au Rwanda,[33] dérivée de Kelly et Murekezi (2000), et la moyenne de l'efficience agronomique basse et élevée moyenne du nutriment clé (N pour les tubercules et les céréales, et P pour les légumineuses telles que le haricot). Pour le présent objectif, l'efficience agronomique basse a été choisie:[34] 1kg de N augmente le rendement des pommes de terre avec 150 kg et celui des grains de céréales avec 12,5 kg de; 1 kg de P augmente le rendement de 22 kg de haricots. Cependant, dans le dernier cas, seul un quart de l'engrais P sera accessible. Cette approche conduit aux rendements moyens à pH 4,7 avec l'utilisation d'engrais: pour les tubercules de 12,0 t/ha ; pour les haricots de 0,7 t/ha et pour les céréales de 1,3 t/ha. Les augmentations moyennes de rendements dues aux doses de 2,31 t/ha de chaux ($CaCO_3$ standard; pH augmente de 4,7 à 5,2) sont: pour les tubercules tolérants, 15% de 12,0 t/ha = 1,8 t/ha; pour les haricots moyennement tolérants, 35% de 0,7 t/ha = 0,24 t/ha; et pour les céréales sensibles, 50% de 1,3 t/ha = 0,65 t/ha. Les estimations obtenues des augmentations de rendements pour l'agriculture extensive et intensive sont résumées dans le Tableau 14.

Tableau 13. Les Doses des Engrais et l'Efficacité Agronomique (AE) Considérée pour Deux Niveaux d'Application d'Engrais.

Culture	$N:P_2O_5:K_2O$	AE[a]	
		Bas[b]	Haut[c]
	(kg/ha)		
Pommes de terre	50 :50 :20	150	225
Haricots	18 : 46 : 0	22	44
Maïs	60 :40 :15	12,5	25
Riz paddy	55 :35 :15	12,5	25

a. Kg du produit principal par kg de l'élément clé (N dans le cas des pommes de terre et les céréales, P_2O_5 dans le cas des haricots).
b. Cas de producteurs inexpérimentés dans la phase initiale de l'utilisation des engrais
c. Cas de producteurs expérimentés dans des conditions favorables de production.

[33] $N:P_2O_5:K_20$ = 50:50:20 pour les pommes de terre, 18:46:0 pour les haricots, et 60:40:15 pour les céréales.
[34]Il se pourrait que l'efficience agronomique basse soit toujours trop élevée. Elle est basée sur le travail dans les régions semi-arides et sous- humides de l'Afrique de l'Ouest, où l'acidité du sol est beaucoup plus rare que dans la RGLAC. Si en effet l'efficience basse est trop élevée, l'effet de chaulage sera plus rentable qu'il est estimé dans le présent chapitre.

Tableau 14. Augmentation du Rendement des Trois Classes de Cultures, Avec et Sans l'Utilisation d'Engrais, Due à l'Application de 2,31 t/ha de $CaCo_3$, Augmentant le pH de 4,7 à 5,2

Cultures	Augmentation de Rendement	
	Sans Engrais	Avec Engrais
	(kg/ha)	
Tubercules (tolérants)	670	1.800
Haricots (intermédiaires)	140	240
Céréales (sensibles)	300	650

VIII.2. Coût Préliminaire: Estimations des Bénéfices

VIII.2.1. Coûts du Chaulage

Le prix, la qualité et le transport de la chaux agricole disponible doivent être pris en compte pour déterminer les coûts de 2,31 t/ha de $CaCO_3$ au Rwanda. Trois cas seront discutés, en considérant les larges différences dans la qualité (V.2) et les coûts. Le Tableau 15 résume l'information. Les trois cas ont reçu des lettres au lieu des noms à cause du manque de connaissance concernant la variation de qualité. Le tableau montre les conséquences extrêmes: le besoin en chaux exprimé en $/ha diffère de plus d'un facteur de 10 quand on compare la chaux la moins chère et la plus coûteuse. Le degré de broyage (facteur de finesse [FF]) crée beaucoup plus de différence dans la qualité que dans l'équivalence en $CaCO_3$ (degré de chauffage en plus du taux en Ca de la matière originale). Cependant, les coûts du transport doivent toujours être ajoutés. Les producteurs proches de la source de chaux « A » ont un réel avantage. En utilisant $15/t par 100 km de transport et en utilisant 100 km comme la distance moyenne entre les mines de chaux et les producteurs, les coûts moyens du chaulage, selon la source, sont $141 (A), $352 (B), et $997/ha (C). On doit conclure que l'application de la chaux avec les qualités de "C" n'est pas économique, alors que "B" est seulement plus économique que "A" pour les producteurs qui sont très proches de la mine. Par conséquent, les coûts de chaulage, selon la distance entre les mines et les agriculteurs, varient entre $100 (proche de la mine de "A") et $320/ha ($\leq$ 50 km de la mine de "B"). Aucune des chaux agricoles disponibles, y compris "A" et "B", n'a assez de qualité pour être utilisée pour longtemps (V.2) ; le contenu en Mg est trop bas. Le Rwanda devrait commencer à exploiter sa dolomite au lieu d'utiliser (exclusivement) la chaux dérivée du travertin.

Tableau 15. Comparaison des Trois Sources de la Chaux Agricole Rwandaise

	Prix[a]	ECC	FF	Requis[b]	Coûts[c]
	($/t)			(t/ha)	($/ha)
A	18	87	62	4,28	77
B	73	105	55	4,00	292
C	100	74	36	8,67	867

a. Les saisons 2006-2007; les prix au Burundi sont toujours environ 50% plus élevés que la chaux la plus chère au Rwanda (quantités exploitées extrêmement petites)
b. L'équivalent pour 2,31 t de $CaCO_3$, pour changer le pH du sol de 4,7 à 5,2.
c. Seuls les prix de livraison, le transport non compris.

VIII.2.2. Bénéfices du Chaulage

Les pommes de terre, les haricots et le maïs seront utilisés comme des exemples pour les cultures tolérantes, modérément tolérantes et sensibles, respectivement. Les prix en 2006 étaient 0,21$, 0,42$, et 0,29$/kg, respectivement. Combiner l'information dans le tableau 14 avec ces prix conduit aux bénéfices bruts du chaulage pour une saison. Les résultats sont présentés dans le Tableau 16. Le chaulage semble être plus rentable dans les systèmes de production intensive plutôt que dans les systèmes de production extensive, si l'utilisation des engrais est rentable. Les coûts et les bénéfices d'utiliser ces derniers ne sont pas couverts ici ; ils sont discutés pour la région par Nzohabonayo et al. (in prép.; voir VIII.2.3 et Tableau 18).

Le chaulage affecte les rendements pour plus d'une saison. La période dépend des facteurs tels que le type du sol (léger ou lourd; bien ou mal tamponné), l'intensité de l'agriculture (intensité de l'utilisation des engrais; quantités des produits exportés du champ), sa fréquence (nombre de saisons culturales par an), et les pratiques agricoles (adoption de la GIFS). Les données relatives à ces facteurs sur la fréquence de chaulage requise sont très nécessaires (VI.4.3). Les rapports comme celui de Beernaert (1999) parlent à propos d'une dose de correction et d'une dose de maintenance ; d'autres parlent de chauler tous les 2–3 ans. La dose de correction qui est utilisée ici est la dose minimum, en tentant d'atteindre pH 5,2 et $\leq$30% de saturation en Al (VIII.1.2). L'effet de la correction ne sera probablement pas maintenu pour "le temps d'inter-chaulage" moyen; pour cela, les bénéfices et les valeurs du rapport valeur:coût (RVC) seront estimés sur une dose de correction tous les 2,5 ans. Les bénéfices et la valeur RVC qui en seront tirés seront présentés pour l'entière dose de correction moyenne, ce qui est l'investissement requis en vue de créer les chances pour l'intensification dans les régions avec des sols acides. On peut s'attendre à ce que les bénéfices ne soient réalisés pendant cinq saisons de production qu'au cas où les agriculteurs respectent les doses de maintenance de la chaux. L'économie du chaulage de maintenance (par saison, basée sur environ un cinquième des doses de correction) est une autre question qui devrait être répondue en faisant du chaulage un coût de production supplémentaire.

Tableau 16. Bénéfices Bruts du Chaulage pour Trois Types de Cultures dans l'Agriculture Extensive (sans Engrais) et Intensive (avec des Engrais) par Saison et pour le Temps d'Inter-Chaulage Moyen Supposé de 2,5 ans ou Cinq Saisons.

	Bénéfices Bruts Par Saison		Bénéfices Bruts Pendant 5 Saisons	
	Sans Engrais	Avec Engrais	Sans Engrais	Avec Engrais
	($/ha)		($/ha)	
RWANDA				
Pommes de terre	141	378	705	1.890
Haricots	59	101	295	505
Maïs	87	188	435	940
BURUNDI				
Pomme de terre	140	375	698	1875
Haricot	87,5	150	437,5	750
Maïs	100	217	500	1085

VIII.2.3. RVC du Chaulage de Correction

La combinaison des résultats des deux paragraphes précédents rend possible de calculer le RVC du chaulage. Elle est faite pour deux situations extrêmes de coûts : proche de la source de la chaux « A » (coûts de chaulage 100$/ha) au Rwanda et suffisamment loin d'elle qu'il devient plus profitable d'utiliser la source « B » (coûts de chaulage 320$/ha) au Rwanda. Les bénéfices qui sont utilisés sont pour cinq saisons (Tableau 16). Les résultats présentés dans le Tableau 17 devraient être considérés comme des valeurs maximales qui seront atteintes lorsque les agriculteurs respectent le chaulage de maintenance, deviennent des utilisateurs des engrais expérimentés, et adoptent la GIFS.

Tableau 17. Le Rapport Valeur: Coûts du Chaulage pour les Formes Extensives et Intensives de l'Agriculture sur deux Distances Extrêmes à Partir de la Source « A », celle de la Meilleure Chaux Agricole.

	RVC Sans Utilisation d'Engrais		RVC Avec Utilisation d'Engrais	
	Proche de "A"	Très Loin de "A"[a]	Proche de "A"	Très Loin de "A"[a]
RWANDA				
Pommes de terre	7,0	2,0	19,0	6,0
Haricots	3,0	1,0	5,0	1,5
Maïs	4,5	1,5	9,5	3,0
BURUNDI				
Pomme de terre	1	0,8	2,7	2,2
Haricot	0,6	0,5	1,07	0,9
Maïs	0,7	0,6	1,6	1,29

a. Distance à laquelle il devient plus profitable d'utiliser la chaux "B"

En utilisant un RVC de $\geq$ 2 comme limite inférieure pour l'adoption des agriculteurs, il semble que pour les prix de 2006, le chaulage est généralement rentable quand il fait partie d'un paquet entier d'intensification, y compris les engrais inorganiques. Pour l'agriculture extensive, il est seulement rentable quand il est proche de la mine pour la chaux "A", mais le chaulage n'est pas recommandé dans de telles conditions parce que l'épuisement et la dégradation du sol croissant sont l'effet final. Cette conclusion est reflétée par l'utilisation présente de la chaux au Rwanda, qui est presque exclusivement liée aux projets soutenus de l'extérieur pour l'intensification; les agriculteurs n'achètent eux mêmes la chaux que rarement. Quel agriculteur peut-il se permettre d'investir 100$–320$/ha pour élever le pH du sol à 5,2, alors que ses bénéfices seront inférieurs à ceux qui sont dans le Tableau 16 pour plusieurs années à cause du manque d'expérience avec les engrais et la GIFS? Par conséquent, la question à répondre est la suivante : quels arguments pourraient pousser les gouvernements et les bailleurs à rendre l'utilisation de la chaux plus rentable en la subsidiant? La réponse implique la rentabilité de l'intensification agricole requise[35] et planifiée. Sans chaulage, le RVC de l'utilisation des engrais est et restera relativement bas dans deux tiers du pays, les régions avec une acidité du sol sérieuse ou modérée (III.3). Sans chaulage, la situation sera aggravée à travers l'intensification ; plusieurs engrais (aussi bien que l'exportation accrue des cultures à partir des champs) causent des diminutions du pH (VII.1.2).

Au Burundi, la situation est plus grave les coûts du chaulage sont beaucoup plus sont beaucoup plus élevés qu'au Rwanda. La dolomite broyée de Butare coute 699$/ha à la source et 843$/ha loin de la source. Ceci sans tenir compte de la main d'œuvre pour son application (un homme jour coûte 1$).

Pour être rentable, c'est-a-dire avoir un RVC supérieur ou égal à 3 pour les 3 cultures la dolomie de Butare doit coûter 86,7$/t ou 373$/ha

Nzohabonayo et al. (en prép.) présentent une indication de la rentabilité de l'utilisation des engrais et distinguent entre l'utilisation efficiente et inefficiente des engrais. Ils lient l'utilisation inefficiente à la basse qualité du sol et/ou aux agriculteurs inexpérimentés. Le transfert vers l'utilisation efficiente des engrais peut être fait par des investissements dans les sols à travers GIFS et en gagnant de l'expérience. L'utilisation inefficiente des engrais a été à la base de l'estimation de l'effet de chaulage dans l'agriculture intensive dans VIII.1.3.

[35]Le Rwanda a un équilibre extrêmement négatif des nutriments du sol, causé par la surexploitation liée à la surpopulation et à une utilisation extrêmement limitée d'engrais inorganiques jusqu'à récemment. (Breman et al., 2008).

Tableau 18. La Rentabilité de l'Utilisation des Engrais au Rwanda à Deux Niveaux de l'Efficience de l'Utilisation des Engrais

	RVC de l'Utilisation des Engrais[a]	
	Basse Efficience[b]	Haute Efficience[c]
Pommes de terre	9,2	13,8
Maïs	1,4	2,8
Paddy	2,5	5,0
Haricots	6,1	12,2

a. Basé sur Nzohabonayo et al. (en prép.), qui ont utilisé les prix de la saison "A" de 2007
b. Observée sur des sols de basse qualité et/ou avec des agriculteurs inexpérimentés.
c. Observée sur des sols de bonne qualité et avec des agriculteurs expérimentés, utilisant GIFS

Le Tableau 18 montre le besoin extrême pour les agriculteurs et les gouvernements dans la RGLAC d'investir dans l'amélioration du sol, en utilisant les engrais inorganiques et le chaulage dans un contexte de GIFS (VII.3). Sans elle, l'intensification agricole est beaucoup moins rentable ; le RVC de l'utilisation des engrais inorganiques sera égal (ou même inférieur—voir ci-haut et Note en bas de page 34) que ceux de l'efficience basse de l'utilisation des engrais dans le Tableau 18. Les agriculteurs ne sont pas capables de faire des investissements eux mêmes; le RVC du chaulage est trop bas pour les agriculteurs inexpérimentés sur des sols pauvres (Tableau 17). Les gouvernements et/ou les donateurs devraient rendre la chaux suffisamment bon marché pour intéresser les agriculteurs à son utilisation. Une fois que les agriculteurs sont expérimentés et ont adopté GIFS, ils seront capables de prendre soin du chaulage de maintenance. « Rendre la chaux suffisamment bon marché" ne devrait pas être considéré comme une subside mais comme un investissement, rendant les agriculteurs capables d'élever la productivité agricole à un autre niveau. Cela concerne un investissement qui est plus rentable et qui peut atteindre beaucoup plus d'agriculteurs que les investissements en irrigation ; l'investissement est même plus rentable quand il est greffé à la promotion et à l'introduction de GIFS (Breman et al., 2003). L'utilisation à grande échelle de la chaux qui sera déclenchée diminuera aussi les coûts de la chaux (Beernaert, 1999).

VIII.3. Conclusion

La lutte contre l'acidité du sol par le chaulage est rentable comme une composante de l'intensification agricole qui comprend aussi l'utilisation d'engrais inorganiques et GIFS. Malgré le fait que les sols acides dominent dans la RGLAC, les recommandations générales de l'utilisation de la chaux par les agriculteurs aux prix actuels devraient être évitées :[36]

[36]Ceci est même le cas au Rwanda, qui est actuellement le pays avec l'environnement de politique agricole le plus favorable et avec l'utilisation de engrais inorganiques la plus rentable.

- La plupart de la chaux agricole est chère et de basse qualité.
- Les sources actuelles de chaux utilisée au Rwanda sont pauvres en Mg. La dolomite n'est pas exploitée au Rwanda. Au Burundi, l'utilisation de la chaux (y compris la dolomite) est limitée à l'utilisation financée par des projets.
- L'investissement requis est élevé en comparaison avec le revenu moyen des agriculteurs.
- Le chaulage sans engrais inorganiques épuisera et dégradera encore plus les sols.
- Le chaulage combiné avec l'utilisation des engrais inorganiques dans un contexte de GIFS n'est pas facilement rentable au début; les agriculteurs doivent être habitués à l'utilisation des engrais et de la chaux et adopter la GIFS.

Les gouvernements et les bailleurs peuvent améliorer considérablement la situation en assurant que de la chaux de haute qualité est disponible à bas prix pendant la période de transition de l'intensification agricole. Comme ceci n'est pas encore une réalité, les recommandations de l'utilisation de la chaux devraient être limitées aux environs des sources de la chaux de bonne qualité et de prix raisonnable. Les recommandations pareilles doivent être aussi spécifiques que possibles, en tenant en compte des sols, des cultures, du climat ainsi que de la situation financière des agriculteurs.

IX. Recommandations Pratiques pour les Gouvernements et les Bailleurs, les Agriculteurs et leurs Encadreurs.

IX.1. Recommandations pour les Gouvernements et les Bailleurs

1. Les Gouvernements de la RGLAC et les bailleurs devraient considérer les investissements dans les sols, en rendant les agriculteurs capables d'intensifier l'agriculture.
2. Les investissements concernés devraient se focaliser sur la disponibilité et l'accessibilité améliorées de la matière organique (MO), de la chaux et du phosphate naturel.
3. Les investissements devraient être accompagnés par une politique nationale et régionale soutenant l'agriculture et par la promotion de la gestion intégrée de la fertilité des sols.
4. Les Gouvernements et les bailleurs devraient comparer la rentabilité des investissements en irrigation avec ceux en gestion de MO et en chaulage. Ces derniers rendent les cultures plus résistantes à la sécheresse, alors que les coûts d'investissements par hectare sont bas et que la rentabilité est élevée.
5. Les Gouvernements doivent développer un système de contrôle de la qualité de la chaux, en tenant compte de trois facteurs :
   - L'équivalence en $CaCO_3$ (par ex. $\geq$ 80%), selon le contenu en Ca de la matière initiale ainsi que de l'intensité et de la durée du chauffage.
   - Le facteur de finesse (par ex. $\geq$ 70%), selon l'intensité et la durée du broyage.
   - Le taux de Mg (la dolomite au lieu du travertin devrait être utilisée comme matière initiale).
   - Le taux d'humidité (par ex. < 5%).

6. Les gouvernements devraient promouvoir et soutenir a) la recherche sur le chaulage et b) le développement d'un système pour déterminer l'acidité du sol et la toxicité en Al (aussi bon marché que possible). Les sujets clé pour la recherche devraient concerner :

- Le développement des recommandations en rapport avec le sol, le climat, et la culture.
- D'autres opportunités pour optimiser les facteurs économiques du chaulage.
- La fréquence du chaulage en rapport avec le sol, la culture et le climat.

7. Les gouvernements devraient promouvoir et soutenir les facilités de crédit pour l'amélioration du sol à travers le chaulage; les coûts d'investissements sont élevés par rapport au revenu des agriculteurs, alors que les bénéfices deviennent disponibles au fil d'une série de saisons.

IX.2. Recommandations pour les Agriculteurs et leurs Encadreurs

1. Dans les conditions actuelles, l'utilisation de la chaux sur les sols acides est seulement recommandée pour certaines cultures (celles avec une intensification hautement rentable, comme les pommes de terre) dans le voisinage des mines où la chaux de bonne qualité est produite (ECC et FF élevés) et vendue pour un prix raisonnable (<0,20$/kg).
2. A travers le chaulage, les agriculteurs ne devraient pas seulement viser à abaisser la toxicité en Al mais aussi à augmenter la résistance à la sécheresse de leurs cultures.
3. Les agriculteurs devraient insister à ce que les vendeurs de chaux mentionnent et garantissent les caractéristiques clé de la qualité: ECC, FF et les taux de Mg et d'humidité.
4. Quand le travertin et d'autres sources avec un contenu bas en Mg sont à la base de la chaux agricole, le chaulage devrait être limité à un ou deux investissements sérieux. Avec le temps, les agriculteurs devraient chercher de la chaux agricole dolomitique pour le chaulage de maintenance.
5. La technologie de chaulage:

- Le chaulage devrait être combiné avec l'utilisation des engrais inorganiques; les deux devraient être des composantes de l'approche GIFS
- Le chaulage devrait être fait bien avant la plantation, en s'assurant que la chaux est distribuée de façon homogène dans les premiers 20–30 cm du sol. Les concentrations locales de la chaux devraient être évitées pour éviter le risque accru d'érosion du sol.

6. Pour d'autres agriculteurs sur des sols acides, qui n'habitent pas près d'une mine, la production de cultures tolérantes dans un contexte de GIFS est recommandée. Des produits qui pourraient être utilisés sont la cendre de bois, les émondes des arbustes et des arbres, ainsi que le fumier et le compost ; autant que possible, ils devraient être basés sur des produits en provenance de l'extérieur de l'exploitation.

Les agriculteurs, les vulgarisateurs, les agronomes et les chercheurs devraient faire un effort combiné pour reconnaître les caractéristiques typiques des régions avec des sols acides en rapport avec les combinaisons de sol et climat, les rendant capables de transférer et de généraliser les résultats obtenus sur certains champs avec un nombre (limité) d'agriculteurs. Le comportement et les pratiques des agriculteurs concernant les choix des cultures et leur utilisation devraient être compris et les mauvaises herbes devraient être reconnues dans un contexte de l'acidité du sol. Les cultures et leurs variétés dans la RGLAC devraient être classifiées en rapport avec leur tolérance pour la toxicité en Al. Le besoin en chaux devrait être basé sur l'Al échangeable et non sur le pH per se. Les effets de la chaux sont dissipés plus rapidement dans les régions tropicales que dans les régions tempérées. Ainsi, il est logique de faire une application plus fréquente et plus légère dans les tropiques.

Appendice A. Cartes

Le Projet CATALIST dans son entièreté
- Etendue Géographique
- pH du Sol
- Principaux Types de Sols

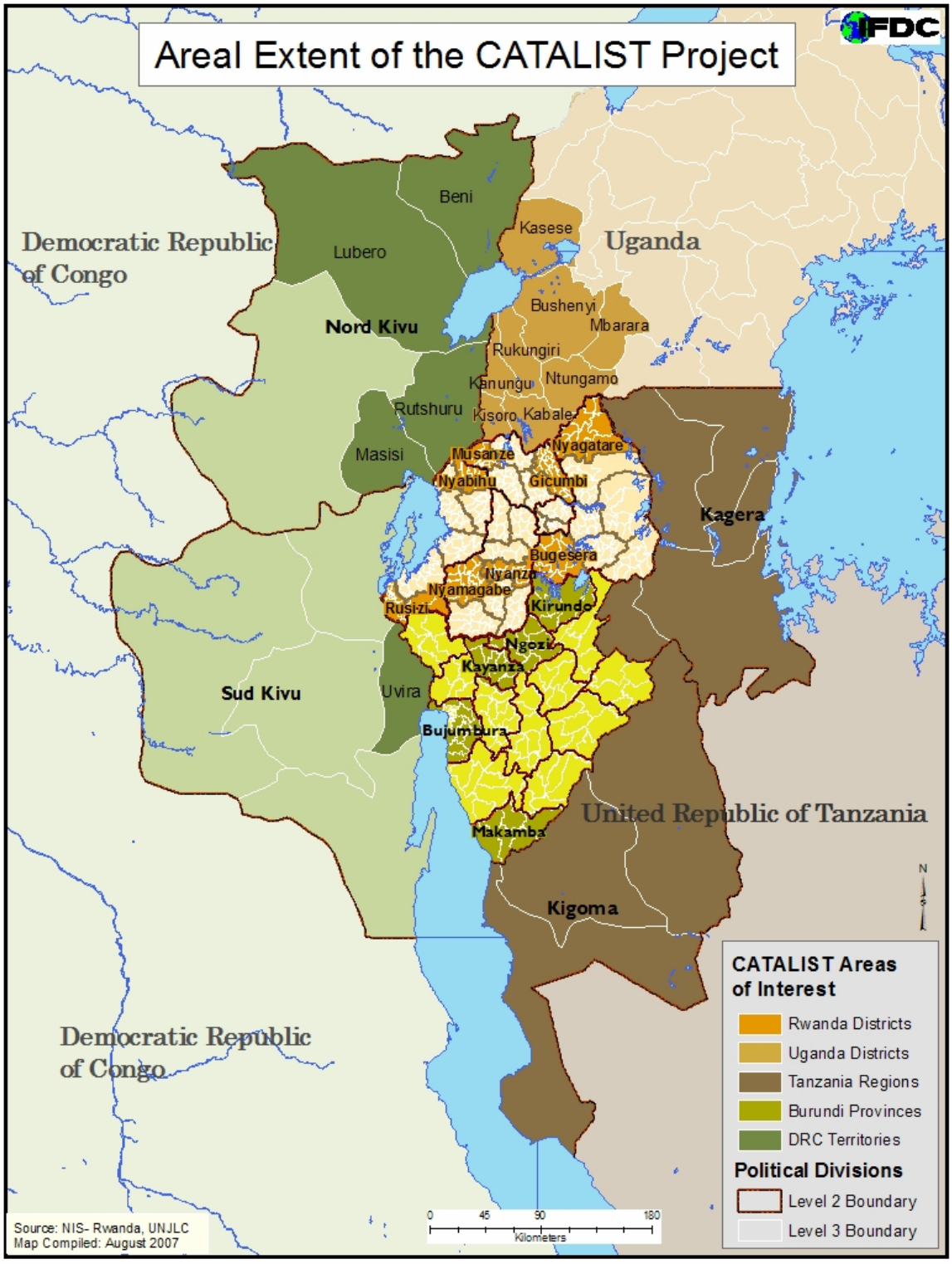
Burundi
- pH du Sol
- Cultures

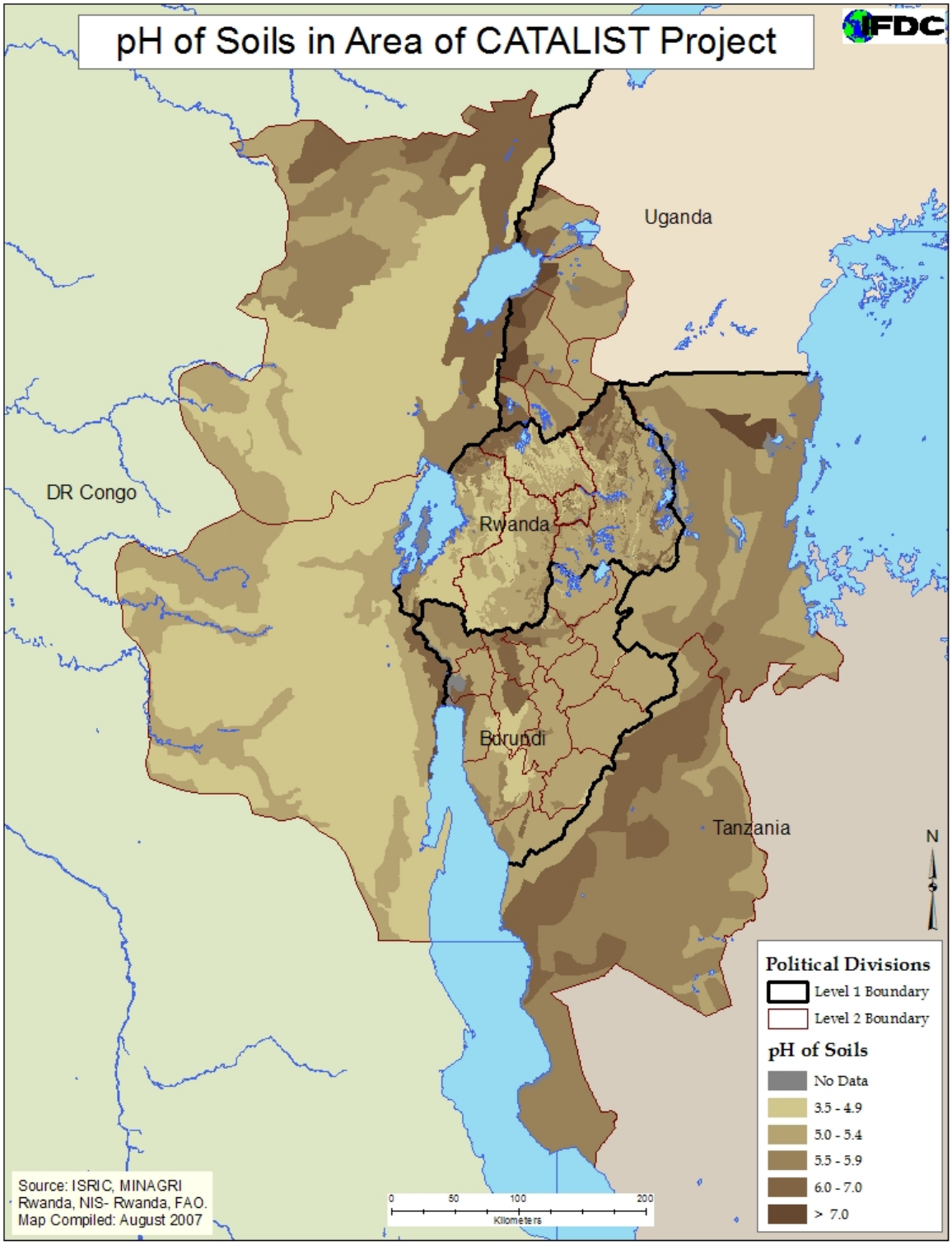
République Démocratique du Congo – Provinces du Nord Kivu et du Sud Kivu
- pH du Sol

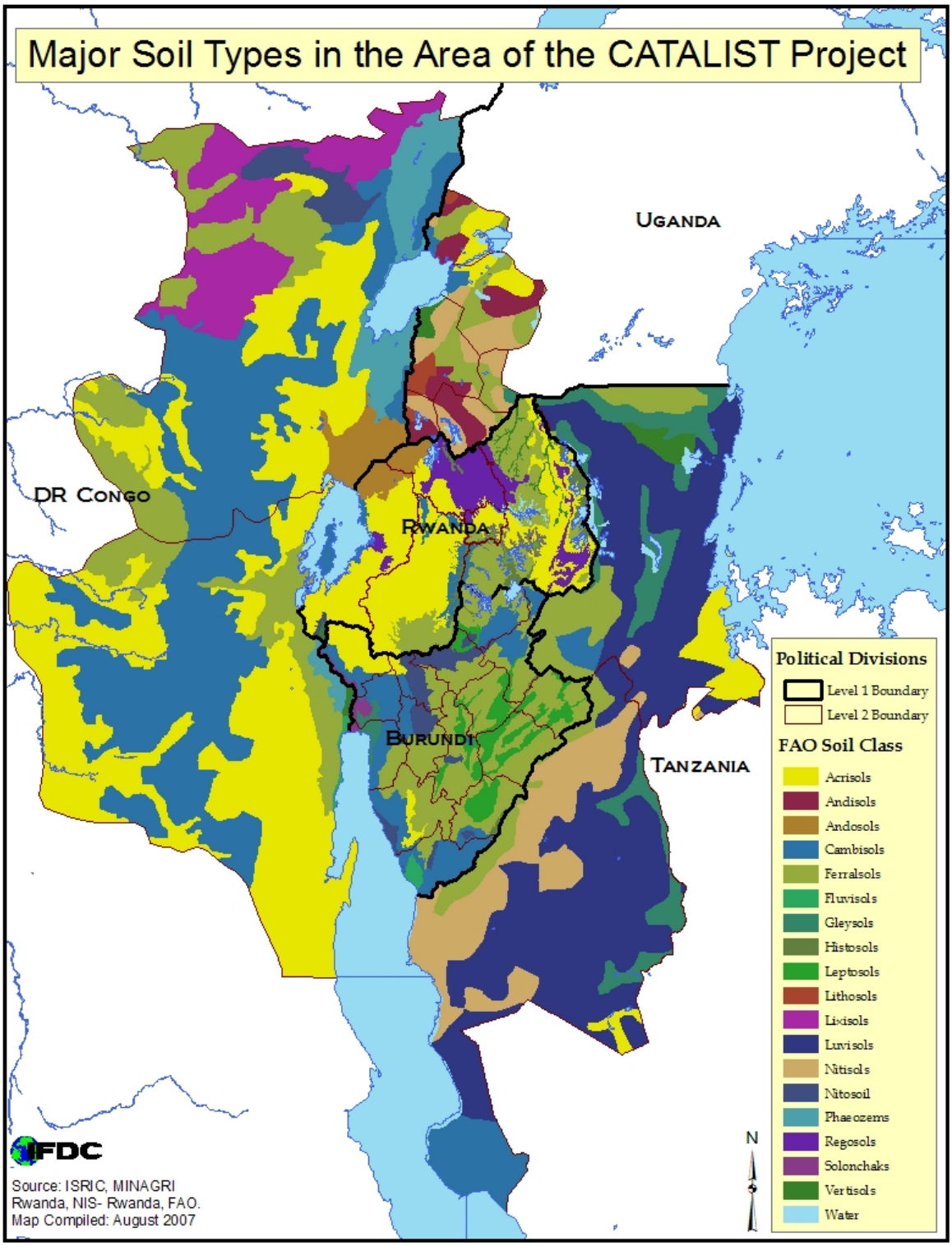
Rwanda
- pH du Sol
- Régions Agro-climatiques
- Zones Agro-écologiques
- Classification des Régions Agro-bioclimatiques

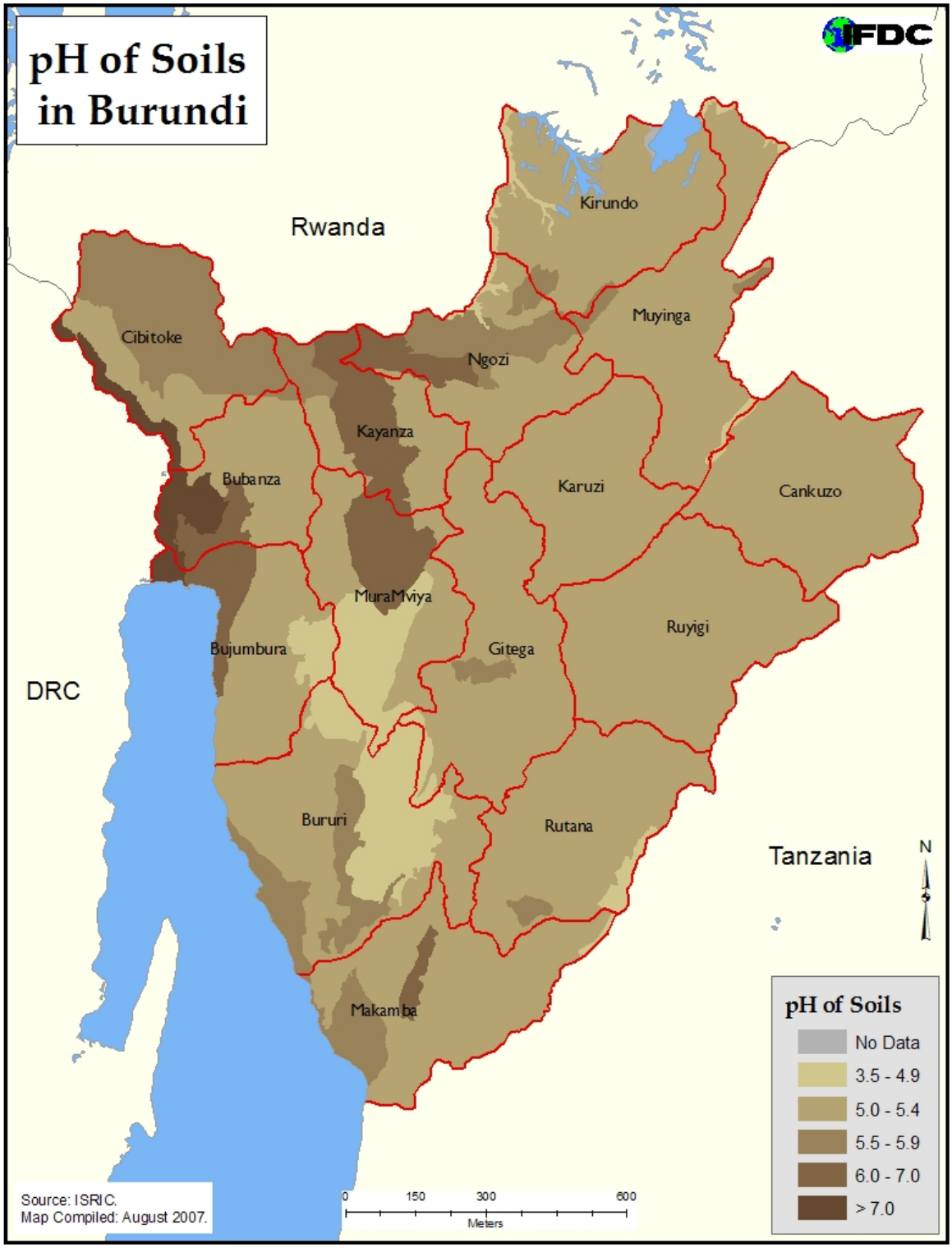
Tanzanie– Provinces de l'Akagera et de Kigoma
- pH du Sol

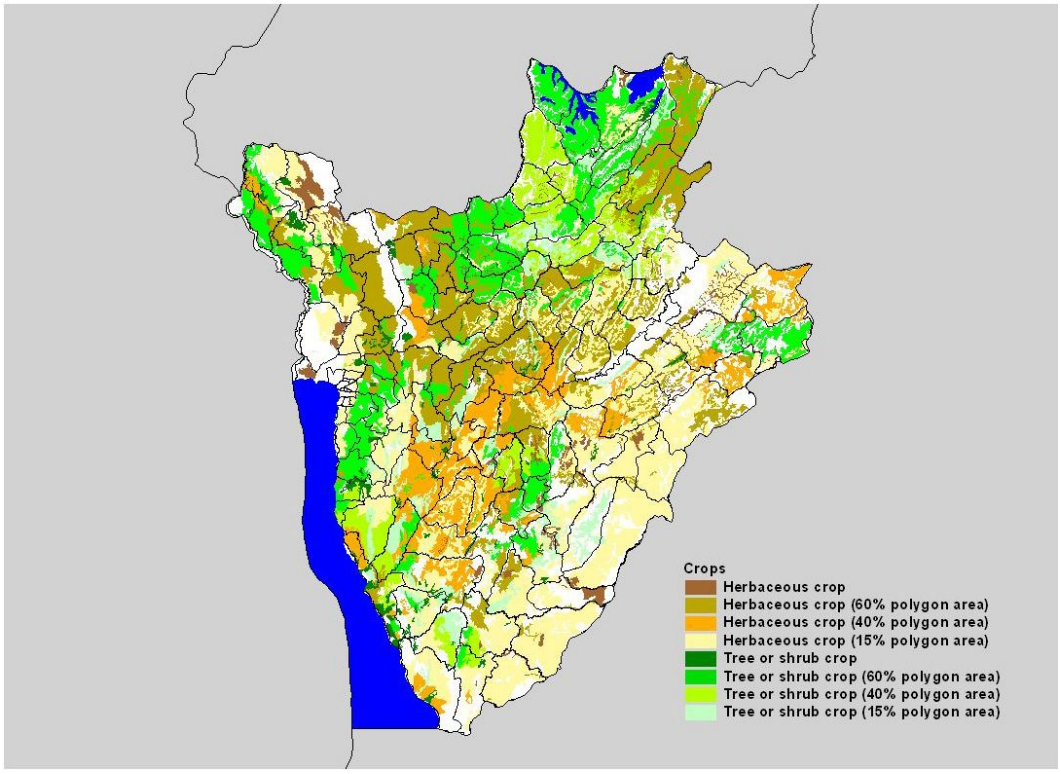
Ouganda – Districts de Bushenyi, Kabale, Kasese, Kisoro, Ntungamo, et Rukungiri
- pH du Sol


Areal Extent of the CATALIST Project
IFDC
Democratic Republic of Congo
Uganda
Beni
Lubero
Kasese
Bushenyi
Mbarara
Nord Kivu
Rukungiri
Kanungu
Ntungamo
Rutshuru
Kisoro
Kabale
Masisi
Nyagatare
Musanze
Nyabihu
Gicumbi
Kagera
Bugesera
Nyanza
Nyamagabe
Rusizi
Kirundo
Ngozi
Kayanza
Sud Kivu
Uvira
Bujumbura
United Republic of Tanzania
Makamba
Kigoma
N
W
E
S
CATALIST Areas of Interest
Rwanda Districts
Uganda Districts
Tanzania Regions
Burundi Provinces
DRC Territories
Political Divisions
Level 2 Boundary
Level 3 Boundary
Democratic Republic of Congo
0 45 90 180
Kilometers
Source: NIS- Rwanda, UNJLC
Map Compiled: August 2007

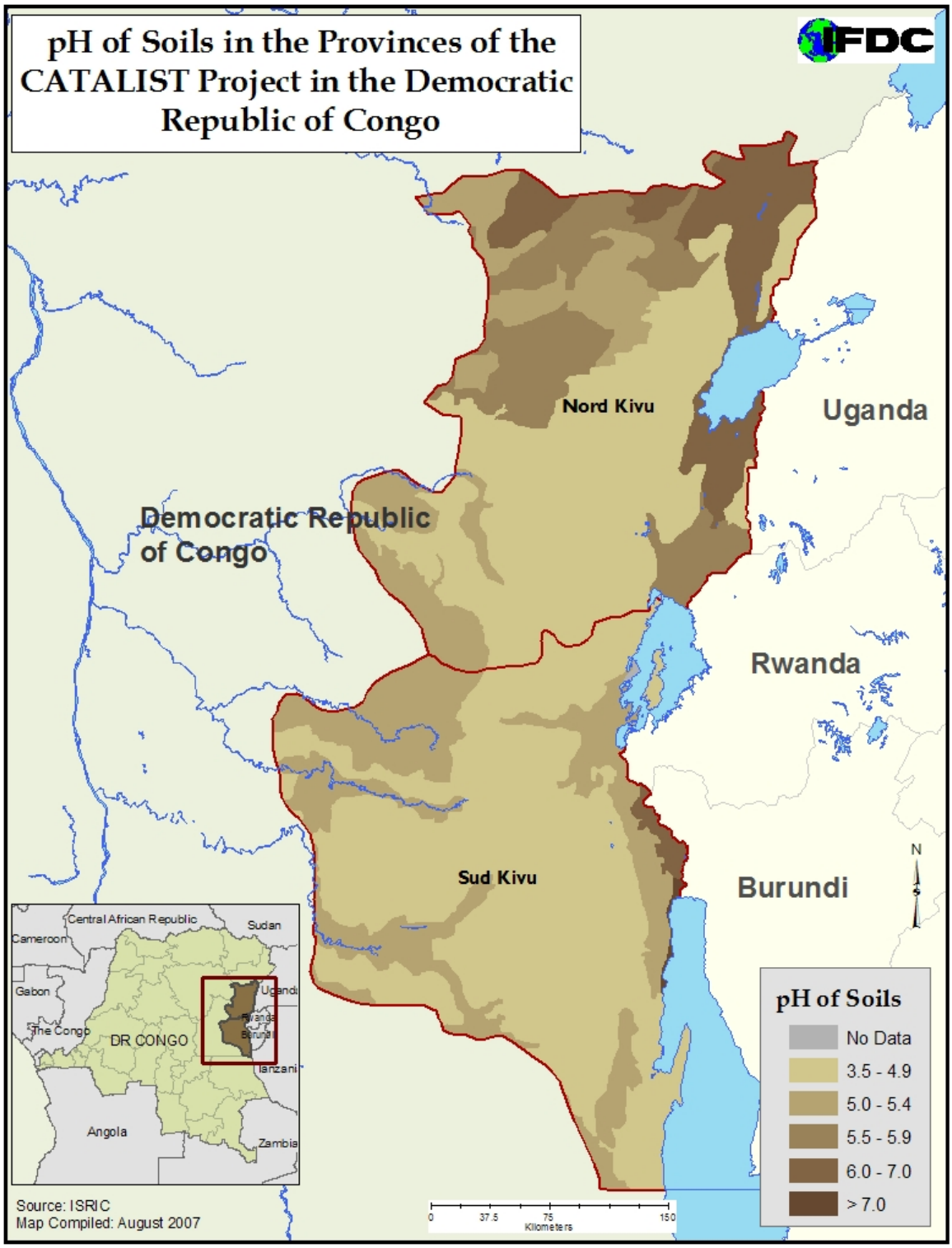

pH of Soils in Area of CATALIST Project
IFDC
Uganda
DR Congo
Rwanda
Burundi
Tanzania
N
Political Divisions
Level 1 Boundary
Level 2 Boundary
pH of Soils
No Data
3.5 - 4.9
5.0 - 5.4
5.5 - 5.9
6.0 - 7.0
> 7.0
Source: ISRIC, MINAGRI Rwanda, NIS- Rwanda, FAO.
Map Compiled: August 2007
0 50 100 200
Kilometers

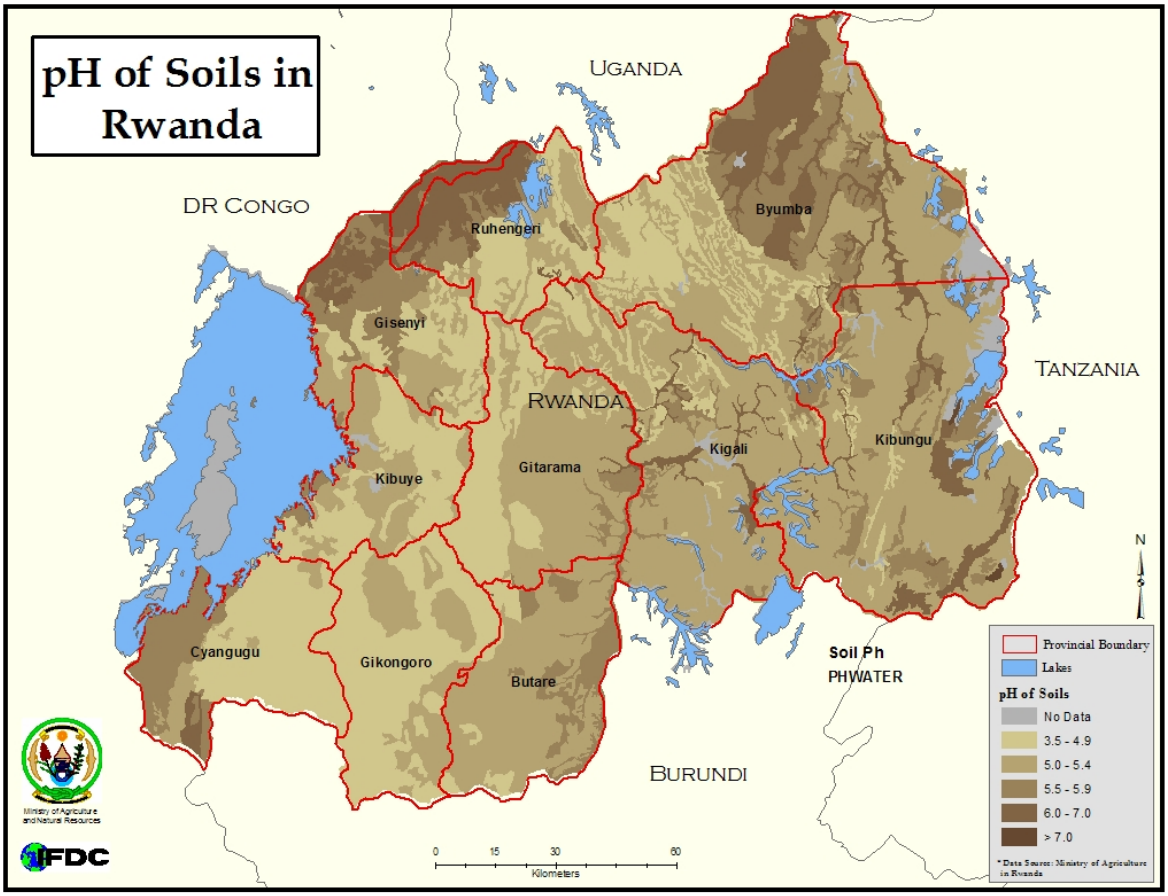

Major Soil Types in the Area of the CATALIST Project
Uganda
DR Congo
Rwanda
Burundi
Tanzania
Political Divisions
Level 1 Boundary
Level 2 Boundary
FAO Soil Class
Acrisols
Andisols
Andosols
Cambisols
Ferralsols
Fluvisols
Gleysols
Histosols
Leptosols
Lithosols
Lixisols
Luvisols
Nitisols
Nitosoil
Phaeozems
Regosols
Solonchaks
Vertisols
Water
N
IFDC
Source: ISRIC, MINAGRI
Rwanda, NIS- Rwanda, FAO.
Map Compiled: August 2007

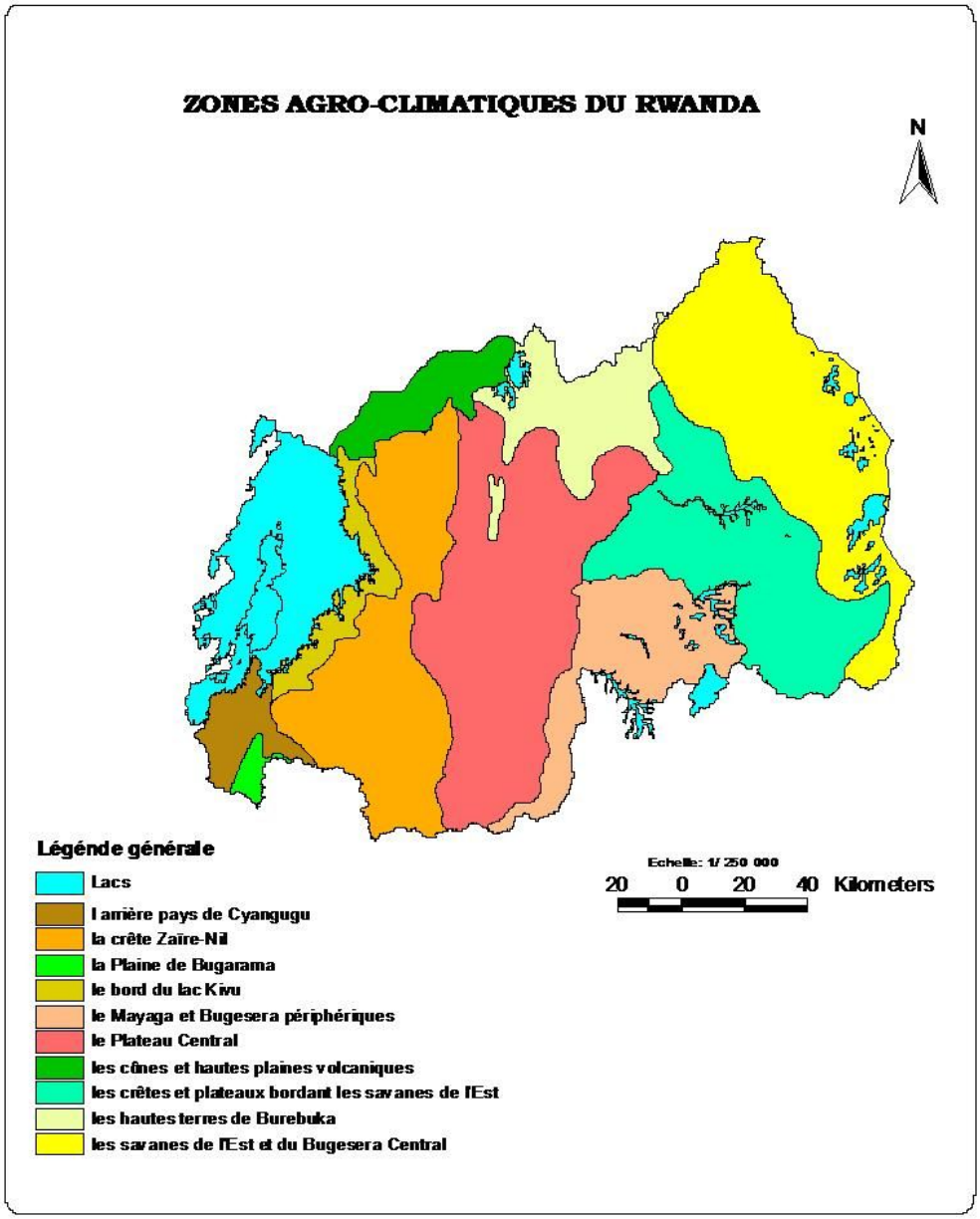

pH of Soils in Burundi
IFDC
Rwanda
Kirundo
Muyinga
Cibitoke
Ngozi
Kayanza
Bubanza
Karuzi
Cankuzo
MuraMviya
Ruyigi
Bujumbura
Gitega
DRC
Bururi
Rutana
Tanzania
N
Makamba
pH of Soils
No Data
3.5 - 4.9
5.0 - 5.4
5.5 - 5.9
6.0 - 7.0
> 7.0
Source: ISRIC.
Map Compiled: August 2007.
0
150
300
600
Meters



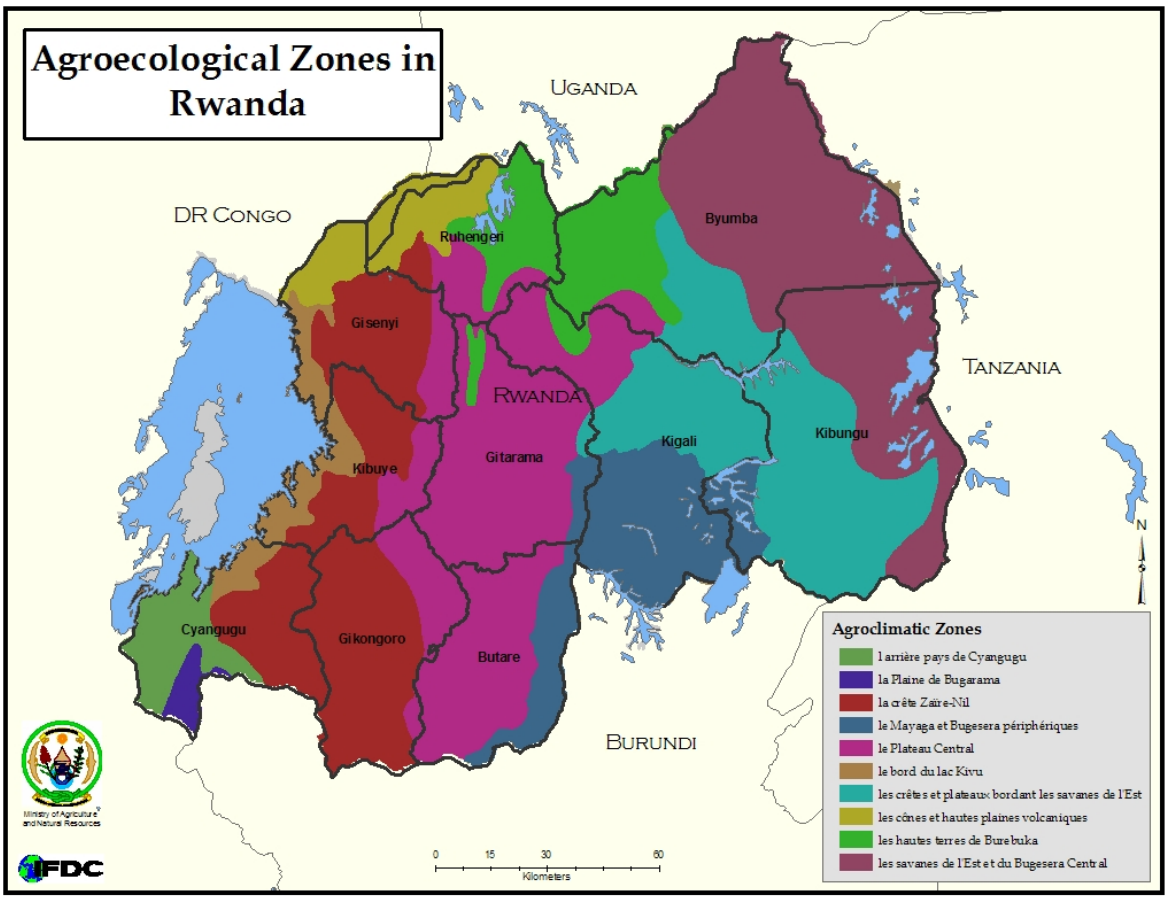
Les Cultures du Burundi

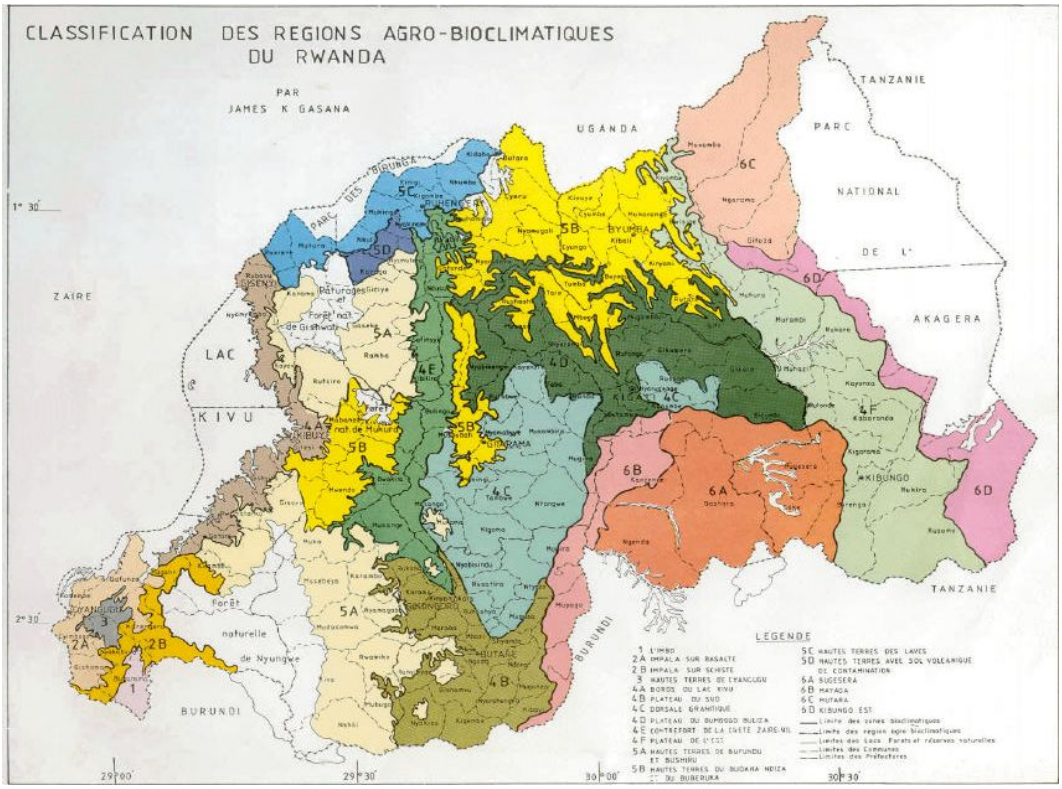

pH of Soils in the Provinces of the CATALIST Project in the Democratic Republic of Congo
IFDC
Nord Kivu
Uganda
Democratic Republic of Congo
Rwanda
Sud Kivu
Burundi
N
Central African Republic
Sudan
Cameroon
Gabon
Uganda
Rwanda
Burundi
The Congo
DR CONGO
Tanzania
Angola
Zambia
pH of Soils
No Data
3.5 - 4.9
5.0 - 5.4
5.5 - 5.9
6.0 - 7.0
> 7.0
0
37.5
75
150
Kilometers
Source: ISRIC
Map Compiled: August 2007

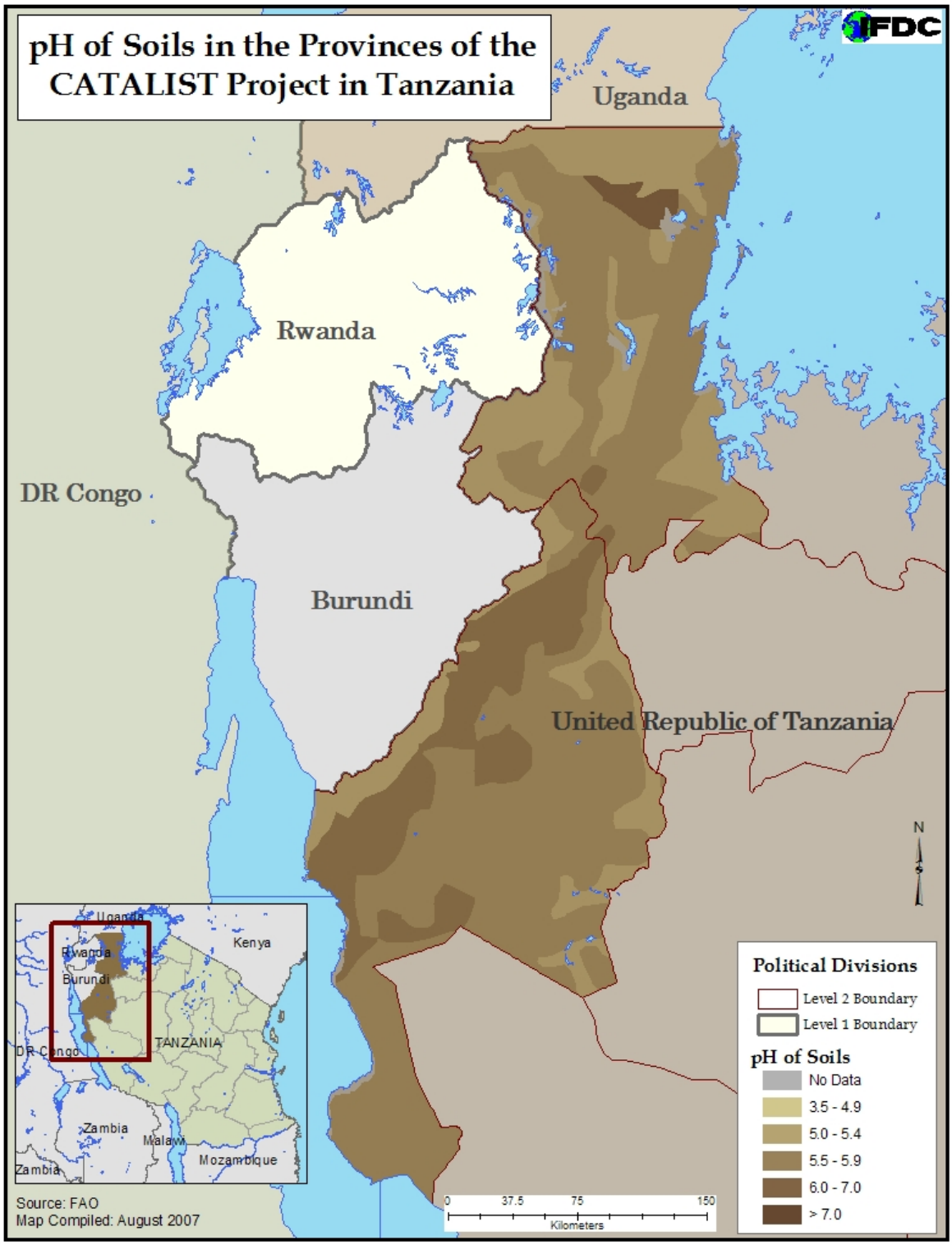

pH of Soils in Rwanda
UGANDA
DR CONGO
TANZANIA
BURUNDI
RWANDA
Ruhengeri
Byumba
Gisenyi
Kibuye
Gitarama
Kigali
Kibungu
Cyangugu
Gikongoro
Butare
N
Soil Ph
PHWATER
Provincial Boundary
Lakes
pH of Soils
No Data
3.5 - 4.9
5.0 - 5.4
5.5 - 5.9
6.0 - 7.0
> 7.0
0 15 30 60
Kilometers
Ministry of Agriculture and Natural Resources
IFDC



Régions Agro-climatiques du Rwanda


Agroecological Zones in Rwanda
UGANDA
DR CONGO
TANZANIA
BURUNDI
RWANDA
Ruhengeri
Byumba
Gisenyi
Kibuye
Gitarama
Kigali
Kibungu
Cyangugu
Gikongoro
Butare
N
0 15 30 60
Kilometers
Ministry of Agriculture and Natural Resources
IFDC
Agroclimatic Zones
l arrière pays de Cyangugu
la Plaine de Bugarama
la crête Zaïre-Nil
le Mayaga et Bugesera périphériques
le Plateau Central
le bord du lac Kivu
les crêtes et plateaux bordant les savanes de l'Est
les cônes et hautes plaines volcaniques
les hautes terres de Burebuka
les savanes de l'Est et du Bugesera Central


CLASSIFICATION DES REGIONS AGRO-BIOCLIMATIQUES DU RWANDA
PAR
JAMES K GASANA
UGANDA
TANZANIE
PARC NATIONAL DE L'AKAGERA
ZAIRE
LAC KIVU
BURUNDI
TANZANIE
1° 30'
2° 30'
29°00'
29°30'
30°00'
30°30'
LEGENDE
1 L'IMBO
2A IMPALA SUR BASALTE
2B IMPALA SUR SCHISTE
3 HAUTES TERRES DE L'KANYUGU
4A BORDS DU LAC KIVU
4B PLATEAU DU SUD
4C DORSALE GRANITIQUE
4D PLATEAU DU BUMBOGO BULIZA
4E CONTREFORT DE LA CREETE ZAIRE-NIL
4F PLATEAU DE L'EST
5A HAUTES TERRES DE BURUNDI ET BUSHIRU
5B HAUTES TERRES DU BUGARA NDIZA ET DU BUBERUKA
5C HAUTES TERRES DES LAVES
5D HAUTES TERRES AVEC SOL VOLCANIQUE DE CONTAMINATION
6A BUGESERA
6B MAYAGA
6C MUTARA
6D KIBUNGO EST
Limite des zones bioclimatiques
Limite des region agro bioclimatiques
Limites des Lacs Forets et réserves naturelles
Limites des Communes
Limites des Prefectures


pH of Soils in the Provinces of the CATALIST Project in Tanzania
IFDC
Uganda
Rwanda
DR Congo
Burundi
United Republic of Tanzania
N
Political Divisions
Level 2 Boundary
Level 1 Boundary
pH of Soils
No Data
3.5 - 4.9
5.0 - 5.4
5.5 - 5.9
6.0 - 7.0
> 7.0
0 37.5 75 150
Kilometers
Uganda
Kenya
Rwanda
Burundi
DR Congo
TANZANIA
Zambia
Malawi
Mozambique
Zambia
Source: FAO
Map Compiled: August 2007

Appendice B. Tableaux Comparant les Caractéristiques Physiques et Chimiques des Echantillons de Chaux et de Travertin Rwandais Obtenus en 2007

Tableau B-1 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon le N° d'échantillon

N° d'Echantillon	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité- Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
1	Chaux-Qualité N° 1	116		0,5		96,6		46,3		0,50		0,036	9	0	12
2	Chaux-Qualité N° 2	120		0,5		81,5		47,6		0,46		0,044	51	1	23
3	Chaux- Qualité N° 3	73,5		1,0		35,7		28,4		1,00		0,070	26	0	38
4	Travertin-pour usage agricole	80,0		1,1		58,1		31,8		0,30		0,087	694	1	10
5	Chaux	97,6		3,4		66,5		37,4		0,76		0,046	367	3	6
6	Chaux	100		1,4		49,1		37,6		1,70		0,021	447	0	9
7	Chaux-pour usage agricole	82,8	74,8	18,6	18,8	61,9	52,7	31,9	29,1	0,62	1,32	0,095	11	0	12
8	Chaux-utilisée pour construction	96,3	103	5,6	3,2	66,2	71,2	37,4	40,4	0,93	0,64	0,080	6	0	14
9	Travertin-pour usage agricole	84,0	80,8	32,5	20,4	43,5	45,8	31,4	32,2	0,91	1,16	0,095	678	0	14
10a	Chaux-pour usage agricole	90,6	85,2	12,0	4,6	61,7	58,2	36,1	34,0	0,89	1,08	0,111	33	0	17
10b	Chaux-utilisée pour construction		83,1		7,8		55,8		34,1		1,02				
11a	Travertin-pour usage agricole	74,1	73,8	15,1	11,6	57,1	44,9	29,3	28,7	0,52	1,22	0,070	523	0	20
11b	Travertin-pour usage agricole		79,8		7,2		45,2		30,7		1,13				
12	Chaux-pour purification d'eau et usages industriels	126	120	0,5	0,8	97,7	97,0	50,9	47,6	0,48	0,43	0,035	554	5	19
13	Chaux-utilisée pour construction	115	122	1,7	0,7	88,8	93,0	46,2	49,2	0,44	0,39	0,053	54	2	20
14	Chaux-pour usage agricole	91,3	104	1,9	0,6	66,5	65,4	36,4	40,6	0,31	0,34	0,092	582	8	25
15	Travertin-pour usage agricole	87,6	87,1	8,6	5,5	57,2	54,6	34,8	34,4	0,33	0,25	0,048	1070	0	8
16	Travertin-pour usage agricole	59,7	81,0	6,9	15,5	62,6	45	24,3	31,6	0,19	0,22	0,080	677	0	8
17	Travertin-pour usage agricole	79,0	73,8	3,2	1,8	67,0	52	31,5	34,7	0,21	0,23	0,067	1800	0	10
18	Chaux- pour purification d'eau et usages industriels	120	127	1,7	1,8	86,7	96,7	42,2	41,6	2,85	2,57	0,017	27	0	12
19	Chaux-utilisée pour construction	121	121	0,7	3,9	88,1	81,2	42,7	41,7	2,50	2,90	0,011	280	6	10
20	Chaux-utilisée pour usage agricole	110	116	7,5	6,2	60,9	54,6	40,0	41,1	2,50	2,85	0,019	275	3	16
21a	Travertin-pour usage agricole	91,5	96,6	6,6	0,2	63,7	35,4	33,6	36,7	1,58	1,22	0,006	543	0	11
21b	Travertin-pour usage agricole		92,8		0,7		39,6		34,1		1,27				
21c	Travertin-pour usage agricole		94,6		0,5		28,4		35,5		2,27				
22	Chaux-pour purification d'eau et usages industriels	125	120	10,5	9,1	67,7	80,6	45,5	43,2	2,32	2,45	0,003	16	0	6
23	Chaux-utilisée pour construction	117	118	0,6	12,9	81,3	72,9	42,6	42,8	2,31	2,45	0,022	192	1	6
24	Chaux-pour usage agricole	97,5	102	0,3	2,7	28,4	55,1	35,3	37,4	1,80	2,05	0,021	342	0	8
25	Travertin-pour usage agricole	96,2	91,9	1,1	6,7	44,5	51,3	35,5	34,8	1,84	1,79	0,023	553	0	10

N° d'Echantillon	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité- Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
26	Travertin-pour usage agricole		93,7		1,0		35,4		35,1		17,4				
Bur-1	Dolomite sur terre-pour usage agricole		102		0,5		64		31,0		11,6				
Bur-2	Dolomite sans terre Roche A-pour usage agricole (après broyage)		102		0,6		NA		19,9		12,0				
Bur-3	Dolomite sans terre Roche B-pour usage agricole (après broyage)		102		0,3		NA		21,7		12,2				
QAQC	Standard pour la détermination de l'Equivalent du Carbonate de Calcium (ECC)	100,3		0,0		99,4			39,8		0,00				

Note: Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

Tableau B - 2 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon la moyenne d'Equivalent du Carbonate de Calcium (ECC)

Echantillon N°.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
18	Chaux	120	127	1.7	1.8	86.7	96.7	42.2	41.6	2.85	2.57	0.017	27	0	12
12	Chaux	126	120	0.5	0.8	97.7	97.0	50.9	47.6	0.48	0.43	0.035	554	5	19
22	Chaux	125	120	10.5	9.1	67.7	80.6	45.5	43.2	2.32	2.45	0.003	16	0	6
19	Chaux	121	121	0.7	3.9	88.1	81.2	42.7	41.7	2.50	2.90	0.011	280	6	10
2	Chaux	120		0.5		81.5		47.6		0.46		0.044	51	1	23
13	Chaux	115	122	1.7	0.7	88.8	93.0	46.2	49.2	0.44	0.39	0.053	54	2	20
23	Chaux	117	118	0.6	12.9	81.3	72.9	42.6	42.8	2.31	2.45	0.022	192	1	15
1	Chaux	116		0.5		96.6		46.3		0.50		0.036	9	0	12
20	Chaux	110	116	7.5	6.2	60.9	54.6	40.0	41.1	2.50	2.85	0.019	275	3	16
Bur-1	Dolomite du Sol		102		0.5		64		31.0		11.6				
Bur-2	Dolomite de Sous Sol Roche A		102		0.6		NA		19.9		12.0				
Bur-3	Dolomite de Sous Sol Roche B		102		0.3		NA		21.7		12.2				
6	Chaux	100		1.4		49.1		37.6		1.70		0.021	447	0	9
24	Chaux	97.5	102	0.3	2.7	28.4	55.1	35.3	37.4	1.80	2.05	0.021	342	0	8
8	Chaux	96.3	103	5.6	3.2	66.2	71.2	37.4	40.4	0.93	0.64	0.080	6	0	14
14	Chaux	91.3	104	1.9	0.6	66.5	65.4	36.4	40.6	0.31	0.34	0.092	582	8	25
5	Chaux	97.6		3.4		66.5		37.4		0.76		0.046	367	3	6
21c	Travertin		94.6		0.5		28.4		35.5		2.27				
21a	Travertin	91.5	96.6	6.6	0.2	63.7	35.4	33.6	36.7	1.58	1.22	0.006	543	0	11
25	Travertin	96.2	91.9	1.1	6.7	44.5	51.3	35.5	34.8	1.84	1.79	0.023	553	0	10
26	Travertin		93.7		1.0		35.4		35.1		1.74				
21b	Travertin		92.8		0.7		39.6		34.1		1.74				
10	Chaux	90.6	85.2	12.0	4.6	61.7	58.2	36.1	34.0	0.89	1.08	0.111	33	0	17
15	Travertin	87.6	87.1	8.6	5.5	57.2	54.6	34.8	34.4	0.33	0.25	0.048	1,070	0	8
10b	Chaux		83.1		7.8		55.8		34.1		1.02				
9	Travertin	84.0	80.8	32.5	20.4	43.5	45.8	31.4	32.2	0.91	1.16	0.095	678	0	14
4	Travertin	80.0		1.1		58.1		31.8		0.30		0.087	694	1	10
11b	Travertin		79.8		7.2		45.2		30.7		1.13				
7	Chaux	82.8	74.8	18.6	18.8	61.9	52.7	31.9	29.1	0.62	1.32	0.095	11	0	12
17	Travertin	79.0	73.8	3.2	1.8	67.0	52	31.5	34.7	0.21	0.23	0.067	1,800	0	10
11a	Travertin	74.1	73.8	15.1	11.6	57.1	44.9	29.3	28.7	0.52	1.22	0.070	523	0	20

Echantillon N°.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
3	Chaux	73.5		1.0		35.7		28.4		1.00		0.070	26	0	38
16	Travertin	59.7	81.0	6.9	15.5	62.6	45	24.3	31.6	0.19	0.22	0.080	677	0	8
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3		0.0		99.4			39.8		0.00				

Note: Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

Tableau B-3 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon la moyenne du contenu d'humidité

Echantillon N°.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
9	Travertin	84.0	80.8	32.5	20.4	43.5	45.8	31.4	32.2	0.91	1.16	0.095	678	0	14
7	Chaux	82.8	74.8	18.6	18.8	61.9	52.7	31.9	29.1	0.62	1.32	0.095	11	0	12
11a	Travertin	74.1	73.8	15.1	11.6	57.1	44.9	29.3	28.7	0.52	1.22	0.070	523	0	20
16	Travertin	59.7	81.0	6.9	15.5	62.6	45	24.3	31.6	0.19	0.22	0.080	677	0	8
22	Chaux	125	120	10.5	9.1	67.7	80.6	45.5	43.2	2.32	2.45	0.003	16	0	6
10a	Chaux	90.6	85.2	12.0	4.6	61.7	58.2	36.1	34.0	0.89	1.08	0.111	33	0	17
10b	Chaux		83.1		7.8		55.8		34.1		1.02				
11b	Travertin		79.8		7.2		45.2		30.7		1.13				
15	Travertin	87.6	87.1	8.6	5.5	57.2	54.6	34.8	34.4	0.33	0.25	0.048	1,070	0	8
20	Chaux	110	116	7.5	6.2	60.9	54.6	40.0	41.1	2.50	2.85	0.019	275	3	16
23	Chaux	117	118	0.6	12.9	81.3	72.9	42.6	42.8	2.31	2.45	0.022	192	1	15
8	Chaux	96.3	103	5.6	3.2	66.2	71.2	37.4	40.4	0.93	0.64	0.080	6	0	14
25	Travertin	96.2	91.9	1.1	6.7	44.5	51.3	35.5	34.8	1.84	1.79	0.023	553	0	10
5	Chaux	97.6		3.4		66.5		37.4		0.76		0.046	367	3	6
21a	Travertin	91.5	96.6	6.6	0.2	63.7	35.4	33.6	36.7	1.58	1.22	0.006	543	0	11
17	Travertin	79.0	73.8	3.2	1.8	67.0	52	31.5	34.7	0.21	0.23	0.067	1,800	0	10
19	Chaux	121	121	0.7	3.9	88.1	81.2	42.7	41.7	2.50	2.90	0.011	280	6	10
18	Chaux	120	127	1.7	1.8	86.7	96.7	42.2	41.6	2.85	2.57	0.017	27	0	12
24	Chaux	97.5	102	0.3	2.7	28.4	55.1	35.3	37.4	1.80	2.05	0.021	342	0	8
6	Chaux	100		1.4		49.1		37.6		1.70		0.021	447	0	9
14	Chaux	91.3	104	1.9	0.6	66.5	65.4	36.4	40.6	0.31	0.34	0.092	582	8	25
13	Chaux	115	122	1.7	0.7	88.8	93.0	46.2	49.2	0.44	0.39	0.053	54	2	20
4	Travertin	80.0		1.1		58.1		31.8		0.30		0.087	694	1	10
3	Chaux	73.5		1.0		35.7		28.4		1.00		0.070	26	0	38
26	Travertin		93.7		1.0		35.4		35.1		1.74				
21b	Travertin		92.8		0.7		39.6		34.1		1.74				
12	Chaux	126	120	0.5	0.8	97.7	97.0	50.9	47.6	0.48	0.43	0.035	554	5	19
Bur-2	Dolomite de Sous Sol Roche A		102		0.6		NA		19.9		12.0				
Bur-1	Ground Dolomite		102		0.5		64		31.0		11.6				
1	Chaux	116		0.5		96.6		46.3		0.50		0.036	9	0	12
2	Chaux	120		0.5		81.5		47.6		0.46		0.044	51	1	23

Echantillon N°.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
21c	Travertin		94.6		0.5		28.4		35.5		2.27				
Bur-3	Dolomite de Sous Sol Roche B		102		0.3		NA		21.7		12.2				
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3		0.0		99.4			39.8		0.00				

Note : Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

Tableau B-4 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon la moyenne du Facteur de Finesse (FF)

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3		0.0		99.4			39.8		0.00				
12	Chaux	126	120	0.5	0.8	97.7	97.0	50.9	47.6	0.48	0.43	0.035	554	5	19
1	Chaux	116		0.5		96.6		46.3		0.50		0.036	9	0	12
18	Chaux	120	127	1.7	1.8	86.7	96.7	42.2	41.6	2.85	2.57	0.017	27	0	12
13	Chaux	115	122	1.7	0.7	88.8	93.0	46.2	49.2	0.44	0.39	0.053	54	2	20
19	Chaux	121	121	0.7	3.9	88.1	81.2	42.7	41.7	2.50	2.90	0.011	280	6	10
2	Chaux	120		0.5		81.5		47.6		0.46		0.044	51	1	23
23	Chaux	117	118	0.6	12.9	81.3	72.9	42.6	42.8	2.31	2.45	0.022	192	1	15
22	Chaux	125	120	10.5	9.1	67.7	80.6	45.5	43.2	2.32	2.45	0.003	16	0	6
8	Chaux	96.3	103	5.6	3.2	66.2	71.2	37.4	40.4	0.93	0.64	0.080	6	0	14
5	Chaux	97.6		3.4		66.5		37.4		0.76		0.046	367	3	6
14	Chaux	91.3	104	1.9	0.6	66.5	65.4	36.4	40.6	0.31	0.34	0.092	582	8	25
Bur-1	Dolomite du Sol		102		0.5		64		31.0		11.6				
10a	Chaux	90.6	85.2	12.0	4.6	61.7	58.2	36.1	34.0	0.89	1.08	0.111	33	0	17
17	Travertin	79.0	73.8	3.2	1.8	67.0	52	31.5	34.7	0.21	0.23	0.067	1,800	0	10
4	Travertin	80.0		1.1		58.1		31.8		0.30		0.087	694	1	10
20	Chaux	110	116	7.5	6.2	60.9	54.6	40.0	41.1	2.50	2.85	0.019	275	3	16
7	Chaux	82.8	74.8	18.6	18.8	61.9	52.7	31.9	29.1	0.62	1.32	0.095	11	0	12
15	Travertin	87.6	87.1	8.6	5.5	57.2	54.6	34.8	34.4	0.33	0.25	0.048	1,070	0	8
10b	Chaux		83.1		7.8		55.8		34.1		1.02				
16	Travertin	59.7	81.0	6.9	15.5	62.6	45	24.3	31.6	0.19	0.22	0.080	677	0	8
11a	Travertin	74.1	73.8	15.1	11.6	57.1	44.9	29.3	28.7	0.52	1.22	0.070	523	0	20
21a	Travertin	91.5	96.6	6.6	0.2	63.7	35.4	33.6	36.7	1.58	1.22	0.006	543	0	11
6	Chaux	100		1.4		49.1		37.6		1.70		0.021	447	0	9
25	Travertin	96.2	91.9	1.1	6.7	44.5	51.3	35.5	34.8	1.84	1.79	0.023	553	0	10
11b	Travertin		79.8		7.2		45.2		30.7		1.13				
9	Travertin	84.0	80.8	32.5	20.4	43.5	45.8	31.4	32.2	0.91	1.16	0.095	678	0	14
24	Chaux	97.5	102	0.3	2.7	28.4	55.1	35.3	37.4	1.80	2.05	0.021	342	0	8
21b	Travertin		92.8		0.7		39.6		34.1		1.74				
3	Chaux	73.5		1.0		35.7		28.4		1.00		0.070	26	0	38

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
26	Travertin		93.7		1.0		35.4		35.1		1.74				
21c	Travertin		94.6		0.5		28.4		35.5		2.27				
Bur-2	Dolomite de Sous Sol Roche A		102		0.6		NA		19.9		12.0				
Bur-3	Dolomite de Sous Sol Roche B		102		0.3		NA		21.7		12.2				

Note : Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

Tableau B-5 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon la moyenne du contenu de Calcium (Ca)

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
12	Chaux	126	120	0.5	0.8	97.7	97.0	50.9	47.6	0.48	0.43	0.035	554	5	19
13	Chaux	115	122	1.7	0.7	88.8	93.0	46.2	49.2	0.44	0.39	0.053	54	2	20
2	Chaux	120		0.5		81.5		47.6		0.46		0.044	51	1	23
1	Chaux	116		0.5		96.6		46.3		0.50		0.036	9	0	12
22	Chaux	125	120	10.5	9.1	67.7	80.6	45.5	43.2	2.32	2.45	0.003	16	0	6
23	Chaux	117	118	0.6	12.9	81.3	72.9	42.6	42.8	2.31	2.45	0.022	192	1	15
19	Chaux	121	121	0.7	3.9	88.1	81.2	42.7	41.7	2.50	2.90	0.011	280	6	10
18	Chaux	120	127	1.7	1.8	86.7	96.7	42.2	41.6	2.85	2.57	0.017	27	0	12
20	Chaux	110	116	7.5	6.2	60.9	54.6	40.0	41.1	2.50	2.85	0.019	275	3	16
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3		0.0		99.4			39.8		0.00				
8	Chaux	96.3	103	5.6	3.2	66.2	71.2	37.4	40.4	0.93	0.64	0.080	6	0	14
14	Chaux	91.3	104	1.9	0.6	66.5	65.4	36.4	40.6	0.31	0.34	0.092	582	8	25
6	Chaux	100		1.4		49.1		37.6		1.70		0.021	447	0	9
5	Chaux	97.6		3.4		66.5		37.4		0.76		0.046	367	3	6
24	Chaux	97.5	102	0.3	2.7	28.4	55.1	35.3	37.4	1.80	2.05	0.021	342	0	8
21c	Travertin		94.6		0.5		28.4		35.5		2.27				
21a	Travertin	91.5	96.6	6.6	0.2	63.7	35.4	33.6	36.7	1.58	1.22	0.006	543	0	11
25	Travertin	96.2	91.9	1.1	6.7	44.5	51.3	35.5	34.8	1.84	1.79	0.023	553	0	10
26	Travertin		93.7		1.0		35.4		35.1		1.74				
10a	Chaux	90.6	85.2	12.0	4.6	61.7	58.2	36.1	34.0	0.89	1.08	0.111	33	0	17
15	Travertin	87.6	87.1	8.6	5.5	57.2	54.6	34.8	34.4	0.33	0.25	0.048	1,070	0	8
21b	Travertin		92.8		0.7		39.6		34.1		1.74				
10b	Chaux		83.1		7.8		55.8		34.1		1.02				
17	Travertin	79.0	73.8	3.2	1.8	67.0	52	31.5	34.7	0.21	0.23	0.067	1,800	0	10
4	Travertin	80.0		1.1		58.1		31.8		0.30		0.087	694	1	10
9	Travertin	84.0	80.8	32.5	20.4	43.5	45.8	31.4	32.2	0.91	1.16	0.095	678	0	14
Bur-1	Dolomite du Sol		102		0.5		64		31.0		11.6				
11b	Travertin		79.8		7.2		45.2		30.7		1.13				
7	Chaux	82.8	74.8	18.6	18.8	61.9	52.7	31.9	29.1	0.62	1.32	0.095	11	0	12
11a	Travertin	74.1	73.8	15.1	11.6	57.1	44.9	29.3	28.7	0.52	1.22	0.070	523	0	20
3	Chaux	73.5		1.0		35.7		28.4		1.00		0.070	26	0	38

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
16	Travertin	59.7	81.0	6.9	15.5	62.6	45	24.3	31.6	0.19	0.22	0.080	677	0	8
Bur-3	Dolomite de Sous Sol Roche B		102		0.3		NA		21.7		12.2				
Bur-2	Dolomite de Sous Sol Roche A		102		0.6		NA		19.9		12.0				

Note: Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

Tableau B-6 Analyse de la Chaux Rwandaise, des Echantillons de Travertin et des Echantillons de Dolomite obtenus en 2007 et en 2008 – Classés selon la moyenne du contenu de Magnésium (Mg)

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Bur-3	Dolomite de Sous Sol Roche B		102		0.3		NA		21.7		12.2				
Bur-2	Dolomite de Sous Sol Roche A		102		0.6		NA		19.9		12.0				
Bur-1	Dolomite du Sol		102		0.5		64		31.0		11.6				
18	Chaux	120	127	1.7	1.8	86.7	96.7	42.2	41.6	2.85	2.57	0.017	27	0	12
19	Chaux	121	121	0.7	3.9	88.1	81.2	42.7	41.7	2.50	2.90	0.011	280	6	10
20	Chaux	110	116	7.5	6.2	60.9	54.6	40.0	41.1	2.50	2.85	0.019	275	3	16
22	Chaux	125	120	10.5	9.1	67.7	80.6	45.5	43.2	2.32	2.45	0.003	16	0	6
23	Chaux	117	118	0.6	12.9	81.3	72.9	42.6	42.8	2.31	2.45	0.022	192	1	15
21c	Travertin		94.6		0.5		28.4		35.5		2.27				
24	Chaux	97.5	102	0.3	2.7	28.4	55.1	35.3	37.4	1.80	2.05	0.021	342	0	8
25	Travertin	96.2	91.9	1.1	6.7	44.5	51.3	35.5	34.8	1.84	1.79	0.023	553	0	10
26	Travertin		93.7		1.0		35.4		35.1		1.74				
21b	Travertin		92.8		0.7		39.6		34.1		1.74				
6	Chaux	100		1.4		49.1		37.6		1.70		0.021	447	0	9
21a	Travertin	91.5	96.6	6.6	0.2	63.7	35.4	33.6	36.7	1.58	1.22	0.006	543	0	11
11b	Travertin		79.8		7.2		45.2		30.7		1.13				
9	Travertin	84.0	80.8	32.5	20.4	43.5	45.8	31.4	32.2	0.91	1.16	0.095	678	0	14
10b	Chaux		83.1		7.8		55.8		34.1		1.02				
3	Chaux	73.5		1.0		35.7		28.4		1.00		0.070	26	0	38
10a	Chaux	90.6	85.2	12.0	4.6	61.7	58.2	36.1	34.0	0.89	1.08	0.111	33	0	17
7	Chaux	82.8	74.8	18.6	18.8	61.9	52.7	31.9	29.1	0.62	1.32	0.095	11	0	12
11a	Travertin	74.1	73.8	15.1	11.6	57.1	44.9	29.3	28.7	0.52	1.22	0.070	523	0	20
8	Chaux	96.3	103	5.6	3.2	66.2	71.2	37.4	40.4	0.93	0.64	0.080	6	0	14
5	Chaux	97.6		3.4		66.5		37.4		0.76		0.046	367	3	6
1	Chaux	116		0.5		96.6		46.3		0.50		0.036	9	0	12
2	Chaux	120		0.5		81.5		47.6		0.46		0.044	51	1	23
12	Chaux	126	120	0.5	0.8	97.7	97.0	50.9	47.6	0.48	0.43	0.035	554	5	19
13	Chaux	115	122	1.7	0.7	88.8	93.0	46.2	49.2	0.44	0.39	0.053	54	2	20
14	Chaux	91.3	104	1.9	0.6	66.5	65.4	36.4	40.6	0.31	0.34	0.092	582	8	25
4	Travertin	80.0		1.1		58.1		31.8		0.30		0.087	694	1	10
15	Travertin	87.6	87.1	8.6	5.5	57.2	54.6	34.8	34.4	0.33	0.25	0.048	1,070	0	8

Echantillon No.	Type de Produit	$CaCo_3$ (ECC) - Sur Base du Poids Sec		Humidité-Sur base du Poids Sec		FF		Ca		Mg		Mn	Fe	Cu	Zn
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008				
		(%)		(%)				(%)		(%)		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
17	Travertin	79.0	73.8	3.2	1.8	67.0	52	31.5	34.7	0.21	0.23	0.067	1,800	0	10
16	Travertin	59.7	81.0	6.9	15.5	62.6	45	24.3	31.6	0.19	0.22	0.080	677	0	8
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3		0.0		99.4			39.8		0.00				

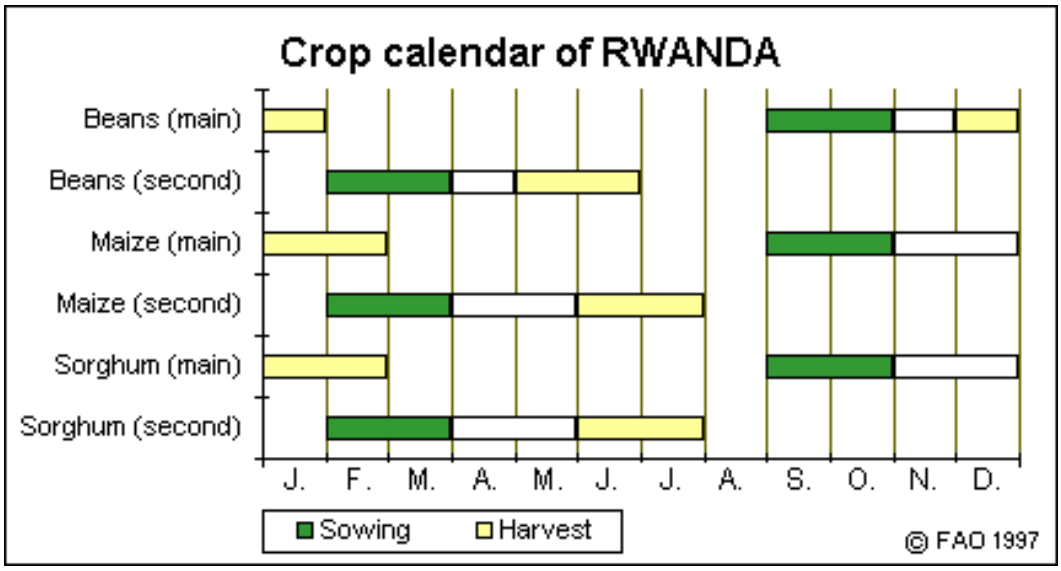
Note: Les échantillons ont été légèrement bouillis dans 50 ml de 0,5 N HCl, refroidis et titrés avec 0,25 N NaOH pour déterminer l'ECC. Les échantillons ont été acidifiés avec 1 ml de 0,5 N HCl, filtrés et dilués à 250 ml.

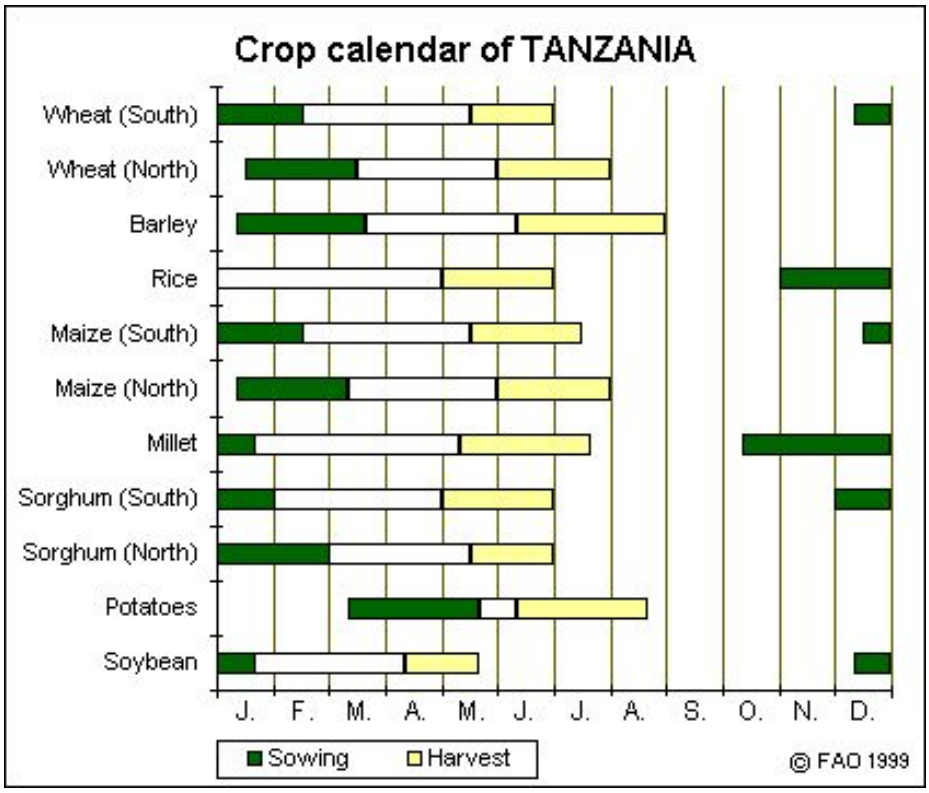
Les Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn ont été déterminés par ICP-OES (les résultats sont sur base du poids sec).

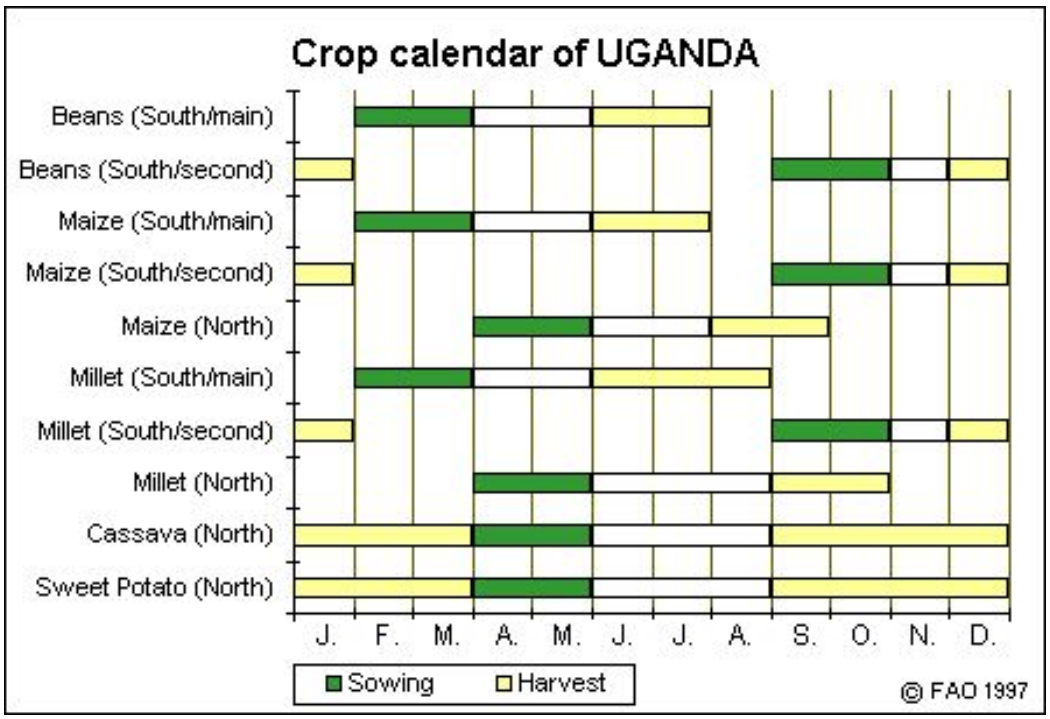
Tableau B-7 Analyse et Categorisation d'Echantillons de Chaux du Rwanda (et des Mines de Butare au Burundi), 2007–2008, Basee sur l'Equivalent du Carbonate de Calcium (ECC), du Contenu de ------Moisissure/Moisture------- et du Facteur de Finenesse (FF)

Echantillon No.	Type de Produit	ECC	Humidité	FF
22	Chaux	122.5	9.8	74.1
23	Chaux	117.5	6.75	77.1
2	Chaux	120	0.5	81.5
19	Chaux	121	2.3	84.6
13	Chaux	118.5	1.2	90.9
18	Chaux	123.5	1.75	91.7
1	Chaux	116	0.5	96.6
12	Chaux	123	0.65	97.4
QAQC	Standard de détermination de l'Equivalent de Calcium Carbonate (ECC)	100.3	0	99.4
20	Chaux	113	6.85	57.8
Bur 1–3	Chaux Dolomitique	102	0.5	64
14	Chaux	97.65	1.25	66.0
5	Chaux	97.6	3.4	66.5
8	Chaux	99.65	4.4	68.7
21c	Travertin	94.6	0.5	28.4
26	Travertin	93.7	1	35.4
3	Chaux	73.5	1	35.7
21b	Travertin	92.8	0.7	39.6
24	Chaux	99.75	1.5	41.8
11b	Travertin	79.8	7.2	45.2
21a	Travertin	94.05	3.4	49.5
6	Chaux	100	1.4	49.1
25	Travertin	94.05	3.9	47.9
10b	Chaux	83.1	7.8	55.8
15	Travertin	87.35	7.05	55.9
4	Travertin	80	1.1	58.1
17	Travertin	76.4	2.5	59.5
10a	Chaux	87.9	8.3	60.0
9	Travertin	82.4	26.45	44.6
11a	Travertin	73.95	13.35	51
16	Travertin	70.35	11.2	53.8
7	Chaux	78.8	18.7	57.3

Appendice C. Les Calendriers Culturaux du Rwanda, de la Tanzanie et de l'Ouganda


Crop calendar of RWANDA
Beans (main)
Beans (second)
Maize (main)
Maize (second)
Sorghum (main)
Sorghum (second)
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
Sowing
Harvest
© FAO 1997


Crop calendar of TANZANIA
Wheat (South)
Wheat (North)
Barley
Rice
Maize (South)
Maize (North)
Millet
Sorghum (South)
Sorghum (North)
Potatoes
Soybean
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
Sowing
Harvest
© FAO 1999


Crop calendar of UGANDA
Beans (South/main)
Beans (South/second)
Maize (South/main)
Maize (South/second)
Maize (North)
Millet (South/main)
Millet (South/second)
Millet (North)
Cassava (North)
Sweet Potato (North)
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
Sowing
Harvest
© FAO 1997

Appendice D. Revue de la Littérature sur l’Acidité du Sol et les Sols Acides

Revue de la Littérature

Identification des régions au sein de la zone d'intervention de CATALIST pour lesquelles l'acidité est ou peut facilement devenir un problème empêchant l'intensification agricole.

Toutes les Régions

Chimie du Sol

Le pH du sol est un important facteur dans la production des haricots dans la Région des Grands Lacs de l'Afrique où il y a une concentration particulièrement élevée de la production des haricots. Le pH du sol est en rapport en même temps avec la capacité du sol de fournir des éléments nutritifs et avec ses problèmes de toxicité en aluminium et manganèse.[37] Les haricots sont cultivée de façon extensive à travers la Région des Grands Lacs de l'Afrique, et les sols acides ou ils sont cultives sont indiques sur une carte de L'Atlas du Haricot, basée sur les données sur les sols de FAO à une échelle de1 :5 million. *Les endroits au sein de la région d'exécution du projet CATALIST sont : les hautes terres très humides sur des sols acides à basses altitudes dans certaines parties du Nord Kivu et Sud Kivu en République Démocratique du Congo, la Province Ouest du Rwanda, et dans des endroits environnants Bujumbura au Burundi. A cause de la basse résolution de la carte fournie dans l'Atlas du Haricot, il est peu utile d'identifier les endroits spécifiques des sols acides pour le projet CATALIST.*

Un test standard de Besoin en Chaux Adams-Evans et le test modifié ont été comparés à Clemson University.[38] Les hypothèses clé dans les calculs du taux de la chaux sont:
1. Réactivité du calcaire avec le sol. La surface spécifique du calcaire et le temps requis pour réagir complètement avec l'acidité du sol sont d'importants facteurs.
2. Le pH cible. Le pH cible qui est le meilleur pour la productivité des cultures n'est pas bien défini (par ex. pH 6,0 et pH 6,5 ont été utilisés).
3. La quantité de sol à être traitée. La profondeur de l'incorporation est un important facteur qui affecte la réactivité de la chaux
4. La variation naturelle des propriétés du sol telles que la profondeur, la capacité d'échange de cations qui affecte le pH du sol, et l'acidité échangeable.
5. Si les échantillons de sol sur lesquels la recommandation pour l'application de la chaux est faite sont représentatifs de l'endroit à être traité.
6. La méthode de l'analyse de laboratoire sur laquelle la recommandation est basée.

Les auteurs de l'étude ont conclu que "une erreur de laboratoire est supposée être la raison principale pour laquelle le pH du sol n'atteint pas le pH cible, ou la raison pour laquelle le pH du sol dans un champ ne change pas comme anticipé avec le temps qui suit l'application de la chaux. En fait, les nombreuses sources d'incertitude citées ci-haut introduisent beaucoup plus d'erreurs que l'analyse de laboratoire." *Les recommandations de chaulage faites dans le projet CATALIST seront les plus utiles si elles tiennent en compte les facteurs ci-dessus, qui peuvent*

37Wortmann C. S., R. A. Kirkby, C. A. Eledu, and D. J. Allen. 1998. *Atlas of Common Bean (Phaseolus vulgaris L.) Production in Africa*, CIAT Publication No. 297.

38Franklin, R. E., K. Moore, H. Deaton, and R. S. Mylavarapu. 1998. "Comparison of the Standard and a Modified Adams-Evans Lime Requirement Test," SB 674, Clemson University, South Carolina, p. 11.

<http://www.clemson.edu/agcomm/pubs/Pages/AGRO/SB674.pdf>.

affecter l'étendue et le temps nécessaires pour que la chaux appliquée par une recommandation atteigne un pH particulier pour prendre effet.

Une recherche sur terrain dans les hautes terres tropicales de l'Indonésie[39] a et menée pour développer pour les vulgarisateurs des techniques pour examiner la fertilité du sol dans les hautes terres tropicales quand aucun test du sol n'était disponible. Puisque une telle technique est moins appropriée que l'analyse chimique pour identifier les sols acides, les variétés indicatrices de plantes ont été utilisées pour identifier les sols acides avec un taux de P bas. Les symptômes de déficience en éléments nutritifs des feuilles peuvent être aussi utilisés comme indicateurs de déficiences possibles en éléments nutritifs. *Dans le projet CATALIST, les symptômes de déficiences en éléments nutritifs dans les feuilles peuvent être des indicateurs initiaux de déficiences en éléments nutritifs ; cependant, il est recommandé qu'une analyse chimique de la plante et des échantillons du sol soit utilisée dans les zones d'exécution du projet pour diagnostiquer adéquatement les déficiences en éléments nutritifs des plantes.*

Le pH tampon est utilisé pour estimer le besoin en chaux et c'est une mesure de l'acidité active et en réserve du sol. Gavlak et al. (2003) décrivent quatre procédures de laboratoire et des calculs qui peuvent être utilisés pour recommander les taux d'application de la chaux. Ces méthodes sont :
1. Besoin en Chaux d'un Simple pH Tampon SMP. Les courbes de calibration standard sont établies pour le chaulage basé sur une valeur SMP à un pH désiré pour les groupes de sol dans une zone géographique. La calibration locale de la méthode est souhaitable si la méthode SMP doit être utilisée dans le projet CATALIST.
2. Besoin en Chaux du pH Tampon Woodruff. La méthode Woodruff est plus appropriée aux sols pauvres en aluminium échangeable avec l'acidité associée avec les applications de l'azote ammoniacal.
3. Besoin en Chaux du pH Tampon Adams and Evans. La méthode Adams and Evans peut détecter de petites différences dans le besoin en chaux qui peuvent causer de grands changements dans le pH. La procédure est généralement reproductible dans 0,10 unités de pH.
4. Besoin en Chaux du pH Tampon Mehlich.[40] La méthode Tampon Mehlich est particulièrement bien appropriée pour déterminer le besoin en chaux pour neutraliser les sols très acides qui peuvent être nuisibles à la productivité des cultures.

Une méthode pour déterminer le besoin en chaux par le pH tampon dans les zones d'exécution du projet CATALIST devrait être choisie et calibrée de telle façon que les données puissent être comparées aux autres données scientifiques pour profiter de la recherche scientifique sur l'acidité du sol et le chaulage.

Matières de Gestion du Sol

Le Sépiolite est un silicate de magnésium hydrate avec la formule $Mg_8Si_{12}O_{28}(OH)_2(OH)_6(OH_2)_4{\cdot}6H_2O$ ou $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH_2)_4{\cdot}8H_2O$; les formules diffèrent

39Dierolf, T. S., E. Kramer, and T. Fairhurst. 1997. "When There Is No Soil Test... Helping Extension Workers Assess Soil Fertility in the Tropical Uplands," *Better Crops International* 11(2):14_17.

40Gavlak, R., D. Horneck, R. O. Miller, and J. Kotuby-Amacher. 2003. "Soil, Plant and Water Reference Methods for the Western Region," WREP 125, 2nd edition, Oregon State University.

dans la proportion du contenu total en eau "libre".[41] Un large gisement de sépiolite se trouve a Sinya (Arusha) tout près de la frontière Tanzanie-Kenya, approximativement 50 km au sud-est de Namanga. Une expérience a été conduite pour déterminer si le sépiolite pourrait être utilisé pour corriger l'acidité du sol d'un sol modérément acide (5,5 pH) en utilisant le maïs (*Zea mays* L.) comme culture d'essai.[42] Voici ce qui a été testé: la couche supérieure du sépiolite– broyage primaire (<10 mailles), sépiolite brut– broyage primaire (<10 mailles), la chaux agricole– terre fine (30 mailles), et dolomite – terre fine (60 mailles). Les matières variaient en contenus de Ca et Mg, la valeur neutralisante et les tonnes/ha requises pour changer le pH du sol de 5,5 à 6,5. Parmi les trois matières de sépiolite testées, la couche supérieure de sépiolite a été la plus efficace pour accroître le rendement de maïs. Tandis qu'elle est statistiquement égale à la chaux agricole et à la dolomite dans la neutralisation de l'acidité du sol et dans l'augmentation du rendement de maïs, la couche supérieure de sépiolite peut être plus économique que la chaux, parce que elle est comme un gisement de surface et n'a pas besoin d'être exploitée. La couche supérieure de sépiolite peut être utilisée sans aucun traitement ; cependant, Singh et Uriyo (1976) notent que le broyage primaire avant d'ajouter la couche supérieure de sépiolite comme un amendement au sol augmenter son efficacité. Le sol de sépiolite peut être une source économiquement viable de la matière de chaulage pour augmenter le pH du sol dans les zones d'exécution de CATALIST dans les Provinces Tanzaniennes de Kagera et Kigoma, mais une recherche agronomique et économique plus poussée devrait être faite avant de prendre une décision pour utiliser cette matière pour augmenter le pH du sol dans ces deux provinces.

Dans une étude complète**,** M.T.F. Wong et al. (1998) ont développé une méthode pour déterminer la capacité améliorante de l'acidité des résidus de plantes, du compost, du compost des déchets urbains, du fumier de ferme et la tourbe appliquée aux sols tropicaux.[43] Un Oxisol du Burundi, un Spodosol du Sumatra et un Ultisol du Cameroun ont été incubés avec 1,5% de quatre composts, du fumier de ferme et une tourbe pendant 14 jours. L'augmentation en pH du sol était directement liée à la capacité de la MO à capter les protons. La procédure de laboratoire pour estimer le pH final d'un sol traité a utilisé l'intersection des courbes tampon déterminées pour le sol et pour la MO. Cette technique de laboratoire peut être utilisée dans le projet CATALIST pour déterminer l'efficacité potentielle de la MO disponible à augmenter le pH des sols acides. Dans les sols organiques, le pH ***(H_2O)*** était dans la marge de 5,0 à 5,5 et dans les sols minéraux, la marge de 6,0 à 7,0 est optimale.

Une recherche plus poussée a été menée par Wong et al. (2000)[44] en utilisant l'Oxisol du Burundi et l'Ultisol du Cameroun pour déterminer la capacité des éléments émondés des arbres agro forestier pour neutraliser l'acidité. Ils ont montré que lorsque les sols sont amendés par 3,1%, par poids, des éléments émondés des jeunes pousses de n'importe laquelle des sept variétés d'arbre, le pH du sol augmentait et que le contenu en aluminium échangeable diminuait. La plus grande augmentation en pH et la diminution correspondante en aluminium échangeable a eu lieu pendant les premiers 14 jours d'incubation et la diminution a continué à un taux plus lent

41Dandy, A. J. 1971. "Zeolitic Water Content and Adsorptive Capacity for Ammonia of Microporus Sepiolite," *J. Chem. Soc. Section A—Inorg. Phys. Theor*. No. 14:2383_2387.

42Singh, B. R., and A. P. Uriyo. 1976. "Use of Sepiolite as a Liming Material,"*E. Afr. Agric For. J.* 41(4):323_327.

43Wong, M.T.F., S. Nortcliff, and R. S. Swift. 1998. "Method of Determining the Acid Ameliorating Capacity of Plant Residue Compost, Urban Waste Compost, Farmyard Manure, and Peat Applied to Tropical Soils," *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 29(19&20):2927_2937.

44Wong, M.T.F., P. Gibbs, S. Nortcliff, and R. S. Swift. 2000. "Measurement of the Acid Neutralizing Capacity of Agroforestry Tree Prunings Added to Tropical Soils," *J. Agric. Sci., Cambridge* 134:269_276.

jusqu' à 42 jours d'incubation. L'effet pour neutraliser l'acide a diminué après 42 jours mais il était toujours important au temps du dernier échantillonnage à 98 jours. Le mécanisme proposé pour expliquer la hausse du pH du sol est que la complexion des protons et des espèces d'aluminium neutralisaient l'acidité du sol. *L'amendement des sols avec la MO rend clairement des bénéfices aux sols acides en 1) augmentant le pH du sol et 2) en diminuant la concentration des espèces solubles d'aluminium. Le personnel de CATALIST qui développe GIFS pour les sols acides devrait considérer les amendements du sol avec la chaux et la MO comme des méthodes que les agriculteurs peuvent utiliser pour améliorer les propriétés chimiques des sols acides.*

Gestion du Sol

La variabilité spatiale du pH dans les sols acides devrait être considérée avant de faire des recommandations pour diminuer l'acidité du sol.[45] La justification du chaulage à taux variable est compliquée par les facteurs tels que les suivants: le chaulage est un investissement à long terme ; les besoins en chaux dans un champ peuvent ne pas être hautement variables ; le temps et la dépense impliqués dans l'échantillonnage d'une catégorie dans un champ et dans l'analyse des échantillons peuvent ne pas justifier les bénéfices économiques du chaulage. *Sauf dans des situations où de larges étendues de terre doivent être chaulés, les agronomes du projet CATALIST devraient prendre plusieurs échantillons par champ et les combiner pour réduire le coût de l'analyse de laboratoire requise pour recommander le besoin en chaux.*

Un rapport récent sur l'usage des engrais en Afrique[46] fait une seule référence en passant sur les sols acides. Le rapport a un point focal clair du point de vue de l'économiste et il fournit des connaissances relatives au marketing et aux aspects économiques des engrais en Afrique. L'échec majeur du rapport, cependant, est son manque d'inclusion d'autres aspects des sols à part leur contenu en éléments nutritifs (tels que la réaction [pH], la capacité de retenir de l'eau, le contenu en micro- éléments nutritifs, et la capacité d'échange de cations) qui peuvent de façon significative affecter l'efficacité des engrais fournissant N, P, et K. Un cas précis est qu'on peut gaspiller de l'argent en achetant les engrais NPK à appliquer à un sol fortement acide si l'acidité du sol n'est pas réduite avant que l'engrais ne soit appliqué. La toxicité en aluminium, la toxicité en manganèse, ou d'autres déficiences en éléments nutritifs, qui sont communes dans des sols acides non traités, peuvent sévèrement faire baisser les rendements de cultures quand l'engrais NPK est appliqué. *Pour apporter des technologies appropriées avec succès aux agriculteurs dans la Région des Grands Lacs, le projet CATALIST doit inclure une collaboration étroite entre les scientifiques biophysiques et les scientifiques socio-économiques. De cette manière, le personnel de CATALIST tendra à éviter les omissions significatives concernant les aspects biophysiques avec des implications économiques telles celles exposées par les économistes qui sont les auteurs du récent rapport à la Banque Mondiale.*

Un groupe dirigé par K. Giller et H. van Keulen des Systèmes de Production des Plantes, Département des Sciences des Plantes de Wageningen University, a proposé de traiter les facteurs du sol qui affectent l'efficience de l'utilisation des éléments nutritifs de plantes

45Adamchuk, V. I., and J. Mulliken. 2005. "Site-Specific Management of Soil pH (FAQ)." Extension Circular Series No. EC 05-705, UNL/Cooperative Extension Service, U2250H001.0705-2005.

46Morris, M. V. A. Kelly, R. J. Kopicki, and D. Byerlee. 2007. "Fertilizer Use in African Agriculture – Lessons Learned and Good Practice Guidelines," The World Bank, Washington, D.C.

introduits sur les sols dans les engrais.[47]Dans le projet Utilisation d'éléments nutritifs dans les Systèmes Animaux et Culturaux- Efficience et Echelles (NUANCES), les chercheurs sont en train de développer un cadre modèle qui combine les dimensions spatiales et temporelles des systèmes agricoles Africains des petits agriculteurs. L'hétérogénéité dans et entre les systèmes agricoles sera traitée, aussi bien que les aspects biophysiques tels que la toxicité en aluminium, la toxicité en manganèse ou d'autres déficiences en éléments nutritifs, qui sont communs dans des sols acides non traités et peuvent sévèrement faire baisser le rendement de cultures quand l'engrais NPK est appliqué. Le cadre modèle est d'inclure l'efficience de la capture des éléments nutritifs, un facteur clé dans la gestion les sols acides. *La recherche spécule que: "Une application potentielle serait d'utiliser le modèle pour une analyse rétrospective de l'intérêt des agriculteurs, de l'adoption et du manque d'adoption de différentes technologies (ex-post). Ceci peut ensuite mener à une meilleure focalisation de futures activités à travers les évaluations ex-ante. » A cause de ceci, il est douteux que le projet CATALIST acquerra des bénéfices du projet de recherche NUANCES.*

Une recherche récente au Centre Ouest Africain de Développement Rizicole (WARDA) pour venir à bout des limitations de rendement du riz des hautes terres cultivé dans les sols acides combine les approches pour modifier en même temps l'organisme et l'environnement.[48] Comme P est fortement fixé par la précipitation avec les variétés d'Al dans les sols acides, la déficience en P est commune dans les sols acides en Afrique. Les variétés de riz qui sont intolérantes à l'acidité du sol ne produisent pas du tout de rendement, et ainsi WARDA est en train de sélectionner des variétés de riz avec une tolérance aux sols acides. Les variétés de riz cultivées dans des zones avec des sols acides ont été sélectionnées pour leur tolérance au dur environnement chimique de l'acidité du sol, et des variétés améliorées tolérantes aux sols acides s'édifient sur des générations de sélections par des agriculteurs dans des zones avec des sols acides. Ca et Mg sont souvent déficients dans les sols acides. Une recherche de WARDA avec différents engrais a montré que l'addition de N, P, Ca et Mg a donné de meilleurs rendements de riz que l'application de N, Ca et Mg seulement, et que l'addition de Ca et Mg à la série d'engrais n'avait pas de plus grand effet sur les rendements que l'application de P seulement. Une autre recherche de WARDA avec le phosphate naturel (PN) et le triple superphosphate (TSP) appliqué aux sols acides pour la production du riz a montré des rendements plus élevés avec TSP, mais un PN du Mali a montré du potentiel pour servir comme une source peu coûteuse de P. Une recherche subséquente en Côte d'Ivoire a montré qu'après un traitement initial avec PN, les traitements de PN ont donné de façon significative des rendements de riz plus élevés dans la deuxième année de l'expérience que dans la première année, démontrant ainsi un effet résiduel de PN. *Le personnel de CATALIST peut être capable de trouver, dans WARDA, des sources de riz pour les tropiques humides, qui sont tolérantes aux sols acides et se portent bien dans les sols avec un taux bas P. La fertilisation avec phosphore des sols acides et des sols traités pour réduire l'acidité du sol sera une composante cruciale de la gestion des éléments nutritifs des plantes dans le projet CATALIST.*

47http://ppathw3.cals.cornell.edu/mba_project/soilforce/NUANCES.pdf

48WARDA. "On the Road to Overcoming Soil Acidity in Upland Rice," IN *WARDA Annual Report 1999*, pp. 23–29.

Burundi

Au Burundi, les rendements de blé ont été augmentés en utilisant la chaux, les engrais, et le fumier vert.[49] Dans la zone de moyenne altitude du Kirimiro et de haute altitude du Nord Mugamba, les nouvelles lignées de blé et triticale ont été testées avec des pratiques différentes de la gestion du sol. Certaines analyses économiques ont été menées pour déterminer le rendement économique des traitements de la gestion du sol. Les recommandations pour la diffusion de certaines variétés sont inclues dans le travail. Dans le Nord Mugamba de Haute Altitude, une augmentation moyenne du rendement de 34% a été obtenue en utilisant40-40 N-P/ha. Dans la zone de moyenne altitude du Kirimiro, 2,5 t/ha de fumier vert appliqué avec 250 kg/ha de chaux ont donné le meilleur rendement économique. Les taux élevés de phosphate de diammonium (DAP) seuls ont donné de bons rendements et un bon rendement économique, mais les rendements de ces traitements étaient plus bas que ceux incluant la chaux. Les données présentées pour les essais de la gestion du sol avec le blé dans la zone Kirimiro de moyenne altitude montrent le rendement de blé le plus élevé (1.144 kg/ha) et le poids de paille le plus élevé (4.271kg/ha) quand la gestion du sol suivante a été appliquée : 250 kg/ha de chaux, 100 kg/ha de DAP, 10.000 kg/ha de fumier vert, et 1.000 kg/ha de cendre de café. De moindres rendements ont été obtenus quand n'importe laquelle des quatre composantes était omise ou appliquée aux taux inférieurs à ceux utilisés pour le rendement maximum. *GIFS, qui doit être recommandée par les agronomes de CATALIST, peut utiliser les intrants minéraux tels que la chaux, DAP et la cendre de café ainsi que les intrants organiques tel que le fumier vert.*

En plus des critères classiques de l'amélioration génétique des plantes, tel que la r*é*sistance aux stress climatiques et aux insectes nuisibles, 33 variétés de blé et de triticale génétiquement améliorées pour être cultivées dans la région de Mugamba au Burundi sont aussi sélectionnées pour leur tolérance aux sols acides et à l'aluminium. Alors que le blé est largement cultivé dans la zone au dessus de 1.900 m sur la Crête-Congo-Nil, le triticale a été introduit dans la zone en 1975. Dans les zones de la région de Mugamba dans laquelle les kaolisols acides, infertiles prédominent, le triticale s'est révélé plus tolérant à l'acidité du sol et à l'aluminium que le blé.[50] Dans les sols avec pH < 5, le triticale a produit entre 30% et 80% de rendement plus que le blé, suivant le degré de l'acidité. La figure 1 montre une relation entre la saturation en aluminium et le pH dans les kaolisols de la région de Mugamba. Elle montre clairement que le pH augmente au fur et à mesure que la saturation en Al diminue (voir ci-dessous). Les données tabulaires montrent, par exemple, que dans les kaolisols humides à pH 4,7, deux variétés de triticale testées (Triticale BVR-Arm et Triticale Mizar) ont produit plus de grains : 183% et 155% du rendement de grain de la variété Romany de blé. Les deux variétés de triticale ont aussi produit des rendements de grains considérablement plus élevés que la variété Romany de blé quand les rendements ont été en moyenne au dessus de la marge des pH du sol testés (pH 4,7 et 5,7). Dans les hydrokaolisols et dans les sols bruns, kaolinitiques, le triticale ne s'est pas montré supérieur aux variétés de blé testées. *Cette recherche indique l'importance de recommander les variétés de cultures tolérantes aux sols acides dans les zones de certains sols acides dans les zones d'exécution de CATALIST. Il peut être plus efficace en termes de coûts d'apporter des variétés*

49Baragengana, R. 1990. "Wheat Nutrition in High Altitude," In *The Sixth Regional Wheat Workshop: for Eastern, Central and Southern Africa: Addis Ababa, Ethiopia*, October 2–6, 1989. pp. 198–203.

50Schalbroeck J. J., and L. Opedecamp. 1985. "Sensibilités Différentielles du Blé (Triticum Aestivum) et du Trticale (X. Triticosecale) a l'Acidité des Terres dans la Mugamba (Burundi)," Actes du Dixième Forum International sur la Soil Taxonomy et les Transfers d'Agrotechnologie : Burundi et Rwanda, 1–12 Avril 1985.

tolérantes à l'acidité dans les zones avec des sols acides dans des endroits où il n'est pas économiquement faisable d'appliquer la chaux et la MO comme amendements du sol. Cependant, il vaut la peine de mentionner qu'une variété de plante (le triticale, dans ce cas précis) avec une performance supérieure dans certains sols acides peut ne pas offrir une performance supérieure dans un autre sol acide.

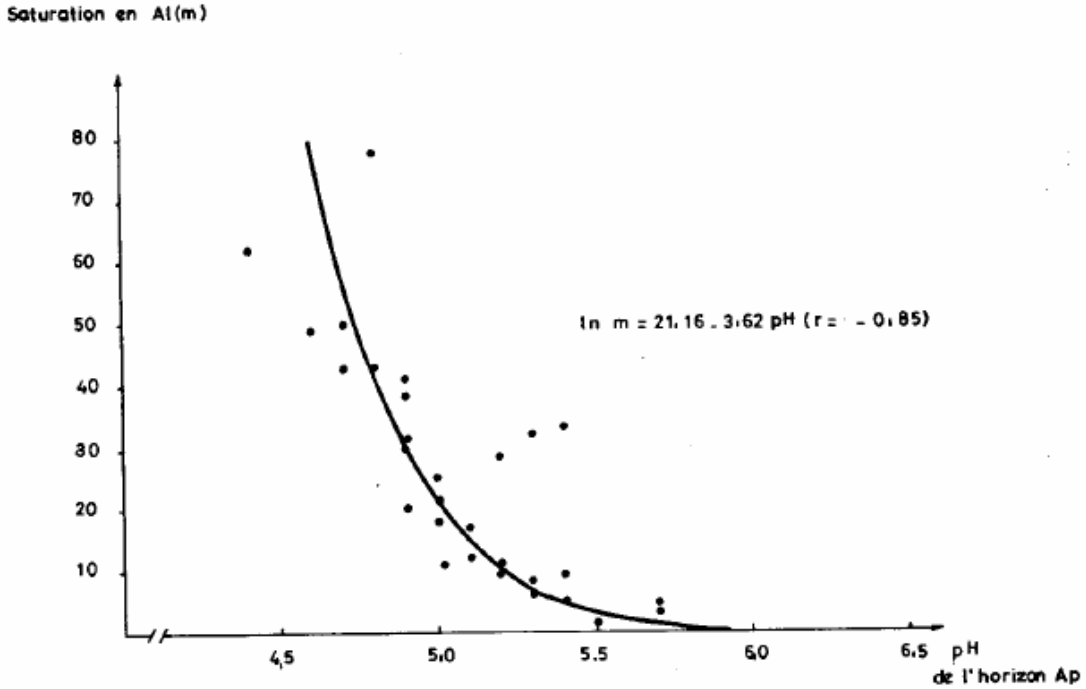


Figure 1. Relation entre la Saturation en Al et le pH dans les Kaolisols de la Région de Mugamba.

Le blé et le maïs sont cultivés dans une zone relativement froide et pluvieuse du Burundi entre 1 400 et 2 200 m d'altitude; ici, le plus important facteur limitant l'intensification agricole est l'acidité du sol.[51] A Mahwa dans la région du Bututsi (Kajondi), les essais ont été menés avec différentes combinaisons d'amendements du sol et d'engrais avec le blé. La chaux utilisée dans les essais est venue d'une touffe de la plaine de l'Imbo, très finement broyée, et non chauffée. La quantité appliquée a été calculée par la méthode de Kamprath, basée sur l'équivalent en CaO et le degré de toxicité en aluminium du sol. Pour neutraliser entre 85% et 90% de l'aluminium échangeable dans l'horizon de la surface du sol, 4,3 t/ha de la touffe de Gihungwe (29,2% CaO et 7% MgO) ont été estimés nécessaires. Dans le traitement du fumier, 7 t/ha de fumier (2,01% N, 1,83% P, 0,30% Ca, 0,18% Mg, 39,1% C organique) ont été appliqués, parce que c'était la quantité estimée qu'un agriculteur Burundais ayant une vache et cultivant 0,4 ha de terre devrait avoir. A cause de la pression humaine sur la terre, les pâturages sont en train d'être transformés en terre cultivée, et le fumier devient moins disponible; par conséquent, un traitement de 4 t/ha de fumier et 2 t/ha de chaux a été inclus. Dans le traitement de fumier et chaux, pour approximer les situations dans lesquelles moins de fumier est disponible, les 2 t/ha de chaux sont pour corriger partiellement la toxicité en aluminium. La fertilisation avec le phosphore n'avait pas de bénéfice économique à moins que le sol ne soit amendé avec le fumier et la chaux pour corriger

51Mathieu, C., C. Otoul, and A. Bruyere. 1992. **"**Influences de la Fertilisation sur un Sol Acide Désaturé et sur le Rendement en Blé Dans le Bututsi (Burundi)**,"** *Pedologie,* XLII-1, p. 39–56, 11 tab., Gand, 1992.

la toxicité en aluminium. Soixante kg/ha de N comme urée et 60 kg/ha de K2O comme KCl ont été ajoutés à tous les traitements.

Conclusions: Comme indiqué par le rendement des grains, l'effet de l'engrais triple phosphate s'est accru de quatre ou cinq fois quand la chaux et le fumier ont été ajoutés au sol. L'utilisation de la chaux et de la MO avec l'engrais NPK a eu des effets immédiats sur ce sol de prairie ferralitique, acide avec des niveaux toxiques d'aluminium. L'analyse économique basée sur l'essai agronomique a montré que le seul traitement qui serait économiquement bénéfique à l'agriculteur est: 2 t/ha de chaux + 4 t/ha de fumier +60 kg/ha de N comme urée, 120 kg/ha de P_2O_5 + 60 kg/ha de K_2O comme KCl. Les calculs économiques ont été basés sur la prémisse selon laquelle les intrants des cultures auraient besoin d'être apportés avec le revenu issu de la vente de cette culture, avec l'exception de la chaux. Le coût d'une application unique de la chaux devait être couvert par le revenu de huit cultures pendant quatre saisons. La chaux a été considérée comme un investissement "à moyen terme", alors que d'autres intrants comme les engrais, les produits de protection de la culture, la semence et le travail manuel ont été considérés comme des investissements "à court terme". *La rentabilité de différents traitements pour gérer les sols acides (chaux, MO et engrais) dépend du prix qu'apportera la culture et les prix des intrants variés. Pour que le projet CATALIST dissémine des recommandations pour la gestion rentable du sol pour les sols acides, la détermination des pratiques qui seront probablement rentables (il n'y a pas de garantie) est une tâche complexe. Elle requiert les contributions des données biophysiques des agronomes concernant l'efficacité agronomique de différentes pratiques et elle nécessite aussi l'analyse économique par des économistes formés ayant accès aux données économiques tels que les coûts des intrants et les prix des cultures sur les marchés.*

La gestion de l'acidité du sol dans des agro écosystèmes basés sur l'arbre a été revue par Wong et al. (2004)[52] dans une étude dans SCRIPTORIA. Ils font référence à un essai mené en collaboration avec le Centre International d'Agroforesterie (ICRAF) sur un Oxisol à Karuzi au Burundi dans lequel les cultures de maïs et de haricots ont reçu des engrais adéquats et l'application de 3 et 6 t/ha de matière émondée; l'augmentation du rendement a été attribuée à l'amélioration de l'acidité du sol et à la saturation en aluminium abaissée. Ces taux d'addition semblent faisables dans des systèmes d'agroforesterie. *Dans le projet CATALIST, les applications de 3-6 t/ha de la matière émondée dépendra de la disponibilité de la matière émondée et du travail.*

République Démocratique du Congo

Il y a de nombreuses opportunités pour la gestion du sol dans les Sud Kivu.[53] Les plus importants gisements de chaux se trouvent à Katana, au nord de Bukavu et à Mushinga, au sud de Bukavu. Ceux-ci ne sont pas utilisés pour l'agriculture mais ils sont principalement utilisés dans l'industrie de construction et pour la production des produits pharmaceutiques par PHARMAKINA. Dans le Nord Kivu, il y a des gisements de chaux à Kasugho, au sud ouest de

52Wong, M.T F., K. Hairiah, and J. Alegre. 2004. "Managing Soil Acidity and Aluminum Toxicity in Tree-Based Agroecosystems," Chapter 8 In SCRIPTORIA In *Below-Ground Interactions in Tropical Agroecosystems Concept and Model With Multiple Plants Components*, Wallingford, UK. CABI. p. 143–156, M van Noordwijk , G Cadisch and C K. Ong (Eds.).

53Lubanga, L. "Possibilités de Gestion de la Fertilité de Sol au Sud-Kivu Montagneux." <http://209.85.165.104/search?q=cache:1iMFaTVRW20J:129.194.252.80/catfiles/2083.pdf+sol+acide+burundi&hl=en&ct=clnk&cd=9&gl=us&lr=lang_fr>.

Lubero et à Katana. *Les participants dans le projet CATALIST devraient être capables d'utiliser ces sources de chaux pour augmenter le pH du sol.*

Rwanda

Deux précédentes consultances scientifiques du sol d'IFDC ont fourni de brèves références aux problèmes de l'acidité du sol au Rwanda. Sur base de l'information obtenue lors de sa consultance au Rwanda du 12 au 27 janvier 2007, Dr. D. T. Hellums[54] a recommandé pour augmenter le pH des sols acides sur lesquels les pommes de terre, le maïs, le soja et le blé sont cultivés: "Corriger le pH du sol à 6 avec l'incorporation de 2,5 t/ha de chaux (tous les deux ans) ou 10 t/ha de fumier organique (annuellement) 4 semaines avant la plantation." Sur base de l'information obtenue au cours de sa consultance subséquente de collection des faits au Rwanda, Dr. U. Singh[55] a noté que les déséquilibres en éléments nutritifs entre Ca et Mg, d'une part, et K, d'autre part, peuvent se produire si la chaux est appliquée pour augmenter le pH des sols acides, aboutissant à des quantités disproportionnellement larges de Ca et Mg disponibles, comparées avec la quantité de K disponible. Il a aussi noté qu'un déséquilibre peut avoir lieu d'une manière contraire si l'engrais K est appliqué dans un sol acide avec très peu de Ca ou Mg, aboutissant à une disponibilité de K disproportionnellement plus élevée que Ca et Mg pour les plantes cultivées dans le sol. Pendant la consultance de Dr. Singh, les échantillons du sol en provenance du bureau de CATALIST ont été analysés par Mme Laurence Mukamana, Agronome de IFDC-Rwanda, et Mr. Chiruza, Agronome à IFDC-RDC. Ils ont trouvé que de très bas niveaux de K étaient évidents dans tous les sols testés, et les niveaux de N et P étaient bas dans la plupart des sols testés. L'effet de la chaux appliquée dans les premiers 30 cm était limité à cette profondeur. La présente revue de littérature fournit des connaissances plus profondes révélant dans quelle mesure l'acidité du sol est un problème dans les zones d'exécution de CATALIST et elle fournit des connaissances plus poussées dans la chimie du chaulage et de la fertilisation, qui nécessite d'être tenue en compte avant que le personnel de CATALIST ne fasse des recommandations pour le chaulage ou la fertilisation des sols dans les zones d'exécution du projet.

L'efficacité de la méthode de culture en couloirs avec des arbustes légumineux dans les sols acides a été l'objet d'investigation au Rwanda entre 1983 et 1989.[56] *Cassia spectabilis, Calliandra calothyrsus,* et *Sesbania sesban* croissaient bien sur des sols acides qui étaient infertiles dans une zone semi-aride. *Calliandra calothyrsus* a fait des nodules spontanément et a été infecté avec mycorrhyzae, qui a rendu possible une bonne absorption du phosphore. Avec des couloirs de 5 m de largeur et quatre coupes par an, *Cassia spectabilis* a fait la meilleure performance, suivi par deux variétés de *Leucaena* et *Calliandra calothyrsus. Sesbania sesban* n'a pas survécu quatre coupes et il a été jugé inapproprié pour la méthode de culture en couloirs dans un environnement aride. La production moyenne annuelle d'elements nutritifs dans la biomasse récoltée a été de 72–119 kg/ha de N, 2–3 kg/ha de P, 47–94 kg/ha de Ca, 8–19 kg/ha de Mg, et 29–60 kg/ha de K. Cette production était équivalente à la contribution des éléments nutritifs

54Hellums, D. T. January 27, 2007. Presentation entitled "Fertilizer Use by Farmers in the Great Lakes Region."

55Singh, U. July 2007. "Consultancy Report: Developing a Terms of Reference on Fertilizer Recommendations for Crops in the Great Lakes Region for CATALIST PROJECT - A Regional Project to Intensify Agricultural Productivity and Improve Product Marketing."

56Balasumbranian V., and L. Sekayange. 1992. "Effets de la Culture en Couloirs sur les Proprietés du Sol et les Performances des Arbustes et les Cultures Vivrieres Dans un Environnemente Semi-Aride au Rwanda. [*Réseau Erosion,* 12:180_190. <http://www.ruralpovertyportal.org/english/regions/africa/rwa/agriculture_in_rwanda/Menu.htm#_Rapports_et_articles>.

minéraux à partir de 10 t/ha du fumier de ferme. Pendant une période de 5 ans, comparées avec le témoin non traité, les augmentations de pourcentage de l'incorporation de la MO des coupes dans les sols acides étaient dans les marges suivantes: 2%–20% C, 3%–7% K, 4%–51% Ca, 7%–31% Mg, et 3%–47% CEC. Les augmentations de rendement du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) et du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) ont été les plus élevées avec *Cassia spectabilis*; le maïs (*Zea mays* L.) a été faible; et le rendement de la patate douce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) a été, avec les traitements de la méthode de culture en couloirs, moins qu'elle était avec le temoin. *Les résultats de cette recherche montrent que la méthode de culture en couloirs avec les variétés légumineuses peuvent être utilisés pour amener les éléments nutritifs minéraux du fond du sol aux parties végétatives de la plante qui peuvent être périodiquement coupées et incorporées dans le sol, en augmentant C, K, Ca, Mg, et CEC. En développant les recommandations GIFS, le personnel agronomique de CATALIST devrait considérer la culture en couloirs avec les variétés légumineuses dans les sols acides dans les zones semi-arides comme une manière d'augmenter la disponibilité des éléments nutritifs essentiels des plantes pour améliorer la qualité du sol et le rendement du haricot commun et du sorgho.*

L'érosion du sol au Rwanda continue d'être le résultat de la conversion de l'usage de la terre des forêts et des pâturages au labourage.[57] Sur des pentes raides, des pertes de 100 t de sol par ha par an ont été observées. Sur base d'une revue de recherche sur l'érosion du sol au Rwanda, Köenig recommande l'utilisation de moyens biologiques telle que la culture en couloirs, au lieu de moyens mécaniques telle que l'édification de murs en roche, pour lutter contre l'érosion et recycler les éléments nutritifs dans les systèmes de culture sur les pentes raides. *Une combinaison des moyens mécaniques et biologiques de lutte contre l'érosion offre la flexibilité pour fournir une lutte anti-érosion appropriée dans différentes régions du Rwanda. Le personnel agronomique de CATALIST avec leurs collègues de Helpage devraient peser les coûts et bénéfices des moyens mécaniques et biologiques de la lutte anti-érosive sur des pentes cultivées de différente inclinaison et avec différentes caractéristiques du sol.*

Au Rwanda, L'agroforesterie a été examinée par l'expérimentation sur terrain comme un moyen de restaurer les sols acides, qui s'érodent dans le Plateau Central (Station Rubona de l'ISAR près de Butare) et dans les savanes dans l'est (Station Karama de l'ISAR) aux plus basses altitudes au Rwanda.[58] Les sols ferralitiques de ces deux régions ont en général une saturation en bases faibles; un pH entre 3,8 et 5 est commun ; et les déficiences en N et P sont répandues. Beaucoup de sols dans ces deux régions semblent être très perméables, ont une faible capacité à retenir l'eau (1 mm par cm), et ont une capacité faible d'échange de cation (1–5 meq/100 g). La Figure 1 montre les zones agroécologiques, et la Figure 2 montre les effets de l'érosion et de la déposition des sols dans les paysages du Rwanda. Des diminutions importantes en érosion sont montrées dans la Figure 3 (d'après Köenig) comme une preuve que l'agroforesterie peut réduire l'érosion de l'ordre de 550 t/ha/an pour les sols dénudés à moins que 100 t/ha/an en utilisant l'agroforesterie. Il est aussi montré dans la Figure 3, sur base des données de Köenig, les réductions d'érosion avec la production du manioc en utilisant l'agroforesterie. Le reste de l'étude contient beaucoup de tableaux des données, chiffres et diagrammes. Les conclusions clé de cette étude sont : 1) l'agroforesterie a réduit le ruissellement et l'érosion à >2 t/ha/an; et 2) après 2 ans, les haies ont produit 9t/ha/an de fourrage vert et 2–4 t/ha/an de bois de chauffage.

57Köenig, D. 1994. "Degradation et Erosion des Sols au Rwanda," Cah. Outre-mer, XLVII:185, 1–3:1994, pp. 35–48.

58Roose, E., F. Ndayizigiye, and L. Sekayange. 1993. "L'agroforesterie et la G-CES au Rwanda – Comment Restaurer la Productivité des Terres Acides ans une Région Tropicale de Montagne à Forte Densité de Population?" Cah. Orstom sér Pédol., vol XXVIII, no. 2, 1993, 327–349.

Jointe aux résidus des plantes, cette biomasse a apporté à la surface du sol 80–120 kg/ha/an de N, 2–12 kg/ha/an de P_2O_5, et 20–80 kg/ha/an de K_2O, CaO, et MgO, selon l'espèce de buisson et la fertilité du sol. Même après avoir ajouté 10 t/ha/an de fumier de ces systèmes d'agroforesterie, la production de maïs et de haricots (600 kg/ha/an) ainsi que des grains de sorgho (800 kg/ha/an) est restée basse. Pour atteindre une production plus élevée de maïs et de haricot (2.300 kg/ha/an) et de sorgho (1.500 kg/ha/an), il était nécessaire pour corriger le pH (3 t/ha/3ans de chaux), et d'ajouter 3–10 t/ha/2 ans de fumier et engrais (40–100 kg/ha/an de N, 30–80 kg/ha/an de P_2O_5, et 20–200 kg/ha de K_2O, selon les besoins des plantes et les déficiences du sol). Roose et ses collègues ont observé que dans le Plateau Central et dans les basses savanes du Rwanda, l'agroforesterie peut stabiliser les pentes et amener certains éléments nutritifs minéraux et la MO à la surface du sol; cependant, ils ont conclu que l'addition de 10 t/ha/an de fumier était inefficace pour augmenter les rendements. Leurs résultats montrent que l'addition de la chaux et des engrais est nécessaire pour augmenter les rendements de façon significative dans les sols acides des deux régions. *Cette recherche indique que dans le projet CATALIST, puisque les besoins pour les éléments nutritifs de plantes dépendent des conditions et des besoins en éléments nutritifs des cultures pour atteindre le rendement cible, le test du sol devrait être utilisé pour déterminer les besoins en chaux et les éléments nutritifs de plante à être appliqués en utilisant les engrais. L'agroforesterie et le fumier peuvent contribuer à la GIFS, mais la chaux et les engrais peuvent apporter des augmentations significatives aux rendements des plantes.*

Une recherche plus poussée de Roose et al. (1988)[59] renforce les conclusions présentées ci-haut et ajoute de nouvelles connaissances aux problèmes associés à la gestion des sols acides, qu'ils estiment comprendre les deux tiers des sols cultivés au Rwanda. Puisque la biomasse végétale de l'agroforesterie est insuffisante pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes cultivées sur des sols acides (particulièrement Ca et Mg de la chaux et P), Roose et ses collègues recommandent la chaux, les engrais minéraux, et la biomasse animale (aliment d'os et aliment de sang). Puisque l'utilisation de la biomasse végétale (agroforesterie, fumier vert, fumier, compost et résidus des plantes de céréales) a été insuffisante pour fournir des éléments nutritifs minéraux suffisants aux plantes cultivées dans les sols acides, Roose et ses collègues recommandent des applications massives de fumier (10 t/ha tous les 2 ans), de chaux (2–4 t/ha tous les 3 ans), et de engrais NPK (50–100 kg/ha/an de N, 40–100 kg/ha de P, et 30–200 kg/ha/an de K, selon le contenu en éléments nutritifs du sol et le rendement cible de cultures spécifiques). Pour restaurer la productivité des sols dégradés, ils recommandent six pas. Un des pas à faire est d'appliquer et de mélanger 10-20 t/ha de fumier ou compost pour "revitaliser" le sol, 1-5 t/ha de chaux pour amener le pH à >4,8, point auquel la toxicité de l'aluminium et du manganèse disparaît, et la fertilisation pour éviter la fixation ou la précipitation avec le fer ou l'aluminium libre. *Les traitements des sols acides dans le projet CATALIST devraient inclure l'application des éléments nutritifs minéraux en provenance des sources organiques et inorganiques. La MO et la chaux fournissent les éléments nutritifs essentiels de plantes ; les additions de MO augmentent la capacité d'échange de cations et tamponnent le pH du sol, et les additions de la chaux neutralisent l'acidité.*

L'utilisation des modèles informatiques de SFCC et ACID4 pour évaluer les problèmes des sols acides dans les hautes terres du Buberuka et du Plateau Central du Rwanda, Yamoah et al.

59Roose, E., F. Ndayizigiye, L. Sekayange, et J. Nsengimana. 1988. „La Gestion Conservatoire de l'Eau et la Fertilité des Sols (G.CES) – Une Nouvelle Stratégie pour l'Intensification de la Production et de la Restauration de l'Environnement en Montagne,„ *Bull. Agric. Rwanda* 21(4): 264_277. <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/bre/36046.pdf>.

(1990)[60] ont divisé la région d'étude en trois zones agro écologiques: (1) haute élévation > 2.000 m; basses précipitations de pluie < 1.200 mm, matériau parental – granite et complexe de schistes; (2) moyenne à haute élévation, 1.800–2.000 m; 1200 mm < précipitation de pluie <1400 mm; matériau parental – granite et complexe de schistes; et (3) basse élévation, 1500–1800 m; grandes précipitations de pluie, >1400 mm; matériau parental – quartzite et complexe de schistes. Les échantillons du sol ont été pris, et le besoin en chaux a été estimé en utilisant le programme ACID4. Les données de chaque échantillon de sol ont été utilisées pour informatiser le besoin en chaux par champ, et une culture sensible à l'Al (haricot) a été utilisée comme culture d'essai dans le modèle. En utilisant le besoin en chaux estimé comme variable dépendante, les analyses de régression ont été menées avec Al et pH comme variables indépendantes pour obtenir les équations de prédiction. Les sols étaient très faible en N, P, et K et marginaux en Ca et Mg. Le pH de tous les sols était < 5,5, indiquant une possible toxicité en Al pour les cultures sensibles à l'Al. L'acidité échangeable de (Al +H) était >2meq/100g, et une saturation moyenne en Al du complexe d'échange de cations était <50%, mais aussi élevée que 70% dans certains sols. Ces niveaux de saturation en Al affectent le haricot et les légumineuses sensibles à l'Al plus que le maïs ou les pommes de terre. La capacité d'échange cationique effective (CECE) est une mesure de la capacité des sols à retenir les éléments nutritifs dans les conditions de lessivage. Le bas niveau de CECE des échantillons de cette étude implique que l'application de Ca et Mg devrait être utilisée pour déplacer Al et H du complexe d'échange de cations plus profond que dans les sols avec une CECE plus élevé. Le besoin en chaux pour les sols se situait 0–6 t/ha de $CaCO_3$. Le coefficient de corrélation pour l'équation prédisant le besoin en chaux à partir de l'Al échangeable a été de r=.95**, par opposition à r=0,73* pour le pH. Alors que plusieurs chercheurs auxquels Yamoah et ses collègues font référence voient l'Al échangeable comme un meilleur instrument pour prédire le besoin en chaux, du point de vue pratique, pH est plus facile à mesurer et peut, par conséquent, être préférable comme base sur laquelle estimer le besoin en chaux. Dans la plupart des cas, le chaulage est nécessaire une fois tous les 3 ans.[61] Selon le SFCC, 75% des sols étaient acides, et 55% étaient des réserves pauvres en K. L'acidité du sol a été associée à un taux élevé Al échangeable et une saturation en Al, qui a excédé 50% au pH<5,2. La chaux est disponible localement dans ce qui était, en 1990, la Province de Ruhengeri. Yamoah et ses collègues recommandent les programmes informatiques de SFCC et ACID4 comme des moyens rapides et peu coûteux pour évaluer les problèmes liés à la fertilité du sol et pour recommander les moyens correctifs pour les surmonter. *Il est recommandé que le Programme des Dynamiques des Sols et des Eléments nutritifs évalue ces deux programmes. S'ils sont rapides et utiles à utiliser, ils devraient être utilisés pour analyser les données sur le sol du projet CATALIST en vue de formuler des recommandations pour le chaulage et les applications d'engrais.*

Yamoah et al. ont mené une étude sur la croissance précoce des arbustes en couloirs dans la région des Hautes Terres du Rwanda.[62] L'étude fournit de l'information sur l'établissement des arbustes en couloirs et leur réaction à la fumure et au chaulage. La croissance de Sesbania a été retardée par le petit pois en culture intercalaire.

60Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, and M. R. Malcolm. 1990. "Application of Expert Systems to Study of Acid Soils in Rwanda," *Agric. Ecosystems Environ.*, 30:203_218.

61Tropsoils. 1987. "ACID4: An Expert System to Manage Soil Acidity in the Humid Tropics." The Center for Soils Research, Bogor Indonesia, Univ. of Hawaii, and North Carolina State University.

62Yamoah, C., R. Grosz, and E. Nizeyimana. 1989. "Early Growth of Alley Shrubs in the Highland Region of Rwanda," *Agroforestry Systems*, 9:171–184.

Tanzanie

Sur base de l'analyse des systèmes de sols et d'agriculture pendant une période de 30 ans en Tanzanie, il est prédit que la productivité des sols Tanzaniens déclinera à moins que des pas ne soient entrepris pour renverser plusieurs processus.[63] Le principal facteur qui cause le déclin dans la productivité est la réduction en disponibilité d'éléments nutritifs à travers l'exploitation minière du sol et l'érosion. Une édification de l'acidité du sol est aussi une menace pour la productivité agricole, particulièrement si des engrais fortement acidifiant sont utilisés.

Ouganda

L'information sur l'Ouganda se trouve dans le corps principal du texte.

63Aune, J. B. 1995. "Predicting Soil Degradation in Tanzania A Systems Analysis Approach," *Norwegian J. Agric. Sci.*, 21:47_60.

Appendice E. Bibliographie

Adamchuk, V. I., and J. Mulliken. 2005. "Site-Specific Management of Soil pH (FAQ)," Extension Circular Series No. EC 05-705. UNL/Cooperative Extension Service. U2250H001.0705-2005.

Adams, F. 1984. "Crop Response to Lime in the Southern United States," IN *Soil Acidity and Liming*, 2nd edition, p. 234, F. Adams (Ed.), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Aune, J. B. 1995. "Predicting Soil Degradation in Tanzania—A Systems Analysis Approach," *Norwegian J. Agric. Sci.*, 21:47–60.

Balasumbranian, V., and L. Sekayange. 1992. « Effets de la Culture en Couloirs Sur les Proprietés du Sol et les Performances des Arbustes et les Cultures Vivrieres Dans un Environnemente Semi-Aride au Rwanda, " *Bull. Réseau Erosion*, 12:180–190. <http://www.ruralpovertyportal.org/english/regions/africa/rwa/agriculture_in_rwanda/Menu.htm#_Rapports_et_articles>.

Baragengana, R. 1990. "Wheat Nutrition in High Altitude," IN *The Sixth Regional Wheat Workshop: For Eastern, Central and Southern Africa: Addis Ababa, Ethiopia*, October 2–6, 1989. pp. 198–203.

Barber, S. A. 1984. "Liming Materials and Practices," IN *Soil Acidity and Liming*, 2nd edition, p. 193, F. Adams (Ed.), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Beernaert, F. R. 1999. "Feasibility Study of a Production Project of Lime and/or Ground Travertine for the Management of Acid Soils in Rwanda," PRO-INTER Project Consultants. Belgium.

Breman, H., and J. J. Kessler. 1995. "The Role of Woody Species in Agroecosystems With an Emphasis on the Sahel," Springer-Verlag, Berlin.

Breman, H., B. Fofana, and A. Mando. 2007. "The Lesson of Drente's 'Essen': Soil Nutrient Depletion in Sub-Saharan Africa and Management Strategies for Soil Replenishment," IN *Land Use and Soil Resources*, A. K. Braimoh and P.L.G. Vlek (Eds.), pp 145–166, Springer Science + Business Media B.V., Bonn, Germany.

Cochrane, T. T., J. G. Salinas, and P. A. Sanchez. 1980. "An Equation for Liming Acid Mineral Soils to Compensate for Crop Aluminum Tolerance," *Trop Agric (Trinidad)* 57:133–140.

Dandy, A. J. 1971. "Zeolitic Water Content and Adsorptive Capacity for Ammonia of Microporus Sepiolite," *J. Chem. Soc.* Section A—Inorg. Phys. Theor. No. 14:2383–2387.

Dierolf, T. S., E. Kramer, and T. Fairhurst. 1997. “When There Is No Soil Test... Helping Extension Workers Assess Soil Fertility in the Tropical Uplands,” *Better Crops International*, 11(2):14–17.

Dierolf, T., L. I. Amien, and R. S. Yost. 1999. “Testing and Validation of an Expert System for Making Liming Decisions,” *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 54:9–20.

Drechsel, P., and W. Zech. 1991. “Foliar Nutrient Levels of Broad-Leaved Tropical Trees: A Tabular Review,” *Plant and Soil*, 131:29–46.

Failly, D. 2000. “L’Economie du Sud-Kivu 1990–2000: Mutations Profondes Cachées Par une Panne,” L’Afrique des Grands Lacs. Annuaire 1999–2000.

Franklin, R. E., K. Moore, H. Deaton, and R. S. Mylavarapu. 1998. “Comparison of the Standard and a Modified Adams-Evans Lime Requirement Test,” SB 674, Clemson University, South Carolina, p. 11.

Gavlak, R., D. Horneck, R. O. Miller, and J. Kotuby-Amacher. 2003. “Soil, Plant and Water Reference Methods for the Western Region,” WREP 125, 2nd edition. Oregon State University.

Glaser, B., J. Lehmann, C. Steiner, T. Nehls, M. Yousaf, and W. Zech. 2002. “Potential of Pyrolized Organic Matter in Soil Amelioration,” Proc. 12th ISCO Conference, Beijing, p. 421–427.

Groupe Chaulage du COMIFER. 2000. “Du Laboratoire au Champ, Questions Vives Sur le Chaulage.”

Guicharnaud, R., and G. I. Paton. 2006. “An Evaluation of Acid Deposition on Cation Leaching and Weathering Rates of an Andosol and a Cambisol,” *Journal of Geochemical Exploration*, 88:279–283.

Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.

Hellums, D. T. January 27, 2007. Presentation entitled “Fertilizer Use by Farmers in the Great Lakes Region.”

Hue, N. V., and H. Ikawa. “Acid Soils in Hawaii: Problems and Management,” <http://www2.hawaii.edu/~nvhue/acid.htm>.

Janssen, B. H. 1999. Nutrients in Soil-Plant Relationships, Wageningen Agricultural University, Wageningen.

Kelly, V., and A. Murekezi. 2000. Fertilizer Response and Profitability in Rwanda, Retrieved from http://aec.msu.edu/fs2/rwanda/index.htm.

Köenig, D. 1994. “Degradation et Erosion des Sols au Rwanda,” Cah. Outre-mer, XLVII:185, 1-3:1994, pp. 35–48.

Kolka, R. K., D. F. Grigal, and E. A. Nager. 1996. “Forest Soil Mineral Weathering Rates: Use of Multiple Approaches,” *Geoderma*, 73:1–21.

Lubanga, L. “Possibilités de Gestion de la Fertilité de Sol au Sud-Kivu Montagneux” <http://209.85.165.104/search?q=cache:1iMFaTVRW20J:129.194.252.80/catfiles/2083.pdf+sol+acide+burundi&hl=en&ct=clnk&cd=9&gl=us&lr=lang_fr>.

Mathieu, C., C. Otoul, and A. Bruyere. 1992. “Influences de la Fertilisation Sur un Sol Acide Désaturé et Sur la Récolte en Blé Dans le Bututsi (Burundi),” *Pedologie*, XLII-1, p. 39–56, 11 tab., Gand, 1992.

Mbonigaba Muhinda, J. J. 2007. “Etude de l’Impact des Composts à Base de Biomasse Végétale Sur la Dynamique des Indicateurs Physico-Chimiques, Chimiques et Microbiologiques de la Fertilité des Sols: Application Sur Trois Sols Acides Tropicaux du Rwanda,” (Thèse de doctorat). Gembloux, Belgique, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques, 317 p., 63 tabl., 46 fig.

Meda, A. R., and P. R. Furlani. 2005. “Tolerance to Aluminum Toxicity by Tropical Leguminous Plants Used as Cover Crops,” *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48(2).

MINECOFIN. 2003. Indicateurs de Développement du Rwanda, Pallotti Press, Kigali, Rwanda.

Nabahungu, L., and V. Ruganzu. 2001. “Effet du travertin et de *Tithonia diversifolia* Sur la Productivité du Haricot Volubile en Sols Acides du Rwanda,” PABRA Millennium Workshop. Novotel Mount Meru, Arusha, Tanzania, May 28–June 1, 2001. pp. 263–267.

Naramabuye, F. X., and R. J. Haynes. 2006. “Short-Term Effects of Three Animal Manures on Soil pH and Al Solubility,” *Australian Journal of Soil Research*, 445:515–521.

Ntiburumusi, F. 1989. “Arrière-Effet du Chaulage Sur la Productivité d’un Kaolisol Humifère Dans la Region Naturelle du Mugamba (Burundi),” Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) Publication N° 135. B.P. 795 Bujumbura, Burundi.

Nzohabonayo, Z., L. Mukamana, S. Chirhuza, and H. Breman, in prep. The Financial Feasibility of Inorganic Fertilizer Use in Central Africa’s Great Lakes Region, Project Report, CATALIST Project, IFDC, Kigali, Rwanda.

Osmond, D. L., T. J. Smyth, R. S. Yost, D. L. Hoag, W. S. Reid, W. Branch, X. Wang, and H. Li (2002). Nutrient Management Support System (NuMaSS) v.2. Soil Management Collaborative Research Support Program, Technical Bulletin No. 2002-02, North Carolina State University, Raleigh, NC.

Palm, C. A., K. E. Giller, P. L. Mafongoya, and M. J. Swift. 2001. “Management of Organic Matter in the Tropics: Translating Theory Into Practice,” *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63:63–75.

Purdue Forage Information. <http://www.agry.purdue.edu/Ext/forages/publications/AY-267_fig2.jpg>.

Roose, E., and F. Ndayizigiye. 1997. "Agroforestry, Water and Soil Fertility Management to Fight Erosion in Tropical Mountains of Rwanda," *Soil Technology*, 11:109–119.

Roose, E., F. Ndayizigiye, and L. Sekayange. 1993. "L'Agroforesterie et la G-CES au Rwanda – Comment Restaurer la Productivité des Terres Acides Dans une Région Tropicale de Montagne à Forte Densité de Population?" Cah. Orstom sér Pédol., vol XXVIII, no. 2, 1993, 327–349.

Roose, E., F. Ndayizigiye, L. Sekayange, and J. Nsengimana. 1988. "La Gestion Conservatoire de l'Eau et la Fertilité des Sols (G.CES) – Une Nouvelle Stratégie pour l'Intensification de la Production et de la Restauration de l'Environnement en Montagne," *Bull. Agric. Rwanda* 21(4): 264–277. <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/bre/36046.pdf>.

Rutunga, V., and H. Neel. 2006. "Yield Trends in the Long-Term Crop Rotation With Organic and Inorganic Fertilizers on Alisols in Mata (Rwanda)," *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 10(3):217–228.

Rwigema, J. B., C. H. Van den Berghe, A. Mulawayezu, and P. Sota. 1993. "Interaction Entre le Fumier Enrichi, le Calcaire et les Différentes Sources de Phosphore Issue de la Roche Phosphatée de Matongo Sur un Ferralsol de la Région du Bututsi (Burundi)," *Tropicultura* 11(2):61–66.

Schalbroeck, J. J., and L. Opedecamp. 1985. Sensibilités Différentielles du Blé (*Triticum aestivum*) et du Triticale (*X. triticosecale*) a l'Acidité des Terres Dans la Mugamba (Burundi). Actes du Dixième Forum International Sur la Soil Taxonomy et Les Transfers d'Agrotechnologie: Burundi et Rwanda, 1–12 avril 1985.

Singh, B. R., and A. P. Uriyo. 1976. "Use of Sepiolite as a Liming Material," *E. Afr. Agric For. J.*, 41(4):323–327.

Singh, U. July 2007. "Consultancy Report: Developing a Terms of Reference on Fertilizer Recommendations for Crops in the Great Lakes Region for CATALIST PROJECT—A Regional Project to Intensify Agricultural Productivity and Improve Product Marketing."

Singh, U., and G. Uehara. 1998. "Electrochemistry of the Double-Layer: Principles and Applications to the Soils," IN *Soil Physical Chemistry*, 2nd edition, D. L. Sparks (Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

SOFRECO. 1999. Feasibility Study of Producing Crushed Lime and/or Travertine to Improve the Soil's Acidity. Retrieved from http://www.sofreco.com/site%20anglais/entagroind%20anglais/an4autres%20produits/arwanda.htm.

Soil Improvement Committee of the California Fertilizer Association. 1985. *Western Fertilizer Handbook*. The Interstate Printers & Publishers, Inc. Danville, Illinois, U.S.A.

Tan, K. 1993. "Analysis of Aluminum Sensitivity in Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) Genotypes" (PhD thesis), Wageningen University.

The, C., H. Calba, W. J. Horst, and C. Zonkeng. 2001. Maize Grain Yield Correlated Response to Change in Acid Soils Characteristics After 3 Years of Soil Amendments. Proc. Seventh Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference, p. 222–227.

Tisdale, S. L., and W. L. Nelson. 1966. *Soil Fertility and Fertilizers*, The Macmillan Company, New York.

Toose, W. A., R. J. Carsky, J. M. Mewou, and M.C.S. Wopereis, in press. Fertilizer Response of Maize and Profitability of Mixed Maize-Acacia Auriculiformis Systems in the Coastal Savanna of West Africa.

Tropsoils. 1987. "ACID4: An Expert System to Manage Soil Acidity in the Humid Tropics." The Center for Soils Research, Bogor, Indonesia, Univ. of Hawaii, and North Carolina State University.

Van Asten, P.J.A., J. Lorenzen, L. Wairegi, D. Mukasa, M. Batte, P. Muchunguzi, and M. Pillay. 2008. IITA/APEP Banana Project. Technical Report. IITA/APEP, Kampala.

Van den Berghe, C. H., and N. V. Hue. 1999. "Liming Potential of Composts Applied to an Acid Oxisol in Burundi," *Compost Science & Utilization*, 7(2):40–46.

Wade, M. K., M. Al-Jabri, and M. Sudjadi. 1986. "The Effect of Liming on Soybean Yield and Soil Acidity Parameters of Three Red-Yellow Podzolic Soils of West Sumatra, Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk, Center for Soil Research, Bogor, Indonesia 6:1–8.

WARDA. 1999. "On the Road to Overcoming Soil Acidity in Upland Rice," IN *WARDA Annual Report 1999*, pp. 23–29.

Wong, M.T.F., E. Akyeampong, S. Nortcliff, M. R. Rao, and R. S. Swift. 1995. "Initial Responses of Maize and Beans to Decreased Concentrations of Monomeric Inorganic Aluminum With Application of Manure or Tree Prunings to an Oxisol in Burundi," *Plant and Soil*, 171:275–282.

Wong, M.T.F., K. Hairiah, and J. Alegre. 2004. "Managing Soil Acidity and Aluminum Toxicity in Tree-Based Agroecosystems," IN *Below-Ground Interactions in Tropical Agroecosystems Concept and Model With Multiple Plants Components*, M. van Noordwijk, G. Cadisch, and C. K. Ong (Eds.), Wallingford, UK. CABI. p. 143–156.

Wong, M.T.F., S. Nortcliff, and R. S. Swift. 1998. "Method of Determining the Acid Ameliorating Capacity of Plant Residue Compost, Urban Waste Compost, Farmyard Manure, and Peat Applied to Tropical Soils," *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29 (19 & 20):2927–2937.

Wong, M.T.F., P. Gibbs, S. Nortcliff, and R. S. Swift. 2000. “Measurement of the Acid Neutralizing Capacity of Agroforestry Tree Prunings Added to Tropical Soils,” *J. Agric. Sci.*, Cambridge 134:269–276.

Wortmann, C. S, R. A. Kirkby, C. A. Eledu, and D. J. Allen. 1998. *Atlas of Common Bean (Phaseolus vulgaris L.) Production in Africa*. CIAT Publication no. 297.

Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, and M. R. Malcolm. 1990. “Application of Expert Systems to Study of Acid Soils in Rwanda,” *Agric. Ecosystems Environ.*, 30:203–218.

Yamoah, C. F., R. Grosz, and E. Nizeyimana. 1989. “Early Growth of Alley Shrubs in the Highland Region of Rwanda,” *Agroforestry Systems*, 9:171–184.