UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Effet d'adjuvants N-P sur la valeur fertilisante de la balle de riz

Nimubona, Désiré; Sous la direction de : Salvator Kaboneka, PhD

2014-08
UB, FABI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2332

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT D'AMENAGEMENT DU MILIEU ET ECOLOGIE

EFFET D'ADJUVANTS N-P SUR LA VALEUR FERTILISANTE DE LA BALLE DE RIZ

Par :

NIMUBONA Désiré

Sous la direction de :

Salvator KABONEKA, PhD

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du grade d'**Ingénieur Agronome**

Bujumbura, Août 2014

DEDICACE

A Dieu Tout Puissant,

A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A mes oncles et tantes,

A mes cousins et cousines,

A tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail,

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Il nous serait ingrat de terminer ce travail sans remercier toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à sa réalisation.

Nos vifs remerciements s'adressent premièrement à Monsieur Salvator KABONEKA, PhD, Professeur de l'Université du Burundi à la FACAGRO, Promoteur et Directeur de ce mémoire, qui malgré ses multiples obligations, a accepté de guider nos premiers pas de recherche. Ses conseils combien pertinents et enrichissants, sa méthodologie de travail, sa rigueur scientifique et son attitude de franche collaboration resteront pour nous des piliers de travail.

Nos remerciements vont également à l'endroit des membres du jury qui ont accepté de lire, de corriger et d'évaluer ce travail.

Nous éprouvons troisièmement une grande reconnaissance envers nos éducateurs depuis l'école primaire jusqu'à l'Université du Burundi et particulièrement ceux de la FACAGRO pour la formation tant morale qu'intellectuelle reçue de leur part.

Nos remerciements vont également à l'endroit du personnel du Laboratoire de Chimie Agricole de l'ISABU pour leur appui dans les analyses effectuées.

Enfin, à toutes personnes, parentés ou amis qui nous ont toujours prêté main forte chaque fois que de besoin soient rassurées de notre profonde gratitude.

A tous et à chacun, nous disons sincèrement merci.

NIMUBONA Désiré

SIGLES ET ABREVIATIONS

ADN	: Acide désoxyribonucléique
ATP	: Adénosine triphosphate
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CIMMYT	: Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo
CM	: Carré moyen
C.V.H.A.	: Cultures Villageoises de Hautes Altitudes
DAP	: Diamonium phosphate
DDL	: Degré de liberté
EC	: Equivalent Céréale
FAO	: Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FACAGRO	: Faculté des Sciences Agronomiques
G.R.E.T.	: Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques
ISTEEBU	: Institut des Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
ISABU	: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
Prob	: Probabilité
pH	: Potentiel d'hydrogène
ppm	: Partie par million
SCE	: Somme des carrés des écarts
Test F	: Test Fisher Snedecor

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Analyses chimiques du sol de KIREKURA échantillonné 31

Tableau 2 : Echelle empirique de fertilité pour l'azote en fonction du pH 32

Tableau 3 : Caractéristiques chimiques et physiques indicatives de la balle de riz 35

Tableau 4: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Première récolte. 39

Tableau 5: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Première récolte. 39

Tableau 6: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Deuxième récolte. 40

Tableau 7: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Deuxième récolte. 40

Tableau 8: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Troisième récolte 41

Tableau 9: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Troisième récolte 41

Tableau 10: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 42

Tableau 11: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 42

Tableau 12: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 43

Tableau 13: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 43

Tableau 14: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 44

Tableau 15: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 44

Tableau 16: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 45

Tableau 17: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 45

Tableau 18: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 46

Tableau 19: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 46

Tableau 20: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 47

Tableau 21: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 47

Tableau 22: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 48

Tableau 23: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Première récolte. 48

Tableau 24 : Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 49

Tableau 25: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte. 49

Tableau 26: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 50

Tableau 27: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte. 50

Tableau 28: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire cumulée des plants de maïs (g/pot)..... 51

Tableau 29: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire cumulée des plants de maïs (g/pot)..... 51

Tableau 30: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne cumulée des plants de maïs (g/pot)..... 52

Tableau 31: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne cumulée des plants de maïs (.g/pot)..... 52

Tableau 32: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot)..... 53

Tableau 33: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (en g/pot)..... 53

Tableau 34: Analyse de la régression linéaire pour la biomasse racinaire totale (g/pot). 54

Tableau 35: Analyse de la régression linéaire pour la biomasse aérienne totale (g/pot)..... 55

Tableau 36: Analyse de régression linéaire pour la biomasse totale cumulée (g/pot)..... 55

Tableau 37 : Tableau synthétique des résultats d'analyse de la variance pour les trois récoltes effectuées..... 56

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Minéralisation et immobilisation nettes de l'azote 7
Figure 2 : Nature des ions phosphoriques en fonction du pH 11
Figure 3 : Schéma général de l'évolution des matières organiques du sol 21
Figure 4 : Evolution de la biomasse sèche cumulée en fonction du traitement 54

RESUME

La présente recherche avait pour but d'évaluer la valeur fertilisante de la balle de riz en utilisant une petite quantité d'engrais (DAP) devant déclencher sa décomposition rapide par la réduction de ses rapports C/N et C/P. Les travaux d'expérimentation réalisés en pots sur la culture test du maïs ont été installés à côté du Laboratoire d'Agrochimie de la Faculté d'Agronomie. Le dispositif expérimental était en randomisation totale avec 5 traitements répartis en 3 répétitions. Il s'agissait du traitement Sol seul (T1) qui constituait le témoin et les 4 autres (T2, T3, T4, T5) amendés avec la balle de riz (1 T/ha) recevaient respectivement 0, 27, 54 et 81 kg de DAP /ha correspondant à 3 kg/pot de sol pour tous les traitements et à 1,5 g/pot de balle de riz amendés avec 0, 0,05, 0,11 et 0,16 g de DAP/pot. Trois récoltes ont été effectuées à intervalle de quatre semaines après le semis. Les variables hauteur des plants, biomasse sèche racinaire, biomasse sèche aérienne, biomasse sèche totale, ainsi que la biomasse cumulée ont fait l'objet de mesure et d'analyse statistique (ANOVA 1). Les résultats obtenus permettent de constater que :

(i) A la première récolte, le traitement amendé avec de la balle de riz sans DAP s'est classé en dernière position avec une diminution de performances de croissance et de rendement par rapport au témoin de 2, 3 cm, 0,53 g et de 0,2 g par pot, respectivement pour la hauteur des plants, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale. Exprimées en termes relatifs, ces réductions correspondent à -8,5, -17,8 et à - 4,7 % pour les trois variables ci-haut citées ;

(ii) A la deuxième récolte par contre, la balle de riz s'étant assez décomposée, des augmentations de croissance et de rendement du traitement balle sans DAP de 2,36 cm de hauteur ; 0,7 g de biomasse sèche aérienne et 1,4 g de biomasse sèche totale ont été obtenues. Ces augmentations correspondent à + 11, + 44,7 et + 64,7 % par rapport au traitement témoin ;

(iii) L'effet dose de DAP n'est pas été apparent à la troisième récolte par le fait que, d'une manière générale, les engrais minéraux sont très solubles et sont utilisables assez rapidement en agissant dans un court délai.

D'une manière générale, les résultats obtenus ont prouvé que la balle de riz complémentée avec du DAP peut être directement utilisée comme fumure organique. Cependant, pour pouvoir tirer des conclusions définitives, il est recommandé de mener des essais en champ, avec éventuellement de la balle préalablement compostée et complémentée.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i
REMERCIEMENTS ii
SIGLES ET ABREVIATIONS iii
LISTE DES TABLEAUX iv
LISTE DES FIGURES vi
RESUME vii
TABLE DES MATIERES viii
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE I: CONSIDERATIONS GENERALES SUR L'AZOTE ET LE PHOSPHORE 3
I.0. Introduction 3
I.1. L'azote 4
I.1.1. Origine de l'azote dans le sol 4
I.1.2. Formes de l'azote dans le sol 4
I.1.3. Dynamique de l'azote dans le sol 5
I.1.3.1. Minéralisation de l'azote 5
I.1.3.2. Immobilisation de l'azote 6
I.1.3.3. Pertes d'azote 7
I.1.4. Rôles de l'azote dans la plante 9
I.2. Le phosphore 10
I.2.1. Formes du phosphore dans le sol 10
I.2.1.1. La forme organique 10
I.2.1.2. La forme inorganique 10
I.2.2. Rôles du phosphore dans la plante 12
CHAPITRE II. DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE APPLIQUEE AU SOL 13
II.0. Introduction 13
II.1. Les produits organiques incorporés au sol 13
II.1.1. Les déchets organiques 14
II.1.1.1. Les pailles 14
II.1.1.2. La balle de riz 14
II.1.1.3. La pulpe de café 16

II.1.2. Les composts 16
II.2. Décomposition de la matière organique 16
II.2.1. Facteurs de décomposition 16
II.2.1.1. L'aération 16
II.2.1.2. La température 17
II.2.1.3. L'humidité 17
II.2.1.4. Le pH du sol 18
II.2.1.5. Le rapport C/N des substrats enfouis 18
II.3. Microorganismes responsables de la décomposition de la matière organique 19
II.3.1. Les bactéries 19
II.3.2. Les actinomycètes 19
II.3.3. Les champignons 19
II.4. Etapes de la décomposition de la matière organique 20
II.4.1. Décomposition des matières organiques jeunes ou minéralisation primaire 22
II.4.1.1. Décomposition des sucres et de l'amidon 22
II.4.1.2. Décomposition de la cellulose et des hémicellulose 22
II.4.1.3. Décomposition de la lignine ou ligninolyse 23
II.4.1.4. Décomposition des protéines ou protéolyse 24
II.4.1.5. Décomposition des autres corps organiques 24
II.4.2. Humification 24
II.4.3. Minéralisation de l'humus 25
II.4.4. Destination des éléments minéralisés 25
II.5. Rôles de la matière organique 26
II.5.1. Effets sur les propriétés physiques 26
II.5.2. Effets sur les propriétés chimiques 27
II.5.3. Effets sur les propriétés biologiques 27
II.5.4. Effets néfastes de la matière organique 27
II.6. Bref aperçu des travaux antérieurs sur la complémentation minérale 28
CHAPITRE III. MATERIELS ET METHODES 30
III.0. Introduction aux expériences en vases de végétation 30
III.1. But de l'expérimentation 30
III.2. Matériels 31
III.2.1. Le sol 31
III.2.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé 31

III.2.1.2. Estimation de la fertilité 31
III.2.2. La plante-test 34
III.2.3. La balle de riz 35
III.2.4. Autres matériels utilisés 35
III.3. Méthodes 36
III.3.1. Dispositif expérimental 36
III.3.2. Calcul de la quantité de sol appliquée dans chaque pot 36
III.3.3. Description de l'expérimentation 37
III.3.4. Analyses statistiques 37
CHAPITRE IV : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 39
IV.1. Présentation et interprétation des résultats 39
IV.1.1. Hauteur des plants 39
IV.1.2. Biomasse sèche racinaire 42
IV.1.3. Biomasse sèche aérienne 45
IV.1.4. Biomasse sèche totale (biomasse aérienne + biomasse racinaire) 48
IV.1.5. Biomasse sèche cumulée 51
IV.2. Discussion des résultats 56
IV.2.1. Synthèse des résultats en fonction des récoltes 56
IV.2.2. La biomasse sèche cumulée 58
CONCLUSION GENERALE 60
BIBLIOGRAPHIE 62
ANNEXES 66

INTRODUCTION GENERALE

Le Burundi, pays essentiellement agricole où plus de 90 % de la population active s'occupe de l'agriculture, reste caractérisé par une production agricole faible. Le déficit alimentaire pour l'année 2010 a été évalué à 471 884 tonnes d'Equivalents Céréales (EC) sur des besoins totaux estimés à 817 000 tonnes d'EC à l'échelle du pays, ce qui représente un taux d'insatisfaction des besoins de base de près de 58 % (MINAGRIE, 2011).

La pression démographique qui engendre l'atomisation et la surexploitation des terres sans restitution de leur fertilité est une des causes majeures de la faible productivité de nos sols. L'une des solutions qui pourraient augmenter la production est l'amélioration de la fertilité du sol par l'utilisation des engrais chimiques et de la fumure organique.

Néanmoins, les engrais chimiques sont importés et ne sont pas disponibles au moment propice. De plus, ils sont chers et inaccessibles à la population dont les revenus sont faibles. Ainsi, l'enquête nationale agricole du Burundi 2011-2012 a montré que la proportion au plan national des ménages qui ont utilisé des engrais chimiques a été estimée à 28,4 % en saison A, à 32,4 % en saison B et à 11,4 % au cours de la saison C (ISTEEBU, 2013). C'est à cause du faible pouvoir d'achat des paysans et du prix excessif des engrais qui a fait que leur utilisation reste plus faible au Burundi à savoir 8 kg/ha/an contre 102 kg en Asie du Sud, 157 kg au Brésil et 202 kg en Asie de l'Est (ADISCO, 2013).

Ensuite, la réduction des litières, des espaces pâturables et des effectifs du bétail ne permettent plus à l'agriculteur de produire assez de fertilisants organiques. Enfin, certaines matières organiques restent inutilisables en agriculture du fait de leur rapport C/N élevé qui ne facilite pas l'activité microbienne responsable de la décomposition de celles-ci. Le rapport C/N idéal pour la vie microbienne est voisin de 25 (VILAIN, 1997). De même que dans le cas de l'azote, la richesse en phosphore des résidus végétaux enfouis oriente les résultats de la dégradation de ces résidus, soit vers une minéralisation apparente pour un rapport C/P < 200, soit vers une immobilisation pour un rapport C/P > 300 (MOREL, 1996). Une recherche sur ces matières organiques s'avère nécessaire en vue d'exploiter toutes les ressources disponibles pouvant permettre d'augmenter la productivité des sols.

C'est dans cette optique que notre sujet intitulé « **Effet d'adjuvants N-P sur la valeur fertilisante de la balle de riz** » visant la restitution au sol des éléments contenus dans la balle de riz par complémentation minérale s'inscrive.

Le but cherché est de valoriser la balle de riz en utilisant une petite quantité d'engrais devant déclencher une rapide décomposition du matériau organique en réduisant leurs rapports C/N et C/P.

Notre travail est subdivisé en deux grandes parties à savoir la partie bibliographique et la partie expérimentale.

La partie bibliographique est constituée de deux chapitres comprenant les considérations générales sur l'azote et le phosphore et la dynamique de la matière organique appliquée au sol.

La partie expérimentale est consacrée aux deux chapitres suivants :

- Matériels et méthodes ;
- Présentation, interprétation et discussion des résultats.

Une conclusion générale et quelques recommandations clôturent le travail.

CHAPITRE I: CONSIDERATIONS GENERALES SUR L'AZOTE ET LE PHOSPHORE

I.0. Introduction

Comme tous les êtres vivants, les plantes ont besoin de nourriture pour croître et se développer. Parmi les éléments du sol, tous ne se sont pas révélés indispensables à la croissance, au développement et à la reproduction de la plante. Pour être caractérisé comme essentiel, un élément doit satisfaire aux critères suivants :

- une carence en cet élément empêche la plante de mener à bien son stade végétatif ou reproductif ;
- les symptômes de carence en cet élément ne peuvent être évités ou corrigés que par la fourniture de cet élément ;
- l'élément est directement impliqué dans la nutrition de la plante en dehors de ses effets possibles sur la correction de certains facteurs microbiologiques ou chimiques, dans le sol ou le milieu de culture (FAO, 1987).

Seize éléments sont considérés aujourd'hui comme essentiels et sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le potassium, le phosphore, le soufre, le calcium, le magnésium, le fer, le bore, le manganèse, le cuivre, le zinc, le molybdène et le chlore.

Parmi ceux-ci, les trois premiers sont fournis par l'air et l'eau, et l'agriculture n'a pas à se préoccuper de leur apport sauf dans le cas des serres dont l'atmosphère peut être enrichie en gaz carbonique (SOLTNER, 1994). L'azote, le phosphore et le potassium sont consommés par les plantes en grandes quantités, c'est pourquoi ils sont appelés éléments fertilisants majeurs ou primaires (MILLER et DONAHUE, 1990).

SOLTNER (1994) stipule que le calcium, le magnésium et le soufre sont souvent appelés à tort éléments secondaires. Selon lui, ils ne devraient pas être appelés ainsi, car leur rôle est tout aussi essentiel, malgré une absorption moindre, que celui de l'azote, du phosphore et du potassium. Le fer, le bore, le manganèse, le cuivre, le zinc, le molybdène et le chlore ne sont exigés par les végétaux qu'en toutes petites quantités et on s'y réfère, en conséquence, pour les appeler oligo-éléments.

Ce chapitre couvrira seulement les deux éléments fertilisants majeurs, l'azote et le phosphore. Ces deux éléments ayant été ajoutés à la balle de riz pour en améliorer son potentiel fertilisant par minéralisation.

I.1. L'azote

I.1.1. Origine de l'azote dans le sol

Contrairement au calcium, au potassium et au phosphore, l'azote trouvé dans le sol sous plusieurs formes ne provient pas de la dégradation des roches mais de sources suivantes :

- Une source atmosphérique : l'azote gazeux qui constitue les 4/5 de l'atmosphère est la source première d'azote du sol :

  - les orages synthétisent à partir de ce gaz le nitrate d'ammoniaque que les pluies entrainent dans le sol ;

  - les bactéries fixatrices d'azote, libres ou associées à des plantes l'utilisent aussi pour la synthèse de leurs protéines, dont elles nourrissent ensuite les plantes.

- Une source organique : l'azote incorporé dans des matières organiques végétales ou animales est la seconde source sous des formes assimilables par les plantes.

A ces deux sources d'azote s'en ajoute une troisième : l'azote contenu dans les engrais synthétisés à partir de l'azote de l'air, ou issus de déchets organiques animaux (SOLTNER, 1994).

I.1.2. Formes de l'azote dans le sol

Selon TISDALE et WERNER (1975), l'azote trouvé dans le sol peut généralement être classé en deux formes: organique et inorganique.

a) Composés azotés inorganiques

Les formes inorganiques sont $NH_4^+, NO_3^-, NO_2^-, NO$ et l'azote (N_2) élémentaire qui est inerte sauf quand il est fixé par les microorganismes comme par exemple le *Rhizobium.* L'hydroxylamine (NH_2OH) est une autre forme inorganique qui existe mais comme elle est un intermédiaire à la formation de NO_2^- à partir de l'ammonium, elle est instable et ne persiste pas dans le sol.

b) Composés azotés organiques

La plus grande partie de l'azote se trouve sous forme organique (protéines, aminoacides, amino-sucres, etc.). Les sols renferment de 1 à 2 % d'azote total, soit 4 à 8 tonnes par hectare. Quatre-vingt-dix-huit à quatre-vingt-dix-neuf pourcent se trouvent sous forme organique: protéines (30 à 50 %), acides nucléiques (3 à 10 %), amino-sucres (5 à 10 %) et d'autres substances plus complexes.

Les premières substances sont facilement biodégradées, les autres sont plus résistantes aux actions microbiennes. La biomasse microbienne renferme 7 % d'azote organique environ, soit 5 % d'azote total du sol mais c'est une masse en continuelle évolution (VILAIN, 1997).

Selon SOLTNER (1994), l'azote peut exister dans le sol sous trois formes, représentant trois stades de décomposition des matières organiques:

- l'azote organique qui est la réserve d'azote du sol ;
- l'azote ammoniacal qui est une forme transitoire;
- l'azote nitrique, très soluble, qui est la forme principale d'absorption.

I.1.3. Dynamique de l'azote dans le sol

La majeure partie de l'azote du sol est incluse dans les matières organiques présentes dans le sol ou à sa surface (MILLER et DONAHUE, 1990).

La complexité de tout ce qui concerne l'évolution de l'azote dans le sol est due à des actions microbiennes variées qui se produisent simultanément dans le sol. La dynamique de l'azote dans le sol est donc une succession complexe de minéralisation et de réorganisation déclenchée par une activité microbienne intense visant sa décomposition. Il existe en effet dans le sol un rapport C/N relativement constant et toute modification de l'un des termes du rapport entraîne une activité microbienne qui tend à réduire le rapport à sa valeur initiale. Ainsi, la quantité d'azote disponible à la plante est fonction de l'équilibre entre la minéralisation de l'azote organique, l'immobilisation de l'azote inorganique et sa perte (GROS, 1979 cité par NIHORIMBERE, 2005).

I.1.3.1. Minéralisation de l'azote

C'est la transformation de l'azote organique en azote minéral (NH_4^+, NO_2^- et NO_3^-). Elle se déroule en trois étapes: ammonisation, ammonification et nitrification (TISDALE et WERNER, 1975).

Les deux premières sont effectuées par l'intermédiaire des microorganismes hétérotrophes et la troisième est effectuée largement par les bactéries autotrophes du sol. Les organismes autotrophes obtiennent leur énergie à partir des oxydations de sels inorganiques et leur carbone à partir du CO_2 de l'atmosphère.

a) L'ammonisation est la décomposition hydrolytique des protéines et la libération des amines et des acides aminés.

Protéines $\rightarrow RNH_2 + CO_2 +$ Energie + Autres produits [1]

b) L'ammonification : les amines, les acides aminés réalisés par le processus d'ammonisation sont synthétisés par d'autres microorganismes hétérotrophes qui forment l'ammoniac.

$$RNH_2 + H_2O \rightarrow NH_3 + R\text{-}OH + Energie \qquad [2]$$

D'après MILLER et DONAHUE (1990), l'ammoniac ainsi formé ne tardera pas à s'ioniser dans l'eau en formant l'ion NH_4^+.

c) La nitrification est un phénomène biologique par lequel la forme ammoniacale de l'azote est transformée en forme nitrique. Autotrophes, les microorganismes nitrificateurs recueillent l'énergie qui leur est nécessaire dans l'oxydation de l'ion ammonium. Elle se déroule en deux étapes (MOREL, 1996):

- Nitrosation :

$$NH_4^+ + 3/2O_2 \xrightarrow{Nitrosomnas\ sp} NO_2^- + H_2O + 2H^+ \ (D_{G\,298}{}^0 = -66{,}5Kcal) \qquad [3]$$

- Nitratation :

$$NO_2^- + {}^1/_2\,O \xrightarrow{Nitrobacter\ sp} NO_3^- \ (D_{G\,298}{}^0 = -17{,}5Kcal) \qquad [4]$$

I.1.3.2. Immobilisation de l'azote

Lorsque la teneur en azote de la matière organique incorporée au sol est faible (1,2 à 1,3 % de la matière sèche), ce qui correspond à un rapport C/N supérieur à 30, la quantité d'azote ne suffit pas pour assurer l'alimentation de la micro-population ; celle-ci complète son approvisionnement en prélevant de l'azote dans le sol qui l'environne: il y a dans ce cas immobilisation de l'azote. Pour ce processus, les termes d'organisation et de réorganisation sont également utilisés, correspondant respectivement à l'azote minéral apporté au sol sous forme d'engrais et à l'azote libéré par minéralisation (MOREL, 1996).

La minéralisation et l'organisation ont toujours lieu simultanément avec des intensités différentes. Il faut distinguer les processus bruts et nets. Si, entre deux mesures, la quantité d'azote minéral s'accroît, il y a minéralisation nette, la minéralisation brute ayant été supérieure à l'organisation ; dans le cas contraire, il y a organisation nette (VILAIN, 1997).

La figure 1 ci-après montre que l'immobilisation nette a eu lieu lorsque le rapport C/N est supérieur à 40 alors que la minéralisation est nette pour le rapport inférieur à 20.

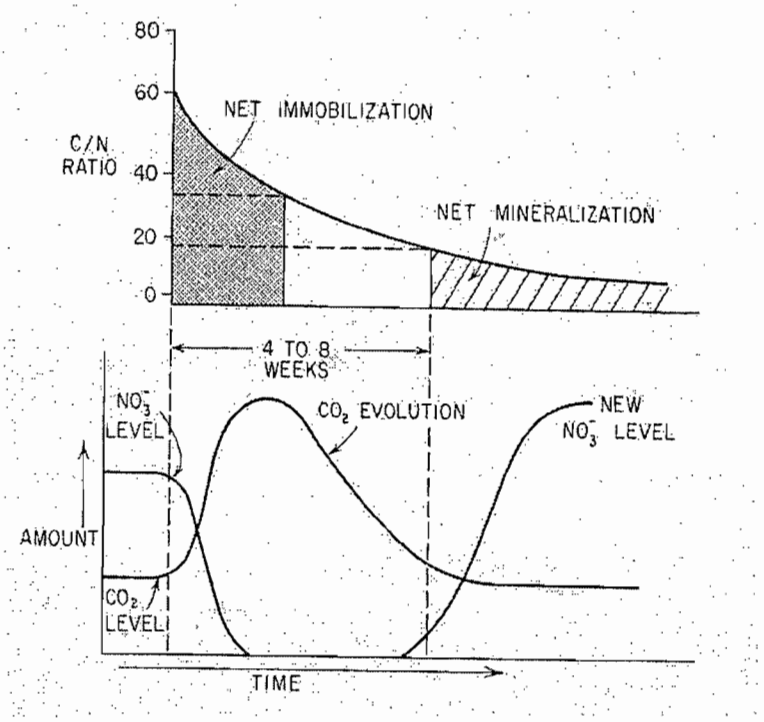


Figure 1 : Minéralisation et immobilisation nettes de l'azote

Source : TISDALE et WERNER, 1975.

I.1.3.3. Pertes d'azote

a) Fixation de l'azote

L'ion NH_4^+ est la forme de l'azote la plus exposée à la fixation par les particules du sol. Le mécanisme de fixation est similaire à celui de la fixation de K^+. Il arrive lorsque les ions NH_4^+ se placent entre les feuillets des argiles (illite, montmorillonite et vermiculite). L'ion NH_4^+ est fixé également par la matière organique du sol. En agriculture, la fixation de l'ion NH_4^+ n'est pas considérablement grande, mais elle peut être un facteur important dans la modification de l'efficience de l'ammonium des fertilisants (TISDALE et WERNER, 1975).

MILLER et DONAHUE (1990) ne considèrent pas la fixation de l'ion ammonium comme une perte car elle peut être progressivement convertie en forme disponible pour la plante.

b) Lessivage

Le lessivage de l'azote emporte surtout les formes nitratées. Les ions ammonium et les ions nitrate sont tous solubles dans l'eau, mais la charge positive de l'ion ammonium est fixée sur les sites d'échange cationique et résiste au lessivage. Le lessivage des nitrates prend place lorsque l'eau s'infiltre au travers des agrégats terreux et que la quantité infiltrée soit abondante

pour amener les nitrates hors de la portée des racines des plantes (TISDALE et WERNER, 1975).

La quantité d'azote lessivée dépend de la capacité de rétention du sol, de la quantité de l'eau et de la concentration nitrique de la solution du sol. A signaler qu'une fraction limitée d'azote organique est entrainée par les eaux de ruissellement (VILAIN, 1997).

c) Pertes d'azote sous forme gazeuse

Volatilisation: L'ammonium peut être volatilisé sous forme ammoniacale. La réaction caractéristique de ce processus est la suivante (TISDALE et WERNER, 1975):

$$NH_4^+ + H_2O + OH^- \rightarrow NH_3 + 2H_2O \qquad [5]$$

D'après VILAIN (1997), l'importance de la volatilisation dépend des facteurs climatiques (humidité et température) et pédologiques (pH, teneur en azote et en matière organique). Les pertes sont faibles si la capacité d'échange du sol est supérieure à 20 méq/100 g de sol et l'humidité élevée. Elles sont élevées en sols alcalins à $pH > 8$; elles sont accrues par les alternances humectation-dessication et une température supérieure à 15^0 C. Les pertes sont surtout notables après épandage d'urée, d'ammoniac anhydre ou d'effluents d'élevage, selon l'auteur cité.

Décomposition chimique du nitrite: Les pertes d'azote sous forme gazeuse dans les sols bien drainés ont été signalées de temps en temps. Trois mécanismes qui relatent la décomposition ont été suggérés (TISDALE et WERNER, 1975) :

-Décomposition du nitrite d'ammonium :

$$NH_4NO_2 \rightarrow 2H_2O + N_2\uparrow \qquad [6]$$

-Réaction de Van Slyke

$$RNH_2 + HNO_2 \rightarrow ROH + H_2O + N_2\uparrow \qquad [7]$$

-Décomposition de l'acide nitreux

$$3HNO_2 \rightarrow 2NO + HNO_3 + H_2O \qquad [8]$$

Dénitrification : La dénitrification est un processus réducteur s'appliquant aux ions nitriques du sol et éventuellement aux ions nitreux qui, selon les conditions, peuvent être transformés en l'un des composés ou éléments de la chaîne suivante (MOREL, 1996) :

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

Quand le sol est gorgé d'eau, l'oxygène est exclu et la décomposition anaérobique prend place. Certains organismes ont l'aptitude d'obtenir leur oxygène des nitrates et nitrites avec la conséquence de libération de l'azote moléculaire et l'oxyde nitreux.

La dénitrification est affectée par le pH du sol, l'humidité, la pression de l'oxygène ainsi que par la quantité de matière organique présente (TISDALE et WERNER, 1975).

I.1.4. Rôles de l'azote dans la plante

Absorbé par la plante sous forme nitrique (NO_3^-) ou ammoniacale (NH_4^+), l'azote s'unit dans les feuilles et les racines aux acides dérivés des glucides avec lesquels il forme les acides aminés, éléments constructifs des protéines. Constituants essentiels du cytoplasme et de ses inclusions, l'azote favorise :

- La multiplication cellulaire, donc la croissance de tissus ;
- La multiplication des chloroplastes puisque la chlorophylle est une substance azotée ; d'où la couleur vert fonce des plantes après un apport d'azote ;
- La synthèse des glucides par des chloroplastes plus abondants ;
- La constitution de réserves azotées dans les graines.

L'azote est un facteur de rendement, et parfois de qualité lorsque par exemple il augmente la teneur en azote des céréales (SOLTNER, 1994).

Les symptômes typiques de la carence azotée sont (FAO, 1987) :

- Port rabougri ;
- Coloration vert pâle ou jaunâtre des feuilles les plus âgées, à partir du bout puis mort et/ou chute de celles-ci selon la gravité de carence ;
- En cas de carence aiguë, forte réduction de la floraison ; diminution de la teneur en protéines.

De l'autre côté, une consommation excessive d'azote retarde le développement et la maturation des plants en stimulant la croissance des organes végétatifs aux dépens de la formation de la partie reproductrice et les rend plus sensibles à des accidents tels que le gel ou la verse de céréales (SOLTNER, 1994).

I.2. Le phosphore

I.2.1. Formes du phosphore dans le sol

Le phosphore dans le sol peut être classé généralement en formes organiques et inorganiques qui dépendent de la nature dans laquelle il se trouve (TISDALE et WERNER, 1975).

I.2.1.1. La forme organique

Selon SOLTNER (1994), les formes organiques du phosphore représentent 20 à 80 % du phosphore total d'un sol et se présentent en deux catégories :

- sous forme typiquement organique : nucléotides, lécithines, dans les matières organiques fraiches, les produits transitoires (notamment les corps microbiens), l'humus ;
- en combinant avec l'humus sous forme d'humo-phosphate.

D'après TISDALE Et WERNER (1975), les principales formes organiques du phosphore sont les phospholipides, les acides nucléiques et les inositols phosphatés.

I.2.1.2. La forme inorganique

Le phosphore peut se rencontrer dans le sol sous différentes formes inorganiques dont la disponibilité pour la plante varie selon leur degré de fixation dans le sol.

a) Forme soluble dans la solution du sol

C'est la forme à partir de laquelle la plante se nourrit sous formes d'ions orthophosphates primaires et secondaires ($H_2PO_4^-, HPO_4^{--}$) (GERVY, 1970). Sa concentration est faible : 0,1 à 1,5 mg par litre, soit 0,1 à 1,5 kg de P_2O_5 par hectare sur 30 cm d'épaisseur (SOLTNER, 1994).

Les ions phosphates présents dans cette solution dépendent du pH ; les ions $H_2PO_4^-$ dominent dans les pH situés entre 2 et 7 alors que les ions $H_2PO_4^{--}$ se forment progressivement avec un pH croissant jusqu'à partir duquel la forme PO_4^{3-} prédomine (figure 2 ci-après).

La figure ci-dessous montre l'évolution des différentes formes de phosphore en fonction du pH.

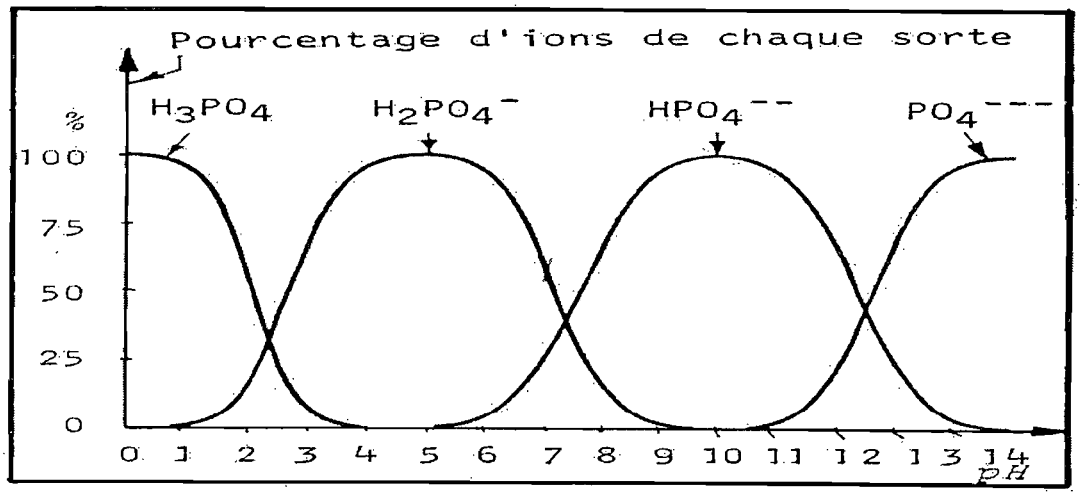


Figure 2 : Nature des ions phosphoriques en fonction du pH

Source : SOLTNER, 1994.

b) Formes adsorbées sur les éléments du sol

Cette fixation se fait soit directement sur les liaisons positives des argiles, soit par l'intermédiaire d'un cation positif. L'humus peut également fixer les anions phosphoriques par l'intermédiaire du calcium, sous forme d'humo-phosphates. Cette dernière fixation n'a lieu qu'au pH supérieur à 7, cas fréquent en sol calcaire. Le phosphore se trouve ainsi protégé contre son insolubilisation par excès de calcaire et il est très facilement utilisable par les plantes.

De plus, il y a une autre fixation mais sous une forme moins facilement échangeable qui se réalise sur les hydroxydes de fer et d'alumine. Ces derniers se comportant comme des colloïdes électropositifs peuvent échanger des ions OH^- contre des anions phosphoriques. Cette fixation est d'autant plus abondante et plus énergique que le pH est acide (SOLTNER, 1994).

c) Forme insoluble de la roche mère

Les roches mères contiennent le phosphore sous forme d'apatite, phosphate de calcium très insoluble. Mais à côté de cette réserve, le phosphore peut devenir insoluble par suite de trois phénomènes :

- précipitation : en milieu très acide (pH inférieur à 4,5) et réducteur, l'abondance de Fe^{+++} et Al^{+++} libres provoque la précipitation de phosphates de fer et d'alumine insolubles ;

- la cristallisation : en milieu très alcalin au contraire (pH supérieur à 8), les phosphates mono-et bi-calciques se transforment en phosphates tricalciques, puis en phosphates cristallisés encore plus insolubles du type apatite ;
- l'inclusion d'ions phosphoriques à l'intérieur des feuillets d'argiles gonflantes (montmorillonite et illite) est possible, tout comme pour les ions K^+ (SOLTNER, 1994).

I.2.2. Rôles du phosphore dans la plante

Le phosphore est un constituant cellulaire et transporteur d'énergie. Ainsi, il joue les rôles suivants (FAO, 1987) :

- constituant des phosphatides, des acides nucléiques, des protéines, des phospholipides et des cœnzymes (ADN et ATP) ;
- constituant de certains acides aminés ;
- nécessaire à la division cellulaire, constituant des chromosomes, stimule le développement radiculaire ;
- nécessaire à la croissance des méristèmes, au développement des fruits, et des graines ;
- stimule la floraison.

La carence en phosphore s'extériorise par un feuillage vert foncé tirant sur le bleu, avec jaunissement et dessèchement de l'extrémité des feuilles. Les feuilles présentent une ondulation caractéristique avec parfois une pigmentation pourpre (GROS, 1979 cité par NDAYIKENGURUKIYE, 2003).

CHAPITRE II. DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE APPLIQUEE AU SOL

II.0. Introduction

Le terme matière organique est désigné comme un ensemble de substances de nature et de propriétés très variées. Leur point commun, outre leur caractère organique est qu'elles font partie de la chaîne des réactions chimiques ou biochimiques qui jalonnent la décomposition dans le sol de débris végétaux ou animaux préalablement incorporés (CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

Par centrifugation, on sépare deux fractions différentes dans la matière organique du sol :

- la matière organique libre ou labile, constituée de petits débris juxtaposés aux particules du sol. Elle peut être rapidement minéralisée ou humifiée sous l'action des microorganismes (faible stabilité). Son rapport C/N, très variable selon l'origine des débris, est supérieur à 15 ;
- la matière organique liée, étroitement associée aux éléments minéraux, les imprégnant comme une sorte de teinture. Son taux annuel de minéralisation est faible (forte stabilité). Le rapport C/N est assez homogène et voisin de 10 (G.R.E.T., 1979).

A la mort des végétaux ou des animaux qui se sont nourris de ceux-ci, les tissus font retour au sol. Ils évoluent alors suivant deux processus plus ou moins simultanés : la minéralisation qui est la transformation des résidus organiques en composés minéraux et l'humification qui est la transformation de ces mêmes résidus en polymères de poids molécules élevés plus stable que les produits de départ. Ces polymères et les produits intermédiaires qui ont servi à leur formation constituent la matière organique du sol (CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

II.1. Les produits organiques incorporés au sol

Les produits organiques sont à la fois source d'éléments nutritifs et d'humus. Très nombreux et d'origines diverses (résidus culturaux, engrais verts, les effluents d'élevage, les résidus d'usinage, etc.), leur composition est très variée. Une juste appréciation de leur valeur fertilisante et/ou amendement permet de les utiliser judicieusement et sans risque (VILAIN, 1997).

Cependant, la plupart des fumures organiques sont de nature volumineuse. Elles ne contiennent que peu d'éléments fertilisants et leur principal intérêt est d'apporter de la matière organique

au sol. Sauf si elles sont apportées en grande quantité, elles ne contribuent que peu à la nourriture des plantes (FAO, 1987).

II.1.1. Les déchets organiques

Les déchets organiques sont constitués par une partie ou la totalité du système radiculaire, de feuilles et des tiges, et une fraction des organes aériens laissés dans ou sur le sol par une culture après la récolte. Les céréales comme le riz, le blé, le sorgho, etc. laissent des débris utiles qui consistent non seulement en chaumes mais aussi en déchets de battage et de moulure tels que pailles, balles et son (FAO,1988). Les déchets des usines sont souvent faiblement utilisés ou même écartés, ce qui se traduit par des problèmes de pollution de l'environnement et une perte en éléments fertilisants et matières organiques qui devraient être restitués au sol. Certains de ces déchets des usines de traitement alimentaires, tels que les bagasses de canne à sucre, les pulpes de café, l'écorce des noix de coco, la balle de riz, etc. peuvent être utilisés comme fumures organiques (FAO, 1987).

II.1.1.1. Les pailles

Les pailles sont les tiges des végétaux à maturité principalement de céréales. La paille, formée essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et d'un peu de lignine, renferme environ 45 % de carbone, 0,5 à 0,6 % d'azote et un peu de potassium (VILAIN, 1997).

Une tonne de paille enfouie donne 100 à 200 kg d'humus stable ; c'est-à-dire 10 à 20 % d'humification (GROS, 1979 cité par SIBOMANA, 2000).

La pauvreté de la paille en azote (C/N voisin de 80 à 100) occasionne une organisation (immobilisation) brutale et intense d'azote minéral (environ 10 kg par tonne de matière sèche). D'où l'effet dépressif souvent constaté sur la culture suivante (VILAIN, 1997).

II.1.1.2. La balle de riz

La balle de riz est un co-produit dérivé de la transformation du riz. Elle est constituée de l'ensemble des bractées ou glumelles qui renferment le grain. Les balles de riz représentent environ 20 % du poids total du riz récolté. Elles sont riches en fibres (35 à 46 %), et leurs cendres sont riches en silice, dont les teneurs varient selon les saisons et les variétés. Elles sont pauvres en protéines (2 à 6 %). Elles contiennent de la cutine (2 à 6 %) qui est localisé dans les cellules de l'épiderme externe et constitue une barrière pour l'eau (ARRAUDEAU, 1998).

Au Burundi, la production de riz paddy s'élevant à 64 629 tonnes (ISTEEBU, 2013) donne environ 12 926 tonnes de balles étant donné que le pourcentage de balle représente 20 % du riz paddy.

a) Utilisation de la balle comme engrais

Les balles de riz peuvent être incorporées au sol. A Taiwan, une augmentation de rendement de l'ordre de 6 % en riziculture irriguée a été observée avec des apports de 10 à 30 tonnes de balles à l'hectare (ARRAUDEAU, 1998). On peut utiliser la balle de riz sous deux formes : soit sous forme de cendres, soit directement sans l'incinérer, mais pour cette dernière on risque de propager les maladies cryptogamiques ou microbiennes ayant affecté la récolte du paddy.

La pauvreté de la balle en éléments fertilisants ne permet pas aux cendres de balles de supporter des frais de transport tant soit peu élevés et leur utilisation comme fumure minérale ne peut être que très locale. Il apparaît donc plus indiqué de se servir de la balle de paddy comme matière de base pour la confection de compost ou de fumier artificiel. Cependant, il est indispensable de faire une fermentation complète afin que soient détruits les éléments de propagation de diverses maladies cryptogamiques ou bactériennes (ANGLEDETTE, 1966).

b) Autres utilisations de la balle de riz

Les balles de riz peuvent être utilisées comme combustibles dans les foyers de machines à vapeur fixes ou semi-fixes, dans les foyers de chaudières, dans les foyers de séchoirs de produits agricoles. Elles peuvent être utilisées dans la préparation du noir de fumée car leur combustion est incomplète dans les chaudières à vapeur. On aura des vernis noirs, des encres et des cirages. Mélangées au $CaCO_3$, aux fluorosilicates et au silicate de sodium, les balles sont pressées et débitées, sous forme de plaques ou de panneaux qu'on sèche ensuite et sont utilisées comme matériaux isolants et réfractaires qui résistent à des températures de l'ordre de 1 400^0 C. Elles peuvent aussi être utilisées comme produits abrasifs pour le nettoyage de certains métaux du fait de leur teneur en silicium, comme panneau de construction et dans la préparation du furfural. Signalons enfin que les balles peuvent être utilisées en élevage comme litières ainsi que dans l'alimentation animale particulièrement chez les moutons et les chevaux mais leur faible taux de digestibilité réduit leur valeur alimentaire (ANGLEDETTE, 1966).

II.1.1.3. La pulpe de café

Des quantités considérables de pulpe de café s'accumulent dans les plantations et dans les usines où l'on prépare les grains de café pour le commerce. Il s'agit là d'un véritable problème pour l'environnement car les énormes tas de ce produit fermentent, dégagent des odeurs nauséabondes, provoquent la prolifération des mouches et polluent souvent les cours d'eau.

La pulpe de café est un bon fertilisant car elle est riche en matière organique, en azote et en potassium. Certains cultivateurs épandent cette pulpe, fraîche ou partiellement décomposée, autour des caféiers. Toutefois, cette opération donne lieu à des problèmes de transport et d'épandage, vu le poids élevé de cette masse humide, permet le dégagement de mauvaises odeurs et entrave la croissance des plantes. Il serait bien plus avantageux de composter cette pulpe rendant ainsi efficace son utilisation (FAO, 1988).

II.1.2. Les composts

Certains résidus d'usinage, du fait de leur rapport C/N ou C/P élevés, nécessitent d'être compostés pour accélérer leur décomposition avant leur utilisation comme fumure organique. Le compostage est défini comme un procédé biologique contrôlé de conversion et de valorisation des substrats organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique) en un produit stabilisé, hygiénique et semblable à un terreau riche en composés humiques. Ce produit est appelé compost (MUSTIN, 1987).

Comme le fumier, les composts sont à la fois des engrais par les éléments qu'ils fournissent aux plantes, après transformations sous l'action des microorganismes du sol, mais aussi des amendements du fait de leurs effets sur les propriétés physico-chimiques du sol (PONTAILLER, 1971).

II.2. Décomposition de la matière organique

II.2.1. Facteurs de décomposition

La décomposition de la matière organique est affectée par plusieurs facteurs dont les principaux sont : l'aération, la température, l'humidité, le pH du sol et le rapport C/N des substrats enfouis.

II.2.1.1. L'aération

Lors de la phase de la décomposition, la quantité d'oxygène nécessaire est très élevée, en raison d'une croissance rapide de la population des microorganismes, une température élevée et une activité biochimique intense (DALZEL et GRAY, 1981 cité par SABUSHIMIKE, 2003).

La structure du substrat est en relation avec le paramètre oxygène. En effet, les besoins de microorganismes aérobies évoluent en cours de la fermentation. Ils sont maximaux au démarrage, lors des premières phases de dégradation intense de la matière organique fermentescible ; la disparition progressive de cette fraction provoque une diminution proportionnelle des besoins en oxygène jusqu'à la maturation où une faible consommation est encore enregistrée (MUSTIN, 1987).

La transformation de la matière organique est lente en sol asphyxiant, que la cause en soit un excès d'eau ou un tassement trop poussé (GAUTHIER, 1991).

II.2.1.2. La température

Les périodes froides retardent la croissance des plantes et la décomposition de la matière organique. Si les températures sont suffisantes pour produire une végétation considérable et qu'elles sont faibles pendant une autre période de l'année, l'accumulation de la matière organique sera élevée. Ces températures élevées permettent la croissance des plantes et la décomposition de la matière organique.

En effet, la température influence l'activité microbienne qui augmente généralement avec l'augmentation de la température. La majorité des bactéries et des actinomycètes du sol ont une croissance optimale entre 20 et 37^0 C. Elle s'arrête en dessous de 0^0 C et au-dessus de 40^0 C, excepté les psychrophiles qui peuvent croître en dessous de 5^0 C et pour les thermophiles qui peuvent tolérer 75^0 C avec un optimum compris entre 55 et 65^0 C (MILLER et DONAHUE, 1990).

II.2.1.3. L'humidité

Une humidité légèrement inférieure à la capacité au champ est la meilleure : si elle est trop élevée, l'aération diminue et par conséquent l'activité microbienne est ralentie. Sous les climats chaux et suffisamment humides, la transformation de la matière organique est rapide, tandis qu'il y a accumulation de matière organique peu altérée dans les climats froids (GAUTHIER, 1991). L'optimum d'humidité pour le processus de la dégradation des matières organiques se situe entre 60 et 70 % (CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

II.2.1.4. Le pH du sol

Le pH du sol influe sur la croissance des microorganismes dont l'optimum se situe entre 6 et 8. Leur croissance est inhibée en dessous du pH=4,5 et au-dessus du pH=8,5. La plupart des bactéries ont un pH optimum de la neutralité mais les levures et les champignons inférieurs sont tolérants aux pH acides (MUSTIN, 1987).

II.2.1.5. Le rapport C/N des substrats enfouis

Généralement, les tissus jeunes comme les engrais verts, les feuilles et les collets, etc., peu lignifiés sont riches en N et en composés hydrolysables favorables à l'activité microbienne. Ils sont par conséquent, facilement décomposables tandis que les tissus âgés, durcis et lignifiés se décomposent très lentement. C'est la valeur C/N de la matière organique qui règle la rapidité de sa décomposition.

Lorsque la teneur en azote de la matière organique incorporée au sol est faible (1,2 à 1,3 % de la matière sèche), ce qui correspond à un rapport C/N supérieur à 30, la quantité d'azote ne suffit pas pour assurer l'alimentation de la micropopulation et par conséquent l'activité est ralentie. C'est le cas observé par les agriculteurs enfouissant les pailles (C/N variant entre 80 et 100) dont leur décomposition s'accompagne de l'effet dépressif. Ces résidus végétaux, trop pauvres en azote, ne peuvent être décomposés sans que les microbes confisquent momentanément une partie de l'azote minéral du sol (SOLTNER, 1994). Durant la première phase, l'évolution est assez rapide, 70 % de la paille disparaissent en quelques mois. La pauvreté de la paille en azote occasionne une organisation brutale et intense d'azote minéral (environ 10 kg de matière sèche). Par suite de la perte importante de carbone et de l'incorporation d'azote dans les substances humiques formées, le C/N décroît rapidement. Le rapport idéal pour la vie microbienne est voisin de 25 (VILAIN, 1997).

Si la teneur des substances organiques introduites est supérieure à 1,8 ou 2 % (rapport C/N inférieur à 20), il existe dans la substance incorporée au sol un excès d'azote par rapport aux besoins microbiens, excès qui apparaît sous la forme minérale NH_4^+. Il y a minéralisation de la substance organique incorporée. C'est le cas des engrais verts dont le rapport C/N varie entre 15 et 20 (MOREL, 1996 ; SOLTNER, 1994).

II.3. Microorganismes responsables de la décomposition de la matière organique

La décomposition de la matière organique ne peut se faire sans intervention des microorganismes du sol dont les plus importants sont les bactéries, les actinomycètes et les champignons.

L'ensemble constitue la biomasse microbienne qui, en fait est composée non seulement de la microflore mais aussi de la faune du sol (nématodes, lombrics, etc.). Elle agit directement par transformation de la biomasse morte ou indirectement par l'action enzymatique. Elle représente en moyenne 2 à 5 % de la matière organique du sol (DUCHAUFOUR, 2001).

II.3.1. Les bactéries

Elles prolifèrent dans les milieux les plus riches en azote, et peu acides ; elles sont surtout abondantes autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses), au sein de la rhizosphère. La plupart d'entre elles sont hétérotrophes et saprophytes, elles décomposent les celluloses, les sucres, qui constituent de sources d'énergie, et sont pour la plus grande part, minéralisées sous forme de CO_2. Les bactéries protéolytiques hydrolysent les protéines des protoplasmes et libèrent des acides aminés qui subissent à leur tour l'ammonification (DUCHAUFOUR, 2001).

II.3.2. Les actinomycètes

Intermédiaires entre bactéries et champignons, les actinomycètes se caractérisent par des mycéliens très ramifiés et non cloisonnés. Ils semblent jouer un grand rôle dans la transformation de certains composés organiques et minéraux du sol, mais ce rôle est mal connu : il serait susceptible de décomposer les composés aromatiques de la matière organique fraîche (la lignine, certains tannins), et d'élaborer certains acides humiques en favorisant les liaisons des chaînes peptidiques avec les noyaux aromatiques, en particulier quinoniques (DUCHAUFOUR, 2001).

II.3.3. Les champignons

De toute dimension, ils sont caractérisés par un mycélium pluricellulaire. Ils résistent mieux que les bactéries à la sécheresse et à l'acidité et constituent la microflore quasi-exclusive de certains mors secs et acides mais, à la différence des bactéries sont toujours hétérotrophes et aérobies, et ne prolifèrent pas dans les milieux mal aérés. Leur rôle dans le sol est considérable et très varié : ils s'exercent surtout dans la phase de décomposition de matière organique fraiche qui précède l'humification : la plupart sont aptes à décomposer les celluloses, certains sont

susceptibles d'hydrolyser les composés de nature phénoliques plus résistants (lignine, tannins). Les pourritures brunes et molles (actives en milieu neutre) décomposent les celluloses préférentiellement aux composés phénoliques : la lignine, libérée, est peu transformée.

Les pourritures blanches des milieux acides, au contraire, s'attaquent aussi à la lignine et aux composés tanniques libérant des composés phénoliques, à petites molécules donc solubles (DUCHAUFOUR, 2001).

II.4. Etapes de la décomposition de la matière organique

Dans un premier temps, les matières organiques subissent, au contact du sol, une série de transformations rapides où l'on peut distinguer deux étapes :

- La décomposition ou minéralisation primaire : les constituants des matières organiques sont désagrégés et simplifiés. Cette étape essentiellement biologique, et amorcée par le travail de division et de brassage de la microfaune du sol, s'effectue en deux phases :
  - une phase de prolifération microbienne à partir de substances faciles à décomposer, servant d'aliments énergiques et plastiques aux microbes, avec dégagement important d'eau, de CO_2 et de chaleur. La masse de ces microbes et de substances organiques variées en pleine fermentation constitue ce que l'on appelle les transitoires.
  - une phase de décroissance microbienne et de libération de substances nutritives, organiques et minérales, issues à la fois des matières organiques décomposées et de la mort des corps microbiens.
- L'humification : il y a édification de molécules complexes appelées composés humiques ou humus stable. Cette seconde étape est à la fois biologique, physique et chimique.

Dans un deuxième temps, commence la minéralisation de l'humus stable ou minéralisation secondaire à raison de 1,5 à 2 % par an. Ce faible taux de destruction, portant sur une masse d'humus formé depuis de nombreuses années, libère, chaque année, des quantités importantes d'éléments nutritifs minéraux et organiques (SOLTNER, 1994).

La figure 3 ci-après montre l'évolution des matières organiques incorporées au sol.

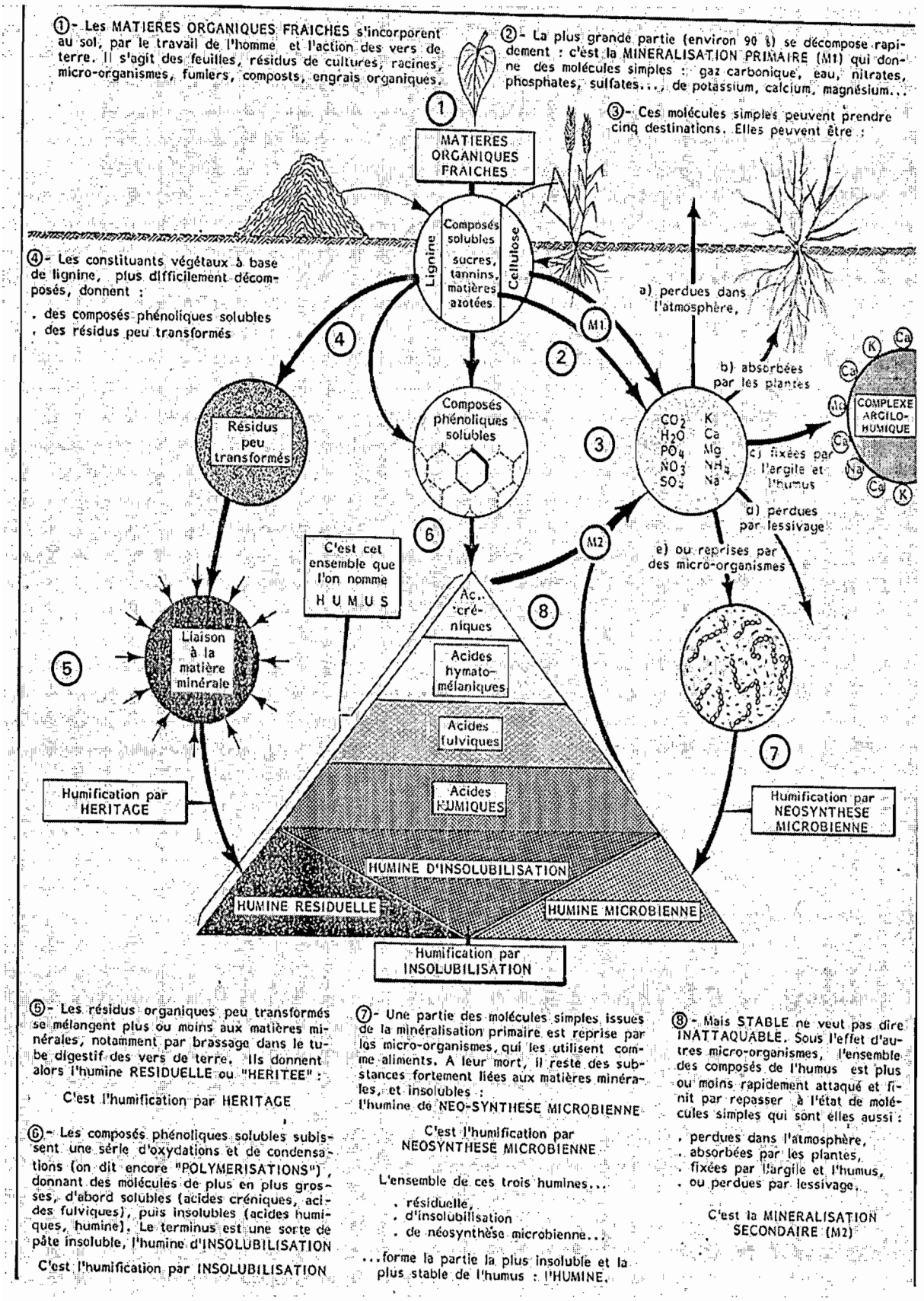


Figure 3 : Schéma général de l'évolution des matières organiques du sol

Source : SOLTNER, 1994.

II.4.1. Décomposition des matières organiques jeunes ou minéralisation primaire

La matière végétale est composée de :

- substances hydrocarbonées (composés ternaires de C, H, O) telles que les sucres solubles, l'amidon, l'hémicellulose et la cellulose, la lignine ;
- matières grasses (composés quaternaires de C, H, O, N avec en plus P et S) se trouvant surtout sous forme de grosses molécules de protéines ;
- corps organiques vitaux (chlorophylle, acides organiques, vitamines, tannins...) ;
- sels minéraux dissouts ou combinés aux substances organiques (sels de Ca, Mg, K, Na, Fe, oligo-éléments).

Les proportions de ces composés sont différentes suivant l'âge et la nature du végétal : les tissus jeunes sont riches en glucides simples (sucres solubles, amidon, hémicellulose) et en matières azotées tandis que les tissus âgés sont riches en substances complexes à évolution plus difficile (cellulose, lignine, tannins...) et pauvres en protéines. Quant aux débris animaux, ils ne contiennent que des matières azotées et des lipides (SOLTNER, 1994).

II.4.1.1. Décomposition des sucres et de l'amidon

Attaqués les premiers, ils sont une source d'énergie très accessible aux microorganismes qui les oxydent :

- en milieu aéré, les levures et les bactéries leur font subir de fermentations alcooliques avec production d'alcool et d'acides avec dégagement du gaz carbonique ;
- en milieu anaérobie, ils sont décomposés jusqu'à la transformation en méthane (CH_4) et en hydrogène gazeux.

Cette première dégradation active énormément la vie microbienne et provoque la multiplication des bactéries qui vont s'attaquer aux hémicellulose et cellulose (SOLTNER, 1994).

II.4.1.2. Décomposition de la cellulose et des hémicellulose

La cellulose et les hémicelluloses, qui sont des substances voisines, subissent une hydrolyse par l'action d'enzymes microbiennes. La dégradation plus ou moins complète, aboutit à des composés de structure moins complexe, en particulier des sucres (VILAIN, 1993). Cette attaque est très sensible à la richesse en azote et en calcium du milieu, ainsi qu'à son oxygénation (SOLTNER, 1994).

En conditions aérobies, de nombreuses bactéries du genre *Cytophaga, Cellevibrio, Cellumonas* et quelques champignons participent à la dégradation. Lorsque les conditions sont très acides,

seuls certains champignons acidophiles sont actifs, mais leur action est lente (VILAIN, 1993). La cellulose non décomposée s'accumule (SOLTNER, 1994).

En conditions anaérobies, la décomposition est d'une autre nature. Sous l'action des bactéries anaérobies du genre *Clostridium* ou *Plactridium*, des acides aliphatiques de différents types apparaissent, puis du méthane, de l'hydrogène et du gaz carbonique (VILAIN, 1993). Dans ces conditions, la cellulose ne servira pas à la construction de l'humus (SOLTNER, 1994).

En milieu neutre et aéré, comme en milieu riche en calcaire actif, la cellulose est rapidement hydrolysée en sucres solubles (SOLTNER, 1994) :

Cellulose→ oligosaccharides→ sucres solubles.

II.4.1.3. Décomposition de la lignine ou ligninolyse

Alors que la cellulose est formée de molécules en chaînes, les molécules de lignine sont formées de nombreux noyaux aromatiques agglutinés, polymérisés. Leur décomposition est difficile sauf en conditions très favorables, conditions qui dépendent comme pour la cellulose de l'aération et de l'acidité du milieu :

- en milieu aéré, peu acide et riche en azote : des champignons basidiomycètes (pourritures blanches) dégradent très rapidement la lignine avec formation de composés phénoliques solubles. Ces derniers, associés à ceux des tannins facilement hydrolysables libérés par une végétation riche en azote, serviront efficacement à l'édification des composés humiques insolubles, surtout à base d'acides humiques et d'humine d'insolubilisation. La ligninolyse est active et complète ;
- en milieu aéré mais très acide, sous végétation acidifiante, pauvre en azote, les pourritures blanches (les champignons acidophiles) attaquent également la lignine, la solubilisant en composés phénoliques solubles. Dans ces conditions, la décomposition est rapidement bloquée par l'excès d'acidité et de composés tannants, et donnera naissance à de l'humine héritée ou résiduelle. De plus, ces composés phénoliques, associés à ceux de tannins condensés issus de la végétation acidifiante, bloquent la décomposition des matières azotées par formation de complexes polyphénols-protéines solubles en les entraînant en profondeur.
- en milieu aéré et basique, riche en calcaire actif (sol sur calcaire tendre), les champignons dominants donnent des pourritures brunes ou molles. Au lieu de solubiliser la lignine, ils se contentent de l'altérer en produits plus ou moins sombres mais insolubles. C'est une simple transformation des molécules de lignine en molécules

d'humus, un humus à base d'humine héritée ou résiduelle. Mais le calcaire en excès bloque rapidement cette transformation : la lignine peu lignifiée et l'humus qui en résultent sont bientôt recouverts d'une gangue de calcaire cristallisé (SOLTNER, 1994).

II.4.1.4. Décomposition des protéines ou protéolyse

La décomposition des membranes cellulosiques libère le contenu azoté de la cellule. Leur dégradation, de même que celle des protéines animales, débute en même temps que celle des substances hydrocarbonées. En milieu aéré et peu acide, la protéolyse proprement dite, qui transforme les grosses molécules en polypeptides, en acides aminés, puis en amides, tels que l'urée. En milieu acide, la décomposition des matières azotées est incomplète : elle n'est en effet réalisée que par les champignons, qui sont incapables de dépasser le stade ammonisation. Leur décomposition est en outre ralentie par la présence des polyphénols qui fixent les protéines pour former les complexes polyphénols-protéines (SOLTNER, 1994).

II.4.1.5. Décomposition des autres corps organiques

Les composés organiques phosphorés et soufrés suivent une minéralisation semblable à celle des composés azotés. Mais au lieu d'aboutir aux nitrates, ils donnent des phosphates et des sulfates. De nombreux sels minéraux retenus dans la matière vivante sont libérés par sa minéralisation : calcium, potassium, magnésium, fer, oligo-éléments divers (SOLTNER, 1994).

II.4.2. Humification

L'humification est l'ensemble des processus de synthèse qui aboutissent à la formation de composés humiques colloïdaux à partir des produits plus ou moins solubles (les produits transitoires) résultant de la décomposition de la matière organique végétale (DUCHAUFOUR, 1984 cité par SIBOMANA, 2000).

Les trois voies de l'humification (SOLTNER, 1994):

- **voie d'insolubiliasation**: par oxydation, plusieurs noyaux aromatiques des composés phénoliques peuvent se souder par intermédiaire de ponts oxygène ou azote. Il se forme d'abord des composés dimères ou trimères (2 ou 3 noyaux aromatiques), donnant naissance aux acides créniques et hymatomélaniques, puis aux acides fulviques, noyaux aromatiques entourés de longues chaines aliphatiques. La polycondensation se poursuivant, les acides fulviques donnent bientôt naissance aux acides humiques bruns, aux acides humiques gris, et enfin à l'humine d'insolubilisation. Cette polycondensation se caractérise par plusieurs phénomènes : l'augmentation de la taille du noyau

aromatique (nucleus), la diminution des chaînes aliphatiques par rapport au nucleus aromatique, l'augmentation du poids moléculaire en même temps que la diminution de la solubilité et enfin cette polycondensation s'accompagne d'une liaison de plus en plus forte à la matière minérale.

- **voie d'héritage** : chaque fois que la décomposition de la lignine est bloquée par une cause quelconque, ses molécules peu transformées se lient plus ou moins à la matière minérale pour donner une humine insoluble que l'on appelle humine résiduelle ou humine héritée. Ce blocage peut provenir soit d'un excès d'acidité, au contraire d'un excès de calcaire actif.
- **voie de néosynthèse microbienne** : certains microorganismes ont la possibilité de reprendre des molécules issues de la minéralisation primaire pour synthétiser leur propre substance. A leur mort, les polysaccharides issus de leur biodégradation peuvent se lier à la matière minérale pour former un autre type d'humus, l'humine de néosynthèse microbienne. Ces synthèses d'humus par voie microbienne se font surtout à partir des sucres, de la cellulose et des matières azotées.

II.4.3. Minéralisation de l'humus

L'humus n'est pas immobilisé pour toujours car il est minéralisé à son tour, mais d'une manière très lente et continue, à un rythme de quelques pour cent par an (CHAMAYOU et LEGROS, 1989). Le taux de minéralisation varie entre 1 et 5 % par an (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 cité par BUKITSE, 2003). Deux coefficients sont utilisés pour caractériser la quantité d'humus formé et la quantité d'humus détruit par an :

- le coefficient isohumique K_1: il désigne le pourcentage de la matière organique apportée chaque année au sol et qui est transformé en humus stable. K_1 dépend de la nature de la matière organique et de l'état biochimique du sol.
- le coefficient de minéralisation K_2 : c'est le pourcentage du stock d'humus stable minéralisé par an. K_2 dépend de la texture du sol, surtout, et de l'intensité de culture (SOLTNER, 1994).

II.4.4. Destination des éléments minéralisés

Les éléments minéralisés vont évoluer de différentes manières. Certains sont absorbés directement par la plante à partir de la solution du sol. Par contre, la majorité des ions nutritifs libérés par minéralisation subissent une fixation immédiate par le complexe argilo-humique qui les mettra progressivement à la disposition de la plante.

Signalons également que les éléments minéralisés peuvent être perdus dans l'atmosphère ou par lessivage (SOLTNER, 1994).

II.5. Rôles de la matière organique

Les matières présentes ou incorporées exercent des effets sur les propriétés du sol et modifient la fertilité. Les actions, leur intensité et leur durée dépendent de la fraction considérée : les matières libres ou liées. La plupart des effets sont favorables mais certains sont néfastes. Une teneur élevée en matières organiques ne doit pas être systématiquement considérée comme un indice de fertilité. Les effets s'exercent sur les propriétés chimiques, physiques, biologiques ou globalement sur la fertilité (VILAIN, 1997).

II.5.1. Effets sur les propriétés physiques

La matière organique rend la structure plus perméable à l'eau et à l'air et augmente sa stabilité. Cette stabilité résulte de la diminution de mouillabilité des agrégats du fait de la pellicule de la matière organique qui les couvre et de l'augmentation de leur cohésion avec la matière organique liée. La capacité de rétention en eau du sol accrue en présence de la matière organique résulte d'une part, de l'augmentation du nombre de micropores du sol au cours de la décomposition de la matière organique, d'autre part, du pouvoir élevé de mouillabilité des matières organiques libres présentes dans le sol (G.R.E.T., 1979).

Ainsi, les terrains sableux, trop légers, acquièrent de la cohésion du corps et l'argile des terres fortes est maintenue coagulée, ce qui limite la prise en masse. Les terres argileuses sont rendues plus poreuses, plus souples, moins collantes et la culture en est facilitée. L'action propre de l'humus est renforcée par celle des microorganismes qui y prolifèrent. Les filaments des champignons, les chaînes de bactéries, les substances gélatineuses sécrétées par divers organismes qui se développent grâce à la matière organique, à l'intérieur des mottes de terre, contribuent à augmenter la résistance aux agents de destruction de la structure (GAUTHIER, 1991). Si elles sont laissées à la surface du sol, les matières organiques libres limitent l'évaporation de l'eau en formant un mulch (VILAIN, 1997).

II.5.2. Effets sur les propriétés chimiques

Les matières organiques agissent sur la fourniture et la disponibilité des minéraux à l'égard des plantes ou aux agents microbiens ainsi que sur la capacité d'échange du sol.

La fraction humifiée des matières organiques possède une capacité d'échange assez variable mais plus élevée que celle des argiles (200 à 400 méq/100 g de sol) à laquelle s'ajoute partiellement. De ce point de vue, 2 % de matière organique sont approximativement équivalents à 10 % d'argile. La capacité d'échange des sols sableux est essentiellement due à la présence des matières organiques (VILAIN, 1997).

La matière organique diminue la toxicité aluminique en formant des complexes organométalliques avec Al^{3+}.

La solubilisation des phosphates est accrue en présence de matière organique. Ceci résulte de sa décomposition qui, d'une part, dégage du CO_2 et, d'autre part, produit des anions-phosphates au niveau des sites d'absorption de l'argile. Il peut aussi y avoir formation de complexe phospho-humiques mobiles et assimilables par la plante (G.R.E.T., 1979).

L'humus limite la rétrogradation du potassium, en permettant aux ions K^+ de se fixer sur lui, il leur évite de s'intercaler entre les feuillets d'argile, fixation qui rendait le potassium peu disponible (SOLTNER, 1994).

II.5.3. Effets sur les propriétés biologiques

La présence d'une faune (lombrics, collemboles, etc) exerçant de multiples actions (accroissement de la porosité, broyage des matières, etc) dépend de l'importance et de la nature des matières organiques présentes.

Les microorganismes, hétérotrophes pour la plupart, utilisent les constituants organiques comme source d'énergie et de nutriments. Un enfouissement de matières fermentescibles est toujours suivi d'une prolifération microbienne (VILAIN, 1997). Notons que la matière organique favorise la résistance des plantes aux maladies parasitaires en permettant le développement d'une microflore fongique prédatrice des nématodes (G.R.E.T., 1979).

II.5.4. Effets néfastes de la matière organique

L'enfouissement de la matière organique n'est pas toujours bénéfique. Un enfouissement mal réalisé, en bouchonnant la matière organique, crée des paquets de débris végétaux dans le sol. Ils se décomposent mal et font obstacle au développement racinaire (G.R.E.T., 1979).

Il peut y avoir une création d'une zone desséchante ou asphyxiante à structure défavorable (gley), en raison de la forte consommation d'oxygène pour la matière organique (GAUTHIER, 1991). L'effet dépressif résultant d'un enfouissement de matière végétale brute à C/N élevé est très net sur le rendement final s'il n'est pas compensé par un apport d'engrais au moment de l'enfouissement. De plus, la décomposition de certaines matières organiques pailleuses produit des composés phénoliques dans le milieu. Or, il a été observé un effet inhibiteur de ces acides phénoliques sur le développement racinaire de certaines plantes. C'est le cas des acides de la décomposition du sorgho sur le coton et le sorgho lui-même, et de celle du mil sur le mil suivant (G.R.E.T., 1979).

Ces acides inhibiteurs entrent dans la catégorie des substances allélopathiques. Elles inhibent la germination et/ou la croissance. On les appelle des substances antagonistes puisqu'elles agissent contre les autres substances (auxines, gibbérellines et cytokinines) qui interviennent dans les différentes phases de la croissance de la plante (BURSTROM, 1957 et LEVITT, 1974 cités par NTIBAZUKWIGIRA, 2003).

HELLER et al. (1990) avancent que la présence des composés phénoliques dans les enveloppes séminales conduit à l'inhibition de la germination. Les composés se dissolvent dans l'eau d'imbibition des enveloppes et s'oxydent en présence de l'oxygène. L'embryon ne reçoit que la différence entre l'oxygène qui se dissout dans les enveloppes imbibés et l'oxygène fixé par les composés phénoliques. De tels composés risquent de gêner la germination en jouant le rôle de pièges à oxygène.

De plus, NTIBAZUKWIGIRA (2003) présente dans son travail que les substances contenues dans les feuilles de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea*, surtout leurs fortes doses, affectent la croissance des deux cultures (maïs et haricot) en réduisant la longueur racinaire du haricot, la quantité de biomasse sèche totale du haricot, l'élongation racinaire du maïs ainsi que sa cinétique de croissance.

II.6. Bref aperçu des travaux antérieurs sur la complémentation minérale

Dans le but de contribuer au maintien de la fertilité de nos sols, les institutions de recherches agronomiques comme l'ISABU et la FACAGRO se sont intéressées sur la valeur fertilisante de la matière organique (fumier, composts, divers résidus végétaux etc.) complémentée par les engrais minéraux.

Ainsi, les travaux réalisés sous l'encadrement du projet C.V.H.A. ont pu montrer que les composts améliorés donnent des rendements plus élevés par rapport aux composts non améliorés. De plus, les travaux de mémoire réalisés au laboratoire ont montré que l'addition des engrais phosphatés ou des engrais azotés sur la paille appliquée au sol augmente sa décomposition et par conséquent sa valeur fertilisante.

En effet, HICINTUKA (1991) stipule que la complémentation minérale du compost au moment de son application en champ au Centre Mixed Farming de RABIRO a permis d'obtenir des rendements significativement différents de ceux obtenus avec le compost traité dans la compostière. Aux collines CIMPAZI et MURUTA, il a montré que le compost amélioré donne des rendements élevés, significativement différents de ceux obtenus avec le compost non amélioré.

HENNEBERT (1988-1989) a aussi montré que l'adjonction d'engrais minéraux couvrant les éléments majeurs et secondaires a permis de corriger les rapports déséquilibrés entre éléments (C/N, C/P) dans les matériaux compostés. La valeur fertilisante des substrats a été significativement augmentée, avec une efficacité variable selon les éléments. De bonnes performances ont été obtenues pour des doses de complémentation minérale correspondant à 1,0 à 1,5 % d'azote (N) et à 1,0 à 2,0 % de phosphate (P) sur base la matière sèche. Pour NIZIGIYIMANA (1986), le fumier a porté la production du simple au double mais il ajoute que ce fumier est susceptible d'être amélioré par ajout d'intrants minéraux.

D'autre part, les travaux effectués au laboratoire de la FACAGRO sur la décomposition de la paille ont abouti à des conclusions suivantes :

- Un sol avec un amendement équivalent à 120 kg de P_2O_5/ha permet d'avoir une décomposition la plus élevée (58,59 %) à la fin de 56 jours d'incubation. Les autres doses d'engrais (0, 40, 80 kg de de P_2O_5/ha) permettent d'avoir les moyennes de décomposition qui augmentent avec la dose (21, 41 et 50,89 %) (NIVYIZA, 2001).
- La décomposition augmente avec les doses. Pour les doses utilisées (O, 40, 80, 120 kg de N/ha), la dose optimum se situe à 80 kg de N/ha car les effets de cette dose sur la décomposition sont les mêmes que ceux de la dose 120 kg de N/ha. Ainsi, la complémentation de 40 kg de N/ha aux pailles enfouies double leur vitesse de décomposition tandis que celle de 80 et 120 kg de N/ha la triple (SIBOMANA, 2000).

CHAPITRE III. MATERIELS ET METHODES

III.0. Introduction aux expériences en vases de végétation

La technique d'essais en vases de végétation est un moyen simple et peu coûteux d'étudier les problèmes de fertilisation. Elle a l'avantage de permettre d'isoler le facteur étudié et de suivre son action. Elle est rapide et permet de dégrossir la plupart des problèmes complexes de recherche agronomique notamment ceux relatifs à la fertilité des sols (détermination des déséquilibres minéraux des sols, connaissance de la valeur fertilisante de certaines fumures) et de suivre l'effet exercé par certains éléments minéraux sur la physiologie et la croissance des végétaux (NIZIGIYIMANA, 1986).

Néanmoins, il faut toujours avoir à l'esprit que l'expérience en végétation est une technique artificielle qui se déroule en conditions exceptionnelles, favorables, contrôlées et dont les résultats ne peuvent pas par conséquent, être quantitativement extrapolés en champs. Par conséquent, une validation en champs des résultats obtenus en vases de végétation est requise.

III.1. But de l'expérimentation

En principe, lorsqu'on incorpore au sol la matière organique dont le rapport carbone/azote est élevé (> 30), sa décomposition est lente. Cependant, on assistera chez la culture en place à ce qu'on appelle « faim d'azote » causée par les microorganismes qui vont satisfaire une partie de leurs besoins en azote aux dépens de l'azote du sol, si un apport minéral n'a pas été prévu lors de l'enfouissement de la matière organique (CHAUX et FOURY, 1994).

Au cours de notre expérimentation, le but visé était:

- de réduire le rapport C/N de la balle de riz par complémentation minérale ;
- d'évaluer l'effet de la complémentation minérale sur la valeur fertilisante de la balle de riz sur une culture test de maïs ;
- d'évaluer la valeur fertilisante de la balle de riz.

III.2. Matériels

III.2.1. Le sol

Le sol utilisé a été prélevé dans une ferme privée sise à KIREKURA 13ème Avenue dans la commune MUTIMBUZI de la province BUJUMBURA RURA

III.2.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé

L'échantillon du sol utilisé a été analysé dans le Laboratoire de Chimie Agricole de l'ISABU. Les résultats d'analyse sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Analyses chimiques du sol de KIREKURA échantillonné

pH_{eau}	pH_{KCl}	C.E. dS/m	C (%)	N %	C/N	K éch (méq/100 g de sol)	Ca éch (méq/100 g de sol)	Mg éch (méq/100g de sol)	CEC (méq/100 g de sol)
6,22	5,52	0,0609	0,66	0,12	5,5	1,16	4,35	1,36	5,70

III.2.1.2. Estimation de la fertilité

La fertilité chimique d'un sol peut être caractérisée par la somme des bases échangeables et le taux de saturation du complexe adsorbant, les carences chimiques, la présence d'éléments chimiques défavorables, la matière organique ; cette dernière étant de loin l'élément le plus important (NIZIGIYIMANA, 1986).

a) Le pH

Les valeurs du pH_{eau} sont classées de manière suivante (KABONEKA, 2007):

pH < 5,2 : Problèmes graves de désaturation en bases et toxique alumino-manganique

5,2 < pH < 5,6 : Problèmes légers de désaturation en bases et toxique alumino-manganique

pH >5,6: bon

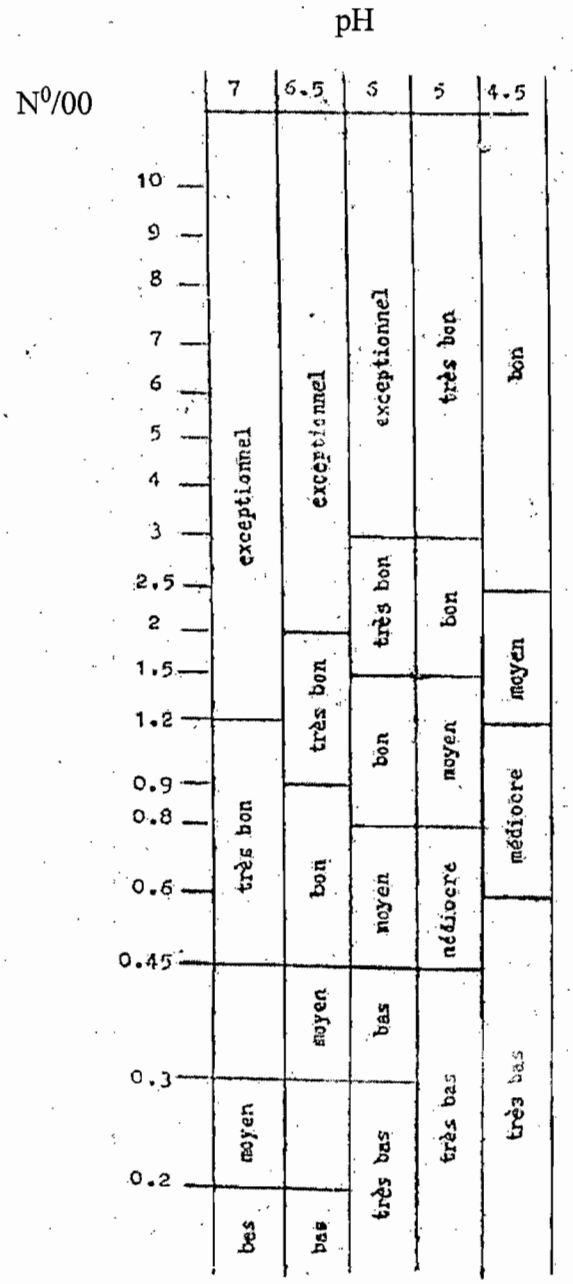
Le sol de KIREKURA a un pH_{eau} de 6,22. L'échelle ci-dessus montre qu'il s'agit d'un bon sol qui n'a pas de problèmes de désaturation en bases et de toxicité aluminique.

b) Disponibilité en azote

L'azote se présente sous différentes formes qui ne sont pas assimilables de la même façon dans le sol. La facilité de la plante à assimiler l'azote dépend de plusieurs facteurs comme le pH du sol, la disponibilité des autres éléments nutritifs dans le sol et la forme azotée disponible.

D'après DABIN (1970) repris par MUNIMBAZI (1985), il existe une relation entre les teneurs en azote total des sols à un certain pH et leur fertilité pour l'azote (Tableau 2). En nous référant à cette échelle, le sol de KIREKURA a une bonne fertilité en azote (1,2 ‰).

Tableau 2 : Echelle empirique de fertilité pour l'azote en fonction du pH



Source : MUNIMBAZI, 1985

c) Contenu en matière organique

Le rapport C/N optimal se trouve entre 9 et 12 (Annexe IV). En se basant sur ce rapport optimal, on constate que le sol de KIREKURA avec son rapport C/N de 5,5 est pauvre en matière organique.

d) Richesse en cations majeurs : Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}

- **Disponibilité en Potassium** (K^{+})

Pour les teneurs du sol en K disponibles pour les plantes, BOYER (1976), DABIN et MAGNIER (1979) cités par MUNIMBAZI (1985), s'accordent sur les limites inférieures suivantes :

- le potassium doit représenter au moins 2 % de la capacité d'échange des bases échangeables dans le cas d'un sol convenablement saturé ;
- les teneurs du sol inférieures à 0,10 méq/100 g de sol constituent des déficits importants de récolte et souvent des carences. Les analyses chimiques révèlent que le sol de KIREKURA est très riche en K (1,16 méq/100 g de sol).

- **Richesse en Magnésium (Mg)**

BOYER (1976) cité par MUNIMBAZI (1985) estime que 0,10-0,17 méq/100 g de sol est à peu près le seuil de carence en Mg et 0,25-0,35 méq /100 g de sol correspond au seuil de déficience. Le sol de KIREKURA n'est pas déficient en Mg (1,36 méq/100 g de sol).

- **Richesse en Calcium (Ca)**

En se référant sur les normes d'interprétation des analyses de sol (Annexe IV), le contenu en Ca^{++} de ce sol est bon à très bon (4,35 méq/100 g) car cette valeur est supérieure à 3,5.

- **Balance cationique**

Le tableau suivant compare les valeurs optimales (Annexe IV) et les valeurs trouvées.

Balance	**Valeurs optimales**	**Valeurs pour le sol utilisé**	**Appréciation pour le sol utilisé**
Ca^{2+}/Mg^{2+}	3-5	3,2	Normal
Mg^{2+}/K^{+}	2-5	1,17	insuffisant
$(Ca^{2+}+ Mg^{2+})/ K^{+}$	12-30	4,9	insuffisant

Le sol de KIREKURA accuse un déséquilibre entre cations.

e) Synthèse

L'estimation de la fertilité chimique du sol de KIREKURA basée sur les résultats d'analyses agro-chimiques montre que ce sol est de bonne fertilité mais connait un déséquilibre entre les cations.

Ainsi, il est caractérisé par :

- un bon sol avec pH neutre ;
- une bonne fertilité en azote ;
- une richesse en potassium ;
- une richesse en magnésium ;
- une richesse en calcium ;
- un déséquilibre cationique.

III.2.2. La plante-test

La plante-test utilisée est le maïs (*Zea mays*), variété ECAVEL 1 obtenue du centre ISABU de Mparambo. Le maïs a été choisi du fait qu'il est souvent utilisé pour mettre en évidence les carences minérales du sol et dans l'évaluation de la valeur fertilisante. C'est une culture qui extériorise bien les carences minérales, comparativement aux autres cultures céréalières.

III.2.3. La balle de riz

La balle de riz utilisée a été ramassée dans l'une des unités de transformations du riz de Bujumbura. Une composition chimique indicative de la balle de riz est montrée dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Caractéristiques chimiques et physiques indicatives de la balle de riz

Paramètres	**Quantité**	**Unités**
Humidité	12,82	%
Matière sèche	87,18	%
		%MS (matière sèche)
Matière organique	83,8	
Matière minérale	16,2	
pH_{eau}	6,8	
Azote total Kjeldahl	0,23	
Rapport C/N	182,01	
Azote organique	0,229	
Azote total	0,23	
Soufre	0,031	
Phosphore	0,027	
Calcium	0,113	
Magnésium	0,095	
Potassium	0,242	
Sodium	0,008	
		en ppm sur sec=mg/kg sec
Fer	168,09	
Manganèse	157,13	
Cuivre	< à 2	
Zinc	8,16	
		%MOS
Hémicellulose	27,67	
Cellulose	39,53	
Lignine	15,04	

Source : http : www.riz-camargue.com|DOCS|litiere-animaux-analyses.pdf

III.2.4. Autres matériels utilisés

- Pots en plastiques perforés au fond pour faciliter le drainage;
- Arrosoir : pour arroser chaque fois que de besoin ;
- Latte graduée : pour mesurer la hauteur atteinte par les plants de maïs ;
- Enveloppes de couleur kaki qui étaient utilisées dans la conservation des plants de maïs après récolte ;
- Etuve : pour sécher à 65^0 C pendant 96 heures la balle de riz et les plants de maïs ;
- Balance analytique : utilisée pour des mesures éventuelles ;

- Broyeur électrique : pour broyer la balle de riz.

III.3. Méthodes

III.3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était en randomisation totale avec 5 traitements répartis en 3 répétitions.

Les 5 traitements comprenaient :

T1 : Sol seul

T2 : Sol+ BR + 0 kg de DAP/ha

T3 : Sol+ BR + 27 kg de DAP/ha

T4 : Sol+ BR + 54 kg de DAP/ha

T5 : Sol+ BR + 81 kg de DAP/ha

Où BR= Balle de riz à raison d'une tonne/ha.

Les trois doses de DAP utilisées (27, 54 et 81 kg/ha) ont été calculées en se basant sur le rapport C/N de la balle de riz (C/N=182). Pour réduire ce rapport à 25 (optimum pour l'activité microbienne), l'azote minéral nécessaire a été calculé sur base du pourcentage d'azote organique et celui du carbone (Tableau 3). Les détails sont repris en annexe II. Le tableau ci-dessous montre l'équivalent en azote et en phosphore pour les trois doses de DAP apportées.

Dose de DAP appliquée (kg/ha)	**Equivalent N**	**Equivalent P**	**C/N**
27	4,86	5,5	58
54	9,7	11	35
81	14,5	16,4	25

III.3.2. Calcul de la quantité de sol appliquée dans chaque pot

Le sol utilisé était d'abord séché à l'air libre puis broyé. L'incorporation de la balle de riz et du DAP a été effectuée dans 4 kg de sol sec. Ces 4 kg ont été obtenus en calculant d'abord la quantité d'eau se trouvant dans 4 kg de sol frais. Après avoir pesé 100 g de sol frais (Poids frais=PF), ces derniers ont été mis dans l'étuve à 105^0 C jusqu'au poids constat (après 48 heures) pour obtenir le poids sec (PS). La quantité du sol par pot a été ajustée en tenant compte du contenu en eau obtenu après avoir étuvé les 100 g de sol frais.

III.3.3. Description de l'expérimentation

L'essai a été installé en face du bâtiment de Laboratoire d'Agrochimie de la FACAGRO. Quatre kilogrammes de sol sec sont mélangés avec 1,5 g de balle de riz sauf pour le témoin (sol seul=T1). L'opération se déroulait dans les pots avec homogénéisation du sol et des amendements organiques appliqués. Les différentes doses de DAP (0 g, 0,05 g, 0,11 g et 0,16 g) ont été utilisées et sont ajoutées respectivement dans les pots constituant les traitements 2, 3, 4 et 5 (T2, T3, T4, T5). Les calculs de la quantité de la balle et du DAP ajoutés sont explicités dans l'annexe II. Le semis a eu lieu le 08 juillet 2013 à raison de cinq graines par pot. L'arrosage avec l'eau de robinet se faisait chaque fois que de besoin. Les premières levées ont été observées le 13 juillet 2013. Le 19 juillet fut la date de démariage pour ne laisser que trois plants par pot.

Un sarclo-binage a été effectué avec l'apparition des recrues de mauvaises herbes. Toutes les récoltes ont été effectuées à intervalle de quatre semaines après le semis. La première récolte a eu lieu le 5 Août 2013. La récolte consistait à arracher toute la partie entière du plant (partie aérienne et racinaire soudées). Trois récoltes ont été effectuées.

Le calendrier de récolte des trois essais était le suivant :

Date	Opération
8/7/2013	Premier semis
13/7/2013	Premières levées
19/7/2013	Démariage pour le premier essai
05/8/2013	Première récolte et deuxième semis
15/8/2013	Démariage pour le deuxième essai
02/9/2013	Deuxième récolte
03/9/2013	Troisième semis
14/9/2013	Démariage pour le troisième essai
01/10/2013	Troisième récolte

A chaque récolte, la hauteur de chaque plant a été mesurée, et la moyenne de hauteur des trois plants par pot a été calculée. Les biomasses mesurées concernaient la biomasse des plants entiers, la biomasse racinaire et aérienne séparées.

III.3.4. Analyses statistiques

Quatre variables ont fait l'objet de mesure et d'analyse statistique : la hauteur des plants, la biomasse sèche racinaire, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale. La biomasse cumulée pour les trois récoltes a fait également l'objet d'analyse statistique. L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel SPSS (Statistical Package for the Social Sciences). Elle consistait à établir le degré de signification entre les traitements par l'analyse de la variance

à un seul critère de classification (ANOVA 1) et à classer les moyennes des traitements par ordre décroissant par la méthode de Newman-Keuls au seuil de 5 %. De plus, pour évaluer une quelque relation de cause à effet, une régression linéaire entre les doses de DAP et les biomasses du maïs (biomasse racinaire totale, biomasse aérienne totale et biomasse totale cumulée) a été effectuée à l'aide du logiciel STATA 13/SE. L'interprétation des résultats a été faite en faisant référence à l'ouvrage de DAGNELIE (1975).

CHAPITRE IV : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV. 1. Présentation et interprétation des résultats

Les résultats d'analyse statistique sont indiqués dans les tableaux d'analyse de la variance et de comparaison des moyennes pour chaque variable.

IV.1.1. Hauteur des plants

Le tableau 4 montre l'analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs pour la première récolte.

Tableau 4: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Première récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	71,084	14			
Facteur Traitement	49,591	4	12,398	5,768*	0,011
Résiduelle	21,493	10	2,149		

L'analyse de la variance révèle un effet simplement significatif du facteur traitement sur la croissance en hauteur des plants de maïs à la première récolte. La comparaison des moyennes est indiquée dans le tableau 5 ci-après.

Tableau 5: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Première récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (cm)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (cm)	Variation relative (5%)
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	29,5333	A	+2,5333	+9,4
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	29,1667	A	+2,1667	+8
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	29,0000	A	+2,0000	+7,4
T1	Sol seul	27,0000	A B	-	-
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	24,7000	B	-2,3000	-8,5

La comparaison des moyennes par le test de Newman-Keuls permet de distinguer deux groupes de moyennes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux.

Les traitements amendés avec la balle de riz et recevant différentes doses de DAP (27, 54, 81 kg/ha) se distinguent significativement de celui amendé avec de la balle de riz, sans ajout de DAP.

Ils ne se distinguent cependant pas du traitement témoin, bien que des augmentations de croissance relative en hauteur de 9,4, 8 et 7,4 % sont enregistrées par rapport au témoin.

Le traitement amendé avec la balle de riz sans DAP montre une réduction de la croissance en hauteur par rapport au traitement témoin (–8,5 %), signe d'immobilisation de l'azote ou du phosphore consécutive à l'addition de la balle de riz.

Tableau 6: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Deuxième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	96,453	14			
Facteur Traitement	66,940	4	16,735	5,670*	0,012
Résiduelle	29,513	10	2,951		

L'analyse de la variance révèle un effet simplement significatif du facteur traitement sur la croissance en hauteur des plants de maïs à la deuxième récolte.

Tableau 7: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Deuxième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (cm)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (cm)	Variation relative (%)
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	27,5000	A	+5,9667	+27,7
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	26,5333	A	+5,0000	+23,2
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	25,7000	A	+4,1667	+19,4
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	23,9000	A B	+2,3667	+11
T1	Sol seul	21,5333	B	-	-

La comparaison des moyennes par la méthode de Newman-Keuls montre deux groupes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux. Sans être significativement différents entre eux, les traitements ayant reçu la balle de riz avec le DAP le sont néanmoins par rapport au témoin. Le traitement amendé avec la balle de riz sans DAP occupe une position intermédiaire et n'est significativement différent ni des traitements avec balle de riz et DAP, ni du témoin. Aussi, l'effet dose de DAP n'est pas apparent, par ce qu'il n'y a pas de proportionnalité entre la croissance en hauteur de la plante-test et les doses de DAP appliqués.

En termes relatifs, les gains de croissance dus aux traitements amendés avec la balle de riz et fertilisés avec le DAP varient de 11 à 28 %. Le plus grand gain de croissance étant observé avec le traitement à base de balle de riz avec 54 kg de DAP/ha, tandis que le plus faible gain de croissance en hauteur est obtenu avec le traitement amendé avec la balle de riz seule.

Le tableau 8 donne les résultats de l'analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs enregistrée à la troisième récolte.

Tableau 8: Analyse de la variance pour la hauteur des plants de maïs (cm) : Troisième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	22,037	14			
Facteur Traitement	11,151	4	2,788	$2,561^{NS}$	0,104
Résiduelle	10,887	10	1,089		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif du facteur traitement sur la croissance en hauteur du maïs pour la troisième récolte.

Tableau 9: Comparaison des moyennes de la hauteur des plants de maïs (cm) : Troisième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (cm)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (cm)	Variation relative (%)
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	21,7000	A	+2,5333	+13,2
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	21,1333	A	+1,9666	+10,3
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	20,3333	A	+1,1666	+ 6
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	20,2333	A	+1,0666	+5,6
T1	Sol seul	19,1667	A	-	-

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes. De même, l'effet du facteur dose n'est pas apparent, puisqu'il n'apparaît pas de proportionnalité entre la croissance en hauteur du maïs et les doses de DAP appliquées.

En effet, les gains de croissance les plus élevés par rapport au traitement témoin sont observés dans l'ordre pour le traitement avec balle de riz et sans DAP (+ 13 %), le traitement avec balle de riz + 54 kg de DAP/ha (+ 10,3 %), le traitement avec balle de riz + 27 kg de DAP/ha (+ 6 %), et enfin le traitement avec balle de riz avec la plus grande dose de DAP (+ 5,6 %).

IV. 1. 2. Biomasse sèche racinaire

La biomasse sèche racinaire a été mesurée après l'étuvage des plants de maïs récoltés. Le pesage concernait les racines des trois plants de chaque pot. Il se faisait après la mesure de la partie entière de ces plants.

A la première récolte, l'analyse de la variance montre les résultats indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 10: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	1,857	14			
Facteur Traitement	0,957	4	0,239	$2,659^{NS}$	0,096
Résiduelle	0,900	10	0,090		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif entre traitements pour la biomasse sèche racinaire enregistrée à la première récolte, ce qui aboutit à l'absence de différence entre traitements tel qu'il est indiqué par le test de Newman-Keuls dans le tableau 11 ci-après.

Tableau 11: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	1,9333	A	+0,6666	+52,6
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	1,9000	A	+0,6333	+50
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	1,8667	A	+0,6000	+47,4
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	1,6000	A	+0,3333	+26,3
T1	Sol seul	1,2667	A	-	-

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes. De même, l'effet du facteur dose n'est pas net, du fait qu'il n'apparaît pas de proportionnalité entre la production de biomasse racinaire du maïs et les doses de DAP appliquées.

En effet, les gains de croissance les plus élevés par rapport au traitement témoin sont observés dans l'ordre suivant : pour le traitement avec balle de riz + 54 kg de DAP/ha (+ 53 %), le traitement avec balle de riz + 81 kg de DAP/ha (+ 50 %), le traitement avec balle de riz + 27 kg de DAP/ha (+ 47 %), et enfin le traitement avec balle de riz sans DAP (+ 26 %).

Le tableau 12 présente les résultats d'analyse de la variance pour la biomasse racinaire obtenue à la deuxième récolte.

Tableau 12: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	1,484	14			
Facteur Traitement	0,797	4	0,199	2,903^{NS}	0,078
Résiduelle	0,687	10	0,069		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif entre traitements pour la biomasse sèche racinaire enregistrée à la deuxième récolte.

Tableau 13: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	1,7667	A	+0,6667	+60,6
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	1,6333	A	+0,5333	+48,5
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	1,6333	A	+0,5333	+48,5
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	1,4667	A	+0,3667	+33,3
T1	Sol seul	1,1000	A	-	-

Tout comme pour la première récolte, la comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes.

De surcroît, l'effet du facteur dose n'est pas net, en raison de l'absence de proportionnalité entre la production de biomasse racinaire du maïs et les doses de DAP appliquées.

En effet, les gains de croissance les plus élevés par rapport au traitement témoin sont observés dans l'ordre pour le traitement avec balle de riz + 54 kg de DAP/ha (+ 61 %), le traitement avec balle de riz + 81 kg de DAP/ha (+ 49 %), le traitement avec balle de riz + 27 kg de DAP/ha (+ 48 %), et enfin le traitement avec balle de riz sans DAP (+ 33 %).

Tableau 14: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	0,696	14			
Facteur Traitement	0,203	4	0,051	$1,027^{NS}$	0,439
Résiduelle	0,493	10	0,049		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif entre traitements pour la biomasse sèche racinaire enregistrée à la troisième récolte.

Tableau 15: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 Kg de DAP/ha	0,8667	A	+0,2	+30
T2	Sol+BR + 0 Kg de DAP/ha	0,6667	A	0	0
T1	Sol seul	0,6667	A	-	-
T4	Sol+BR + 54 Kg de DAP/ha	0,5667	A	-0,1	-15
T3	Sol+BR + 27 Kg de DAP/ha	0,5333	A	-0,1334	-20

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes.

Contrairement aux résultats obtenus dans les paragraphes précédents, le traitement témoin occupe une position intermédiaire entre les traitements amendés avec de la balle de riz, avec ou sans DAP.

Le traitement avec de la balle de riz seul est caractérisé par une production de biomasse sèche racinaire équivalente à celle du témoin, tandis que le meilleur gain de production de biomasse sèche racinaire est observé avec le traitement balle de riz + la plus grande dose de DAP (+ 30 %). De l'autre côté, les traitements avec balle de riz ayant reçu respectivement 54 kg (-15 %) et 27 kg (- 20 %) de DAP/ha sont caractérisés par des productions de biomasse sèche racinaire inférieure à celle du traitement témoin.

IV.1.3. Biomasse sèche aérienne

Le tableau 16 montre les résultats d'analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs obtenue à la première récolte.

Tableau 16: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	7,334	14			
Facteur Traitement	6,117	4	1,529	12,467**	0,001
Résiduelle	1,227	10	0,123		

L'analyse de la variance révèle un effet hautement significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche aérienne à la première récolte.

Tableau 17: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	4,3333	A	+1,3333	+44,4
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	3,7667	A B	+0,7667	+25,6
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	3,3333	B	+0,3333	+11,1
T1	Sol seul	3,0000	B C	-	-
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	2,4667	C	-0,5333	-17,8

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans trois groupes de moyenne A, B et C qui se chevauchent. Le traitement de tête est constitué par celui ayant été amendé avec la balle de riz + 81 kg de DAP/ha, celui en bas du classement est celui qui a été amendé avec la balle de riz sans DAP. Ce dernier a donné une production de biomasse sèche aérienne significativement inférieure à celles obtenues avec le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha et le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha. Le même traitement ayant reçu la balle de riz sans DAP produit une biomasse sèche aérienne inférieure à celle du traitement témoin (-18 %), indication de la présence du processus d'immobilisation des éléments nutritifs par suite de l'ajout de la balle de riz.

A ce titre et en termes relatifs, les gains de production de biomasse sèche aérienne enregistrés par rapport au traitement témoin par suite de l'application de balle de riz et de DAP sont de + 44 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, + 26 % pour le traitement balle de riz

+ 54 kg de DAP/ha et + 11 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha. Ces résultats indiquent un effet dose de DAP sur la production de biomasse sèche aérienne de maïs à la première récolte.

Le tableau 18 rapporte les résultats de l'analyse de variance appliquée à la production de biomasse sèche aérienne à la deuxième récolte.

Tableau 18: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	6,029	14			
Facteur Traitement	3,389	4	0,847	$3,210^{NS}$	0,061
Résiduelle	2,640	10	0,264		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche aérienne à la deuxième récolte.

Tableau 19: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T4	Sol+BR+ 54 kg de DAP/ha	3,0000	A	+1,4333	+91,5
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	2,6000	A B	+1,0333	+66,0
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	2,5333	A B	+0,9666	+61,7
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	2,2667	A B	+0,7000	+44,7
T1	Sol seul	1,5667	B	-	-

La comparaison des moyennes par la méthode de Newman-Keuls permet de dégager deux groupes moyennes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux. Seul le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha en tête du classement est significativement différent du traitement témoin situé en bas du classement.

Les gains de production de biomasse sèche aérienne ne suivent pas strictement les doses de DAP appliquées (effet partiel dose). En effet, les gains de production de biomasse sèche aérienne par rapport au traitement témoin enregistrées à la deuxième récolte sont dans l'ordre suivant : + 92 % pour le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, 66 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, 62 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha et 45 % pour le traitement avec balle de riz seulement.

Le tableau 20 ci-après montre l'analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs obtenue à la troisième récolte.

Tableau 20: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Source de Variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	0,729	14			
Facteur Traitement	0,143	4	0,036	$0,608^{NS}$	0,666
Résiduelle	0,587	10	0,059		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche aérienne à la troisième récolte.

Tableau 21: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	1,3000	A	+0,2333	+21,9
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	1,1667	A	+0,1	+9,4
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	1,0667	A	0	0
T1	Sol seul	1,0667	A	-	-
T4	Sol+BR+ 54 kg de DAP/ha	1,0333	A	-0,0334	-3,1

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes. Le traitement témoin enregistre une production de biomasse sèche aérienne supérieure au traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, avec une réduction de 3 % de production de biomasse sèche aérienne par rapport au témoin.

Parallèlement, les gains de production de biomasse sèche aérienne par rapport au traitement témoin pour la troisième récolte sont de 22 % pour le traitement amendé avec la balle de riz sans DAP, 9 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha. Le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha enregistre une production de biomasse sèche aérienne identique à celle du traitement témoin.

IV. 1.4. Biomasse sèche totale (biomasse aérienne + biomasse racinaire)

L'analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs obtenue à la première récolte donne les résultats présentés et interprétés dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 22: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	13,189	14			
Facteur Traitement	10,249	4	2,562	8,715**	0,003
Résiduelle	2,940	10	0,294		

L'analyse de la variance révèle un effet hautement significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche totale à la première récolte.

Tableau 23: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Première récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	6,2333	A	+1,9666	+46,1
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	5,7000	A	+1,4333	+33,6
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	5,2000	A B	+0,9333	+21,9
T1	Sol seul	4,2667	B	-	-
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	4,0667	B	-0,2	-4,7

La comparaison des moyennes par la méthode de Newman-Keuls permet de dégager deux groupes de moyennes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux. Le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha en tête du classement est significativement différent du traitement témoin et du traitement amendé avec de la balle de riz sans application de DAP. Ces deux traitements étant classés en bas du classement et ne sont pas significativement différents du traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha, en position intermédiaire.

Un effet dose d'application de DAP est net dans la mesure où les gains de production de biomasse sèche totale par rapport au traitement témoin pour la première récolte des plants de maïs suit l'ordre suivant : + 46 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, 34 % pour le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha et 22 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha.

Le tableau 24 indique la production de biomasse sèche totale de plants de maïs à la deuxième récolte.

Tableau 24 : Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	12,817	14			
Facteur Traitement	7,444	4	1,861	3.463^{NS}	0,051
Résiduelle	5,373	10	0,537		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche aérienne à la deuxième récolte.

Tableau 25: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Deuxième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	4,7667	A	+2,5	+110,1
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	4,2333	A B	+1,9666	+86,8
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	4,1667	A B	+1,9	+83,8
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	3,7333	A B	+1,4666	+64,7
T1	Sol seul	2,2667	B	-	-

Malgré l'absence d'effet significatif de l'effet traitement sur la biomasse sèche totale de plants de maïs à la deuxième récolte, la méthode de Newman-Keuls permet d'obtenir deux groupes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux. Seul le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, en haut du classement, est significativement supérieur au traitement témoin, en bas du classement. Tous les autres traitements occupent une position intermédiaire entre les deux traitements. Les gains de production de biomasse sèche totale par rapport au témoin pour la deuxième récolte suivent l'ordre suivant : + 110 % pour le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, 87 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, 84 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha et 65 % pour le traitement balle de riz + 0 kg de DAP/ha.

Le tableau 26 indique la production de biomasse sèche totale de plants de maïs à la troisième récolte.

Tableau 26: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	2,377	14			
Facteur Traitement	0,497	4	0,124	$0,661^{NS}$	0,663
Résiduelle	1,880	10	0,188		

L'analyse de la variance révèle un effet non significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche totale à la troisième récolte.

Tableau 27: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot) : Troisième récolte.

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	2,0333	A	+0,3	+17,3
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	1,9667	A	+0,2334	+13,5
T1	Sol seul	1,7333	A	-	-
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	1,6000	A	-0,1333	-7,7
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	1,6000	A	-0,1333	-7,7

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans un même et seul groupe de moyennes homogènes. Le traitement témoin enregistre une production de biomasse sèche totale supérieure au traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha et au traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, avec des réductions de production de biomasse équivalentes à 8 %, par rapport au témoin. Parallèlement, les gains de production de biomasse sèche totale par rapport au traitement témoin pour la troisième récolte sont de 14 % pour le traitement balle de riz sans DAP et 17 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha.

IV.1. 5. Biomasse sèche cumulée

Rappelons que la biomasse sèche cumulée est obtenue en sommant les biomasses issues des trois récoltes: biomasse sèche racinaire, biomasse sèche aérienne et biomasse sèche totale.

Les résultats de l'analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire cumulée des plants de maïs sont consignés dans le tableau 28.

Tableau 28: Analyse de la variance pour la biomasse sèche racinaire cumulée des plants de maïs (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	4,529	14			
Facteur Traitement	3,543	4	0,886	8,976**	0,002
Résiduelle	0,987	10	0,099		

L'analyse de la variance révèle un effet hautement significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche racinaire cumulée.

Tableau 29: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche racinaire cumulée des plants de maïs (g/pot).

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	4,4000	A	+1,3667	+45,1
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	4,2667	A	+1,2334	+40,7
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	4,0333	A	+1	+33
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	3,7333	A	+0,7	+23,1
T1	Sol seul	3,0333	B	-	-

La comparaison des moyennes par la méthode de Newman-Keuls permet de dégager deux groupes de moyennes homogènes A et B distincts. Le traitement témoin occupe seul le groupe B et est en bas du classement. Tous les 4 traitements amendés avec de la balle de riz occupent le groupe A sans être significativement différents entre eux.

Bien que l'effet dose n'est pas statistiquement exprimé, les gains de production de biomasse sèche racinaire cumulée par rapport au traitement témoin suit l'ordre suivant : + 45 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, + 41 % pour le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha, + 33 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha et + 23 % pour le traitement balle de riz + 0 kg de DAP/ha.

Le tableau 30 indique les résultats de l'analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne cumulée des plants de maïs.

Tableau 30: Analyse de la variance pour la biomasse sèche aérienne cumulée des plants de maïs (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob.
Totale	19,660	14			
Facteur Traitement	13,820	4	3,455	5,916*	0,010
Résiduelle	5,840	10	0,584		

L'analyse de la variance révèle un effet simplement significatif du facteur traitement sur la biomasse sèche aérienne cumulée.

Tableau 31: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche aérienne cumulée des plants de maïs (.g/pot).

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	8,1000	A	+2,4667	+43,8
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	7,8000	A	+2,1667	+38,5
T3	Sol+BR+ 27 kg de DAP/ha	6,9333	A	+1,3	+23,1
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	6,0333	A B	+0,4	+7,1
T1	Sol seul	5,6333	B	-	-

La comparaison des moyennes par la méthode de Newman-Keuls montre deux groupes homogènes A et B qui se chevauchent entre eux. Sans être significativement différents entre eux, les traitements ayant reçu la balle de riz avec le DAP le sont par rapport au témoin. Le traitement amendé avec la balle de riz sans DAP occupe une position intermédiaire et n'est significativement différent ni des traitements avec balle de riz et DAP, ni du témoin. Aussi, bien que l'effet dose de DAP est apparent, il n'est pas statistiquement significatif, dans la mesure où les biomasses sèches aériennes correspondant aux traitements avec DAP ne sont pas significativement différents.

Malgré tout, en termes relatifs, les gains de production dus aux traitements amendés avec la balle de riz et fertilisés avec le DAP varient de 23 à 44 %. Le plus grand gain de production en biomasse sèche aérienne cumulée sur les trois récoltes est observé pour le traitement à base de balle de riz + 81 kg de DAP/ha (+ 44 %), suivi du traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha (+ 39 %), du traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha et enfin par le traitement balle de riz + 0 kg de DAP/ha.

Le tableau 32 montre les résultats de l'analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (sur les trois récoltes).

Tableau 32: Analyse de la variance pour la biomasse sèche totale des plants de maïs (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	38,889	14			
Facteur Traitement	30,423	4	7,606	8,983**	0,002
Résiduelle	8,467	10	0,847		

L'analyse de la variance révèle un effet hautement significatif du facteur traitement sur la production de biomasse sèche totale des plants de maïs.

Tableau 33: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche totale des plants de maïs (en g/pot).

Libellé	Traitement	Moyennes (g/pot)	Groupes homogènes	Variation absolue par rapport au témoin (g)	Variation relative (%)
T5	Sol+BR + 81 kg de DAP/ha	12,5000	A	+3,8333	+44,2
T4	Sol+BR + 54 kg de DAP/ha	12,0667	A	+3,4	+39,2
T3	Sol+BR + 27 kg de DAP/ha	10,9667	A B	+2,3	+26,5
T2	Sol+BR + 0 kg de DAP/ha	9,7667	B C	+1,1	+12,7
T1	Sol seul	8,6667	C	-	-

La comparaison des moyennes avec la méthode de Newman-Keuls groupe tous les traitements dans trois groupes homogènes A, B et C qui se chevauchent entre eux. Le traitement de tête est constitué par celui ayant été amendé avec la balle de riz + 81 kg de DAP/ha, celui en bas du classement est le traitement témoin (sol seul). Ce dernier a donné des productions de biomasse sèche totale significativement inférieures à celles obtenues avec le traitement balle de riz + 81 kg de DAP, le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha et le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha. Le traitement balle de riz sans DAP produit une biomasse sèche totale non statistiquement différente de celle du témoin. De l'autre côté, le traitement avec balle de riz n'est pas non plus statistiquement différent du traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha.

Cependant, en termes relatifs, les gains de production de biomasse sèche racinaire enregistrés par rapport au traitement témoin par suite de l'application de balle de riz et de DAP sont de + 44 % pour le traitement balle de riz + 81 kg de DAP/ha, + 39 % pour le traitement balle de riz + 54 kg de DAP/ha et + 27 % pour le traitement balle de riz + 27 kg de DAP/ha.

Ces résultats indiquent un effet dose de DAP sur la production de biomasse sèche totale de maïs, mais celui-ci n'est pas statistiquement significatif.

La figure 4 ci-dessous indique l'évolution des rendements en fonction du traitement pour la biomasse sèche cumulée : biomasse racinaire totale (BRT), la biomasse aérienne totale (BAT) et la biomasse totale cumulée (BTC).

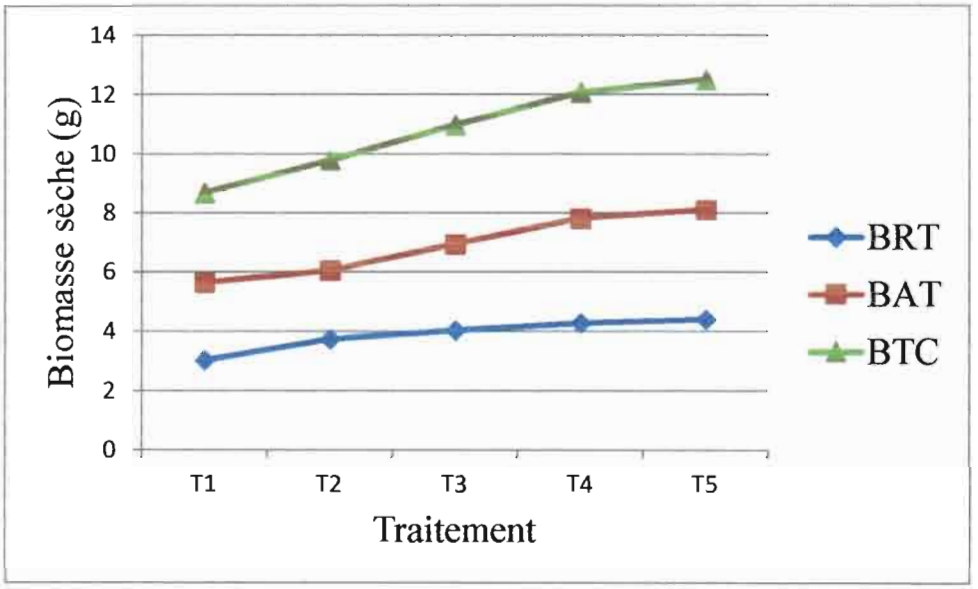


Figure 4 : Evolution de la biomasse sèche cumulée en fonction du traitement

L'allure des trois courbes de la figure ci-dessus montre que les rendements en biomasses sont corrélés positivement avec les traitements.

En effet, les résultats de l'analyse de la régression linéaire entre les doses de DAP appliquées et les biomasses sèches cumulées de maïs sont indiqués dans les tableaux 34, 35 et 36.

Tableau 34: Analyse de la régression linéaire pour la biomasse racinaire totale (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	1,409	10	0,128		
Modèle	0,748	1	0,748	11,32**	0,0072
Résiduelle	0,661	11	0,661		

L'analyse de la régression linéaire pour la biomasse racinaire totale des plants de maïs révèle que le modèle linéaire testé est hautement significatif. L'équation de régression correspondante est la suivante : $y = 3,37 (\pm 0,12) + 0,008(\pm 0,002)\ x$ où x= dose de DAP et y = biomasse racinaire cumulée avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,53$.

Tableau 35: Analyse de la régression linéaire pour la biomasse aérienne totale (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	10,336	10	0,939		
Modèle	7,490	1	7,490	26,32***	0,0004
Résiduelle	2,846	11	2,846		

L'analyse de la régression linéaire pour la biomasse sèche aérienne totale indique que le modèle linéaire testé est très hautement significatif. L'équation de régression correspondante est la suivante : y = 6,15 (± 0,25) + 0,02(± 0,005) x où x= dose de DAP et y = biomasse aérienne cumulée avec un coefficient de détermination R^2 = 0,72, bien meilleur que pour le cas précédent.

Tableau 36: Analyse de régression linéaire pour la biomasse totale cumulée (g/pot).

Source de variation	SCE	DDL	CM	F	Prob
Totale	16,142	10	1,467		
Modèle	12,973	1	12,973	40,94***	0,0001
Résiduelle	3,169	11	3,169		

L'analyse de la régression linéaire pour la biomasse sèche totale cumulée des plants de maïs montre encore une fois que le modèle linéaire est très hautement significatif. L'équation de régression correspondante est la suivante : y = 9,93 (± 0,27) + 0,034(± 0,005) x où x= dose de DAP et y = biomasse totale cumulée avec un coefficient de détermination R^2 = à 0,80.

IV.2. Discussion des résultats

Les variables hauteur des plants, biomasse sèche racinaire, biomasse sèche aérienne, biomasse sèche totale ainsi que la biomasse sèche cumulée ont été utilisées pour évaluer l'effet de l'addition des engrais N-P sur la valeur fertilisante de la balle riz. Les résultats d'analyse statique ont permis de montrer des effets entre les traitements qui sont soit non significatifs (NS), simplement significatifs (SS), hautement significatifs (HS) et très hautement significatifs (THS). Les effets de signification ont varié avec les variables et suivant les récoltes.

IV.2.1. Synthèse des résultats en fonction des récoltes

Le tableau 34 ci-dessous montre les différentes variations que l'analyse de la variance permet de détecter au cours des récoltes effectuées.

Tableau 37 : Tableau synthétique des résultats d'analyse de la variance pour les trois récoltes effectuées.

Variables	Récoltes effectuées			Cumul des 3 récoltes
	1ère récolte	2ème récolte	3ème récolte	
Hauteur des plants	SS	SS	NS	-
Biomasse sèche racinaire	NS	NS	NS	HS
Biomasse sèche aérienne	HS	NS	NS	SS
Biomasse sèche totale	HS	NS	NS	HS

A la première récolte, toutes les variables ont un effet au moins simplement significatif sauf pour la biomasse sèche racinaire. De plus, le traitement balle sans DAP s'est classé le dernier avec une diminution par rapport au témoin de 8,5, 17,8 et 4,7 % respectivement pour la hauteur des plants, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale. Cela montre que l'incorporation de la balle a causé une immobilisation des éléments du sol par les micro-organismes satisfaisant leurs besoins au cours de la décomposition de celle-ci. Des résultats pareils ont été obtenus par d'autres chercheurs, notamment BOUCKMAN et BRADY (1960) cités par BUKITSE (2003). Ces derniers affirment que lorsqu'on ajoute au sol des grandes quantités de résidus organiques ayant un rapport C/N élevé, dans des conditions favorisant la digestion microbienne, un changement se produit rapidement. Une flore hétérotrophe (bactérie, champignons et actinomycètes) devient active et se multiplie dans des proportions considérables. Ainsi, l'azote minéral est momentanément utilisé pour la synthèse des cellules microbiennes.

De plus, CHAUX et FOURY (1994) précisent que si le rapport C/N est supérieur à 40 (paille et tourbe brun, etc), les micro-organismes prélèvent au sol 5 à 10 kg d'azote/tonne de produits enfouis.

Pour la deuxième récolte, l'analyse de la variance a révélé un effet non significatif pour toutes les variables sauf pour la hauteur des plants. Mais, la méthode de Newman-Keuls a pu montrer la différence entre les traitements. Celle-ci classe le traitement témoin en dernier lieu contrairement à la première récolte. La balle de riz s'est décomposée et a permis d'augmenter le rendement pour le traitement balle sans DAP de 11, 44,7 et 64,7 % respectivement pour la hauteur des plants, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale par rapport au témoin. Même si la balle de riz a un rapport C/N très élevé, les autres facteurs de décomposition sont favorables. En effet, les résultats d'analyse du sol utilisé ont montré un pH favorable à une intense activité microbienne et qu'il est de bonne fertilité en azote en fonction de ce pH. Cela est confirmé par SOLTNER (1994) en montrant qu'en milieu aéré, peu acide et riche en azote, des champignons basidiomycètes (pourritures blanches) dégradent très rapidement la lignine, qui est naturellement résistante, en formant de composés phénoliques solubles.

L'analyse de la variance a révélé un effet non significatif pour toutes les variables à la troisième récolte. De même, le test de Newman-Keuls a montré qu'il n'y a pas de différence entre les traitements pour la troisième récolte. L'effet dose de DAP n'est pas apparent à la troisième récolte par le fait que d'une manière générale les engrais minéraux sont très solubles et sont utilisables assez rapidement en agissant dans un court délai, aussi à ce stade de l'expérimentation, la balle de riz aura subi une décomposition et minéralisation des éléments constitutifs suivie de la libération des éléments nutritifs.

Par ailleurs, SOLTNER (1994) stipule que les binaires azotés et phosphatés (N-P) sont marqués par leur action rapide :

- associant le phosphate mono calcique et l'azote ammoniacal ou nitrique, ce sont des engrais solubles ;
- l'association azote + phosphore visant surtout l'installation de la plante, le développement rapide de son enracinement, les binaires N-P sont employés comme engrais stater, au semi ou à la plantation.

Néanmoins, le traitement balle sans DAP s'est montré plus influent à la troisième récolte par rapport au témoin. Cela serait dû à la libération des éléments qui ont été immobilisés aux récoltes précédentes.

La biomasse sèche racinaire s'est révélée non significative pour toutes les récoltes par l'analyse de la variance. Il en est de même pour la méthode de Newman-Keuls car elle classe les traitements dans un seul groupe. L'effet dose de DAP n'a pas été remarquable car la croissance des racines a été bloquée par la base du pot ; les racines perdent leur énergie et sont obligées de se recourber.

IV.2.2. La biomasse sèche cumulée

La biomasse sèche cumulée était utilisée pour évaluer l'effet de la complémentation minérale sur la valeur fertilisante de la balle de riz pendant les trois récoltes effectuée.

L'analyse de la variance a révélé un effet simplement significatif pour la biomasse aérienne totale et un effet très hautement significatif pour la biomasse racinaire totale et la biomasse totale cumulée.

Ensuite, l'analyse de la régression linéaire a révélé que le modèle linéaire testé était très hautement significatif pour la biomasse aérienne totale et biomasse totale cumulée et hautement significatif pour la biomasse racinaire. D'autre part, le coefficient de détermination R^2 pour la biomasse racinaire est faible comparativement aux autres composantes de la biomasse. Une tentative d'explication possible serait que la croissance des racines aurait été bloquée par la base du pot, ne permettant pas une croissance optimale de celles-ci dans un espace confiné. Ceci relève l'une des limitations des expériences en vases de végétation à volumes de croissance racinaire limitée.

De manière synthétique, tous les traitements ont manifesté une augmentation de rendement par rapport au témoin et ont augmenté avec la dose de DAP ajouté.

Une recherche bibliographique sur des expérimentations similaires effectuées au Burundi relève entre autres que les travaux effectués dans les régions Muramvya-Bugarama, Ijenda et Makamba (année 1989-1991) sous l'encadrement du projet C.V.H.A ont permis de montrer une augmentation de rendement pour des composts améliorés par les engrais minéraux par rapport aux composts non améliorés (SINZOBAHAMVYA,1989; RURANGWA,1990; NAHIMANA, 1991). C'est ainsi qu' à titre d'exemple, NAHIMANA (1991) affirme que la complémentation minérale des composts sur la culture de la pomme de terre a permis une augmentation significative de la production moyenne : 12,01 tonnes par hectare pour le compost traité, contre 9,20 tonnes par hectare pour le compost non traité et 7,01 tonnes par hectare pour le témoin.

En revenant sur notre expérimentation, nous remarquons que pour la biomasse cumulée, le phénomène d'immobilisation des éléments nutritifs n'est pas apparent sur les courbes de la figure 4. Cela pourrait s'expliquer par la richesse en azote et faible acidité du sol utilisé qui a pour avantage d'accélérer la décomposition de la balle et par conséquent la disponibilité des éléments pour la plante.

CONCLUSION GENERALE

Pour les pays en voie de développement en général et le Burundi en particulier où la population ne cesse pas d'augmenter, une intensification de la production agricole est impérative pour assurer leur survie. Suite à l'atomisation des terres cultivables, l'augmentation de la production par unité de surface reste la seule alternative qu'il faut adopter.

Dans notre travail intitulé « **Effet d'adjuvants N-P sur la valeur fertilisante de la balle de riz** », le but visé était de valoriser la balle de riz en vue de contribuer à l'augmentation de la productivité de nos sols là où la culture du riz est pratiquée.

L'essai comprenait cinq traitements et les variables suivantes : hauteur des plants, biomasse sèche racinaire, biomasse sèche aérienne, la biomasse sèche totale ainsi que la biomasse cumulée se sont analysées statistiquement. Les résultats ainsi obtenus nous permettent de conclure ce qui suit :

- A la première récolte, l'incorporation de la balle a causé une immobilisation des éléments du sol par les micro-organismes satisfaisant leurs besoins au cours de la décomposition de celle-ci. Ainsi, le traitement balle sans DAP se classe le dernier avec une diminution de rendement par rapport au témoin de 8,5, 17,8 et 4,7 % respectivement pour la hauteur des plants, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale.

- A la deuxième récolte, la balle de riz s'est décomposée et a permis d'augmenter le rendement pour le traitement balle sans DAP de 11, 44,7 et 64,7 % respectivement pour la hauteur des plants, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche totale par rapport au témoin. L'expérience a montré que même si la balle de riz a un rapport C/N très élevé, les autres facteurs de décomposition étaient favorables.

- L'effet dose de DAP n'est pas apparent à la troisième récolte par le fait que, d'une manière générale, les engrais minéraux sont très solubles et sont utilisables assez rapidement en agissant dans un court délai.

- Pour la biomasse sèche cumulée, tous les traitements ont manifesté une augmentation de rendement par rapport au témoin et les rendements ont augmenté avec la dose de DAP ajoutée. De plus, l'immobilisation des éléments nutritifs n'a pas nettement été enregistrée, car le sol utilisé avait une faible acidité et une richesse en azote ce qui lui a permis d'accélérer la décomposition de la balle et par conséquent la libération des éléments nutritifs disponibles pour la plante.

D'une manière générale, nos résultats prouvent que la balle de riz complémentée peut être directement utilisée comme fumure organique. Cependant, certaines réserves sont à retenir. Nous recommandons ainsi ce qui suit :

- Cette étude ayant été conduite en pot, l'essai en champs devrait suivre pour valider les résultats rapportés dans notre travail ;
- Etant donné la forte diversité des sols du Burundi en grande partie caractérisée par des fortes acidités et que notre étude a été menée sur un sol à faible acidité, nous recommandons d'étendre cette étude sur les autres types de sol où la culture du riz est pratiquée ;
- Etant donné que l'immobilisation s'est remarquée à la première récolte, le recours au compostage de balle de riz complémentée par les engrais N-P avant son application au sol augmenterait des rendements dans les régions où a été prélevé l'échantillon. C'est une voie de recherche qui s'ouvre consécutivement aux résultats de notre travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. ADISCO, 2013. Trimestriel d'information et d'action du monde rural, 32 p.
2. ANGLEDETTE, A., 1966. Le riz. Technique et Documentation, Maisonneuve et Larose, Paris, 930 p.
3. ARRAUDEAU, M., 1998. Le riz irrigué. Collection Les techniques d'agriculture tropicale, Maisonneuve et Larose, Paris, 338 p.
4. BUKITSE, J., 2003. Minéralisation de l'azote à partir des résidus du petit pois appliqués dans deux sols d'altitude du Burundi, Mémoire, U.B, FACAGRO, Bujumbura, 70 p.
5. CHAMAYOU, H. et LEGROS, J.P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la Science du sol. Presse Universitaires de France, 593 p.
6. CHAUX, C. et FOURY, C., 1994. Production légumières ; Tome3. Légumineuses potagères, légumes. Technique et documentation-Lavoisier, Paris, 563 p.
7. DAGNELIE, P., 1975. Méthodes de l'inférence statistique. Vol II. Presse Agronomique de Gembloux, 461 p.
8. DUCHAUFOUR, P., 2001. Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. 6ème Edition de l'abrégé de pédologie. 129-131 p.
9. F.A.O, 1987. Guide sur les engrais et la nutrition des plantes. Bulletin F.A.O n^0 9, Rome, 199 p.
10. FAO, 1988. Aménagement du sol: production et usage du compost en milieu tropical et subtropical. Bulletin F.A.O n^0 56, Rome, 165 p.
11. GAUTHIER, J., 1991. Notions d'agriculture : le sol, les cultures, les élevages, l'économie et la gestion. Paris, rue Lavoisier F.75384 cedex o8, 575 p.
12. G.R.E.T, 1979. Biomasse : Comparaison des valorisations et coques d'arachide. Collection Technologie et Développement, Paris, 300 p.
13. GERVY, R., 1970. Les phosphates et l'agriculture. DUNOD, Paris, 298 p.
14. HELLER, R., ESNAULT, R. et LANCE, C., 1990. Physiologie végétale. Paris, France, 266 P.

15. HENNEBERT, M., 1988-1989. Fertilisation intégrée et fertilité des sols acides de la crête Zaïre-Nil (Burundi). Essai d'amélioration des compostières. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 80 p.

16. HICINTUKA, C., 1992. Fertilisation intégrée en milieu paysan : Amélioration des compostières et étude des arrières-effets des composts améliorés dans la région de CIMPAZI-MURUTA. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 92 p.

17. ISABU, 2012. Catalogue des espèces et variétés vivrières sélectionnées par l'ISABU. Deuxième édition, 126 p.

18. ISTEEBU, 2013. Enquête nationale agricole du Burundi 2011-2012. Volume 1 : Résultats de la campagne agricole, 243 p.

19. KABONEKA, S., 2007. Cours de fertilisation pour la deuxième épreuve d'Ingénieur Agronome. Année Académique 2008-2009, FACAGRO, U.B, 130 p.

20. MILLER, R.W. and DONAHUE, R.L., 1990. Soils, an introduction to soil and plant growth, 6th Edition. Prentice-Hall international édition. Condom, 768 p.

21. MINAGRIE, 2011: Plan National d'Investissement Agricole 2012-2017, BUJUMBURA, 99 p.

22. MUNIMBAZI, C., 1985. Contribution à l'étude de la fertilité des sols acides du Burundi, Mémoire, U.B, FACAGRO, Bujumbura, 133 p.

23. MOREL, R., 1996. Les sols cultivés, 2ème Edition. Paris, Lavoisier-Technique et documentation, 389 p.

24. MUSTIN, M., 1987. Le compost : Gestion de la matière organique. Editions François DUBUSC, Paris, 954 p.

25. NAHIMANA, M., 1991. Fertilisation intégrée en milieu paysan : Amélioration des compostières et étude des arrières-effets des composts améliorés dans la région de MURAMVYA-BUGARAMA. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 74 p.

26. NDAYIKENGURUKIYE E., 2003. Minéralisation du phosphore à partir des résidus de petit pois appliqués dans deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 67 p.

27. NIHORIMBERE, G., 2005. Evaluation de la valeur fertilisante en azote des biomasses foliaires de *Gliricidia sepium*, *Calliandra calothyrsus* et *Pisum sativum*. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 111 p.

28. NIVYIZA, J.C., 2001. Effet de l'application des engrais phosphates sur la décomposition de la paille de blé appliquée dans un sol de haute altitude du Burundi. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 101 p.

29. NIZIGIYIMANA, A., 1986. Etude de l'effet de l'addition d'intrants minéraux au fumier sur sa valeur fertilisante. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 127 p.

30. NTIBAZUKWIGIRA, G., 2003. Contribution à l'évaluation de l'effet allélopathiques de quelques espèces agroforestières vulgarisées au Burundi : cas de *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium* et *senne siamea*. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 98 p.

31. PONTAILLER, S., 1971. Engrais et fumure. Quatrième Edition mise à jour. Presse Universitaire de France, 124 p.

32. RURANGWA, R., 1990. Etude du compostage: comparaison des biomasses, complémentation minérale. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 89 p.

33. SABUSHIMIKE, J., 2003. Minéralisation du phosphore à partir de la biomasse foliaire de *Senna siamea* et *Senna spectabilis* dans des sols de l'Imbo. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 82 p.

34. SIBOMANA, L., 2000. Effet de l'application des engrais azotés sur la décomposition de la paille de blé dans un sol d'altitude du Burundi. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 109 p.

35. SINZOBAHAMVYA, P., 1989. Fertilisation intégrée en milieu paysan-Amélioration des compostières. Mémoire, FACAGRO, Bujumbura, U.B, 78 p.

36. SOLTNER, D., 1994. Phytotechnie générale. Les bases de la production végétale 20ème Edition. Tome 1. Le sol-climat-la plante. Collection Sciences et Techniques Agricoles. Imprimerie SIRAUDEAU et cie, 4-6 rue des bases Fonassières. 49023 ANGERS. Cedex 02. 467 p.

37. TISDALE, S.L. and WERNER, L.N., 1975. Soil fertility and fertilizers. 3rd Edition, New York, London, Macmillan. Publishing Inc., 694 p.

38. VILAIN, M., 1993. La production végétale. Volume 1. Les Composantes de la production. 2ème Edition. Paris, rue Lavoisier, F75384, cedex 08, 438 p.

39. VILAIN, M., 1997. La production végétale. Volume 2. La maîtrise technique de la production. 2ème Edition. Paris, rue Lavoisier, F75384, cedex 08, 449 p.

Site internet

40. http : www.riz-camargue.com|DOCS|litiere-animaux-analyses.pdf

ANNEXES

Annexe I : Les résultats obtenus au cours de trois récoltes effectuées

Première récolte

Traitement	Répétition	Hauteur moy. (cm)	Biomasse rac. (g)	Biomasse aér. (g)	Biomasse tot. (g)
Sol seul	1	28,3	1,5	2,9	4,4
	2	25,6	1,1	2,6	3,7
	3	27,1	1,2	3,5	4,7
Sol+ BR+0 kg de DAP/ha	1	22,0	1,5	2,3	3,8
	2	26,1	1,8	2,6	4,4
	3	26,0	1,5	2,5	4,0
Sol + BR+ 27 kg de DAP/ha	1	28,5	1,9	3,0	4,9
	2	29,3	2,0	3,2	5,2
	3	30,8	1,7	3,8	5,5
Sol +BR+ 54 kg de DAP/ha	1	30,0	2,0	3,6	5,6
	2	29,0	2,1	4,1	6,2
	3	28,0	1,7	3,6	5,3
Sol + BR+ 81 kg de DAP/ha	1	29,5	1,3	4,0	5,3
	2	28,0	2,0	4,3	6,3
	3	30,0	2,4	4,7	7,1

Deuxième récolte

Traitement	Répétition	Hauteur moy. (cm)	Biomasse rac. (g)	Biomasse aér. (g)	Biomasse tot. (g)
Sol seul	1	21,0	1,0	1,4	2,4
	2	19,8	0,7	0,9	1,6
	3	23,8	1,6	2,4	4,0
Sol+ BR+0 kg de DAP/ha	1	26,5	1,7	2,8	4,5
	2	23,6	1,5	2,0	3,5
	3	21,6	1,2	2,0	3,2
Sol + BR+ 27 kg de DAP/ha	1	24,0	1,8	2,1	3,9
	2	26,1	1,4	2,2	3,6
	3	27,0	1,7	3,3	5,0
Sol +BR+ 54 kg de DAP/ha	1	27,5	1,8	3,0	4,8
	2	27,0	1,6	2,9	4,5
	3	28,0	1,8	3,1	4,9
Sol + BR+ 81 kg de DAP/ha	1	25,0	1,6	2,4	4,0
	2	27,0	1,8	2,9	4,7
	3	27,6	1,5	2,5	4,0

Troisième récolte

Traitement	Répétition	Hauteur moy. (cm)	Biomasse rac. (g)	Biomasse aér. (g)	Biomasse tot. (g)
Sol seul	1	19,3	0,4	0,8	1,2
	2	20,1	0,9	1,2	2,1
	3	18,1	0,7	1,2	1,9
Sol+ BR+0 kg de DAP/ha	1	21,6	0,5	0,9	1,4
	2	22,5	0,4	1,3	1,7
	3	21,0	1,1	1,7	2,8
Sol + BR+ 27 kg de DAP/ha	1	20,0	0,7	1,1	1,8
	2	21,0	0,5	1,1	1,6
	3	20,0	0,4	1,0	1,4
Sol +BR+ 54 kg de DAP/ha	1	21,3	0,6	0,9	1,5
	2	19,6	0,5	0,9	1,4
	3	22,5	0,6	1,3	1,9
Sol + BR+ 81 kg de DAP/ha	1	19,6	1,0	1,3	2,3
	2	21,6	0,8	1,2	2,0
	3	19,5	0,8	1,0	1,8

La somme de trois récoltes (biomasse racinaire, aérienne et totale)

Traitement	Répétition	Biomasse rac. (g)	Biomasse aér. (g)	Biomasse tot. (g)
Sol seul	1	2,9	5,1	8,0
	2	2,7	4,7	7,4
	3	3,5	7,1	10,6
Sol+ BR+0 kg de DAP/ha	1	3,7	6,0	9,7
	2	3,7	5,9	9,6
	3	3,8	6,2	10,0
Sol + BR+ 27 kg de DAP/ha	1	4,4	6,2	10,6
	2	3,9	6,5	10,4
	3	3,8	8,1	11,9
Sol +BR+ 54 kg de DAP/ha	1	4,4	7,5	11,9
	2	4,3	7,9	12,2
	3	4,1	8,0	12,1
Sol + BR+ 81 kg de DAP/ha	1	3,9	7,7	11,6
	2	4,6	8,4	13,0
	3	4,7	8,2	12,9

Annexe II : Détermination de la quantité de la balle et du DAP à mettre dans les pots

- Détermination de la quantité de la balle à mettre dans les pots

  Nous avons considéré une production moyenne de riz paddy de 5 T/ha (pour le riz cultivé au Burundi). Sachant que la balle représente 20 % du riz récolté, nous avons utilisé 1 T/ha.

  Etant donné que 1ha de sol pèse 2.10^6 kg de sol, dans un pot de 4 Kg de sol sec, on y met :

  $$\frac{1\text{ T de balle de riz} \times 4\text{ Kg de sol}}{2.10^6\text{ Kg de sol}} = 2\text{ g de balle de riz}$$

- Détermination de la quantité de DAP à mettre dans les pots

  Sachant que le rapport C/N de la balle de riz est 182 avec le % N de 0,23 (Tableau 2), en réduisant le rapport à 25 (optimum pour l'activité microbienne), le pourcentage du carbone sera donnée par :

  C/N= 182 (% N=0,23)

  % C= 42 %, la masse de C se trouvant dans 1Kg de balle de riz sera $\frac{42}{100} \times 1000\text{ g} =$ 420 g de C. De même la masse de N dans 1Kg de balle de riz sera 2,3 g.

  Si le rapport C/N est ramené à 25, on aura $\frac{420}{2,3\text{ g}+X_{Nmin}} = 25$ (X_{Nmin} = Nminéral

  $$X_{Nmin} = 14,5\ g$$

  En considérant 1T de balle de riz par ha, on utilisera $\frac{14,5\text{ g de N} \times 1000\text{ kg de balle de riz}}{1\text{ kg de balle de riz}} =$ 14,5 kg de N/ha

  Calculons la quantité de DAP (18-46-0) comme source d'azote : $\frac{14,5\text{ kg de N} \times 100\text{ kg de DAP}}{18\text{ kg de N}} = 81\text{ kg de DAP/ha}$

  En utilisant trois doses de DAP avec 81 kg/ha pris comme le maximum :

  - Première dose 1/3 du max=27 kg de DAP/ha
  - Deuxième dose 2/3 du max=54 kg de DAP/ha
  - Troisième dose=81 kg de DAP/ha

  Etant donnée qu'un ha sol=2.10^6 kg de sol, dans un pot de 4 kg de sol, on y mat :

- Pour la première dose : $\frac{27 \text{ kg de DAP} \times 4 \text{ kg de sol}}{2.10^6 \text{ kg de sol}} = 0{,}05 \text{ g de DAP}$
- Pour la deuxième dose : $\frac{54 \text{ kg de DAP} \times 4 \text{ kg de sol}}{2.10^6 \text{ kg de sol}} = 0{,}11 \text{ g de DAP}$
- Pour la troisième dose : $\frac{81 \text{ kg de DAP} \times 4 \text{ kg de sol}}{2.10^6 \text{ kg de sol}} = 0{,}16 \text{ g de DAP}$

Annexe III : Description de la variété de maïs utilisée (ECAVL1) (Source : ISABU, 2012)

Espèce : Zea mays

Variété : ECAVL

Centre d'origine : CIMMYT Kenya

Année d'introduction à l'ISABU : 2002

Année de diffusion : 2006

Caractéristiques morphologiques

- Hauteur à l'insertion de l'épi : 1,05 m
- 50 % floraison mâle : 67 jours
- 50 % floraison femelle : 71 jours
- Stade laiteux : 89 jours
- Maturité physiologique : 113 jours
- Poids de mille graines : semi dentée
- Couleur du grain : blanc concassée

Caractéristiques agronomiques

- Rendement : 4-5 tonnes/ha
- Zone de culture : 800-1200 m

Comportement vis-à-vis des maladies et ravageurs

- Résistance à la maladie des bandes
- Sensible à l'helminthosporiose
- Sensible aux chenilles foreuses des tiges.

Annexe IV : Quelques normes d'interprétation du sol

Paramètre	Valeurs	Observations
pH-eau	> 5,6 5,2<pH<5,6 < 5,2	Bon Problèmes légers de désaturation en bases et toxique aluminique Problèmes graves de désaturation en bases et toxique alumino-manganique
% C	> 3,5 1<%C<3,5 < 1	Elevé à très élevé Moyen à élevé Faible à très faible
C/N	9 < C/N<12	Optimal
Ca^{2+}(méq/100 g)	> 3,5 1,5 <Ca< 3,5 1,5	Bon à très bon Faible à moyen Faible à très faible
Mg^{2+}(méq/100 g)	> 1,5 0,5< Mg<1,5 <0,5	Bon à très bon Faible à moyen Faible à très faible
K^{+}(méq/100 g)	> 0,5 0,2<K<0,5 <0,2	Bon à très bon Faible à moyen Faible à très faible
Ca^{2+}/ Mg^{2+}	3<Ca/Mg<5	Optimal
Mg^{2+}/ K^{+}	2<Mg/K<5	Optimal
(Ca^{2+}+ Mg^{2+})/ K^{+}	12 à 30	Optimal
Al^{+} échangeable (méq/100g)	<0,5 0,5<Al<1,5 1,5<Al<3 >3	Très faible toxicité Toxicité aluminique faible à moyenne Toxicité aluminique forte Toxicité aluminique très forte
Saturation en Al-m-(%)	m< 10<m<45 m>45	Pas de problème de toxicité aluminique Toxicité aluminique faible à moyenne Toxicité aluminique forte
CEC effective (méq/100g)	> 25 10<CECeff<25 5<CECeff<10 <5	Très élevé Elevé Moyen Faible à très faible
V_{eff}	> 80 40<V_{eff}<80 <40	Bon à très bon Faible à moyen Trop faible
P (ppm)	> 20 20<P<50 50<P<100 <100	Carence en P Disponibilité médiocre en P Bonne disponibilité en P Disponibilité élevée en P

Source : KABONEKA, 2007

Annexe V: Modes opératoires des analyses du sol

1. Mesure du pHeau et du pHKCl

- Peser 2 fois 5 g de terre fine et met les dans un bécher de 50 ml.
- Ajouter 25 ml de l'eau distillée dans l'un et 25 ml de KCl dans l'autre.
- Agiter les 2 suspensions toutes les 20 minutes pendant une heure.
- Après dernières agitation, procéder aux mesures du pH à l'aide d'un pH-mètre en veillant à rincer l'électrode avec l'eau distillée pour passer d'un échantillon à l'autre.
- Pour lecture, attendre la stabilisation de l'électrode, noter les résultats.

2. Dosage de l'azote total

- Peser 0,2 g de sol et porter quantitativement dans un ballon Kjeldahl.
- Ajouter 3 g d'alliage de Devardo et 200 ml d'eau distillée.
- Verser 5 ml de NaOH le long du col du ballon de sorte qu'il se mélange graduellement au contenu.
- Brancher immédiatement à l'unité de distillation, l'allonge plongeant dans 50 ml d'acide borique.
- Laisser réagir au moins 15 minutes sans chauffer.
- Démarrer ensuite la distillation et récolter environ 150 ml de distillat.
- Rincer l'allonge avec l'eau distillée.
- Titrer avec l'acide sulfurique jusqu'au point de virage vert à violet.

$$\%N \text{ total} = \frac{14{,}008 \text{ ml } H_2SO_4 \,.\, \text{Normalité}H_2SO_4}{\text{poids de l'échantillon}}$$

3. Dosage du carbone organique

- Peser, au dixième mg, 1 g de sol et porter quantitativement dans un erlenmeyer.
- Pipeter 10 ml de la solution de $K_2Cr_2O_7$ 1N et porter dans l'erlenmeyer.
- Ajouter 20 ml de H_2SO_4 concentré.
- Laisser reposer 30 minutes en agitant doucement.
- Ajouter 200-250 ml d'eau déminéralisée, 10 ml de BaCl 10 % et 5 ml de H_2PO_4 concentré.
- Placer sur un agitateur magnétique.
- Mettre à volume la burette semi-automatique de pellet avec la solution de $FeSO_4$ 0,5N.
- Ajouter 1ml de la solution de phényl et titrer jusqu'au bleu au vert.
- Noter le résultat (ml $FeSO_4$ 0,5 N) et réaliser 2 blancos.

Calcul du pourcentage de carbone

Soient X le poids de sol pesé, Y le volume (ml) FeSO4 ajouté pour l'échantillon, Z le volume (ml) FeSO4 ajouté pour le blanco moyen et f facteur du FeSO4 (0,5 N). Le pourcentage de carbone est donné par la relation suivante :

$$\% = \frac{(Z - Y) \,.\, f0{,}15}{X.\, 0{,}77}$$

4. Conductivité électrique

- Etalonnage de l'appareil
  - Plonger l'électrode de la conductivité dans l'eau déminéralisée et mettre l'appareil sous tension.
  - Placer le potentiomètre d'amplification sur K (constante de cellule). Après équilibre, amener la valeur indiquée sur la cellule.
  - Mettre l'appareil hors circuit
- Mesure de la conductivité électrique
  - Peser au mg près 5 g de sol sec broyé et tamisé à 2 mm. Ajouter (burette) 25 ml d'eau déminéralisée (conductivité= 2-3 micromhoms/Cm).
  - Mélanger toutes les 20 minutes.

- Après 1 heure de mise en équilibre, plonger l'électrode préalablement rincée (jet de pissette) et sèche (Kleenex). Prendre garde de bien plonger dans la suspension l'entièreté de deux plaques de l'électrode.
- Mettre la conductimètre en marche et attendre que la mesure soit stable. Agiter le berlin en tournant. Si l'affichage digital clignote, augmenter le facteur multiplicatif de lecture (×10, × 100, × 1000).
- Noter le numéro de l'échantillon et le résultat (exprimé en micromhos/Cm) après deux lectures consécutifs identiques. Mettre l'appareil hors circuit.
- Enlever le berlin. Rincer avec un point de pissette l'intérieur de l'électrode et essuyer l'électrode.

5. Détermination des bases échangeables (Na^+, K^+, Ca^{++}, Mg^{++}) et de la capacité d'échange cationique (CEC)

- Mettre dans des colonnes de percolation, bien lavées et sèches, de l'ouate lavé.
- Ajouter 2 spatules de sable propre.
- Mettre 5 g de sol broyé et tamisé à 2 mm, bien mélangé avec 25 g de sable propre.
- Percoler toutes les 30 minutes, 3 fois 50 ml d'acétate d'ammonium (Ac NH_4 1N pH 7,0), recueillir la solution dans des jaugés de 250 ml et porter à volume.
- La solution obtenue (solution I) servira au dosage des cations échangeables.
- Percoler toutes les 20 minutes 5 fois 50 ml d'échantillon dénaturé et recueillir le percolat dans des bacs.
- Placer sous les colonnes des jaugés de 250 ml, percoler toutes les 30 minutes, 3 fois 5O ml de KCl 10 % pH 3,0 et porter à volume avec de l'eau déminéralisée.
- La solution obtenue (solution II) servira au dosage de la CEC.
- Les blanco sont réalisés avec 35 g de sable pur.

Analyse de solution I (pour les bases échangeables)

- Passer la solution I directement au spectrophotomètre d'absorption atomique pour le dosage des Na^+ et K^+.
- Diluer les échantillons dont la concentration est supérieur à 10 ppm.

Pour les le dosage des Ca^{++} et Mg^{++} :

- Pipetter 10 ml de la solution I dans un jaugé de 25 ml, ajouter 2,5 ml de $LaCl_3$ 1 %, porter à volume avec acétate d'ammonium Ac NH_4 N/2 boucher et agiter.

- Passer au spectrophotomètre d'absorption atomique. Diluer les échantillons dont la concentration est supérieure au standard le plus élevé.

Analyse de la solution II (pour la CEE)

- Pipetter 25 ml de la solution II et porter dans l'appareil de Parnass.
- Ajouter 25 ml de NaOH 40 % et distiller à vapeur (H_3BO_3 2 %) additionné à l'indicateur (mélange de 16 ml de vert de bromocrésol et 4 ml du rouge de méthyl). La solution vire du rouge violet au bleu vert.
- Titrer avec H_2SO_4 0,05 N la solution contenue dans l'erlenmeyer jusqu'au virage du bleu vert au rouge violet.

- Passer au spectrophotomètre d'absorption atomique. Diluer les échantillons dont la concentration est supérieure au standard le plus élevé.

Analyse de la solution II (pour la CEE)

- Pipetter 25 ml de la solution II et porter dans l'appareil de Parnass.
- Ajouter 25 ml de NaOH 40 % et distiller à vapeur (H_3BO_3 2 %) additionné à l'indicateur (mélange de 16 ml de vert de bromocrésol et 4 ml du rouge de méthyl). La solution vire du rouge violet au bleu vert.
- Titrer avec H_2SO_4 0,05 N la solution contenue dans l'erlenmeyer jusqu'au virage du bleu vert au rouge violet.