



**COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE
UNIVERSITE DE LIEGE - GEMBLoux AGRO-BIO TECH**

**UTILISATION DES COMPOSTS DE BIODECHETS MENAGERS POUR
L'AMELIORATION DE LA FERTILITE DES SOLS ACIDES DE LA PROVINCE
DE KINSHASA (République Démocratique du Congo)**

Crispin MULAJI KYELA

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences
agronomiques et ingénierie biologique

Promoteur : **Prof. G. MERGEAI**
Co-promoteur : **Prof. Hon. M. CULOT**

2011

© Copyright.

Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et de ses modifications ultérieures.

MULAJI KYELA Crispin (2011). Utilisation des composts de biodéchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la Province de Kinshasa (Rép. Dém. du Congo) (Thèse de Doctorat). Gembloux, Belgique, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech., 172 p., 32 tabl., 37 fig.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche des méthodes de gestion durable des sols sableux de la Province de Kinshasa (République Démocratique du Congo), afin de garantir une bonne sécurité alimentaire. Il constitue une recherche sur l'utilisation de composts produits à partir de biodéchets ménagers en vue de l'amélioration de la qualité des sols sableux. L'objectif général est d'évaluer l'incidence d'apports répétés de matières organiques issues de composts de biodéchets ménagers sur la dynamique des paramètres chimiques et biochimiques dans les sols acides sableux ainsi que sur leurs effets sur la productivité.

Un essai pilote de compostage à petite échelle a été installé pour la production des composts à partir des déchets solides ménagers et la caractérisation des composts obtenus a permis de définir le potentiel agronomique que présente ce matériau.

Le diagnostic de l'état agropédologique des sols des trois sites étudiés a révélé que ces sols sont sableux [*rubiques arenoferralsols (dystriques)*], présentent d'excellentes conditions physiques de drainage, de circulation d'air et de pénétration des racines, sont pourvus des colloïdes à charge variable, présentent une réaction acide, et sont pauvres en matières organiques et en nutriments minéraux. De plus, leurs capacités de rétention au champ et d'éléments nutritifs sont très limitées, et constituent leurs principales contraintes à la productivité agricole.

Au terme de quatre saisons culturales en trois milieux réels, l'étude de la réaction des amendements organiques [20, 40 et 60 t.ha⁻¹ de matière brute (MB)] a donné des résultats satisfaisants. L'apport continu de ces matières organiques (MO) constituées des composts de biodéchets ménagers a, en quatre saisons culturales, significativement augmenté les valeurs de pH, carbone organique total, capacité d'échange cationique (CEC), saturation en bases effectives (SB eff) et ont réduit le taux de saturation en aluminium échangeable dans les trois sites. Avec la plus forte dose T3 (60 t.ha⁻¹ MB), les valeurs de pH-eau ont augmenté d'au moins 0,8 unité et les teneurs en carbone ont été multipliées par 2,5 à 3 sur les trois sites. Les valeurs de CEC ont augmenté de 3,3 à 5,02 cmol₍₊₎.kg⁻¹ et la saturation en aluminium effective toxique a baissé de plus de 90%.

S'agissant des paramètres biochimiques [carbone & azote microbien, respiration basale (RB), respiration induite par substrat (RIS), activité de phosphomonoestérase acide (APA), activité de l'uréase non tamponnée (AU_{nt}) et tamponnée (AU_t)], les traitements au compost ont induit une amélioration sensible, en fonction des doses appliquées sur l'ensemble de l'expérimentation. Ces apports ont induit des activités microbiologiques qui auraient contribué à l'augmentation des nutriments dans les sols (N, P, etc.) par les activités microbiennes. La disponibilité des nutriments et la fourniture de carbone par les composts expliqueraient ces augmentations.

De plus, les rendements des différentes plantes tests utilisées (*Glycine max* L. Merr, *Arachis hypogaea* L. et *Hibiscus sabbariffa* L.) ont été positivement influencés par les apports de MO des composts de biodéchets ménagers (CBDM). Comparés aux engrais minéraux, leur potentiel fertilisant n'est pas négligeable. D'après les résultats obtenus, les doses ≥ 40 t.ha⁻¹ de matière brute (MB) conviendrait pour atteindre et maintenir un degré de fertilité acceptable et assurer des rendements satisfaisants de cultures. Mais les faibles doses se sont montrées plus efficaces que les fortes doses du point de vue agronomique. Les doses ≤ 20 t.ha⁻¹ de matière brute (MB) sont préconisées en culture annuelle et régulière. Le phosphore s'est révélé être l'élément le plus limitant pour la production agricole des sols des sites étudiés quels que soient les types d'amendements et de cultures utilisés. Enfin, l'étude indique que pour des raisons d'efficacité et de disponibilité des moyens, une production accrue peut être obtenue par synergie entre les composts utilisés en petite quantité et les engrais minéraux en compléments.

MULAJI KYELA Crispin (2011). Use of household biowaste composts to improve acid soils fertility of the Province of Kinshasa (Dem. Rep. of Congo) (Ph. D. Thesis). Gembloux, Belgium, University of Liège, Gembloux Agro-Bio Tech., 172 p., 32 tabl., 37 fig.

Abstract

This work is part of the research for appropriate methods for sustainable management of the sandy soils of the province of Kinshasa (Democratic Republic of Congo), in order to ensure and guarantee the adequate food security. It consists of a scientific research of the use of composts produced from household organic waste in improving the quality of sandy soils to the province of Kinshasa. The general objective pursued in this work is to evaluate the impact of four repeated applications of organic matter from bio-waste compost on chemical and biochemical parameters dynamics in acid sandy soils and their productivity.

A pilot composting on a small scale has been installed for the production of composts from municipal solid waste and characterization of composts obtained has revealed the agronomic potential that presents this material.

The diagnosis of the condition agropedological soils revealed that soils of the three study sites are sandy classified as *rubrics arenoferrasols (dystrics)*, have excellent physical conditions for drainage, air circulation and root penetration possess variables charges colloids, show an acid reaction, low organic matter and low nutrient minerals contents. In addition, their water and nutrients retentions capacity are very limited, and are the main soil constraints to agricultural productivity of these soils.

After four growing seasons in real environments, the study of the reaction with the soil organic amendments (20, 40, 60 t.ha⁻¹ MB) gave satisfactory results. The provision of continuous additions of organic composts significantly increased the values of pH, TOC, CEC, SB eff and reduced the rate of exchangeable Al saturation in the three sites. With the highest dose T3 (60 t.ha⁻¹ MB), the pH increased at least 0.8 units and the carbon content multiplied by 2.5 to 3 on the three sites. CEC values increased from 3.3 to 5.02 cmol₍₊₎mg.kg⁻¹ and the toxic aluminum saturation decreased more effective than 90%.

Regarding biochemical parameters (microbial carbon & nitrogen, RB, RIS, APA, Unt, Ut), compost treatments induced a significant improvement in function and doses applied throughout the experiment. These contributions have induced microbial activity which contributed to the increase in soil nutrients (N, P, ...) by microbiological activities. The availability of nutrients and furniture of carbon by the composts explain these increases.

In addition, yields on different test plants (*Glycine max* L. Merr, *Arachis hypogaea* L. and *Hibiscus sabbariffa* L.) were positively influenced by the treatments of organic composts household wastes. Compared with mineral fertilizers, their fertilizing potential is not negligible. According to the results observed, doses ≥ 40 t.ha MB⁻¹ should be to keep and maintain an acceptable level of fertility and yields potentiel of crops. But low doses were more efficient than high doses of agronomic point of view. Doses ≤ 20 t.ha⁻¹ MB are recommended in annual crop and regular. Phosphorus was found to be the most limiting element to agricultural production of soil sites studied whatever of the types of amendments and cultures used. Finally, the study indicates that for reasons of efficiency, availability and funds increased production may be obtained through synergy between the composts used in small quantities and fertilizer mineral supplements.

Remerciements

Je tiens à remercier, en tout premier lieu le Professeur Guy MERGEAI, Professeur à l'Unité de Phytotechnie Tropicale et Horticulture pour avoir accepté de succéder au Professeur Marc CULOT parti en retraite comme promoteur. Malgré ces multiples occupations, il n'a ménagé d'aucun effort pour assurer la direction de cette thèse. Ses critiques, remarques et suggestions constructives m'ont permis d'améliorer la qualité de cette thèse.

Je suis infiniment reconnaissant au Professeur Honoraire Marc CULOT, ancien responsable du Laboratoire d'Ecologie Microbienne et Epuration des Eaux (LEMEE), co-promoteur et initiateur de cette thèse de m'avoir accepté, accueilli et d'avoir dirigé mes travaux et surtout pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail. Les moments difficiles qu'il a connu en fin de carrière, ne l'a pas empêché d'assurer avec compétence la direction de cette thèse. Je garde sincèrement autant des leçons scientifiques qu'humaines grâce à son encadrement. Ses sages conseils m'ont fortement édifiés et m'ont permis de mener à bien mes travaux de recherche.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent également aux Professeurs qui ont accepté de faire partie du comité d'encadrement et d'évaluation de la présente thèse. Les remarques et suggestions combien constructives formulées après lecture, ont amélioré énormément la qualité de mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes sincères remerciements s'adressent particulièrement au Professeur Jean-Pierre BAUDOIN, président du jury pour sa disponibilité, au Professeur Jean-Pierre DESTAIN, directeur général du Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W), au Professeur Honoraire André FALISSE, ancien responsable de l'Unité de Phytotechnie des régions tempérées, au Professeur Laurent BOCK, responsable de l'Unité Sol-Ecologie-Territoire à Gembloux Agro-Bio Tech., Université de Liège et au Professeur Bernard GODDEN de l'Université Libre de Bruxelles (ULB).

J'exprime mes sincères remerciements aux autorités académiques de l'Université de Kinshasa (UNIKIN), de la Faculté des Sciences et particulièrement celles du Département de Chimie qui m'ont permis d'effectuer une bonne partie de mes travaux de recherches doctorales en Belgique. Je pense singulièrement au Professeur Pius MPIANA qui m'a facilité l'obtention de la bourse doctorale et les démarches administratives pendant mes séjours à Kinshasa. Je remercie également le Professeur Paul MAFUKA de m'avoir permis de réaliser une partie de mes analyses dans son Laboratoire de Pédologie à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa. Je remercie aussi son Assistante Irène KIBAL, responsable du laboratoire.

Qu'il me soit permis d'adresser mes profondes remerciements aux membres du corps académiques de la Faculté des Sciences, en particulier ceux du Département de Chimie, Université de Kinshasa pour m'avoir encouragé et soutenu pendant ma formation : Professeur Charles KABWE, Professeur Christopher KABELE, Professeur Augustin MALUMBA, Professeur MONAMA, Professeur NOKI, Professeur TABA, Professeur LOBO, etc.

Je tiens à remercier du fond de cœur la Coopération Technique Belge (CTB) de m'avoir octroyé une bourse de doctorat mixte. Mes remerciements s'étendent également aux encadreurs du staff

administratif de la CTB, en particulier Messieurs Célestin MISIGARO (Bruxelles, Belgique) et Jean-Claude KAKUDJI (Kinshasa, Rép. Dém. du Congo).

Qu'il me soit permis de remercier avec enthousiasme et très profondément, tout le personnel administratif, scientifique et technique ancien et actuel du Laboratoire d'Ecologie Microbienne et Epuration des Eaux, notamment : Thierry FIEVEZ, Marie Christine GERARD, Jean François D'ATONIO, Sandrine MELITOR, Julie GUISET, Léandre BERNIER, et mes collègues Dr Féniel PHILIPPE, Dr Pascal DISA-DISA, Habib BOUHAOUACH, Philippe MAMBANZULUA etc., pour toute une longue et inoubliable période passée ensemble et dont je garderai toujours un excellent souvenir. A Thierry FIEVEZ, son assistance technique et ses conseils ont été plus que nécessaire pour la réalisation de cette thèse.

Je remercie Ir Pascal KASULU coordonateur du Projet Compostière de Quartier (PCQ), section de la Croix Rouge de la Rép. Dém. du Congo de Lemba (Kinshasa) et de l'Association des Volontaires pour le Développement Communautaire (AVODEC) pour le soutien et la collaboration dans la réalisation de mon travail tant au niveau de la production des composts de biodechets ménagers à qu'à l'expérimentation en plein champ au Plateau de Batéké à Balume.

Je remercie également tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à l'édification de cette thèse. Je pense particulièrement à mes compagnons de lutte et amis : Abélaïn AMURI, Isabelle MUKAGATARE, Thierry TANGO, Robert KISASA, Sylvie MBAMBI, Dr Blaise MBALA, Dr Jean-Pierre DJIBU, Bébéliér MITIMA, Dr Ruben KOY, Dr Paul MALUMBA, Dr Céline SIKULISIMWA, Dr Tieny NSIAMA, Jacques MUBO, Yve BOTULA, Francis NSIMBA, Boniface POSHO qui m'ont sans cesse manifesté leur soutien pendant ma formation doctorale.

Mes remerciements les plus profonds s'adressent également à ma famille pour le soutien moral, matériel et surtout l'amour qui ne cesse de manifester à mon égard. Je pense à ma mère Angéline KABEDI et à mon défunt père Eugène TSHIBANGU, à ma sœur Micheline KALENDA et son époux Dr Thomas BAKAJIKA, à mon frère Anaclet TSHIBANDA et son épouse Jeanne MWA MBUYI, à ma regrettée sœur Oscarine KONGA... et à mes neveux, Steve TSHIBANGU, Jimmy KABEMBA, Thythy TSHIBUYI, Arcel DIANGO, Junior MULAJA, Patrick KALALA etc., et nièces, Magalie NGALULA, Bernadette MBOMBO, Nadine TSHIBANDA, etc. Je pense enfin à mon fils Prince TSHIBANGU et sa mère Bénédicte MUKULA pour tant d'abnégations et des sacrifices consentis; j'exprime ici l'expression de ma profonde affection.

Je serais qualifié d'ingrat, si j'omettais de remercier la grande famille congolaise de Gembloux « Congo Gembloux », les ami(e)s belges et les membres de l'Eglise « La Pierre Vivante ». Je pense plus particulièrement à : David BUSE, Dr Blaize MUZINGU, Didier LIOGE, Edouard MIBEYA et Fany STOFFEL, Papy MATONDO, Rose-marie PAQUET, Ghislain NTUMBA, Myriam VANESCH. Que toutes personnes physiques et morales qui ne sont pas citées, trouvent l'expression de ma sincère reconnaissance et mes vifs remerciements.

Enfin, je rends gloire à Dieu, au seigneur Jésus-Christ pour l'aboutissement de ma formation.

Liste des abréviations et acronymes

α : seuil de probabilité

AC : année culturale

AE : acidité d'échange

ANOVA : Analysis of Variance

APA : activité de la monophosphoesterase acide

ATU : allyle trio urée

AU_{nt} : activité de l'uréase non tamponnée

AU_t : activité de l'uréase tamponnée

BDM : biodéchets ménagers

C/N: rapport carbone (C) sur azote (N)

CBM : compost des biodéchets ménagers

CDV : compost des déchets verts

CEC : capacité d'échange cationique

CECE : capacité d'échange cationique effective

CECOMAF : centre de commercialisation des produits maraîchers et fruitiers

CFB : compost des déchets de fermes

C_{fm} : carbone facilement métabolisable

C_{mic} : carbone microbien

cm : centimètre

cmol₍₊₎ : centimole

COM : compost des ordures ménagères

COT : carbone organique total

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

CRC : capacité de rétention au champ

CV : coefficient de variation

Da : densité apparente

DBO5 : demande biochimique en oxygène après 5 jours d'incubation

DCO : demande chimique en oxygène

EA : efficience agronomique des amendements

EAE : effience agronomique de l'élément fertilisant

ETM : éléments traces métalliques

ETP : évapotranspiration

FAO : Food and Agriculture Organisation

FM : fumure minérale

Gx ATB : Gembloux Agro-Bio Tech.

ha : hectare

h : heure

INS : Institut National de Statistique de la République Démocratique du Congo

ISO : International Standard Organisation

KE: coefficient d'efficience

K_{CE} : facteur (coefficient) de calibration

kg : kilogramme

KIN : Kinshasa

λ : longueur d'onde

M : molaire

MB : matière brute

méq : milliéquivalent

mm : millimètre

MO : matière organique

MS : matière sèche

MST : matière sèche totale

μO : micro-organismes

N : normale

NE : différence entre l'azote microbien fumigé et l'azote microbien non fumigé

nd : non déterminé

nm : nanomètre

N_{mic} : azote microbien

N_{min} : azote minéral

N_{org} : azote organique

NPK : engrais minéral à base d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K)

N_{tot} : azote total

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer

P (mm): précipitation exprimée en millimètre

p : probabilité

P_{disp} : phosphore disponible

P_{org} : phosphore organique

P_{tot} : phosphore total

pH : potentiel d'hydrogène

PCQ/RC : Projet de Compostière de Quartier de la Croix Rouge

qCO_2 : quotient métabolique

Q_R : quotient d'activation respiratoire

RB : respiration basale
RDC ou R.D. Congo : République Démocratique du Congo
Rdt : rendement
RIS : respiration induite par substrat
SBE : somme des bases échangeables
SCA : saison culturale A
SCB : saison culturale B
SENASSEM : Service National des Semences (RDC)
SPW : Service Public de Wallonie
t : tonne
 $T_{i=0,\dots,5}$: traitements
TS B : taux de saturation en bases
TS_{eff} Al : taux de saturation effective en aluminium
TS B_{eff.} : taux de saturation effective en bases
Ulg : université de Liège
Unikin : université de Kinshasa
USA : United State of America
USDA : United States Department of Agriculture
WBR : World Reference Base for Soil Resources

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1. Milieu physique et description des sites de l'étude	5
1.1 Introduction	5
1.1.2 Géologie	7
1.1.3 Sol de la RDC.....	7
1.2 Province de Kinshasa et milieu physique	9
1.2.1 Géologie de la Province de Kinshasa.....	9
1.2.2 Sols de Kinshasa	10
1.2.3 Caractéristiques climatiques de la Province de Kinshasa	11
1.2.4 Végétation de la Province de Kinshasa.....	13
1.2.5 Valeur agricole et utilisation de la terre.....	15
1.2.6 Ressources potentielles d'amélioration de la fertilité des sols	16
1.3 Conclusion partielle.....	18
Chapitre 2. Incidences de matière organique des composts sur des indicateurs biologiques et chimiques des sols	21
2.1. Introduction	21
2.2. Compostage des déchets	22
2.3 Facteurs affectant le processus de compostage.....	24
2.3.1 Température (T°).....	24
2.3.2 pH.....	25
2.3.3 Aération et humidité	26
2.3.4 Substrat	26
2.3 Déchets d'origine urbaine susceptibles d'être compostés.....	27
2.4 Avantages du compostage.....	28
2.6 Influence du compost sur la dynamique des principaux paramètres physico-chimiques et biologiques du sol	30
2.6.1 Effet sur le carbone organique du sol.....	32
2.6.2 Effet sur l'azote (N) du sol.....	32
2.6.3 Effet sur le phosphore	34
2.6.4 Effets de composts sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol.....	35
2.4.5. Effets sur les caractéristiques biologiques du sol.....	38
2.4.6. Action sur les rendements de cultures.....	41
2.4.7 Effets sur l'environnement.....	41
2.5 Autres utilisations des composts	43
2.6 Conclusion partielle	44

Objectifs de l'étude.....	45
Hypothèses de travail.....	45
Cadre et stratégie de la recherche.....	46
Chapitre 3. Matériels et méthodes.....	47
3.1. Sites d'expérimentation	47
3.2 Relevés pluviométriques pendant la période d'expérimentation	48
3.3 Préparation et conditionnement des échantillons de sol	48
3.4 Analyses physico-chimiques et biologiques	49
3.4.1 Analyses physico-chimiques.....	49
3.4.2. Analyses biologiques des sols.....	53
3.4.3. Analyses enzymatiques.....	54
3.5 Nature et préparation des amendements utilisés.....	55
3.6 Conduite des essais	57
3.6.1 Dispositif expérimental.....	57
3.6.2 Mode d'application et quantités.....	58
3.6.3 Cultures-tests utilisées et opérations culturales.....	59
3.6.4 Durée des essais, échantillonnage et méthodes d'analyse des sols dans le temps	59
3.7 Analyses statistiques des données.....	60
Chapitre 4. Propriétés et diagnostic de l'état agropédologique des sols des sites étudiés	61
4.1 Introduction	61
4.2 Matériels et méthodes.....	61
4.3 Résultats et discussion	62
4.3.1 Caractéristiques physiques	62
4.3.2 Caractéristiques chimiques.....	63
4.3.3 Caractéristiques microbiologiques	69
4.4 Conclusion partielle.....	71
Chapitre 5. Effets de l'application des composts de biodéchets ménagers sur les propriétés physicochimiques et chimiques des sols	73
5.1 Introduction	73
5.2 Matériels et méthodes.....	74
5.3 Présentation des résultats et discussion	74
5.3.1 pH.....	74
5.3.2 COT & N _{tot}	77
5.3.4 Azote organique (N _{org}) et minéral (N _{min}).....	83
5.3.5 Phosphore total, phosphore organique et phosphore disponible	87
5.3.6 Complexe adsorbant.....	93

5.3.7 Saturation en Al.....	98
5.3.8 Corrélations entre les paramètres physico-chimiques et chimiques.....	100
5.4 Conclusion partielle.....	102
Chapitre 6. Effets des composts de biodéchets ménagers sur les indicateurs microbiologiques de la qualité des sols.....	105
6.1 Introduction	105
6.2 Matériels et méthodes.....	106
6.3. Présentation des résultats et discussion	106
6.3.1 Biomasse microbienne	106
6.3.2 Activité microbienne	111
6.3.3 Carbone facilement métabolisable.....	116
6.3.4 Activités enzymatiques	118
6.3.5 Corrélations entre paramètres biochimiques	124
6.4 Conclusion partielle.....	127
Chapitre 7. Efficience des composts de biodéchets ménagers sur les rendements des cultures .	129
7.1 Introduction	129
7.2 Matériels et méthodes.....	130
7.3 Présentation et discussion des résultats	130
7.3.1 Rendement des cultures.....	130
7.3.2 Efficience agronomique des amendements apportés	138
7.3.3 Efficience agronomique des éléments fertilisants.....	142
7.3 Conclusion partielle.....	147
8. Conclusions générales et perspectives	149
9. Références bibliographiques	155
10. Annexes	173

Liste des figures

Figure 1. Carte de la République Démocratique du Congo et pays limitrophes (RDC, 2006).....	5
Figure 2. Zones climatiques de la République Démocratique du Congo (Géographie de la RDC, www.wikipédia.org).....	6
Figure 3. Sols récents et ferrallitiques de la République Démocratique du Congo (Fahem, 1978)....	8
Figure 4. Carte de la Province de Kinshasa (De Saint Moulin <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figure 5. Erosion de surface et corrélation de dépôt du système de Kalahari (Marcelino, 1995)....	10
Figure 6. Courbes ombrothermiques et bilan hydrique de la région de Kinshasa: (a) Station de N'Djili et (b) Station de Binza (Koy, 2009).....	13
Figure 7. Carte d'occupation de sols dans la Province de Kinshasa (Musée de Tervuren <i>in</i> Mibeya, 2009).....	14
Figure 8. Processus théoriques mis en jeu pendant le compostage d'après Itävaara <i>et al.</i> (1995 <i>in</i> Albrecht, 2007)	23
Figure 9. Courbe théorique de l'évolution de la température au cours du compostage (Mustin, 1987).....	25
Figure 10. Schéma de l'influence d'apports de matières organiques sur la stabilité structurale (Monnier, 1985 <i>in</i> Bauduin, 1986).	31
Figure 11. Schéma du cycle de l'azote lié à un apport de compost d'après Francou (2003).	33
Figure 12. Localisation des sites d'étude.....	47
Figure 13. Précipitations enregistrées au cours des saisons culturales (2007-2009) dans la Province de Kinshasa (Station de Binza Météo).....	48
Figure 14. Schéma du dispositif expérimental dans les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.	57
Figure 15. Evolution du pH dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	75
Figure 16. Evolution du carbone organique total (COT) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	78
Figure 17. Evolution de l'azote total (N_{tot}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.....	79
Figure 18. Evolution de l'azote organique (N_{org}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	84
Figure 19. Evolution de l'azote minéral (N_{min}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	86
Figure 20. Evolution du phosphore total (P_{tot}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	88
Figure 21. Evolution du phosphore organique (P_{org}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	89

Figure 22. Evolution du phosphore assimilable (P_{ass}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	90
Figure 23. Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	95
Figure 24. Evolution du taux de saturation effective en bases ($ST_{B_{eff}}$) dans le sol en fonction des traitements au cours des quatre saisons culturales.	97
Figure 25. Evolution de la saturation effective en Al ($ST_{eff} Al$) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	99
Figure 26. Evolution du carbone microbien (C_{mic}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	107
Figure 27. Evolution de l'azote microbien (N_{mic}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	110
Figure 28. Evolution de la respiration basale (RB) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	112
Figure 29. Evolution de la respiration induite par substrat (RIS) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	113
Figure 30. Evolution du carbone facilement métabolisable (C_{fm}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	117
Figure 31. Evolution de l'activité enzymatique de l'acide monophosphoesterase (APA) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	119
Figure 32. Evolution de l'activité enzymatique uréase non tamponnée (AU_{nt}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	122
Figure 33. Evolution de l'activité enzymatique uréase tamponnée (AU_t) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.	123
Figure 34. Evolution du rendement relatif en biomasse de l'oseille en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.	135
Figure 35. Evolution du rendement relatif en graines d'arachide en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.	136
Figure 36. Evolution du rendement relatif en graines de soja en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.	137
Figure 37. Efficience agronomique des différents traitements et cultures à la fin de l'expérimentation sur les 3 sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.	139

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés chimiques des 50 premiers centimètres des sols du Plateau des Batéké dans des sites différents (Kasongo <i>et al.</i> , 2009).....	11
Tableau 2. Sommes des précipitations et moyennes des températures de la région de Kinshasa dans deux stations météorologiques (1977-2006) obtenues à partir des données de l'Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite (METTELSAT).....	12
Tableau 3. Caractéristiques chimiques de la couche arable (0-25 cm) et de sous-sol (25-50 cm) du Plateau des Batéké sous jachère d' <i>Acacia auriculiformis</i> A. Cumm. Ex Benth (Koy, 2009).	16
Tableau 4. Composition minéralogique des quelque roches de la province de Bas-Congo (Koy, 2009).....	17
Tableau 5. Paramètres fondamentaux intervenant durant le compostage des déchets (Wass <i>et al.</i> , 1996 ; Damien, 2004; Leclerc, 2001a; Charnay, 2005).	27
Tableau 6. Exemples de la composition de différents composts de déchets, dans quelques villes africaines d'après Farinet et Niang (2004) tiré de Soclo <i>et al.</i> , (1999) pour Cotonou, de Ngnikam <i>et al.</i> (1993) pour Yaoundé, de Farinet et Sow (1997) pour Bakel, et de Farinet et Copin (1994) pour les déchets d'abattoir au Sénégal.....	27
Tableau 7. Composition moyenne des ordures ménagères dans différents pays (Biey, 2001; Francou, 2003; SPW, 2010).	28
Tableau 8. Valeurs limites des ETM dans les composts (mg.kg ⁻¹) destinés particulièrement à l'épandage agricole selon le pays (adapté d'Amlinger, 2004 <i>in</i> Amir, 2005 et Moniteur Belge, 2009).	42
Tableau 9. Coordonnées géographiques des sites et profils texturaux des couches arables.	47
Tableau 10. Composition moyenne de quelques caractéristiques des composts des biodéchets ménagers utilisés au début de chaque campagne culturale et de la fumure minérale selon les caractéristiques du fabricant.	56
Tableau 11. Quantités des composts BDM apportées (t.ha ⁻¹ MB) et d'engrais NPK (kg.ha ⁻¹) au cours de l'expérimentation par saison culturale.....	58
Tableau 12. Quelques caractéristiques physiques des sols des sites étudiés.	62
Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites étudiés à l'état initial.	64
Tableau 14. Valeurs moyennes de carbone & azote microbien, respiration basale & induite par substrat, quotient d'activation respiratoire, quotient métabolique, carbone facilement métabolisable, activité de la monophosphoesterase acide, activité de l'uréase tamponnée & non tamponnée.....	70
Tableau 15. Bilan analytique des apports en carbone organique total par les matières organiques des composts de biodéchets ménagers et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.....	82
Tableau 16. Bilan analytique des apports en azote total par les amendements organiques des composts BDM et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.....	83

Tableau 17. Proportion en % entre les formes azotées pour les résultats moyens de la dernière saison culturale pour les trois sites.....	87
Tableau 18. Proportions entre les formes du phosphore pour les résultats moyens de la dernière saison sur les trois sites de l'étude.....	91
Tableau 19. Bilan des apports en phosphore total par les amendements (organiques, minéraux) et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.....	93
Tableau 20. Comparaison des moyennes à la fin de la quatrième saison des paramètres physicochimiques des sols en fonction des traitements.....	101
Tableau 21. Corrélations entre paramètres physico-chimiques et chimiques choisis pour les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.....	102
Tableau 22. Proportions entre les formes microbiennes et totales du carbone, de l'azote total, du carbone facilement métabolisable comme composante du carbone organique total; et le quotient d'activation respiratoire (Q_R) et le quotient métabolique (qCO_2) en fonction des traitements pour les données moyennes de la dernière saison culturale sur les trois sites.....	125
Tableau 23. Comparaison des moyennes à la quatrième saison des paramètres biologiques en fonction des traitements appliqués dans les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.....	112
Tableau 24. Corrélations entre paramètres microbiologiques et avec quelques paramètres physico-chimiques et chimiques choisis pour les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.....	127
Tableau 25. Comparaison des moyennes des rendements à la quatrième saison pour chaque plante-test utilisée et pour les traitements appliqués sur les 3 sites.....	131
Tableau 26. Apport moyen par traitement et types d'amendements d'éléments fertilisants N, P_2O_5 et K_2O par saison culturale.....	131
Tableau 27. Efficience agronomique (E_a) des composts BDM (en kg MS/t) au cours des saisons culturales en fonction des cultures et traitements à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.....	138
Tableau 28. Efficience agronomique (E_A) des engrais minéraux NPK au cours des saisons culturales en fonction des traitements et cultures dans les trois sites de Kimwenza, au Mont Amba et à Balume en kg MS/t NPK.....	141
Tableau 29. Efficience agronomique apparente des éléments fertilisants (N, P_2O_5 , K_2O) contenus dans les composts en kg MS.kg ⁻¹ de l'élément, à la quatrième saison à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.....	143
Tableau 30. Efficience agronomique apparente des éléments fertilisants (N, P_2O_5 , K_2O) contenus dans les engrais minéraux NPK en kg MS.kg ⁻¹ de l'élément, à la quatrième saison à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.....	144
Tableau 31. Efficience agronomique relative des éléments fertilisants (N, P_2O_5 , K_2O) en % à la quatrième saison culturale à Kimwenza, au Mont Amba et Balume par rapport au traitement T4 (100 kg.ha ⁻¹ NPK).....	146
Tableau 32. Efficience agronomique relative moyenne des éléments fertilisants (N, P_2O_5 , K_2O) en % à la quatrième saison culturale à Kimwenza, au Mont Amba et Balume par rapport au traitement T5 (200 kg.ha ⁻¹ NPK).....	146

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans les villes d'Afrique, les ordures ménagères sont composées en grande partie de matière organique (40 à 90 %). Elles constituent un problème majeur d'hygiène car leur collecte et leur évacuation nécessitent une organisation entre les ménages et les pouvoirs publics qui fait défaut dans beaucoup de cas. Aussi, l'élimination de déchets organiques dans les sites d'enfouissement représente de plus en plus un coût élevé, ainsi qu'un impact négatif sur le milieu (Smith, 1994 *in* N'Dayegamiye *et al.*, 2005). Face à cette situation, les pouvoirs publics doivent trouver des alternatives durables dans la gestion des déchets ménagers.

La ville Province de Kinshasa en République Démocratique du Congo est confrontée à cette situation et connaît ces dernières décennies une démographie de plus en plus galopante. La population de Kinshasa s'élèverait à plus de 7 millions d'habitants (RDC, 2009). La conséquence est l'augmentation importante des déchets solides ménagers qui croît avec la production des biens de consommation. Bien que le tonnage des déchets produits pour l'ensemble de la ville ne soit pas connu avec précision, ces derniers contiennent plus de 65 % de fraction organique biodégradable (Biey, 2001). Cette fraction constitue une source importante de matière organique pour la production de composts lorsque le système de collecte et de séparation des déchets solides ménagers à la source est organisé et mis en place. Il a été démontré que les techniques de compostage (décentralisé et/ou centralisé) offrent beaucoup d'opportunités dans le contexte actuel de la ville de Kinshasa (Mulaji, 2006). Les activités agricoles comme débouchés des matériaux compostés se développent dans la ville et ses environs pour faire face à la demande en produits agricoles et à la crise socio-économique. Plus de 80 % de la population de Kinshasa vit au moins en partie de l'agriculture et la sécurité alimentaire reste et demeure la préoccupation majeure de la population.

En ce 21^{ème} siècle en raison de la croissance de la population africaine, le plus grand défi de l'agriculture et de la production alimentaire est d'atteindre simultanément deux objectifs : (i) la durabilité, en passant par la conservation des sols et de l'eau et (ii) l'augmentation de la production pour satisfaire la population en perpétuelle croissance (RDC, 2005). Cependant, la gestion durable de la fertilité des sols des zones tropicales humides demeure d'actualité, parce que la majorité de la production agricole dans ces sols tropicaux (cas des pays en développement) reste encore basée sur le système traditionnel (de culture itinérante). Il faut également noter que dans ces régions, l'agriculture est essentiellement pluviale et tributaire des aléas climatiques (températures élevées et fortes pluviométries) en plus des conditions édaphiques trop souvent défavorables et du processus pédologique naturel qui aboutit souvent à des sols altérés (acides), continuellement et intensément lessivés (Kanyankogote *et al.*, 2005). Actuellement, la gestion de la fertilité s'intègre de plus en plus dans la maîtrise de la fragilité des sols soumis à une forte anthropisation pour répondre aux besoins alimentaires de la population (Kombele, 2004).

L'accès limité à la terre entraîne et continue de provoquer une surexploitation des sols cultivés conduisant ainsi à une utilisation des terres marginales dans certaines régions. Dans ces conditions, le système de culture traditionnel qui consiste à éliminer la végétation naturelle d'un terrain et à le laisser en jachère après culture pendant au moins 2 à 5 ans devient difficilement applicable. La réduction de la durée de la jachère ne peut être préconisée comme solution efficace par rapport aux conséquences de la pratique de cultures successives sur les sols tropicaux pauvres qui entraînent une dégradation chimique et biologique, limitant la croissance des végétaux (Dabin, 1984; Tian *et al.*, 2001 *in* Koy, 2009). Il en résulte la désaturation du complexe adsorbant et l'acidification plus ou moins forte qui diminuent la fertilité des sols. Les pertes d'éléments nutritifs observées dans ces sols par les récoltes des cultures, par l'érosion et par le lessivage qui ne sont pas remplacées par des apports et l'acidification qui est aussi bien un phénomène naturel né de la pédogénèse, qu'un phénomène provoqué par la mise en culture, conduit inexorablement à une baisse notable des rendements (Voundi, 2001). L'exploitation de tels sols exige le relèvement du pH et de la capacité d'échange cationique, la neutralisation de l'aluminium échangeable et la restauration de la balance cationique, etc. On recourt généralement au chaulage en vue de neutraliser l'acidité, plus particulièrement celle associée à l'aluminium échangeable et d'améliorer d'autres propriétés. Cependant, dans les sols fortement altérés des régions tropicales humides, le relèvement du pH jusqu'à des valeurs de 6 à 7, requiert des apports fréquents en chaux à cause de l'effet tampon relativement faible que présentent ces sols (Kanyankogote *et al.*, 2005).

La Province de Kinshasa est quasi totalement couverte de sols sablonneux hérités des sables de recouvrement du système *Kalahari* (Beau, 1975; Sys, 1983). Ces sols appartiennent au grand groupe des sols *ferrallitiques* (Compère, 1970). Ils sont caractérisés par un stade avancé d'altération, présentent une réaction acide et possèdent une faible réserve (balance) des nutriments (Baert *et al.*, 1991; Marcelino, 1995) qui les rendent marginaux pour l'agriculture (Malele, 2003a). La faible fertilité chimique et la capacité de rétention en eau très limitée constituent des sévères limitations de leur potentiel agronomique. Le lessivage des éléments nutritifs en profondeur est favorisé dans ces sols. Lorsqu'ils sont défrichés et laissés à nu, la décroissance de l'activité biologique est encore plus rapide (Dzaba, 1987).

En République Démocratique du Congo et notamment dans la Province de Kinshasa, c'est sans nul doute la dégradation des terres, c'est-à-dire la perte partielle ou totale de la productivité quantitative et/ou qualitative, ou encore les deux résultant des phénomènes tels que l'érosion des sols, la perte de fertilité des sols, la détérioration de la structure des sols, le déboisement, les méthodes culturales inadéquates et les cultures sur les terres marginales qui est l'impact défavorable le plus important du secteur agricole (RDC, 2005). Généralement, les agriculteurs ou les fermiers ne sont pas informés de l'état de fertilité des sols utilisés. Dans ces

conditions, il est difficile pour les agriculteurs congolais (petits fermiers ou paysans) de pratiquer une agriculture soutenable et financièrement rentable, à cause des faibles capitaux dont ils disposent et des multiples contraintes liées à l'indisponibilité d'utilisation des engrais minéraux ou des amendements commerciaux pour accroître la production. L'accès aux engrais conventionnels hydrosolubles en application régulière est pratiquement impossible dans ces conditions. De plus, l'application exclusive des engrais minéraux n'est généralement efficace que pendant les premières années d'apports continus; on constate en effet une baisse de rendement après quelques années à cause de la dégradation des propriétés des sols (Alvarez, 2005; Nyiraneza *et al.*, 2009 in N'Dayegamiye et Drapeau, 2009). Ainsi, le niveau de matière organique du sol reste le facteur important pour le maintien de la fertilité dans le sol. L'efficacité des engrais minéraux est liée à la quantité de la matière organique dans le sol (Charland *et al.*, 2001; N'Dayegamiye *et al.*, 2005; etc.). L'étude d'Aoyama *et al.* (1999 in Rousseau, 2005) a montré un effet faible ou nul de la fertilisation minérale sur la qualité du sol tandis que l'apport en matière organique (fumier) est associé à une amélioration de la structure du sol et à un stockage de nutriments dans le sol. À part les sols d'origine volcanique, les sols en zones tropicales sont d'habitude peu fertiles et se dégradent relativement vite lorsqu'ils sont mis en exploitation pour la production des cultures annuelles. La FAO (2003) préconise la nécessité de maintenir les taux de matière organique aussi bien que les éléments chimiques de sol en Afrique subsaharienne et ailleurs sous les tropiques, à cause de l'extraction des minéraux par les plantes cultivées et de la décomposition rapide de la matière organique dans le sol sous l'influence de la température élevée.

C'est pourquoi des options alternatives de gestion de la fertilité des sols tropicaux incluant l'usage des ressources naturelles disponibles localement comme les agrominéraux (roches naturelles fertilisantes utilisées en agriculture), les déchets d'agro-industrie et les composts de biodéchets (ménagers) semblent être une nécessité vitale. Dans le contexte de la ville de Kinshasa, la récupération et le recyclage des déchets biodégradables sous forme de composts présenteraient une perspective intéressante et une réponse aux agriculteurs. En outre, le compostage des déchets ménagers apparaît non seulement comme une méthode prometteuse de recyclage mais aussi d'assainissement de ces déchets. Ce procédé (compostage) permet d'hygiéniser les résidus ménagers et de les transformer en humus en une période relativement courte (N'Dayegamiye *et al.*, 2005; Culot, 1996; Culot *et al.*, 1999; Biey, 2001; Charnay, 2005). Les composts des résidus des déchets ménagers valorisés selon les normes environnementales peuvent rapidement améliorer la productivité et la qualité des sols (N'Dayegamiye *et al.*, 2005; Charnay, 2005). C'est pour cette raison que le compostage de résidus (boues des stations d'épuration, déchets verts, déchets industriels et organiques ménagers, déjections animales) triés à la source permet la réduction d'utilisation des fertilisants artificiels d'autant que la quantité des déchets à admettre dans les décharges est en pleine croissance dans plusieurs pays (Ros *et al.*, 2006a; N'Dayegamiye *et al.*, 2005).

Dans une telle perspective, la présente investigation se donne comme objectifs principaux : la valorisation des déchets ménagers par la production des composts d'une part et l'amélioration de la fertilité des sols de la Province de Kinshasa d'autre part. Pour cela, il est indispensable : (i) d'organiser un système de compostage à différentes échelles selon le cas; de connaître les contraintes à la fertilité de sols; (ii) d'étudier l'influence d'apports en matières organiques sur la dynamique de l'activité biologique en relation avec la biodisponibilité d'éléments nutritifs; (iii) apprécier la production des cultures test dues aux apports organiques en fonction des saisons et évaluer l'efficacité agronomique des amendements apportés. Ainsi, cette thèse repose-t-elle sur l'hypothèse que l'amendement en compost des biodéchets ménagers agit et modifie favorablement les propriétés du sol.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- ✚ Généralités sur le milieu physique et description des sites de l'étude
- ✚ Incidences des composts sur des indicateurs chimiques et biologiques des sols

Chapitre 1. Milieu physique et description des sites de l'étude

1.1 Introduction

La République Démocratique du Congo (figure 1) large de ses 2.344.000 km² est un pays au potentiel agricole énorme en Afrique Centrale disposant de 80 millions d'hectares de terres arables réparties dans trois grandes zones agroécologiques : (i) la cuvette alluviale du fleuve Congo au centre, d'une altitude variant entre 300 et 500 m, recouverte par des forêts équatoriales et des marais, peu peuplés; (ii) les plateaux étagés de savanes, qui bordent cette cuvette au Nord et au Sud, d'une altitude variant de 700 à 1200 m; (iii) les massifs montagneux volcaniques à l'Est et au Nord-Est, d'une altitude de 1500 à 5000 m (FAO, 2009). Elle est située entre les latitudes de 5°10' N et 13°00' S et les longitudes de 11°30' et 31°00' E; et limitée au Nord par la République Centrafricaine et le Soudan, à l'Est par l'Ouganda, le Rwanda, le Burundi et la Tanzanie, au Sud par la Zambie et l'Angola, à l'Ouest par le Congo-Brazzaville et l'enclave angolaise de Cabinda (Geodata, 1994 *in* Kombele, 2004).

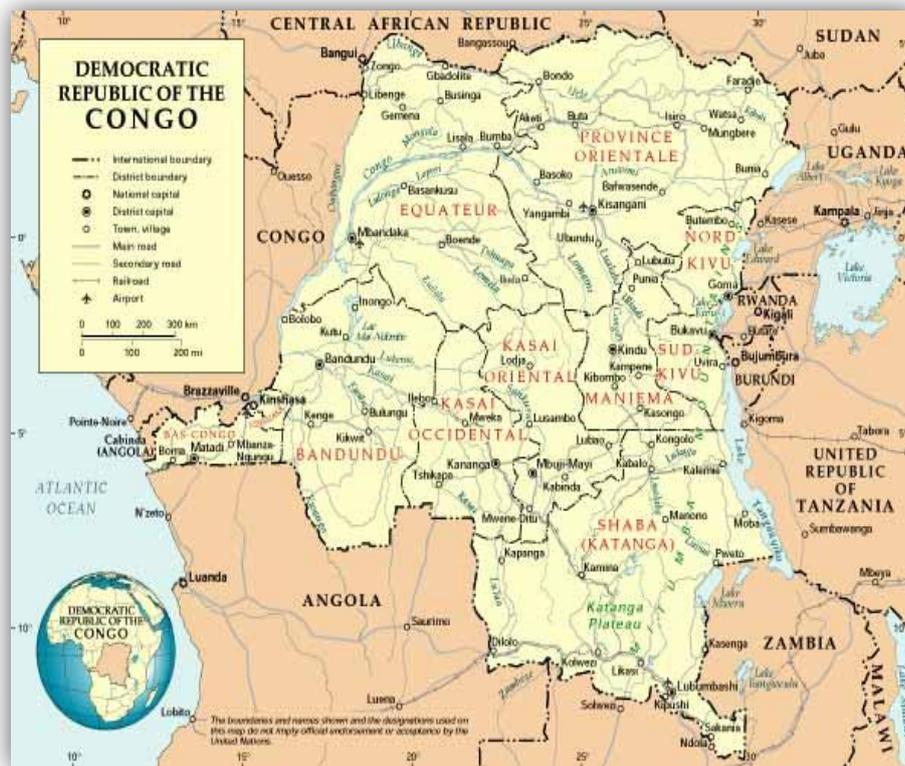


Figure 1. Carte de la République Démocratique du Congo et pays limitrophes (RDC, 2006).

La position de la RDC, à cheval sur l'équateur, lui permet de jouir d'une alternance des climats propice à une production ininterrompue des cultures sur toute l'année et un approvisionnement continu de ses marchés en produits agricoles (Tollens, 2004). Ses conditions climatiques permettent la culture d'un large éventail de productions tropicales.

Bien que les terres agricoles soient, en général, de faible fertilité (Van Wambeke, 1995), l'agriculture demeure l'activité principale de la population. Environ 75 % de la population nationale vivent de l'agriculture (RDC, 2006; FAO, 2009). Malheureusement les terres exploitées annuellement ne couvrent que 10 % des 80 millions d'hectares des terres arables. Cependant, l'agriculture RD Congolaise est essentiellement pluviale et dominée par les cultures vivrières destinées à l'autoconsommation. Elle est en deçà des besoins alimentaires actuels des populations. Le déficit le plus aigu est constaté à Kinshasa. Généralement, l'augmentation de la production agricole se fait par l'accroissement des surfaces cultivées plutôt que par l'accroissement de la productivité des terres (FAO, 2009).

1.1.1 Climat

La République Démocratique du Congo comprend plusieurs zones climatiques dont les caractéristiques différentes créent pour l'agriculture des conditions fort dissemblables. Contrairement à ce qui se passe dans certaines régions du monde (exemple de l'hémisphère nord), où les saisons se distinguent principalement par les variations de la température moyenne, dans la grande partie du territoire de République Démocratique du Congo, la différenciation saisonnière dépend avant tout de la quantité et de la répartition des précipitations atmosphériques (Pain, 1978; Vandenput et Van Den Abeele, 1956). On distingue trois zones climatiques à savoir (figure 2):

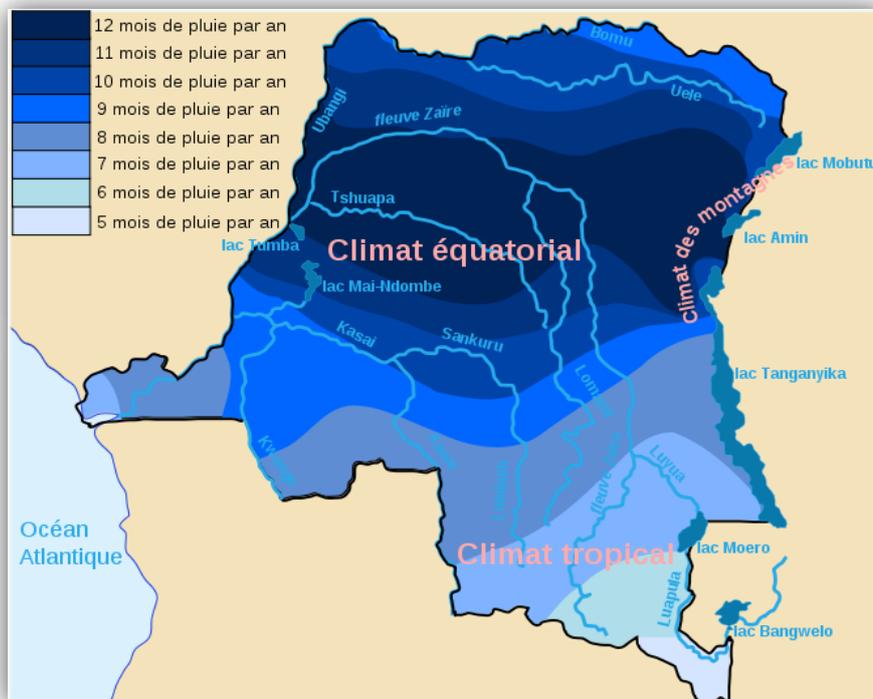


Figure 2. Zones climatiques de la République Démocratique du Congo (Géographie de la RDC, www.wikipédia.org).

La zone équatoriale, à cheval sur l'Equateur, s'étend jusqu'à 2° latitude Nord et Sud. Son climat est chaud et humide, le total des précipitations annuelles est au minimum de 1.500 mm et la température moyenne dépasse 25 °C. L'humidité avoisine le point de saturation.

Les zones tropicales s'étendent au Nord et au Sud de la zone équatoriale jusqu'aux tropiques (23°27 Nord et Sud). L'année est marquée par la saison des pluies (800 à 1.500 mm) ou la saison chaude et la saison sèche ou froide variant de 1 à 3 mois dans le Nord et de 1 à 7 mois dans le Sud. L'humidité relative y est encore élevée (Kinshasa 80 %), mais moindre que dans la zone équatoriale. La température diurne peut monter à 40 °C ne dépassant pas 25 °C la nuit au Nord et descendre dans certaines régions aux environs de 3-4 °C.

La zone relativement tempérée, qui comprend toute la partie orientale, d'une altitude de 500 à 4.500 m, englobe les parties les plus élevées. Cette zone accuse, plus encore que la zone tropicale, de grandes irrégularités dans le régime des pluies.

1.1.2 Géologie

Du point de vue géologique, la République Démocratique du Congo comprend deux régions d'étendues très contrastées. La première dessine une bande étroite, de moins de 100 km de large, qui longe la côte atlantique ; des couches marines mésozoïques et cénozoïques y affleurent. La seconde comprend tout le reste du territoire (Pain, 1978).

1.1.3 Sol de la RDC

Les sols de la République Démocratique du Congo sont extrêmement variés (différentes échelles) : variété de matériel parental et des conditions de développement. Ces sols appartiennent au groupe des sols tropicaux profondément altérés et riches en fer et en alumine, sous l'action d'un climat chaud et humide (Fahem, 1978; Malela, 2003b). On rencontre côte à côte des ensembles de sols très divers, les plus riches sur des surfaces limitées et dispersées, les plus pauvres beaucoup plus étendus (figure 3).

On distingue :

- ✚ (i) les *sols minéraux bruts*, stériles, qui sont localisés sur les affleurements rocheux et des cuirasses affleurantes; et les *sols récents* qui occupent de faibles superficies et apparaissent mal sur les cartes pédologiques à petite échelle de la RDC. Ces derniers sont en général les plus fertiles (selon USDA Soil Taxonomy): sols volcaniques (*andosols*, 0,5 % du territoire national) au pied des monts Virunga, terres noires sur alluvions bien drainées, riches en matières organiques, sols à forte teneur en sels (*aridisols*) et sols hydromorphes (5 %) mal drainés sont étendus dans la cuvette centrale, le long des vallées du fleuve Congo et les cours inférieurs de ses principaux affluents : Lindi, Lomami, Aruwini, Itimbiri, Mongola, Lulonga, Ikelemba, Ruki, Oubangui, Giri, Moeko; et sur les rives des lacs.

- ✚ (ii) les *sols ferrallitiques*. On distingue : - les *ferrisols* (14 %) à pédogenèse active, localisés sur les roches de Karoo, dans la grande vallée de Kwango et du Kasai, au Maniema, au Nord-Est de la cuvette, au Kivu et au Bas-Congo; - les *ferralsols* (53,5 %) riches en argiles (> 20 %) mais à réserves minérales faibles et à pédogenèse arrêtée. Ils occupent une grande surface dans toute la périphérie du pays. Sous forêt dense, ils peuvent avoir une certaine fertilité. Enfin, les *arenoferrals* (26 %), profondément lessivés, sont des sols sableux à faibles teneur en argile < 20 %, très acides; ils recouvrent plus de ¼ du pays aussi bien sous forêt dense que sous savane ou forêt claire au Kwango, Kwilu, Kasai, Katanga, ainsi que sur les plateaux littoraux.

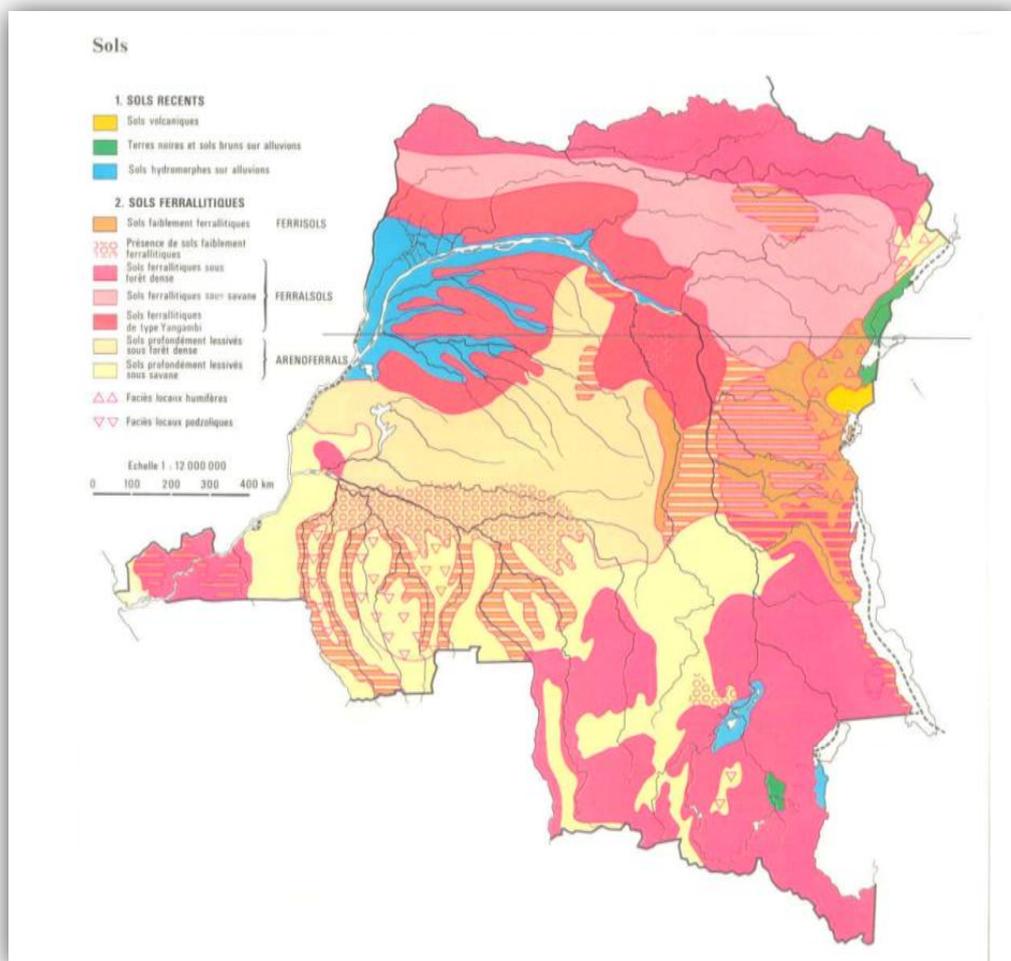
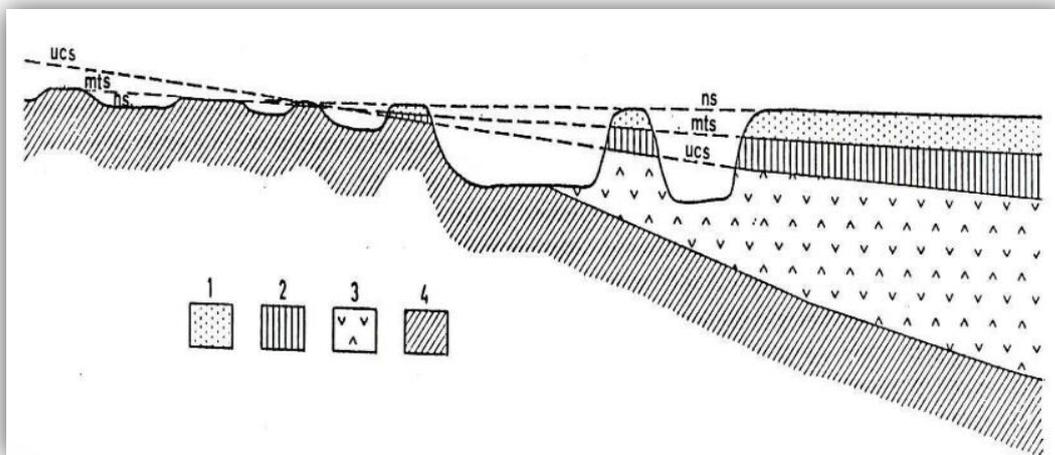


Figure 3. Sols récents et ferrallitiques de la République Démocratique du Congo (Fahem, 1978).

Il ressort de la figure 3 que les sols de la Province de Kinshasa se classent dans les sols *ferrallitiques* pauvres ou les *arenoferrals* (*arenoferralsols*) dont les caractéristiques sont décrites dans la section 1.2.2 (Legros, 2007; WRB, 2006).

Le *mésozoïque* couvre le *cénozoïque* (ou le *secondaire*) recouvrant du *tertiaire* en légère discordance dans les collines les plus élevées et sous le Plateau des Batéké. Sa base ou « série de grès polymorphes » est formée de sables blancs d'âge *paléogénique*, comportant d'importantes quantités de grès siliceux (quartzitiques) facilement mobilisables pouvant atteindre 80 à 120 m d'épaisseur (figure 5). Cependant, la partie supérieure « série d'ocres » appartenant au *néogène* est formée essentiellement de sables fins peu argileux sans stratification apparente (ocres ou bruns, décolorés en surface d'origine fluviale) (Pain, 1984). Au cours du *quaternaire*, les processus d'érosion (figure 5) devenant plus dynamique que la sédimentation et le climat jouant un rôle prépondérant, les alluvions occupent les parties basses et les fonds des vallées.



ns = neogene surfaces; mts = middle Tertiary; ucs = upper cretaceous surfaces, 1 = series of “sables ocre”, 3 = mesozoic deposits, 2 = series of “grès polymorphes”, 4 = precambrian deposits

Figure 5. Erosion de surface et corrélation de dépôt du système de Kalahari (Marcelino, 1995)

1.2.2 Sols de Kinshasa

D'après Sys *et al.* (1961), les sols de Kinshasa sont classés selon l'ordre des *kaolisol*s, sous-ordre des *hydro-xerokaolisol*s et grand groupe des *arenoferrals*, classification type des sols du Congo. Ce sont des sols qui ont été développés sur les sables ocres communément appelés « système de Kalahari », produits de l'érosion des collines et du démantèlement du plateau. Ces sols sont constitués par des couches de sables fins souvent de couleur ocre jaune parfaitement homogénéisés, dépourvus de stratification; avec une teneur en argile généralement < 20 %. La teneur en matière organique et le degré de saturation du complexe adsorbant y sont faibles. Pour la Province de Kinshasa, très peu de données disponibles existent sur la caractérisation chimique et biologique des sols en vue d'évaluer leur fertilité.

Les données récentes ont été obtenues par Kasongo *et al.* (2009) dans la région du Plateau des Batéké dans trois sites qui sont indiqués dans le tableau 1 ci-dessus. L'analyse

granulométrique des sols étudiés selon le triangle textural de l'*USDA* de tous les profils a montré une texture essentiellement sableuse (> 90 %), laquelle devient un peu plus fine dans l'horizon Bws (sable-limoneux). Les profils observés sont des *arénosols* dotés des propriétés « *ferraliques* » classifiés comme *rubiques ferraliques arénosols (dystriques)*. La similarité de la composition texturale des différents profils confirme davantage l'uniformité des conditions de formation des sols.

Tableau 1. Propriétés chimiques des 50 premiers centimètres des sols du Plateau des Batéké dans des sites différents (Kasongo *et al.*, 2009).

Caractéristique	Sols de Mampu		Sols de Mbankana		Sols de Kinzono	
	0-25 cm	25-50 cm	0-25 cm	25-50 cm	0-25 cm	25-50 cm
pH-H ₂ O	5,25	5,10	4,90	5,02	5,27	5,03
pH-KCl	4,31	4,30	4,18	4,38	4,40	4,20
C.O (%)	1,04	0,96	0,85	0,60	1,15	0,72
N _{tot} (%)	0,05	0,07	0,04	0,04	0,06	0,04
C/N	21	14	21	15	19	18
P _{dis} (mg.kg ⁻¹)	14	5	13	7	16	12
*Ca _{éch}	0,26	0,10	0,22	0,09	0,26	0,16
*Mg _{éch}	0,09	0,04	0,08	0,05	0,11	0,06
*K _{éch}	0,04	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01
*Na _{éch}	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
*Al _{éch}	1,21	0,99	1,35	1,19	1,43	0,85
*CECE	1,62	1,15	1,69	1,39	1,43	1,05
*CEC _{Ac-NH4(pH 7)}	2,81	2,11	2,73	1,63	3,07	2,25
Sat.Al (%)	75	87	80	88	72	81
T (%)	15	08	13	11	13	11
**Mn	71,9	nd	75,0	nd	70,3	nd
**Fe	68,0	nd	70,4	nd	65,7	nd
**Zn	17,0	nd	16,2	nd	13,4	nd
**Cu	2,05	nd	2,08	nd	2,12	nd

*= exprimé en $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$; **= exprimé en $\text{mg}. \text{kg}^{-1}$; T= taux de saturation ; nd= non déterminé

Les résultats chimiques indiquent probablement une toxicité aluminique et les valeurs de pH sont < 5,30. Les valeurs de carbone organique total et de l'azote total obtenues sont inférieures respectivement à 1,2 et 0,1 %. La teneur en phosphore assimilable (Bray 2) varie de 5 à 16 $\text{mg}. \text{kg}^{-1}$ et la CEC des sols quel que soit l'horizon considéré est faible < 5 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ indiquant que ces sols ont une capacité de stockage des nutriments limitée (Koy, 2009). Selon la WRB (2006), ces sols qualifiés de « *dystriques* » sont moins fertiles et ont des taux de saturation en bases faibles qui varient de 12 à 15 %.

1.2.3 Caractéristiques climatiques de la Province de Kinshasa

La Province de Kinshasa se trouve dans la zone climatique de basse altitude, caractérisée par un climat tropical chaud et humide de type *AW4* suivant la classification de Köppen (Bultot,

1954 *in* Compère, 1970). On y observe une alternance de deux saisons : une sèche de juin à mi-septembre et une pluvieuse de mi-septembre à la fin du mois de mai.

La variation de la température moyenne d'un mois à un autre est faible (tableau 2). Les mois de l'année les plus chauds sont février, mars et avril ($\pm 25,5$ °C) et le plus frais est juillet (22,1°C); avec une amplitude thermique annuelle de 9,45 °C.

Tableau 2. Sommes des précipitations et moyennes des températures de la région de Kinshasa dans deux stations météorologiques (1977-2006) obtenues à partir des données de l'Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite (METTELSAT).

Mois	Kinshasa-N'Djili		Kinshasa-Binza	
	P (mm)	T °C	P (mm)	T °C
Janvier	168,6	26,5	175,1	25,7
Février	147,7	27	151,2	26,1
Mars	188,4	27,3	196,8	26,5
Avril	211,6	27,3	208,3	26,5
Mai	142,5	26,5	146,4	25,7
Juin	7,5	24,2	0	23,7
Juillet	1,6	23,2	1,8	22,5
Août	6,6	24,3	6	23,5
Septembre	35,4	26	34,1	25
Octobre	149,7	26,4	145,8	25,6
Novembre	259,6	26,4	261,8	25,5
Décembre	183,8	21,4	193,7	25,5
Annuelle	1498	26	1527	25,1

L'humidité relative moyenne est élevée, atteint sa valeur maximale de 88,1 % en décembre et son minimum 76,4 % septembre.

Les précipitations de la Province de Kinshasa sont abondantes et inégalement réparties durant l'année (tableau 2 et figure 6) : pratiquement nulles pendant la saison sèche, de juin à septembre, elles passent par deux maxima, l'un en novembre et l'autre en avril avec un minimum secondaire en janvier-février correspondant à une petite saison sèche de 2 ou 3 semaines (Compère, 1970). Cette répartition permet la pratique de deux saisons culturales : saison A d'octobre à janvier et saison B de février à juin.

La précipitation annuelle de la Province de Kinshasa varie entre 1300 et 1600 mm, avec une distribution bimodale. Les dates du début et de la fin de la saison pluvieuse varient grandement d'une année à l'autre. Crabbe (1980 *in* Koy, 2009) a constaté les dates suivantes pour le début et la fin de la saison sèche dans la Province de Kinshasa : (i) début, 28 mai (moyenne) et entre le 12 mai et 22 juin (extrêmes); (ii) fin, 21 septembre (moyenne) et entre le 1^{er} septembre et le 12 octobre (extrême).

Dans la Province de Kinshasa, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est de l'ordre de 1250 à 1310 mm et deux maxima sont observés, l'un au début d'octobre et l'autre en fin mars (figure 6). D'après Koy (2009) le bilan hydrique basé sur la capacité de rétention d'eau de 100 mm par le sol montre que la précipitation n'excède pas l'ETP d'octobre en mai. Un surplus net d'eau est observé de novembre en mai, alors que durant les mois de juillet, août et septembre, les sols sont déficitaires.

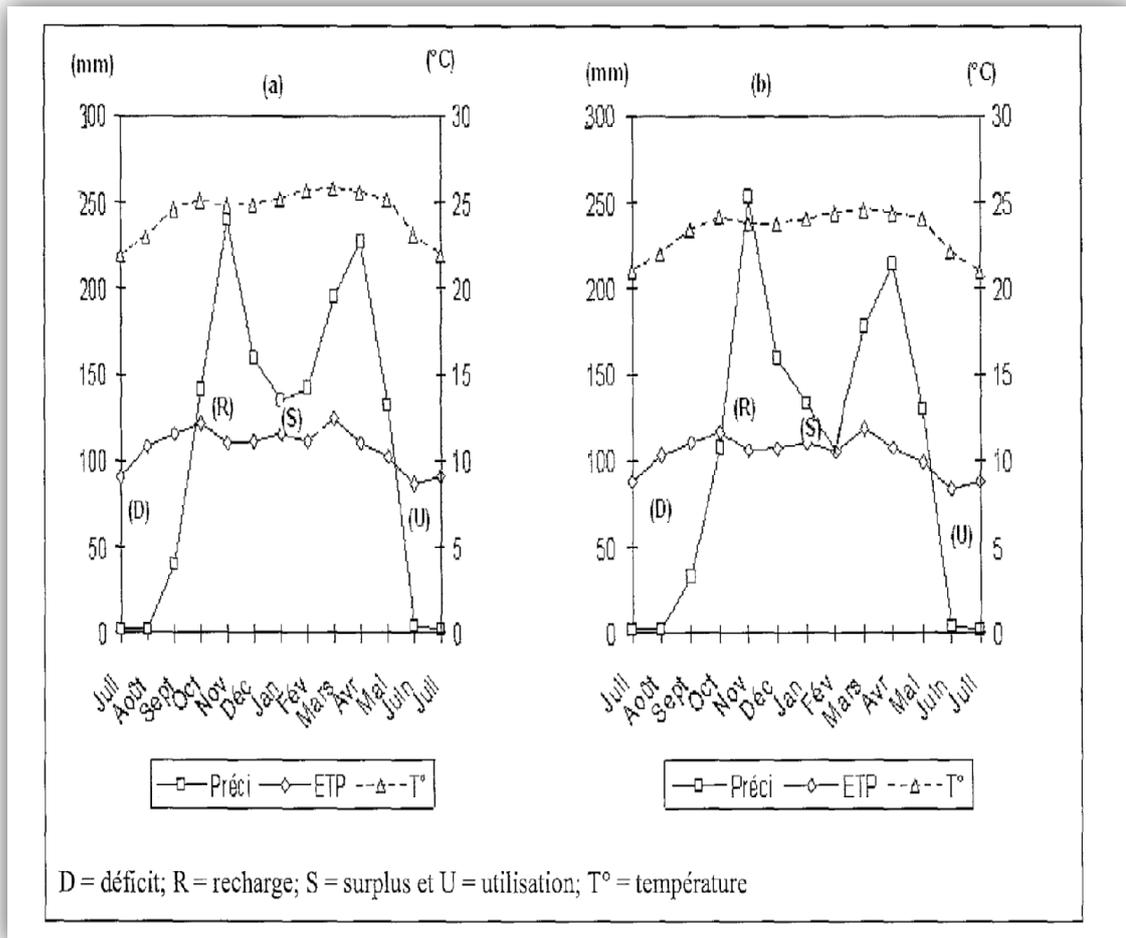


Figure 6. Courbes ombrothermiques et bilan hydrique de la région de Kinshasa: (a) Station de N'Djili et (b) Station de Binza (Koy, 2009).

1.2.4 Végétation de la Province de Kinshasa

La végétation naturelle se trouve actuellement localisée dans les régions des collines et sur le Plateau du Kwango à cause de la pression liée à l'urbanisation (figure 7). Deux types de végétation prédominent, les galeries forestières et les savanes plus dominantes principalement dans la région du Plateau des Batéké.

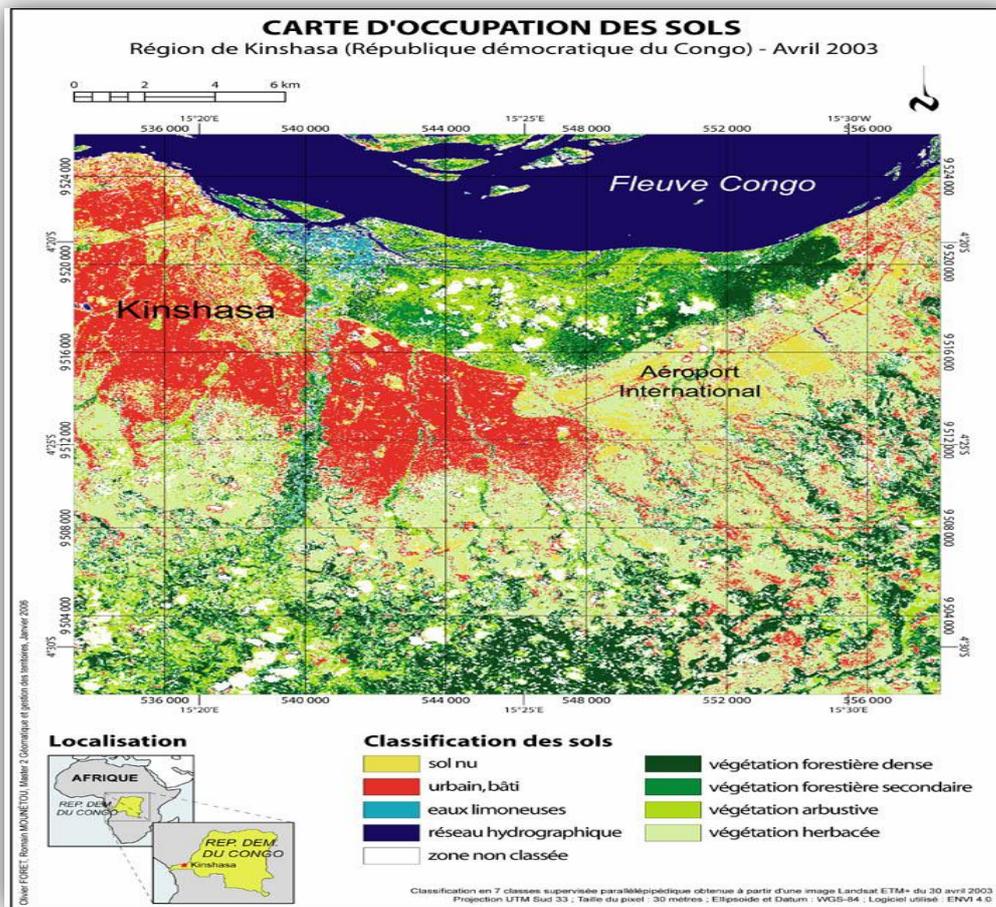


Figure 7. Carte d'occupation de sols dans la Province de Kinshasa (Musée de Tervuren *in* Mibeya, 2009).

Les galeries forestières sont présentes dans les parties marécageuses des dépressions circulaires et aux bords des rivières dans les fonds des vallées. Les espèces les plus importantes sont : *Standtia stipitata* Niove, *Milletia laurenti* De Wild, *Pentacletra eetveldeana* De Wild, *Strychnos variabilis* De Wild et *Quassia africana* Baill. Les forêts sont fondamentalement développées dans les sables couverts de la litière à décomposition rapide (Baert *et al.*, 1991).

Les savanes couvrent une grande partie des sols du Plateau de Batéké. On distingue deux faciès : la savane arbustive et la savane herbeuse (Pauwels et Nzayilu, 1993; Lubini, 1997). La savane arbustive généralement à la limite de la savane-forêt dans les dépressions des vallées dont les plus importants sont : *Hymenocardia acida* Tul., *Crossopterix febrifuga* (Afzel) Benth., *Pterocarpus angolensis* D.C., *Combretum psidioides* Welw, *Strychnos pungens* Solerader, *Strychnos cocculoides* Baker, *Paropsia brazzeana* Baill., *Albizia adifianthifolia*, *Anona arenaria* Thonn, *Syzygium macrocarpum* Eng. Quelques arbres y sont également trouvés : *Dialium englerianum* Henriq, *Erythropheum africanum* (Welw) Harms et *Ochna afzelii* Stem Bark (Ladmirant, 1964). La savane

herbeuse couvre la partie sableuse de la zone. Elle est composée principalement des espèces : *Loudetia demeusi* (De Wild) Hubbard, *Hyparrhenia diplandra* (Hack) Stapf., *Ctenium newtonii* Hack, *Trachypogon thollinii* (Franch) Stapf., *Digitaria brazzæ* (Franch) Stapf., *Digitaria uniglumis* (Rich) Stapf., et *Afromomum alboviolaceum* (Ridley) K. Shum, *Sporobolus africana* (Poir) Robyns & Tournay et *Rhynchalytrum roseum* (Nees) Stapf. & Hubb., etc.

1.2.5 Valeur agricole et utilisation de la terre

Les sols de la Province de Kinshasa ont une valeur agronomique assez limitée et sont marginaux, à cause de leur pouvoir de rétention en eau faible et de leur valeur de fertilité chimique bas (Malele, 2003a). Leur utilisation varie largement avec le type de sol et des cultures pratiquées (Koy, 2009). En général, au Plateau des Batéké les sols sont utilisés pour la culture annuelle du maïs (*Zea mays* L.), du manioc (*Manihot esculenta* Crantz), de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) comme cultures les plus importantes et du soja (*Glycine max* L. Merr). Les sols des dépressions fermées n'ont pratiquement aucune valeur agricole, ils sont sporadiquement utilisés pour la culture de l'arachide.

En vue d'augmenter le potentiel agronomique des sols de Kinshasa principalement dans la région du Plateau des Batéké au Nord Est dans le secteur de Mampu-Mbakana, le gouvernement de la RDC avec l'appui de l'Union Européenne et de la fondation Hanns-Seidel, a introduit un système d'« agroforesterie ». L'*Acacia auriculiformis* A. Cumm ex Benth s'est avéré la légumineuse la mieux adaptée aux conditions édaphique et climatique de la région (Koy, 2009). Les forêts d'*Acacia* constituées sont exploitées en utilisant le système de rotation (jachère) et la technique de culture sur brûlis. La période de rotation varie de 8 à 17 ans. Elle est suffisamment longue pour la restauration de la fertilité du sol et permettre une culture annuelle continue. La fertilisation minérale n'est pas généralisée dans le système agricole de Kinshasa. Le tableau 3 donne une illustration de la durée de la jachère sous *Acacia* sur les propriétés chimiques des sols du Plateau des Batéké (Koy, 2009).

Chez les maraîchers, l'usage des fumiers de ferme et des déchets ménagers bruts est assez répandu dans les périmètres de maraîchage dans le centre de Kinshasa (à Lemba échangeur, Bandal mollard, Limete Funa, etc.) et la périphérie (Kimwenza, N'Djili Brasserie, CECOMAF) pour la production des légumes feuilles tels amarante (*Amaranthus hybridus* L.), oseille (*Hibiscus sabbariffa* L.), pointe noire (*Brassica pekinensis* Lour.), patate douce feuilles [*Ipomoea batatas* (L.) Lam], ciboule (*Allium fistulosum* L.), épinard (*Basella alba* L.), etc. et des légumes fruits tels que le gombo [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench], l'aubergine (*Solanum melongena* L.), la tomate (*Solanum lycopersicum* L.), le piment (*Capsicum annum* L.), etc. (Muzingu, 2010; Makumbelo *et al.*, 2002).

Tableau 3. Caractéristiques chimiques de la couche arable (0-25 cm) et de sous-sol (25-50 cm) du Plateau des Batéké sous jachère d'*Acacia auriculiformis* A. Cumm. Ex Benth (Koy, 2009).

Jachère (année)	pH (1 :2,5)		Corg%.....	Ntot	C/N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB ⁱ	Al ³⁺	CEC ⁷ⁱⁱ
	pH _{H2O}	pH _{KCl}										
Sol de surface (0-25) cm												
0 ⁱⁱⁱ	4,97 _c	4,30 _b	0,86 _a	0,05 _a	19 _b	0,24	0,09	0,04	0,02	0,39	1,03	2,5
4	4,72 _b	4,20 _{ab}	1,16 _b	0,08 _b	15 _b	0,29	0,10	0,01	0,04	0,44	1,26	3,0
8	4,66 _{ab}	4,15 _{ab}	1,87 _c	0,18 _c	11 _a	0,29	0,12	0,01	0,01	0,43	1,40	3,3
10	4,61 _{ab}	4,18 _{ab}	1,97 _d	0,19 _c	10 _a	0,65	0,14	0,05	0,01	0,84	1,27	4,0
17	4,51 _a	4,12 _a	2,92 _e	0,28 _d	10 _a	0,68	0,20	0,02	0,03	0,93	2,00	4,8
Sous sol (25-50 cm)												
0 ⁱⁱⁱ	4,89 _b	4,27 _b	0,77 _a	0,04	19 _b	0,08	0,04	0,01	0,01	0,14	0,85	2,0
4	4,78 _{ab}	4,18 _{ab}	1,03 _b	0,08 _b	13 _a	0,16	0,01	<0,01	<0,01	0,17	0,89	2,5
8	4,78 _{ab}	4,20 _{ab}	0,97 _b	0,08 _b	12 _a	0,21	0,01	<0,01	0,03	0,25	0,98	2,9
10	4,65 _a	4,15 _a	1,00 _b	0,08 _b	13 _a	0,38	0,03	0,02	<0,01	0,45	0,83	2,3
17	4,40 _a	4,10 _a	1,31 _c	0,10 _b	13 _a	0,02	0,02	0,01	0,01	0,47	1,30	4,5

ⁱ Somme des bases ; ⁱⁱ CEC au pH 7,0 (NH₄OAc 1M) ; ⁱⁱⁱ correspond à la savane ; les moyennes suivies des différentes lettres au sein d'une colonne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$).

1.2.6 Ressources potentielles d'amélioration de la fertilité des sols

L'utilisation des ressources naturelles locales disponibles comme amendements naturels doit être encouragée comme une alternative de gestion intégrée et adaptée de la fertilité des sols, susceptible d'améliorer leur productivité par l'intensification de la production agricole. La Province de Kinshasa présente quelques potentialités en ressources locales pouvant être utilisées dans l'amélioration de la fertilité des sols. C'est le cas des déchets des sociétés agroalimentaires (tourteaux des brasseries, parche de café, etc.), les déchets d'ordures ménagers, les agrominéraux, fumiers de fermes, etc. Certaines de ces ressources sont connues et exploitées par les agriculteurs, mais offrent une disponibilité limitée. Dans beaucoup de cas, ces ressources ne sont pas exploitées, à cause de leurs coûts prohibitifs ou tout simplement de leur méconnaissance (Ruganzu, 2009).

1.2.6.1 Agrominéraux

Certains agrominéraux ou matériaux géologiques représentent une ressource potentielle d'amendements minéraux pour la production agricole. Ce sont des roches et minéraux pourvoyeurs de nutriments : roches phosphatées, sels d'azote et de potassium, roches silicatées basiques, roches calcaires, dolomie agricole, etc. La Province de Bas-Congo voisine de Kinshasa possède les agrominéraux (la dolomie rose, la roche verte, le phosphate, etc.) susceptibles d'être utilisés dans la fertilisation des sols (Koy, 2009).

Koy (2009) a montré que ces ressources sont susceptibles de libérer les nutriments requis pour la croissance des plantes une fois appliquées aux sols tropicaux pauvres. Le tableau 4 ci

dessous donne la composition chimique moyenne de quelques agrominéraux de la province de Bas-Congo (Koy, 2009).

Tableau 4. Composition minéralogique des quelque roches de la province de Bas-Congo (Koy, 2009).

Paramètres analysés	Dolomie rose (Kimpese)	Roche verte (Gangila)	Phosphate (Kanzi)
SiO ₂ (%)	6,44	42,82	37,80
Al ₂ O ₃ (%)	1,55	16,17	9,22
Fe ₂ O ₃ (%)	0,79	14,88	4,69
CaO (%)	30,25	7,51	14,44
MgO (%)	16,99	10,46	0,13
Na ₂ O (%)	0,64	2,55	0,29
K ₂ O (%)	0,09	0,09	0,52
P ₂ O ₅ (%)	0,16	0,23	21,99
pH-H ₂ O	10,5	8,7	5,7
Cd (mg.kg ⁻¹)	nd	nd	1,83
Pb (mg.kg ⁻¹)	nd	nd	1,26
Cr (mg.kg ⁻¹)	nd	nd	51

nd : non déterminé

La disponibilité de ces ressources reste limitée aux agriculteurs (paysans & maraîchers) en fonction de la distance du lieu de prélèvement, aux moyens et surtout de leurs méconnaissances.

1.2.6.2 Fumier de ferme

Depuis bien longtemps, le fumier est connu comme l'une des voies efficaces d'amélioration de la fertilité et de la production des cultures dans les sols tropicaux (Dennison, 1961 *in* Kihanda *et al.*, 2006). Il constitue une source de nutriments (N, P, K). La composition et la valeur fertilisante du fumier sont variables en fonction de l'espèce animale, de la qualité du fourrage et de la litière, ainsi que des conditions de fermentation et de conservation (Leclerc, 2001a).

Son utilisation est la plus courante en zone de maraîchages. Comme partout en Afrique, la production du fumier est surtout réalisée dans des petites fermes où le bétail est mis et nourri à l'étable dans le but d'en récolter un maximum de matières fertilisantes en faveur des cultures vivrières. La quantité produite dépend de la taille du bétail et du système d'élevage. Cet élevage est basé sur les bovins, les ovins, les caprins, les porcins, les lapins et la volaille. Le nombre d'animaux diffère d'une ferme à une autre, suivant les possibilités de les entretenir. Par ailleurs, la disponibilité du fumier est de plus en plus limitée par rapport au nombre d'exploitants et des têtes de bétail rendant insuffisant tout système d'intensification de l'agriculture (Ruganzu, 2009; Muzingu, 2010); ce qui oblige à recourir à des voies alternatives complémentaires.

1.2.6.3 Epandage des déchets organiques et compost.

L'épandage des déchets d'ordures ménagères en agriculture est très répandu en Afrique de l'Ouest et à Kinshasa (Waas *et al.*, 1996; Nzuzi, 1999; Muzingu, 2010). Ce sont les maraîchers urbains et péri urbains qui s'adonnent à cette forme de valorisation sans compostage. Cette pratique bien que bon marché, entraîne par ailleurs de sérieux inconvénients. Elle peut être responsable d'une diminution de la productivité agricole des sols par l'immobilisation momentanée de l'azote minéral par les microorganismes responsables de la dégradation de la matière organique dans la mesure où le rapport C/N est élevé. Elle comporte également des risques de propagation de certaines maladies cryptogamiques, de certains rongeurs, et des risques de contamination importante par les graines de mauvaises herbes. En outre, ces déchets frais ont été en contact avec diverses matières et peuvent être contaminés par les métaux lourds. D'un point de vue hygiénique, ils risquent de propager des maladies pouvant s'introduire dans la chaîne alimentaire (Culot *et al.*, 1999; Muzingu, 2010).

Le compost est obtenu par compostage des déchets organiques. Dans le cas des biodéchets ménagers, le compostage est adapté aux pays en développement du fait de la proportion importante de matière organique contenue dans les déchets urbains et de la volonté de réduire le gisement entrant en décharge (Charnay, 2005). De plus, ce traitement permet l'obtention d'un amendement organique indispensable au sol, le compost. L'utilisation des composts dans la fertilisation des sols n'est pas très développée à Kinshasa par manque d'un système de gestion globale des déchets tant au niveau de la mairie que des municipalités (Mulaji, 2006). La richesse en matière organique (> 65 %) (Biey, 2001) et la quantité des déchets produits dans la ville de Kinshasa offrent une bonne opportunité d'utilisation des composts dans la fertilisation des sols. Le gisement généré par les déchets ménagers à Kinshasa est estimé à 3,5 mille tonnes par jour (Nzuzi, 2008). Le tri à la source et la collecte sélective des biodéchets permet d'obtenir un matériau valorisable par compostage en produisant un amendement organique de qualité (Leclerc, 2001b).

1.3 Conclusion partielle

La population africaine vit essentiellement de l'agriculture, et les sols constituent la base de leur survie. Malheureusement, la majorité des sols sous climats tropicaux possèdent des facteurs limitants majeurs pour la croissance des cultures, en raison du déséquilibre de la balance exportation-restitution des nutriments et des conditions pédoclimatiques de la région, lesquelles accélèrent la dégradation de la fertilité chimique des sols.

Les facteurs majeurs qui affectent la production agricole dans la Province de Kinshasa sont ceux liés aux conditions géomorpho-pédologiques du fait que la quasi-totalité des sols est sableuse et anthropisée. L'intensification des activités humaines notamment le déboisement et la pratique des méthodes culturales inadéquates affecte davantage le stock en matière

organique de l'horizon bioactif du sol, qui entraîne la dégradation de la structure des sols et par conséquent, occasionne l'érosion et la baisse de la fertilité des sols. La faible teneur en matière organique, principale source de carbone et de réserve nutritive et pourvoyeur d'un complément de la CEC constitue la grande limitation édaphique pour la productivité des sols. Le recours aux amendements minéraux synthétiques, comme le chaulage, généralement en grande quantité pour relever le pH et maintenir la production agricole ne semble pas être une solution efficace vu les conditions socio-économiques des agriculteurs et à cause de l'effet tampon faible que présentent ces sols. De plus, la mise en jachère est longue et ne donne pas des résultats satisfaisants à cours terme.

L'exploitation de ces sols exige un relèvement de la matière organique disponible capable d'apporter des éléments minéraux essentiels et améliorer les propriétés physico-chimiques et biologiques de ces sols. Il existe plusieurs types de matières organiques susceptibles d'être apportées aux sols. Cependant, la voie consistant à diversifier les ressources organiques disponibles localement et à moindre coût mérite d'être explorée. C'est le cas des composts de biodéchets ménagers. La valorisation de la matière organique des déchets domestiques sous forme de composts doit être intégrée comme mode de gestion dans la relance de la fertilisation de ces sols. Cette pratique de recyclage des résidus domestiques par compostage n'est pas très répandue à Kinshasa. Le chapitre suivant donne quelques informations essentielles sur l'impact d'apport de matières organiques des composts aux sols.

Chapitre 2. Incidences de matière organique des composts sur des indicateurs biologiques et chimiques des sols

2.1. Introduction

Les matières organiques sont des constituants complexes du sol. Elles peuvent être classées en trois compartiments distincts dans les sols cultivés (Leclerc, 2001a) : la matière organique vivante, végétale, animale et micro-organismes, qui englobe la totalité de la biomasse en activité; la matière organique morte mais fraîche (figurée), débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et d'origine animale (déjections et cadavres); et l'humus (matière organique amorphe), dû à la recombinaison des déchets en dégradation et représentant toutes les autres formes de matière organique liées à la fraction minérale du sol, et plus ou moins résistantes à la biodégradation. L'humus est la fraction la plus importante qui assure la formation du complexe argilo-humique et la micro-agrégation des sols. La fraction des autres compartiments, dite labile, est constituée de carbone organique jeune et est reliée à la macro-agrégation des sols, à leur capacité de minéralisation et à leur activité biologique (Quenum *et al.*, 2004).

La matière organique est d'une importance fondamentale dans la durabilité pour la fertilité des sols et donc pour une production agricole durable, du fait de ses effets physiques, chimiques et biologiques (FAO, 2005; Farinet et Niang, 2004; Tejada *et al.*, 2008a). Son influence sur les propriétés du sol dépendra de la quantité et du type de matière organique ajoutée (Tejada *et al.*, 2009b). Pour certains auteurs, la matière organique, et plus particulièrement l'humus, serait un facteur de sécurité et d'économie dans la production végétale. Le taux de matière organique d'un sol serait l'un des indicateurs les plus sensibles de son évolution. Un sol cultivé vieillit inéluctablement car, que la culture soit intensive ou non, les pertes par minéralisation de matières organiques sont toujours supérieures aux apports des cultures par rapport à celles des végétations naturelles (FAO, 2005; Chaussod *et al.*, 1992). Les méthodes dites modernes de fertilisation et de travail du sol, conjuguées à une intensification parfois mal maîtrisée (monoculture, abandon des jachères), accélèrent ce vieillissement de l'humus. L'apport de la matière organique au sol revêt alors une dimension capitale. Son intérêt se mesure cependant à long terme, selon son aptitude à se transformer en humus (forme stable de cette transformation). Outre l'amendement des sols cultivés, la matière organique peut sous certaines conditions être utilisée pour remplacer le sol. Elle doit dans ce cas présenter des caractéristiques physico-chimiques bien particulières, qui la rendent compatible avec la germination des semences et les premiers stades de développement des plantes. Une des sources potentielles de restitution de la matière organique au sol est le compost, qui peut être obtenu par compostage des déchets de diverses origines. Dans le cas de notre étude, nous allons nous intéresser plus au compost des biodéchets ménagers.

2.2. Compostage des déchets

Les déchets solides ménagers constituent un gisement de matières organiques fraîches et transitoires, précurseurs de l'humus. Ils contiennent également des composés minéraux sous diverses formes, qui peuvent contribuer à la fertilisation des sols. Pour les déchets urbains, s'ils sont collectés séparément après le tri des ordures ménagères, les matières organiques recyclables permettent de produire une matière organique de grande qualité pour l'agriculture et l'horticulture.

Définition et mécanismes impliqués

Il existe de nombreuses définitions du compostage dans la littérature, mais une définition très générale pourrait être, le compostage est un procédé biologique aérobie de dégradation et de transformation de la matière organique permettant d'obtenir un produit valorisable à partir d'un déchet. De façon précise, le compostage est défini comme « un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobie, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost » (Francou, 2003).

Le processus de compostage est souvent comparé à celui de l'humification naturelle des résidus organiques en substances humiques dans les sols mais est en fait assez différent. Le compostage accélère la transformation biologique aérobie de la matière organique impliquant la formation de substances humiques et engendrant un produit stable, le compost

Généralement, il existe deux types de compostage, en présence de quantités suffisantes d'oxygène ou avec carence d'oxygène. La nature du processus de décomposition y est directement liée. Lors de carences en oxygène (O_2), les micro-organismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires tels que des acides gras volatils, du méthane (CH_4), du sulfure d'hydrogène (H_2S) et quelques autres substances spécifiques des fermentations anaérobies. En l'absence d'oxygène, ces composés ne sont pas métabolisés et s'accumulent. Un grand nombre de ces composés présentent de forts pouvoirs olfactifs et certains d'entre eux peuvent entraîner une phytotoxicité lors de l'épandage des composts obtenus dans ses conditions comme amendements organiques. Le compostage avec des poches anaérobies est un processus s'effectuant à basse température; ainsi, les graines d'adventices et les pathogènes ne sont pas affectés et nécessite davantage de temps pour être détruits qu'en cas de compostage parfaitement en présence d'oxygène (Albrecht, 2007). Ces inconvénients contrebalancent fortement les avantages de ce procédé et notre étude a porté sur le compostage aérobie, bien que certaines études (He *et al.*, 2000 & Beck-Friis *et al.*, 2001 *in* Albrecht, 2007) aient rapporté la présence possible de zones anaérobies dans un compost dit « aéré ». De telles zones s'expliquent par l'intense activité microbienne consommatrice

d'oxygène et génératrice de gaz carbonique, souvent combinée à un manque d'aération du compost.

De ce qui précède, le compostage est donc un processus aérobie qui requiert la présence de l'oxygène pour favoriser, la décomposition de la matière organique par les micro-organismes en conditions contrôlées (Biey, 2001; Ryckeboer, 2001). Il permet la décomposition (dégradation) des matières organiques simples et complexes par une succession écologique des micro-organismes aérobies (bactéries, champignons, protozoaires) durant le processus (Amir, 2005; Mustin, 1987; Leclerc, 2001 ab) et une conservation des éléments nutritifs de ces matériaux (Kaiser, 1981; De Bartoli *et al.*, 1983; Anid, 1983; Francou, 2003; Girard *et al.*, 2005). Le but est de convertir biologiquement les composés organiques sous une forme stabilisée et de détruire les organismes pathogènes pour l'homme et pour les plantes par un échauffement naturel de la masse à composter à une température de plus ou moins 60°C.

Finstein et Moris (1975) expliquent que, dans la plupart des écosystèmes, la libération de chaleur d'origine biologique est très diffuse et disparaît trop rapidement pour engendrer une élévation de température significative (Albrecht, 2007). Cependant, la décomposition de matières organiques reste un cas à part pouvant produire une intense chaleur. En effet, le processus de compostage peut être très simplement schématisé ou représenté par l'équation ci-dessous pour la production de chaleur au cours de l'action de micro-organismes en présence d'oxygène (O₂). La matière organique peut alors subir deux types de processus : une minéralisation complète jusqu'au CO₂ ou une humification et une production des substances humiques (figure 8) :

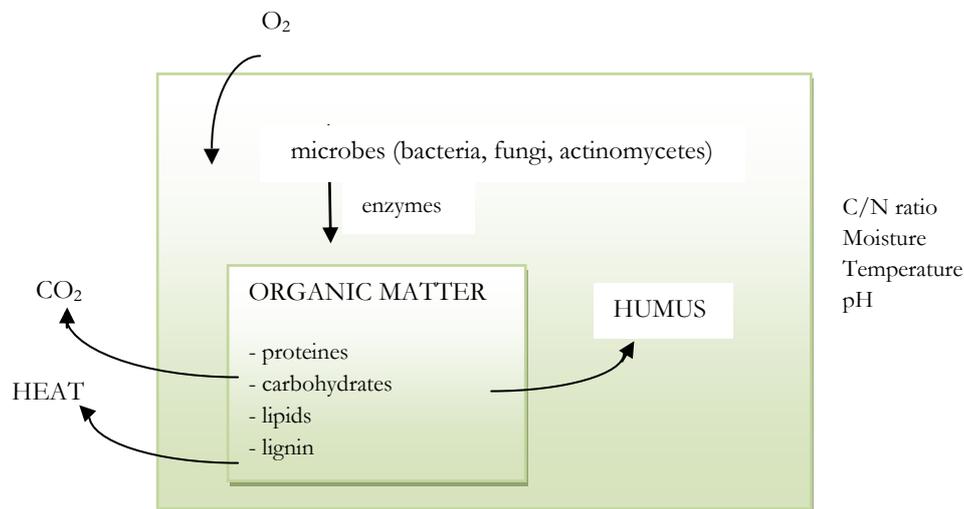
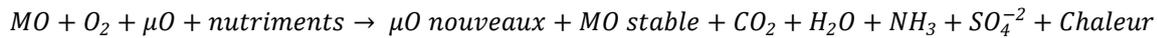


Figure 8. Processus théoriques mis en jeu pendant le compostage d'après Itävaara *et al.* (1995 in Albrecht, 2007)



Le taux de dégradation est affecté par la taille des particules, la température, l'oxygène, l'humidité des matériaux et le rapport C/N (Biey, 2001; Ryckeboer, 2001).

2.3 Facteurs affectant le processus de compostage

Pour fournir un produit fini de qualité, le processus de compostage doit être aérobie, rapide, sans mauvaise odeur et avec production de chaleur. Dans cette optique, plusieurs paramètres sont à prendre en considération et doivent être maîtrisés. Cependant, différents prétraitements de la matière organique doivent être effectués en vue d'optimiser le déroulement du processus à savoir une séparation à la source et des collectes sélectives pour limiter les contaminations de la matière organique (métaux lourds, métaux ferreux, plastiques, etc.) et l'élimination des matériaux non biodégradables dans le cas des déchets solides ménagers.

Les paramètres fondamentaux du compostage sont la température, le pH, l'humidité, l'aération, la taille des particules et la disponibilité des nutriments ainsi que la forme et taille du mélange. Ils influencent conjointement la vitesse et l'activité des micro-organismes et régissent donc le déroulement même de la fermentation.

2.3.1 Température (T°)

Plusieurs phases théoriques se succèdent au cours du compostage (figure 9). Dans les conditions optimales, le compostage à prédominance aérobie se déroule en trois phases (Ryckeboer, 2001; Godden, 1986; Leclerc, 2001a) : (i) une phase mésophile durant les premiers jours de compostage envahie par les micro-organismes mésophiles indigènes (bactéries et champignons essentiellement), pendant laquelle les substances facilement biodégradables (sucres simples, acides aminés, alcools, lipides) et une partie des polymères (protéines, acides nucléiques, amidon, pectines, hémicellulose, cellulose...) sont rapidement métabolisées, entraînant ainsi une augmentation de la température jusqu'à environ 40°C, (ii) une phase thermophile, pendant laquelle la température atteint 50 à 80 °C et à laquelle ne résiste que les micro-organismes thermophiles ou thermotolérants (actinomycètes et bactéries thermophiles); et (iii) une phase de maturation et de stabilisation au cours de laquelle la température tombe lentement jusqu'à la température ambiante, le matériau est recolonisé progressivement par les micro-organismes mésophiles bénéfiques incluant ceux qui sont antagonistes à des champignons pathogènes des plantes. Plus les molécules organiques sont complexes, plus la biodégradabilité diminue et plus la durée de décomposition est longue (Godden et Penninckx, 1987). La délimitation de ces phases est essentiellement basée sur les gradients et les effets différentiels de la température sur les populations microbiennes. Les processus d'humification prédominent ainsi que la dégradation lente des composés résistants qui dure jusqu'à l'utilisation des composts (Francou, 2003).

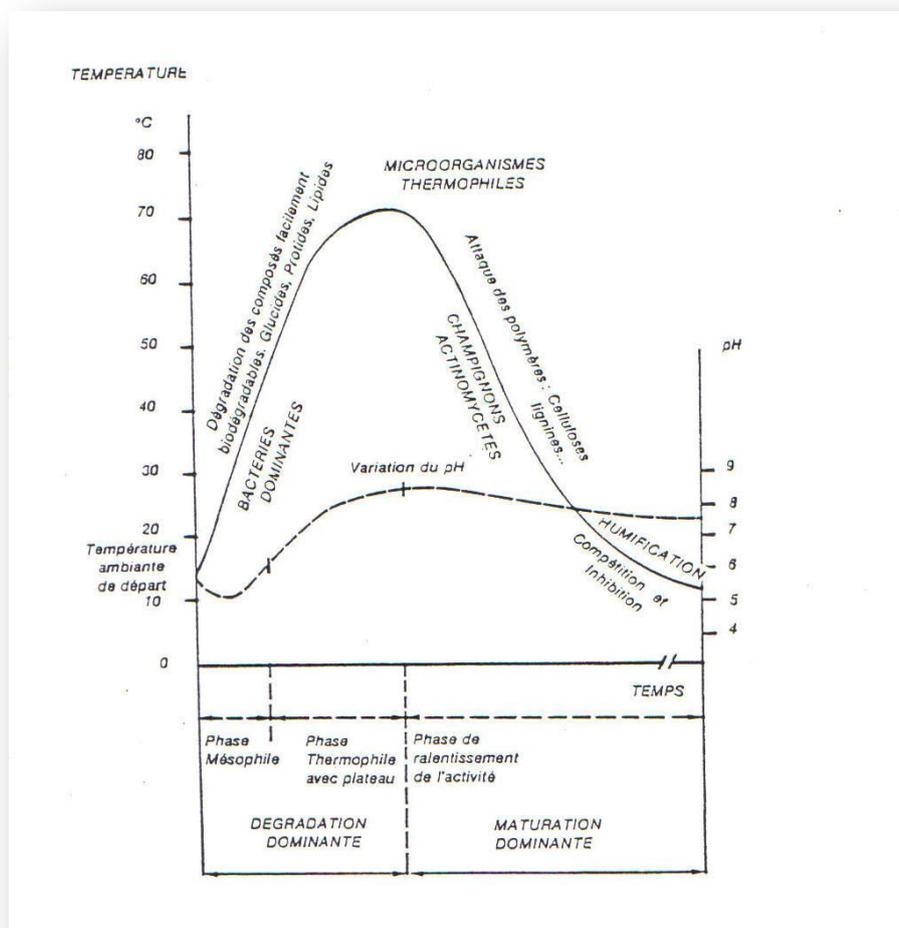


Figure 9. Courbe théorique de l'évolution de la température au cours du compostage (Mustin, 1987).

2.3.2 pH

Une phase acidogène se produit au début du processus de dégradation : production d'acides organiques et de dioxyde de carbone (CO_2) par les bactéries acidogènes, décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial. La seconde phase correspond à une alcalinisation : hydrolyse bactérienne des composés azotés avec production d'ammoniac (NH_3) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques (Charnay, 2005; Mustin, 1987). Le pH final optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat (Damien, 2004). Le suivi du pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique. La première phase acidogène est difficilement observable car les acides gras volatils sont rapidement consommés comme l'indiquent les études de Canet et Pomares (1995) ou celles de Sanchez-Monedero *et al.* (2001) (Charnay, 2005).

2.3.3 Aération et humidité

L'humidité et l'aération sont étroitement liées (Lardinois, 1993). L'aération insuffisante durant le processus de compostage produit des odeurs nauséabondes et des substances toxiques. L'oxygène utilisé par les micro-organismes provient de l'air présent dans les espaces ouverts entre les particules et la masse de compostage. Si les espaces (interstices) sont remplis d'eau, l'air est exclu et l'activité aérobique diminue (anaérobique). L'aération peut être accomplie par retournement d'andains (compostage ouvert), par les retourneurs tabulaires (monts de compost), les enjambeurs (pour les andains triangulaires) ou par aération forcée (soufflerie) souvent moins efficace que le retournement.

Le taux maximum d'humidité permissible varie avec la nature des déchets compostés, mais un taux de 55 à 65 % est généralement adéquat. L'eau est nécessaire au développement des micro-organismes et peut être apportée par arrosage selon le cas. Si le tas est trop sec, le processus de compostage est lent ou arrêté, alors qu'au dessus de 65 %, des conditions anaérobies se rencontrent.

2.3.4 Substrat

Le substrat pour compostage peut être tout résidu organique qui fournit les nutriments requis aux micro-organismes. L'azote est l'élément essentiel qui doit être ajusté dans le rapport C/N lequel ne doit pas dépasser 30/1. A des rapports C/N élevés, le processus se ralentit et la qualité du produit final est parfois mauvaise. Au faible ratio de C/N < 15, la perte d'azote peut se produire par volatilisation de l'ammoniac.

Le compostage est renforcé par l'uniformité des particules et la réduction de la taille des particules avant le processus est avantageux mais une proportion de particules de grosses tailles (minimum de 3-4 cm) est nécessaire pour éviter l'effondrement du tas et le manque d'air consécutif. La taille optimale et la distribution dépendent des matériaux compostés. Les micro-organismes ne peuvent prendre que des composés solubles dans les cellules pour leurs métabolismes, les matières organiques solides sont généralement dégradées plus lentement que les matières organiques solubles.

Le tableau 5 ci-dessous donne brièvement les rôles que jouent chacun des paramètres qui contrôlent le compostage en plus du pH.

Au terme du processus de compostage, les produits obtenus (composts) sont très variés, résultant de plusieurs paramètres notamment, la diversité de la nature des déchets compostés, le degré de maturité, la diversité des procédés de compostage, l'optimisation ou gestion du processus, etc. Le tableau 6 suivant donne en exemple la composition moyenne de différents composts dans les villes de quelques pays africains et en France.

Tableau 5. Paramètres fondamentaux intervenant durant le compostage des déchets (Wass *et al.*, 1996 ; Damien, 2004; Leclerc, 2001a; Charnay, 2005).

Paramètres	Recommandations	Remarques
Dimension des particules	broyage sur maille de 25 mm	favorise l'attaque microbienne
Retournement	régulier suivant le procédé	assure une bonne aération
Humidité	50 % à 60 % au départ	assure l'eau nécessaire au métabolisme microbien
Rapport C/N	30 au départ	Assure une meilleure immobilisation microbienne de l'azote
pH	ne pas dépasser 8,5	évite les pertes en azote
Contrôle des organismes pathogènes	température 60 à 70° C pendant au moins 24h	assure une bonne hygiénisation

Tableau 6. Exemples de la composition de différents composts de déchets, dans quelques villes africaines d'après Farinet et Niang (2004) tiré de Soclo *et al.*, (1999) pour Cotonou, de Ngnikam *et al.* (1993) pour Yaoundé, de Farinet et Sow (1997) pour Bakel, et de Farinet et Copin (1994) pour les déchets d'abattoir au Sénégal.

	MST (% brut)	MO %	C/N	Valeur fertilisante (% MST)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
COM, Cotonou	60	20	21	0,5	0,0	0,3
COM, Bakel	80	14	28	0,3	0,0	0,4
COM, Yaoundé	-	18	14	0,8	0,1	0,6
COM & CDV, France	63	38	-	1,6	1,1	1,5
CDV, France	58	52	20	1,6	0,5	1,5
CDA, Sénégal	70	52	16	2,0	2,3	1,8
CFB, France	53	60	8,6	2,9	2,3	1,8
Tourbe	38	69	41	1,1	0,2	0,1

COM : compost d'ordures ménagères, CDV : compost de déchets verts, CFB : compost de déchets de ferme, CDA : compost de déchets d'abattoir.

2.3 Déchets d'origine urbaine susceptibles d'être compostés

Les déchets urbains contiennent toutes sortes de matériaux, tant naturels que synthétiques. Certains de ces matériaux sont fermentescibles, d'autres non, mais les proportions entre ces deux types de composés varient suivant des critères locaux et saisonniers. Cette variation quantitative et qualitative dépend du temps, du lieu, des habitudes et des modes de vie des personnes. Le tableau 7 suivant donne une illustration indicative de la composition moyenne des ordures ménagères dans quelques pays d'Afrique et du Nord d'après Biey (2001), Francou (2003) et (SPW, 2010), qui mentionnent des différences importantes en termes de

composants fermentescibles, papiers-carton, verres, chiffons, plastiques, métaux et sables. Ces différences peuvent s'observer d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre surtout dans les cas des pays en voie de développement. La fraction fermentescible des déchets est surtout dominante dans les villes africaines dépassant les 55 %.

Tableau 7. Composition moyenne des ordures ménagères dans différents pays (Biey, 2001; Francou, 2003; SPW, 2010).

	Principaux composants des ordures ménagères (% du tonnage brut)					
	Fermentescible	Papiers-cartons	Verre	Plastiques	Métaux	Autres
Wallonie (Belgique)	41	12,2	3,0	12,6	1,7	28,9
France	29	25	13	11	4	18
Allemagne	32	22	8	5	10	23
Grèce	50	20	5	10	5	15
USA	28	34	7	9	8	14
Ghana (Accra)	85	5	2	3	3	2
Nigeria (Ibadan)	56	13	2	6	-	-
Kinshasa (RDC)	66	6,4	1,4	13,2	3	10

Les déchets urbains compostables peuvent être répartis en cinq catégories (Annabi, 2005; Francou, 2003) : (i) *déchets verts* : ensemble de déchets végétaux issus des jardins publics ou privés : tontes d'herbe, élagage, feuilles, etc.; (ii) *ordures ménagères* : ensemble des déchets ménagers produits par les collectivités ne pratiquant pas la collecte sélective; (iii) *ordures ménagères résiduelles* : fraction résiduelle des déchets ménagers obtenus après séparation des papiers, cartons, verres et emballages collectés séparément; (iv) *fraction fermentescible (putrescible) des ordures ménagères* : elle est généralement désignée sous le nom de biodéchets (déchets de cuisine, fleurs, etc.). Cette fraction peut être triée par les particuliers et collectée de façon sélective. Les déchets verts des jardins des particuliers sont alors souvent collectés avec cette fraction. Les déchets de marchés entrent également dans cette catégorie. (v) *boues de stations d'épuration urbaine* : ces boues sont issues de l'épuration des eaux usées domestiques ou industrielles. Les caractéristiques des boues dépendent des caractéristiques du traitement des eaux usées (physico-chimique ou biologique), du procédé de stabilisation des boues (aérobie ou anaérobie, thermique, etc.), et de leur état physique (liquide, solide, etc.).

2.4 Avantages du compostage

Le compostage est une technique de traitement de déchets qui présente un certain nombre d'avantages. Outre les bénéfices agronomiques que procure le compostage des déchets que nous développons plus loin, il existe également des bénéfices environnementaux, économiques et sociaux. Au niveau des bénéfices environnementaux, notons la diminution des volumes des déchets à éliminer. Une diminution de la quantité de matières putrescibles à éliminer entraînerait des impacts positifs liés aux lieux d'enfouissement sanitaire (décharge) par l'extension de la durée de vie utile de ces sites qui sont de plus en plus coûteux et difficiles

à implanter ainsi que la réduction des risques environnementaux, reliés aux lixiviats, pour l'eau de surface et souterraine et les nuisances atmosphériques (Mustin, 1987; Francou, 2003; N'Dayegamiye *et al.*, 2005). C'est donc une alternative précieuse à la mise en décharge ou à l'incinération des déchets organiques (Debosz *et al.*, 2002; Culot *et al.*, 1999; N'Dayegamiye *et al.*, 2005), surtout dans les villes des pays sous développés. De façon globale, le compostage permet donc, de transformer les déchets organiques, en un produit utilisable, le compost.

Les bénéfices économiques reliés à la pratique du compostage sont, entre autres, en lien avec la durée de vie prolongée des lieux d'enfouissement sanitaire. Des économies sont effectuées également par les municipalités au niveau des coûts de collecte, de transport et d'élimination des déchets et par les producteurs agricoles au niveau des montants consacrés à l'achat d'engrais chimiques. En plus, dans les pays en développement, la pratique du compostage peut être une source d'emploi dans un système intégré de gestion des déchets et demande d'équipements non spécialisés.

Si le compostage présente un certain nombre d'avantages dont son caractère de procédé naturel qui n'exige qu'un minimum de contrôle extérieur, il n'en offre pas moins certains inconvénients par rapport aux autres procédés de traitement : (i) utilise les déchets biodégradables et exige une certaine surface d'entreposage, (ii) dégage parfois des odeurs désagréables et (iii) le compost produit peut contenir les métaux lourds transférables aux cultures.

2.5 Bénéfice agronomique du compost

Les bénéfices agronomiques liés à l'utilisation des composts sont nombreux. L'avantage principal à utiliser le compost est donc directement relié à son contenu en matière organique. Ainsi, l'épandage d'un amendement organique laisse espérer des effets positifs suivants sur le sol (Charnay, 2005; Charland *et al.*, 2001) :

- L'amélioration de la structure et de la stabilité structurale du sol

La structure du sol réfère au mode d'assemblages des particules minérales et organiques. Une bonne structure, constituée de macro-agrégats, facilite et réduit le travail du sol et assure sa fertilité et sa conservation. Comparativement aux fertilisants minéraux, les composts favorisent le développement et l'établissement d'une meilleure stabilité structurale stimulée par la microflore du sol qui ont une influence positive sur la formation d'agréats. En effet, dans le processus de formation d'agréats, les micro-agrégats du sol (0,25-1 mm) se lient ensemble pour former les macro-agrégats (> 5 mm) et ce, grâce aux mucilages microbiens, aux filaments de champignons et aux polysaccharides issus de la décomposition de la matière organique. La formation de macro-agrégats améliore la structure du sol, ralentit l'érosion et réduit le lessivage. La stabilité structurale réduit également les risques de compaction des sols

et permet une augmentation de la croissance et de la respiration du système racinaire des plantes.

- La rétention d'eau et la porosité

L'application de compost a un effet bénéfique sur la capacité de rétention en eau du sol amendé. La matière organique contenue dans les composts peut absorber l'eau, améliorant ainsi la capacité de rétention d'eau du sol. Le compost étant composé de particules de tailles différentes, il offre une structure poreuse qui améliore la porosité du sol. L'amélioration de la porosité entraîne également une meilleure aération du sol et ainsi le développement de l'activité biologique et des plantes (N'Dayegamiye et Drapeau, 2009).

- L'influence sur la chimie du sol

Les substances humiques du compost sont bénéfiques contre l'acidification du sol qu'ils corrigent par l'effet de son pouvoir tampon et qu'ils stabilisent chimiquement. Le compost fournit des substances nutritives progressivement assimilables par les plantes en se minéralisant. Ces substances sont fonction de sa composition chimique et des éléments qui le constitue. Les détails sont donnés dans la section 2.6 sur les effets de matière organique des composts sur les paramètres chimiques.

- L'effet phytosanitaire décrit la faculté fongicide du compost

D'une manière générale le compost contient des substances fongiques et les micro-organismes donnant plus de vigueur aux végétaux et augmentant ainsi, leur résistance vis à vis de certains pathogènes (Charnay, 2005; Charland *et al.*, 2001).

2.6 Influence du compost sur la dynamique des principaux paramètres physico-chimiques et biologiques du sol

Beaucoup de sols cultivés sont déficitaires en matière organique. La maintenance de la matière organique des sols est très importante pour la productivité à long terme des agro écosystèmes (Goyal *et al.*, 1999 in Tedaja *et al.*, 2008a). Un certain nombre de propriétés des sols dépendent de leur teneur en matière organique considérée comme un des éléments essentiels de la qualité des sols (Girard *et al.*, 2005). Dans tous les types de sols, l'ajout de MO au sol stimule la croissance des micro-organismes et augmente l'activité de ceux-ci, ce qui conduit à une plus grande disponibilité des éléments nutritifs du sol au bénéfice des cultures (Clément et N'Dayegamiye, 2009).

Plusieurs études ont eu pour objet l'estimation des impacts de l'utilisation des composts sur les qualités physiques, chimiques et biologiques du sol. Les modifications apportées au sol dans ces études par l'addition de composts sont bénéfiques à la croissance végétale, meilleure rétention et disponibilité de l'eau en période de sécheresse; meilleure aération et maintien d'une bonne porosité, qui améliore le drainage naturel des sols; optimisation des échanges

gazeux; pénétration facilitée des racines dans le sol; stabilisation de la structure du sol; accroissement de la rétention et de l'échange ionique; apport d'oligo et de macroéléments nutritifs, et maintien d'un pH favorable; etc. (Gobat *et al.*, 1998; Girard *et al.*, 2005; Tejada *et al.*, 2008b; Tejada *et al.*, 2009a; Tejada *et al.*, 2009b; Charland *et al.*, 2001). Certains apports de composts permettent en outre l'apparition de résistances naturelles des sols à certains phytopathogènes telluriques (Girard *et al.*, 2005) qui permettent de diminuer l'utilisation de pesticides. Cependant, l'observation des effets positifs notamment la vitesse de réchauffement, la capacité de rétention en eau et la stabilité structurale des composts sur les propriétés physiques du sol nécessite de fortes doses d'apports, pas toujours compatibles avec les pratiques agricoles habituelles (Hofny-Collins, 2006). Il a été constaté notamment pour la stabilisation structurale que les amendements riches en substances carbonées solubles et en azote se décomposent vite et ont un effet limité dans le temps (ex. engrais verts). Par contre, les amendements riches en lignine (résidus de bois) se décomposent lentement (Gaucher, 1981). L'humus stable qu'ils produisent est plus abondant et leur action dans le temps est de plus de longue durée. Monnier (1985) a conceptualisé dans un schéma (figure 10) l'action de l'activité biologique du sol suite à l'apport de la matière organique exogène et ses conséquences en termes de molécules résiduelles dans le sol (Annabi, 2005). L'action des composts urbains se situe entre celle des engrais verts et celle de la paille (Baudouin, 1986).

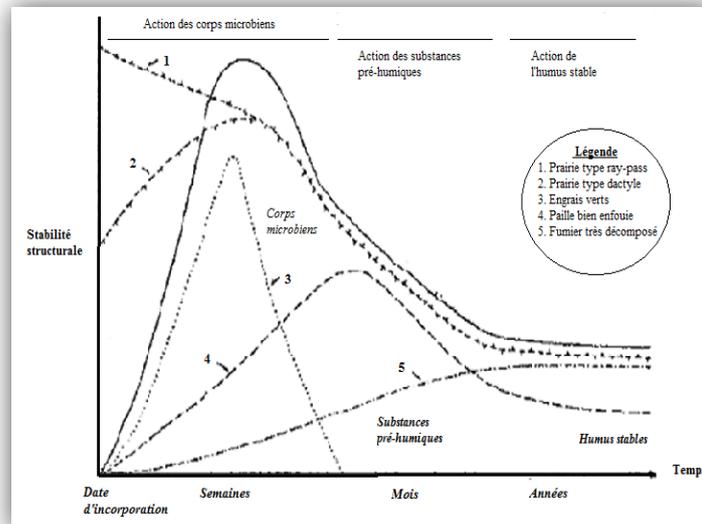


Figure 10. Schéma de l'influence d'apports de matières organiques sur la stabilité structurale (Monnier, 1985 *in* Baudouin, 1986).

La variété des composts rend difficile l'établissement de règle générale en vue de leur utilisation. Il faut tout d'abord examiner leur composition chimique (teneur en carbone organique total, en azote, en phosphore et en potassium), puis leur degré de maturité et les caractéristiques du sol à amender. Il est difficile de donner des directives relatives aux

quantités de compost à utiliser. Selon la nature de ce dernier, on conseille d'appliquer entre 5 à 150 t.ha⁻¹ MB (Hofny-Collins, 2006; Gobat *et al.*, 1998; Charland *et al.*, 2001). Dans ce travail, nous avons utilisé 20, 40 et 60 t.ha⁻¹ MB comme doses à appliquer.

2.6.1 Effet sur le carbone organique du sol

Un amendement à base de compost améliore non seulement la concentration en matière organique dans les sols, mais aussi et surtout son activité. Le compost, par son rapport C/N et sa richesse en biomasse microbienne vivante, est une matière organique stable, mais relativement active car riche en carbone facilement métabolisable par rapport à celle préexistante dans le sol, ce qui fait qu'il induit la biodégradabilité de la fraction résiduelle plus passive (Girard *et al.*, 2005).

Beaucoup d'études ont montré une nette amélioration ou augmentation du carbone organique dans le sol après plusieurs applications répétées des composts des déchets urbains (Smicikes *et al.*, 2008; Leiffeld *et al.*, 2002; N'Dayigamiye *et al.*, 2005; Mze, 2008 ; Hartl *et al.*, 2003).

2.6.2 Effet sur l'azote (N) du sol

L'azote est l'élément fondamental de la production végétale, le pivot de la fertilisation. Il entre dans la composition de très nombreux éléments essentiels à la vie cellulaire : acides aminés, acides nucléiques, etc. Dans le sol, il est indispensable de savoir non seulement la teneur totale en azote, mais aussi ses formes minérales disponibles pour la croissance des plantes. L'azote est généralement à 95 - 99 % sous forme organique dans le sol et dans les amendements organiques (Mustin, 1987). Cette forme n'est globalement pas assimilable par les plantes et l'azote doit de ce fait être converti par minéralisation en formes inorganiques solubles (NH₄⁺, NO₃⁻) (figure 11). L'azote organique est minéralisé en NH₄⁺ par ammonification, puis nitrifié en NO₃⁻. La nitrification est réalisée par les micro-organismes plus spécifiques, tels que des bactéries des genres *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. Dans le cycle de l'azote, les micro-organismes constituent la force motrice de toutes les réactions qui se produisent. Ils sécrètent des enzymes qui catalysent les réactions biochimiques à l'intérieur des cellules comme dans leur environnement qui permettent de passer d'une forme azotée à une autre (Epstein, 1997; Brady et Weil, 2002; Troeh et Thompson, 2005). L'azote minéral est susceptible d'être ensuite assimilé par les plantes, immobilisé dans la biomasse microbienne du sol, volatilisé sous forme d'ammoniac (NH₃) ou après dénitrification (N₂O, N₂) ou éventuellement perdu par lixiviation (NO₃⁻). Le cycle simplifié de l'azote est résumé dans la figure 11.

Généralement, le potentiel d'utilisation de l'azote par les plantes reste supérieur au taux de disponibilité de l'azote (1 à 5 % d'azote minéralisé chaque année et 2 à 6 % immobilisé par les micro-organismes), ce qui a pour conséquence que la quantité d'azote disponible dans le sol reste pour la plupart du temps faible (Troeh et Thompson, 2005; Brady et Weil, 2002; Schinner *et al.*, 1995).

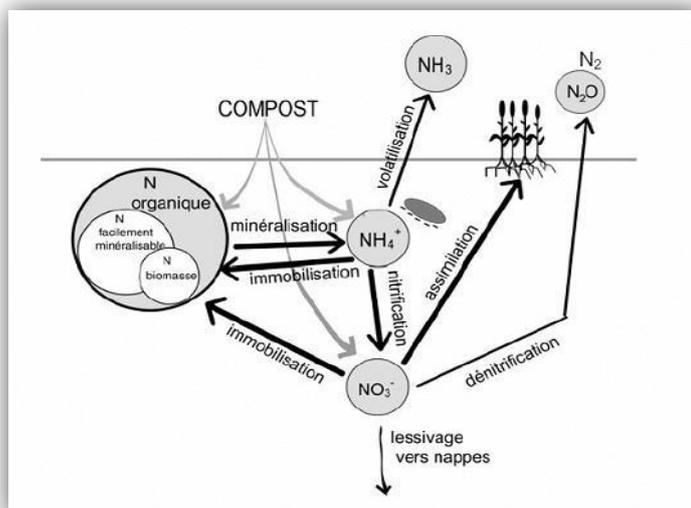


Figure 11. Schéma du cycle de l'azote lié à un apport de compost d'après Francou (2003).

Les composts contiennent relativement peu d'azote (0,5 à 3 % en fonction des composants de base), leur apport en quantité peut fournir l'azote complémentaire nécessaire et enclencher sa dynamique dans le sol (Mbonigaba, 2007). Les fumures organiques libèrent de l'azote sous forme assimilable pour la plante et leurs actions sont lentes et progressives. Par contre, dans certains cas (lisiers, purins, etc.) ou le NH_4^+ est en grande quantité et le rapport C/N faible, la libération de l'azote assimilable se fait rapidement parfois au détriment de son utilisation optimale par rapport aux besoins des cultures (Leclerc, 2001a). Elles résistent donc à la lixiviation et la totalité de l'azote apporté n'est pas directement utilisable. Mustin (1987) rapporte qu'un compost d'ordures ménagères libère l'azote de 5 à 20 % sous forme assimilable. D'autres facteurs liés au sol, comme le pH joue également un rôle important dans le processus de minéralisation de l'azote. Les sols acides ont tendance à accumuler en prédominance le NH_4^+ au détriment du NO_3^- car dans les conditions d'acidification sévère, la nitrification est fortement réduite (Mbonigaba, 2007).

Par ailleurs, le compost semble améliorer la disponibilité de l'azote. En effet, selon une étude réalisée en 1990, après 20 ans d'application annuelle de compost et de fertilisant minéral sur une culture de riz, le prélèvement d'azote sur les parcelles amendées de compost était supérieur à celui des parcelles fertilisées (Suzuki *et al.*, 1990). Sullivan *et al.* (1998) ont montré que les composts étaient d'excellentes sources d'azote dans une étude qui avait comme objectif de déterminer la valeur de fertilisation en azote des résidus alimentaires compostés avec des résidus de jardin, du papier ou des résidus de bois. Également, selon Baziramakenga et Simard (1998), l'application de certains composts (paille, bois, etc.) permet d'introduire la lignine qui se décompose lentement et aussi de grandes quantités d'acides aliphatiques à

faibles poids moléculaires dans les sols (acides acétiques, formiques et oxaliques), améliorant la mobilité et la disponibilité des éléments nutritifs tel l'azote.

2.6.3 Effet sur le phosphore

Le phosphore est aussi un composant relativement mineur, mais essentiel de la matière organique du sol. Il intervient dans beaucoup de processus fondamentaux de la croissance des plantes comme la photosynthèse et la fixation d'azote. C'est le cas dans la constitution de certains éléments structuraux essentiels à la vie cellulaire (acides nucléiques, phospholipides), dans les échanges d'énergie (phosphorylation d'un composé organique) et dans de très nombreuses réactions métaboliques (réactivité de substrats ou changement de conformation réactionnelle de coenzyme) (Albrecht, 2007). Il pose un certain nombre de problèmes en termes de fertilité de sols notamment par : (i) les basses teneurs en phosphore total dans les sols, (ii) les composés du phosphore sont souvent insolubles et non disponibles pour être facilement assimilés par les plantes et (iii) les apports extérieurs du phosphore peuvent être fortement fixés et devenir à la longue des composés insolubles (Paul et Clark, 1996). La teneur en phosphore d'un sol naturel dépend de la nature de la roche-mère, des facteurs climatiques et des conditions d'altération (degré d'altération, activité biologique) (Mze, 2008). Beaucoup d'études situent les niveaux du phosphore total dans les sols entre 35 à plus de 5000 mg.kg⁻¹ ou le phosphore total dans le sol représente 0 à 0,4 %, et que le phosphore organique varie de 19 à 70 % du phosphore total (Pierzynsky *et al.*, 2000; Troeh et Thompson, 2005; Essington, 2004).

L'ajout de la matière organique dans un sol apporte les nutriments essentiels, mais modifie aussi fondamentalement les caractéristiques chimiques et biologiques comme dit plus haut. Le compost étant riche en matière organique peut ainsi servir de source de C, N, P capables de réactiver la microflore des sols qui participent à la solubilisation du P inorganique, à l'immobilisation (généralement à courte durée) et à la minéralisation du P organique (Paul et Clark, 1996; Adl, 2003).

Le phosphore représente approximativement 0,2 – 0,5 % de la masse sèche des composts d'origine urbaine (He *et al.*, 1992; Iglesias-Jimenez *et al.*, 1993; Erich *et al.*, 2002; Petersen, 2003). Comme pour l'azote, il semble que la disponibilité en phosphore soit assez faible (Pommel, 1982). Selon Traore (1998) et Charland *et al.* (2001), le devenir du phosphore ou sa disponibilité dans un sol amendé en compost est plus dépendant des propriétés intrinsèques du sol (teneur en phosphore échangeable, pouvoir fixateur, concentration des ions phosphatés en solution) que de la minéralisation de la matière organique du compost. Les formes, l'échangeabilité et la disponibilité du phosphore des composts sont mal connues de même que la dynamique du phosphore dans les sols qui reçoivent ces amendements (Traoré, 1998; Morel *et al.*, 2001). Pour des concentrations en P de 0,6 % et 0,4 % dans des composts à base d'ordures ménagères, Garcia *et al.* (1992) mesurent des concentrations de P disponible de

0,07 % et 0,04 % respectivement. De Haan (1981) rapporte même un effet négatif d'un compost d'ordures ménagères sur le prélèvement du P par des tomates. Signalons cependant que d'autres travaux montrent que l'ajout de compost augmente la quantité de phosphore disponible pour les plantes (Erich *et al.*, 2002). Les résultats similaires ont été observés par Perez-de-Mora *et al.*, (2006) avec un compost à base des déchets organiques sur un Entisol fortement acide. De même sur les sols argileux (Bukavu, R.D. Congo) et limono-sableux (Busogo, Rwanda) après quatre saisons culturales d'application (5, 10 et 15 t.ha⁻¹) dans une étude sur l'influence d'apports en matières organiques sur l'activité biologique et la disponibilité du phosphore dans deux sols de la Région des Grands Lacs d'Afrique (Mze, 2008). Les composts agissent également sur le phosphore du sol en rendant soluble du phosphore qui ne l'était pas auparavant en plus de l'effet de remontées du phosphore des couches profondes par les micro-organismes filamenteux (Benali *et al.*, 1999). Il faut ajouter également que l'excès de phosphore en fertilisation minérale est une source de pollution des eaux de surfaces, entraînant une eutrophisation (McDowell et Sharpley, 2003).

2.6.4 Effets de composts sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol

L'incorporation de composts à pH neutre peut également permettre de réduire l'acidité du sol, et de diminuer ainsi les risques d'exportation de métaux vers la plante. Dans leur étude, Bolan *et al.* (2003) constatent que l'ajout de compost à un sol permet de réduire l'extractibilité des polluants métalliques par rapport au même sol non amendé. L'incorporation de compost au sol s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface du sol (Bresson *et al.*, 2001). L'amélioration de la structure du sol par l'utilisation de composts est généralement attribuée aux polysaccharides et autres biopolymères venant des composts (He *et al.*, 1992). Mais selon Pascual *et al.* (1998), les polysaccharides des composts ont plutôt une fonction de source de carbone et d'énergie pour la biomasse microbienne, alors que ce sont les polysaccharides d'origine microbienne qui assurent la fonction d'amélioration structurale du sol.

Une étude au champ de Bazzoffi *et al.* (1998) portant sur un compost d'ordures ménagères pouvant être considéré comme stabilisé montre une réduction significative de la densité apparente du sol pour un apport de 60 t.ha⁻¹ durant l'année suivant l'apport. Les auteurs constatent que cet effet du compost est moins évident à partir de la deuxième année et ils attribuent la réduction de la densité apparente du sol observée à la présence d'inertes au sein du compost.

Les composts ayant un pouvoir de rétention en eau supérieur au sol, l'incorporation de composts au sol augmente la capacité de rétention du sol proportionnellement à la dose apportée (Rousseau, 2005).

2.6.4.1. Influence sur le pH et l'acidité d'échange des sols

En région tropicale humide dominée par les fortes précipitations et des températures très élevées, le lessivage des cations basiques entraîne généralement une diminution du pH (acidification) du sol. L'acidité du sol affecte la solubilité des éléments métalliques, l'assimilation des éléments minéraux par les plantes et leur mouvement, la croissance végétale, l'activité des micro-organismes du sol, et d'autres attributs et réactions du sol (Epstein, 1997). L'acidité d'échange provient des ions hydrogène et aluminium du complexe d'échange. Le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ est souvent utilisé comme indicateur caractérisant l'activité de l'aluminium. La toxicité aluminique figure parmi les principaux facteurs limitants la productivité des sols tropicaux. Cependant, l'aluminium n'existe pas sous forme échangeable lorsque le pH du sol est $> 5,5$, suite à la formation de $\text{Al}(\text{OH})_3$, composé de très faible solubilité. Dès que le pH de vient inférieur à cette valeur, la teneur en aluminium disponible augmente sensiblement en des formes toxiques (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^+$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$), et il devient généralement le cation le plus abondant pour les sols à $3,5 < \text{pH} < 5,5$ car il provient des argiles en dégradation (Boyer, 1982, Landon, 1990).

Les apports de matières organiques améliorent le pH du sol aussi bien en sol acide par son pouvoir tampon et les apports des bases (Ca, Mg, K, Na) qu'en sol basique par l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) au niveau des complexes argilo-humiques. Ces complexes augmentent le pouvoir tampon du sol et sa capacité à résister aux variations de pH (Charland *et al.*, 2001). Par rapport aux engrais inorganiques, ils apportent, en plus des macroéléments, un complément d'oligoéléments très favorables à la végétation (Gobat *et al.*, 1998).

D'après Bray et Weil (2002), l'apport de la matière organique permet d'améliorer l'acidité des sols par les trois voies suivantes : (i) fixation de l'aluminium par la matière humique en limitant ainsi sa toxicité; (ii) formation des complexes solubles de l'aluminium avec les acides organiques à faibles poids moléculaires produits de la décomposition microbienne et exsudation des racines; (iii) l'apport en éléments minéraux peut entraîner l'augmentation de pH et provoquer la formation des composés peu solubles non échangeables de l'Al.

2.6.4.2. Influence sur le complexe adsorbant

2.6.4.2.1 Influence sur la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique joue un rôle important dans la croissance des végétaux, car elle détermine la quantité d'éléments nutritifs disponibles aux plantes sous forme de cations échangeables. Dans les sols, la variation de la CEC est fonction de la teneur en matière organique et en argiles qui sont généralement dépendantes en quantité et qualité des conditions naturelles d'altération de la roche mère (Gobat *et al.*, 1998). La matière organique joue un rôle important dans la disponibilisation de la CEC quand celle des fractions minérales

du sol est faible, par exemple dans les sols sableux et de nombreux sols tropicaux dont les charges sont variables et dont la CEC diminue avec le pH (Bertrand et Gigou, 2000). Dans ces conditions le sol retient plus de sels minéraux, ce qui favorise la nutrition des racines et s'oppose à la lixiviation des ions.

La réserve d'éléments nutritifs tient à l'existence sur la fraction humique d'une capacité d'échange des cations concernant notamment les ions K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . L'humus contient une série des molécules complexes aux chaînes carbonées avec de nombreux groupements fonctionnels (carboxyles, phénoliques et alcooliques) chimiquement actifs qui engendrent d'énormes quantités de sites électronégativement chargés. Comme l'argile, ces molécules organiques (l'humus colloïdal) sont capables de complexer les éléments peu solubles et de les rendre aussi plus mobiles et plus assimilables (Bertrand et Gigou, 2000) par les plantes, mais ne sont pas facilement drainés du profil par percolation des eaux. Dans certains cas, l'élimination des métaux lourds et autres polluants peut aussi être obtenue par la formation de complexes (chélation), s'ils sont peu absorbés par les plantes et par conséquent réduire la toxicité et minimiser le lessivage (Rice *et al.*, 2007). Mais l'exemple le plus fréquent est certainement celui, en sol acide, de l'aluminium qui est très efficacement éliminé en solution du sol par toutes les formes de matière organique. Dans ces sols, ils réduisent la toxicité aluminique en complexant les ions Al en composés non toxiques.

Dans certains cas, les composés organiques augmentent la chélation des métaux lourds et autres polluants sous forme des complexes organométalliques et par conséquent réduisent la toxicité et minimisent le lessivage (Rice *et al.*, 2007; Gobat *et al.*, 1998). Ceci est dû à la présence des micro-organismes du sol et à la matière organique qui fixent ou forment des chélates avec les métaux lourds, à l'intérieur de complexes organiques (Charland *et al.*, 2001). De plus, le calcium et le pH basique apportés souvent par la matière organique font en sorte de rendre temporairement les métaux non disponibles aux plantes.

2.6.4.2.2 Influence sur les cations basiques échangeables

La plante puise dans la solution du sol les cations utiles, dont la disponibilité est directement fonction de la garniture du complexe d'échange (Gobat *et al.*, 2003).

Selon Brady et Weil (2002), de fortes quantités de ces nutriments apportés par la matière organique sont associées avec les particules inorganiques et organiques solides du sol. A travers une série de processus chimiques et biochimiques, les nutriments sont libérés à partir des formes solides du sol pour remplacer ceux de la solution du sol. Dans cet échange de cations, les éléments comme le Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , sont libérés dans la solution du sol à partir des surfaces colloïdales et peuvent directement être absorbés par les plantes. Les ions sont également libérés dans la solution du sol à partir de la décomposition des tissus organiques par les micro-organismes du sol.

Ces différents cations étant libérés au rythme de la minéralisation (Schvartz *et al.*, 2003), les quantités mises en jeu sont fonction des apports totaux; elles sont notamment importantes lorsque les résidus sont entièrement restitués au sol. Le potassium par exemple est présent en concentration variable dans les composts de déchets urbains et généralement très faible que dans les sols cultivés (< 1 %) (He *et al.*, 1992). Mais sa disponibilité est très grande, puisque pratiquement tout le K est disponible (de Haan, 1981; Garcia *et al.*, 1992; Jakobsen, 1995; Francou, 2003; Albrecht, 2007). Selon, Pedneault (1994 *in* Charland *et al.*, 2001), le potassium, le calcium et le magnésium deviennent disponibles rapidement, alors que la libération d'azote, de phosphore et de soufre, qui dépend aussi de la biodégradabilité des matières organiques se réalise par contre plus lentement.

Beaucoup d'études ont montré un accroissement considérable des concentrations des cations basiques principaux (Ca, Mg, K) dans le sol après un apport répété en compost (de biomasse végétale, déchets urbains ou déchets verts) et ou en essais d'incubation (Parkinson *et al.*, 1999; Mbonigaba, 2007; Mze, 2008).

2.4.5. Effets sur les caractéristiques biologiques du sol

Tout apport organique provoque la stimulation de la biomasse microbienne, compartiment vivant de la matière organique du sol (Girard *et al.*, 2005). L'action des matières organiques sur les propriétés biologiques consiste essentiellement à l'hébergement d'organismes vivants du sol et constitue une source nutritive de la microfaune du sol (Adl, 2003; Calvet, 2003; Charland *et al.*, 2001). Les micro-organismes influent sur les propriétés chimiques du sol, dans un sol bien équilibré, la biomasse microbienne se comporte comme un réservoir d'éléments minéraux : elle les maintient (bio immobilisation temporaire) dans les horizons supérieurs du sol, les protège du lessivage, et les restitue progressivement aux plantes (Bhattacharyya *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 1993; Michael, 1999; Deubel et Merbach, 2005; Ros *et al.*, 2006a). Les composts sont considérés comme pourvoyeurs, non seulement de micro-organismes nouveaux (diversifiés) au sol, mais aussi de nutriments utilisables par ces derniers (Gobat *et al.*, 2003; Gobat *et al.*, 1998; Charland *et al.*, 2001). Un sol contenant une grande diversité d'organismes a plus de chance d'être en bonne santé et de propager moins de maladies aux plantes (phytoprotection) (Gobat *et al.*, 2003; FAO, 2005). Les études ont montré que le compost agit sur la biodiversité du sol ou il est appliqué en s'attaquant aux micro-organismes pathogènes troisième principale cause des nuisances pour l'agriculture après les insectes et les mauvaises herbes (Charland *et al.* 2001). D'après, Charland *et al.* (2001), 12 % des pertes agricoles mondiales en 1995 étaient causés par les maladies dues aux pathogènes qui s'attaquent aux plantes. Le compost assure le contrôle de certaines pathogènes associés aux plantes par : le mycostatisme ou le bactériostatisme (inhibition directe de la germination des spores), la lyse (destruction des mycéliums des agents pathogènes), les actions de type

antibiotique (émission de substances organiques spécifiques et toxiques), la compétition pour l'espace vital et pour les éléments nutritifs, la prédation et le parasitisme.

Les micro-organismes ont la particularité de donner une mesure intégrée de la santé du sol qui ne peut être obtenue par les mesures de physico-chimie ou des organismes multicellulaires. Ce sont des indicateurs sensibles de l'état de changement intervenu dans le sol et sert d'alerte de l'effet du stress sur l'écosystème du sol et aussi de l'intensité de minéralisation du carbone (Carter et Gregorich, 2008; Dilly, 2006; Dilly *et al.*, 2005; Ros *et al.*, 2006b; Rousseau, 2005). Cependant, les indicateurs biologiques ne sont que très peu utilisés dans le suivi de la santé des sols (Rousseau, 2005). Actuellement, toute interprétation des données de fertilité (santé) de sol doit tenir compte aussi bien des indicateurs physico-chimiques essentiels que des indicateurs biologiques traduits en termes de biomasse ou d'activités enzymatiques (Davet, 1996). Ces indicateurs qui estiment la biomasse microbienne dans le sol comme une partie de la matière organique constituée des micro-organismes vivants sont obtenus par: des méthodes directes (dénombrement des cellules microbiennes) ou des méthodes indirectes (fumigation-extraction, respiration induite par substrat, activité de phosphatase, etc.) (Carter et Gregorich, 2008; Ros *et al.*, 2006b).

L'amélioration des propriétés physiques du sol due à l'incorporation des composts permet d'offrir des conditions favorables aux micro-organismes du sol, augmentant ainsi l'activité biologique des sols. Diaz *et al.* (1994) observent une augmentation significative de la population fongique et bactérienne durant les deux années suivant l'application d'un compost urbain jeune. Les études de Mbonigaba (2007), Mze (2008), Bhattacharyya *et al.* (2001), Tejada *et al.* (2009a), Tejada *et al.* (2009b), Tejada *et al.* (2008a), Tejada *et al.* (2008b), etc. ont montré une amélioration de l'activité biologique (respiration basale, respiration induite par substrat et la biomasse microbienne) sous l'effet des apports en matières organiques issues des composts des biomasses végétales, des fumiers de ferme et des déchets urbains après quatre applications (N'Dayigamiye *et al.*, 2005), seul en comparaison avec le témoin ou celui de l'engrais minéral. Debosz *et al.* (2002) ont montré qu'après 11 mois d'incubation en conditions contrôlées sur un sol sablo-limoneux, le compost augmente dans son ensemble les proportions de carbone et azote microbiens. Les mêmes effets ont été observés par Pérez-de-Mora *et al.* (2006) en moins de deux ans d'apport de 150 t.ha^{-1} de compost de déchets urbains dont le carbone microbien est passé de $19,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans le champ témoin à $443,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans ceux traités aux composts dans un Entisol contaminé aux métaux lourds et induisant aussi l'activité enzymatique ainsi que la diversité des différentes communautés microbiennes.

Concernant les activités enzymatiques, elles sont en relation directe avec les cycles des éléments C (β -glucosidase), N (uréase), P (phosphorase) et S (arysulatase) et catalysent l'hydrolyse des molécules simples, permettant leurs assimilations par les racines et les micro-organismes (Tejada *et al.*, 2009a). L'incorporation de compost augmente aussi les activités

enzymatiques du sol qui jouent un rôle considérable dans l'évolution des composés endogènes et exogènes de la dégradation des tissus végétaux, animaux et des corps microbiens, l'humification jusqu'à la minéralisation (Gobat, 1998; Calvet, 2003; Rousseau, 2005; Tejada *et al.*, 2008a; Tejada *et al.*, 2009a; Tejada *et al.*, 2009b; Ros *et al.*, 2006a). Cependant, les études sur l'activité enzymatique du sol rapportent parfois des effets contradictoires. Les activités enzymatiques dans les sols sont également sensibles aux modifications environnementales et sont de ce fait considérées comme des indicateurs des perturbations naturelles et anthropiques. Les amendements organiques contiennent des enzymes intra et extracellulaires, et stimulent par conséquent l'activité de la plupart d'enzymes du sol (Liang *et al.*, 2003; Tejada et Gonzalez, 2006; Gobat *et al.*, 1998; Tejada *et al.*, 2009b). Les enzymes du sol non directement associées à des réactions métaboliques proviennent des plantes (graines, racines), des animaux et surtout des micro-organismes (Davet, 1996; Dik, 1997). Les enzymes les plus mises en évidence dans les sols sont celles appartenant aux groupes des oxydoréductases (déshydrogénases, catalases, etc.) et des hydrolases (phosphatases, estérases, lipases, uréases, etc.) (Gobat *et al.*, 1998; Alef, 1995). Seules les activités de la phosphatase (phosphatases acides indicateurs typiques du milieu rhizosphérique dans les exsudats racinaires) et de l'uréase (tamponnée et non tamponnée) qui appartiennent au groupe d'enzymes de la minéralisation (phosphore organique \rightarrow ortho-phosphate; urée \rightarrow NH_3 et CO_2) et qui jouent un rôle important dans la nutrition des plantes retiendront notre attention dans ce travail (Alef *et al.*, 1995).

Les phosphatases catalysent l'hydrolyse de différents composés phosphatés comme les esters de phosphate, pyrophosphates, métaphosphates, phosphates inorganiques (Alef *et al.*, 1995; Gobat *et al.*, 1998). Elles sont alors responsables de la mobilisation enzymatique du phosphore organique. L'attention est portée sur le groupe des monophosphoesterases qui englobe les enzymes qui catalysent l'hydrolyse des monophosphoesters organiques en phosphore inorganique assimilable aux plantes. Gracia *et al.* (1997) vont plus loin en précisant que la demande en phosphore des plantes serait responsable de la synthèse de cette enzyme. Martens *et al.* (1992), Mbonigaba, (2007) ont montré que l'addition de la matière organique sous forme de compost maintenait l'activité de la phosphatase dans le sol à des niveaux élevés.

L'uréase est une enzyme impliquée dans le processus de minéralisation de l'azote. L'uréase catalyse l'hydrolyse de l'urée en dioxyde de carbone (CO_2) en ammonium (NH_3) et il est largement distribué dans les micro-organismes, les plantes et animaux (Tejada *et al.*, 2009b).

Perucci (1990) a observé une augmentation significative d'activités enzymatiques (uréases, protéases, phosphatases et sulfatases) dans les sols amendés aux composts. En améliorant le potentiel biologique et enzymatique des sols, le compost crée des conditions optimales de croissance des plantes, de minéralisation et de disponibilité des éléments nutritifs. Cependant,

les composts semblent avoir des effets de stimulation de l'activité microbienne du sol moins marqués que les déchets organiques non compostés, à cause de la réduction de leur concentration en éléments nutritifs pour les micro-organismes du sol (Emmerling *et al.*, 2002).

L'emploi des fumures organiques conduit à une augmentation des activités microbiennes et enzymatiques du sol qui dépendent, toutefois, du type de substrat utilisé (caractéristiques chimiques et microbiologiques substrats), de la quantité appliquée, du type de sols à amender (Tejada *et al.*, 2009a; Tejada *et al.*, 2009b; Gobat *et al.*, 2003; Pérez-de-Mora *et al.*, 2006; Mbonigaba, 2007 ; Ruganzu, 2009). De même, ces auteurs signalent une corrélation positive entre les matières organiques et la biomasse microbienne du sol comme l'affirment également Lin et Brookes (1996). A contrario, les fumures organiques riches en cations monovalents et en acides fulviques affectent l'activité microbienne et enzymatique incorporées dans le sol; et aussi la dégradation de la structure de sol (Tejada *et al.*, 2006a; Tejada *et al.*, 2008b; Tejada *et al.*, 2009a). Brendecke *et al.* (1993), Fielßbach *et al.* (1994), et Filip et Bielek (2002 *in* Tejada *et al.*, 2006a) ont rapporté une décroissance de la biomasse microbienne après dix ans d'application de 5 à 15 t.ha⁻¹ de matière organique fraîche (boues de station d'épuration) due principalement à la présence de métaux lourds.

2.4.6. Action sur les rendements de cultures

Selon Pedneault (1994 *in* Charland *et al.*, 2001), l'analyse des rendements comparatifs obtenus avec différentes formes de fertilisation avec et sans compost fait ressortir les principaux éléments suivants : un bon compost permet d'augmenter les rendements par rapport à des sols non fertilisés, même lorsqu'il est appliqué à de faibles doses; la qualité des composts et les doses appliquées influencent directement les rendements; le fractionnement des applications donne de meilleurs résultats; des baisses de rendement peuvent s'observer avec des composts immatures et à C/N élevé ou avec des doses d'application trop fortes; les applications de fertilisants organiques produisent une diminution de la fréquence d'utilisation des engrais minéraux et de la sévérité du parasitisme.

La valeur agronomique des composts des déchets urbains sur l'augmentation des rendements des cultures a été signalée par plusieurs auteurs. N'Dayegamiye *et al.* (2005) ont montré dans une étude sur les effets des apports de composts de résidus ménagers sur le rendement des cultures et certaines propriétés de sol, en comparant le témoin seul sans amendement avec les apports de composts seuls à raison de 20, 40 et 60 t.ha⁻¹, que ces derniers ont augmenté les rendements en maïs graines de 1 à 3 t.ha⁻¹ proportionnellement aux doses apportées en deux années consécutives.

2.4.7 Effets sur l'environnement

Outre l'enrichissement du sol en éléments nutritifs et en carbone organique, l'apport de matières organiques par le compost peut entraîner l'introduction de divers contaminants dans

le sol traité et par exemple augmenter la quantité d'ETM fixés à la phase solide dans le sol (Amir, 2005; Weber *et al.*, 2006). L'augmentation des concentrations de métaux lourds est généralement considérée comme l'un des effets indésirables les plus fréquents qui peuvent résulter de l'application du compost produit à partir de déchets municipaux, en particulier, si elles proviennent de la collecte des déchets non sélective dans des zones industrielles (Weber *et al.*, 2006). Le risque d'accumulation des ETM dans le sol reste dépendant de la spéciation de ses éléments, des quantités dans le compost ainsi que des changements physico-chimiques et biologiques entraînés dans le sol suite à l'application de ces résidus organiques. Le degré de contamination des substrats de départ par des substances toxiques influence directement la qualité du compost final et ses possibilités d'application (Gobat *et al.*, 1998). En particulier, les sols sableux avec un faible pouvoir tampon de pH et d'adsorption des métaux, sont considérés comme de mauvais substrats pour les déchets contaminés par les métaux après leur application (Weber *et al.*, 2006). Toutefois, l'application de compost peut non seulement conduire à une augmentation de métaux lourds, mais se traduit également par l'enrichissement du sol de MO. Ces deux effets se neutralisent mutuellement. Dans les composts mûrs, la matière organique indique généralement une grande capacité à lier les cations des métaux lourds, tant dans le processus d'échange d'ions simple entre la phase solide et la solution du sol, ou par la formation de complexes de coordination. Ainsi, le réel danger pour l'environnement associé à l'enrichissement du sol en métaux lourds dépend de la concentration de formes mobiles facilement disponibles pour les plantes et du relargage de métaux lourds suite à la dégradation de la matière organique. Le tableau 8 ci-dessous rassemble les valeurs limites statutaires ou arbitraires dans les composts décidées dans plusieurs pays.

Tableau 8. Valeurs limites des ETM dans les composts (mg.kg^{-1}) destinés particulièrement à l'épandage agricole selon le pays (adapté d'Amlinger, 2004 *in* Amir, 2005 et Moniteur Belge, 2009).

Pays	Règlements	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Autriche	Usage agricole	0,7	70	70	0,4	25	45	200
	Assurance qualité RALGZ-QAS							
Allemagne	Volontaire	1,5	100	100	1	50	150	450
	Fédéral	2	100	150	1	50	150	400
Belgique	Wallonie	1,5	100	100	1	50	100	400
	NF 44 061 Préprojet (2004)							
France	N° 814.013 ;	1	120	300	2	60	180	600?
Suisse	1986/Révisé 2001	1	100	100	1	30	120	400
USA	EPA CFR 40/503 Boue	39	-	1500	17	420	300	2800
	Compost qualité Rodale	4	100	300	0,5	50	150	400

Par ailleurs, d'autres normes ont été définies à partir de certaines propriétés physico-chimiques ainsi que du fond géochimique des sols susceptibles de recevoir ces épandages (Amir, 2005). En République Démocratique du Congo aucune norme n'existe sur l'épandage de la matière organique dans les sols agricoles.

2.5 Autres utilisations des composts

Les utilisations potentielles du compost sont multiples. Outre en agriculture et horticultures, les composts peuvent être utilisés dans des programmes de revégétation et biorestauration de sites dégradés ou contaminés, pour la stabilisation des pentes, comme milieu filtrant en biofiltration ou comme adsorbant (Charland *et al.*, 2001). Bref, les composts peuvent être utilisés pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols altérés ou autres matrices.

Le compost est utilisé aux Etats-Unis par exemple, par le Département des Transports (DOT), en bordure des autoroutes dans des projets de revégétation, de remblaiement et de contrôle d'érosion (Anonyme, 2000 & McCoy et Cogburn, 2001 *in* Charland *et al.*, 2001). Les composts sont également utilisés afin d'améliorer les propriétés des sols contenant des niveaux toxiques de métaux lourds, de produits pétroliers ou ayant des valeurs extrêmes de pH. L'ajout du compost à des sols contaminés au plomb a permis de réduire les formes disponibles de plomb au niveau des sols amendés (Chaney et Ryan, 1994 *in* Charland *et al.*, 2001). De même, Guittonny-Larchevêque (2004 *in* Albrecht, 2007) a montré que l'épandage de compost est capable de diminuer, à court terme, le possible stress toxique qu'exercent le nickel (Ni) et le chrome (Cr) sur les végétaux dans un sol pollué. En effet, même si l'apport de compost constitue une source exogène d'éléments traces métalliques (ETM), il constitue un milieu nutritif pour les racines des végétaux (humus) plus dilué en Ni et Cr que le milieu naturel au préalable contaminé en ces deux éléments.

En ce qui concerne les polluants organiques, la matière organique des composts a également la capacité de dégrader les pesticides par le développement des activités biologiques, ce qui en diminue la concentration effective dans les sols (Albrecht, 2007). Par ailleurs, l'étude de Joergensen *et al.* (1997) a montré que l'addition de compost à un sol contaminé au mazout a diminué le pourcentage de mazout extractible et a augmenté la minéralisation du mazout sous forme de CO₂. Les micro-organismes du compost dégradent et métabolisent les contaminants du sol, les transformant en humus et en sous-produits inertes (CO₂, eau et sels). Les résultats de l'utilisation de composts pour le traitement de sols pollués dépendent de plusieurs facteurs, notamment la biodisponibilité et la biodégradabilité du polluant organique (Albrecht, 2007). D'autres utilisations du compost, moins répandues par contre sont également possibles telles que l'utilisation du compost comme adsorbant et comme combustible.

2.6 Conclusion partielle

De nombreuses études ont mis en évidence des gains qualitatifs et quantitatifs pour les cultures et l'amélioration de la fertilité des sols par l'usage de la matière organique ou des composts en agriculture. Cette amélioration semble résulter davantage de l'effet de l'apport organique sur le sol que d'un apport en éléments nutritifs.

L'incorporation au sol de composts permet d'entretenir, voire d'enrichir le stock de matière organique du sol, améliorant ainsi les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol favorisant la fertilité des sols. Cependant, la valeur amendante peut être variable selon l'origine des composts et leur degré d'évolution c'est-à-dire le processus d'optimisation et de maturité.

L'application de composts dans le sol peut conduire à une immobilisation temporaire de l'azote dans le cas des composts riches en substrats carbonés facilement minéralisables, ou à une minéralisation lente dans le cas des composts ayant une matière organique résistante à la biodégradation. Cette variabilité des comportements peut rendre difficile la gestion de la fertilisation azotée (par les agriculteurs). Ce phénomène s'atténue avec les apports au cours des années.

Le retour au sol des produits résiduaux organiques est sans aucun doute la filière la plus logique de leur élimination en raison de leur valeur agronomique. Cependant, l'innocuité de ces produits doit être garantie comme critères de qualité en terme de concentrations en polluants et indésirables tels qu'exigés dans les réglementations mise en place dans beaucoup de pays du Nord. D'où le compostage des matières organiques à la source. Enfin, les utilisations potentielles du compost sont multiples, outre les applications agronomiques, les composts peuvent être utilisés dans la revégétalisation, biorestauration de sites dégradés ou contaminés, etc. Un travail important doit être fait en amont pour séparer les flux de polluants des déchets effectivement recyclables en agriculture : collecte sélective des déchets organiques et des déchets verts de particuliers et des collectivités, etc.

EXPERIMENTATION

- ✚ Objectifs, hypothèses et stratégie de l'étude
- ✚ Matériels et méthodes
- ✚ Propriétés et diagnostic de l'état agropédologiques des sols étudiés
- ✚ Effets de l'application des composts de biodéchets ménagers sur les propriétés physico-chimiques et chimiques des sols
- ✚ Effets de l'application des composts de biodéchets ménagers sur les indicateurs microbiologiques de la qualité des sols
- ✚ Efficience des composts de biodéchets ménagers sur les rendements des cultures

Objectifs de l'étude

L'objectif général de cette étude consiste à évaluer les effets de l'apport dans le sol, de la matière organique issue des composts de déchets ménagers collectés à Kinshasa sur l'amélioration de la fertilité et de la production des sols acides de la République Démocratique du Congo. Cette étude s'applique singulièrement sur les sols acides de la Province de Kinshasa.

Les objectifs spécifiques suivants ont été ciblés:

- mettre en place un système de compostage de déchets solides ménagers et caractériser les composts obtenus;
- diagnostiquer l'état actuel de la fertilité des sols des sites étudiés au point de vue de leurs propriétés physiques, chimiques et microbiologiques ainsi que de leurs contraintes potentielles à la productivité;
- évaluer l'effet de l'apport de la matière organique des composts de biodéchets ménagers sur la dynamique des propriétés chimiques, physico-chimiques et microbiologiques dans les conditions naturelles de terrain;
- évaluer l'influence de l'apport des composts de biodéchets ménagers sur la productivité des cultures tests et aussi évaluer l'efficacité agronomique des apports.

Hypothèses de travail

Conformément aux objectifs ci-dessus basés sur les investigations déjà réalisées sur cette problématique, les hypothèses suivantes ont été émises et les résultats de cette étude permettront de vérifier leur validité.

- Les propriétés chimiques, physico-chimiques et microbiologiques de la fertilité des sols de la Province de Kinshasa sont très peu favorables pour une production agricole;
- Les matières organiques issues des composts de biodéchets ménagers peuvent contribuer à améliorer les propriétés des sols acides, plus particulièrement le pH, la disponibilité en éléments nutritifs notamment par l'augmentation de la CEC, les propriétés biologiques, tout en réduisant les teneurs en aluminium échangeable du sol;
- Les matières organiques issues des composts de biodéchets ménagers peuvent constituer une meilleure alternative aux engrais minéraux chimiques hydrosolubles qui sont coûteux et qui sont rapidement lessivés dans un sol à faible CEC et dans une région à pluviosité élevée.

Bref, valorisés selon les normes environnementales exigées, les composts de biodéchets ménagers pourraient rapidement améliorer la qualité et la productivité des sols (acides sableux) intensément cultivés.

Cadre et stratégie de la recherche

Face à la croissance démographique et à la production des déchets solides ménagers dans la ville de Kinshasa, aux difficultés de leur gestion en ce qui concerne leur collecte et leur élimination; et à la productivité limitée de sols acides sableux de la Province de Kinshasa sous l'effet des facteurs naturels du milieu physique né de la pédogenèse et du climat (fortes températures et précipitations) en plus des facteurs anthropiques, la présente étude rentre dans le cadre de la valorisation des ressources organiques disponibles dans les déchets solides ménagers par la production des composts à petite ou grande échelle pour des applications agronomiques pour l'amélioration de la fertilité des sols acides.

La démarche de cette étude a consisté à mener des essais sur terrain dans trois sites dont deux à forte activité agricole de la Province de Kinshasa, à savoir le Plateau des Batéké à Balume dans la commune de Maluku, Kimweza dans la commune de Mont Ngafula, et en plus du Mont Amba dans la commune de Lemba. Un essai pilote de production de compost a été monté en collaboration avec la section de la Croix Rouge/RDC de Lemba dans le cadre du Projet de Compostière de Quartier (PCQ) à Lemba, Kinshasa. Et un essai d'apports au sol de matières organiques des composts de biodéchets et d'engrais minéraux (NPK) dans les parcelles unitaires sous différentes cultures a été mené dans les trois sites. Cette expérimentation a été réalisée en quatre étapes successives correspondant aux quatre saisons culturales en deux années au cours desquelles des échantillons de sols et les parties utiles des cultures (biomasse et graines) étaient régulièrement prélevés pour évaluer l'incidence des fertilisants organiques en comparaison avec les engrais minéraux (NPK) sur les propriétés de sols et déterminer leurs efficacités agronomiques.

Chapitre 3. Matériels et méthodes

3.1. Sites d'expérimentation

Les sols qui font l'objet de cette étude proviennent de trois sites (figure 12) dans la Province de Kinshasa dont deux où les activités agricoles sont beaucoup plus développées notamment dans la région du Plateau des Batéké (à Balume) et la région de Kimwenza Mission ainsi que le sol du Mont Amba. Le tableau 9 suivant donne la location géographique des différents sites ainsi que le profil texturale de la couche arable.

Tableau 9. Coordonnées géographiques des sites et profils texturaux des couches arables.

Coordonnées	Sites		
	Balume	Kimwenza	Mont Amba
Longitude	15°52'01,0" EO	15°17'09,5" EO	15°18'29,0" S
Latitude	04°06'19,0" S	04°27'41,9" S	04°25'01,16" EO
Altitude	655,9 m	374, 2 m	450 m
Profil (0-20 cm)	Sable fin, 7,5 YR 3/2 (<i>dark brown</i>) à l'état frais	Sable fin, 10 YR 4/6 (<i>dark yellow</i>) à l'état frais	Sable fin, 7,5 YR 4/4 (<i>brown strong</i>) à l'état frais

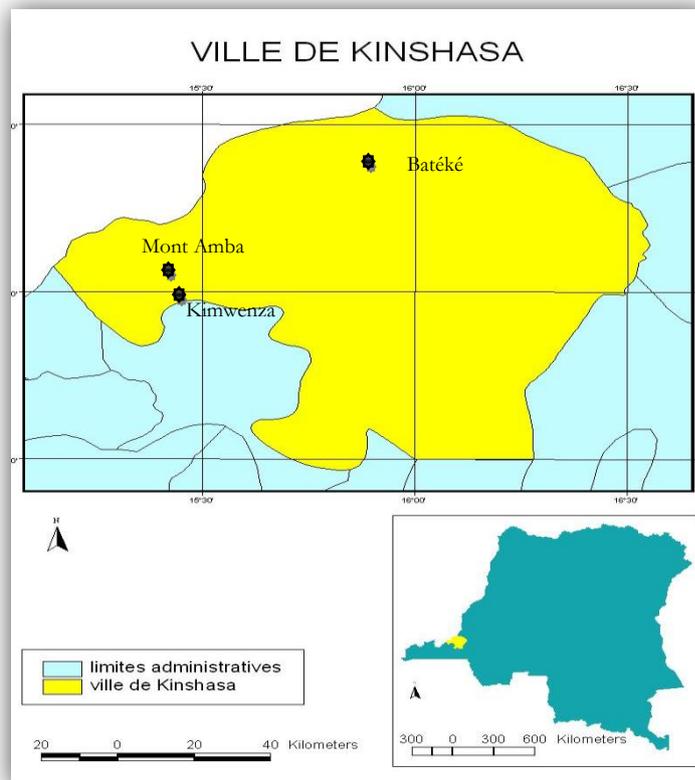


Figure 12. Localisation des sites d'étude.

3.2 Relevés pluviométriques pendant la période d'expérimentation

Les expérimentations sur terrain ont été menées pendant quatre saisons culturales allant d'octobre 2007 à mai 2009. Les précipitations enregistrées pendant la période d'expérimentation dans la Province de Kinshasa sont représentées par la figure 13 et l'annexe 2. Cette figure montre une variabilité et une répartition inégale au cours des mois et des essais. Pendant la première année culturelle, la plus pluvieuse, il a été enregistré 782 mm et 754 mm de pluie, respectivement en saison A et B. La seconde année a été moins pluvieuse et il a été enregistré à la dernière saison 621,2 mm de pluie.

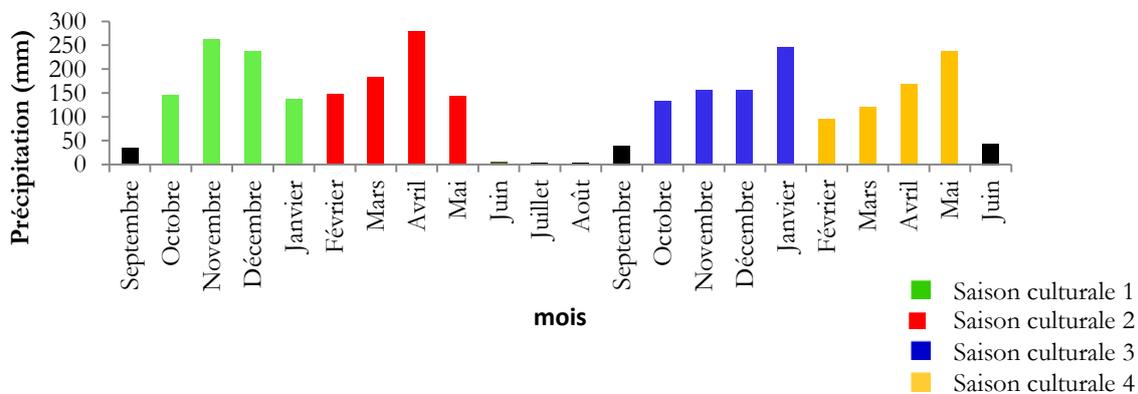


Figure 13. Précipitations enregistrées au cours des saisons culturales (2007-2009) dans la Province de Kinshasa (Station de Binza Météo).

Les variations saisonnières des pluies observées ainsi que leur distribution irrégulière au cours d'une même saison pourraient avoir un impact sur les propriétés des sols, la nutrition et le développement des cultures.

3.3 Préparation et conditionnement des échantillons de sol

Sur chaque site, un profil a été fait jusqu'à une profondeur de plus de 100 cm, et un échantillon de sol par horizon a été prélevé pour des raisons de classification des sols. En outre, pour la caractérisation détaillée des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols, un échantillon composite des petites carottes de terre (500 g) prélevée de façon dispersée autour du profil d'une profondeur de 0-30 cm sur une superficie d'environ 1 hectare pour Balume et Kimwenda tandis que le sol du Mont Amba a été prélevé dans le jardin expérimental de la Faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa. Après chaque prélèvement les échantillons étaient subdivisés en deux parties. Une partie séchée à l'air libre puis broyée à l'aide d'un mortier en porcelaine et d'un pilon approprié; et tamisée sur un tamis de 2 mm pour les analyses physico-chimiques de routine pour l'estimation de la fertilité (Pauwels *et al.*, 1992) et l'autre conservée à l'état frais (4 °C) pour les analyses

microbiologiques (Schinner *et al.*, 1995). Les analyses microbiologiques ont été effectuées sur des échantillons frais ramenés à 50 % de leur capacité maximale de rétention en eau (Öhlinger, 1995). La norme ISO 17155 (2002) recommande préférentiellement de ramener l'humidité à 40 ou à 60 % de la capacité de rétention. En plus, les échantillons non perturbés ont été prélevés dans chaque site à l'aide des cylindres métalliques (anneaux de Kopecky) en acier inoxydable pour la mesure de la densité apparente.

Les propriétés morphologiques de ces sols sont résumées dans la description des profils suivant les « *Guidelines for Soil Description* » (FAO, 1990) en annexe 1. En plus, des observations géomorphologiques et des coordonnées géographiques par GPS (*map 765 GARMIN*) de chaque site ont été réalisées (tableau 9 et annexe 1).

Les analyses microbiologiques et une partie des analyses chimiques étaient réalisées au Laboratoire d'Ecologie microbienne et d'Épuration des Eaux (LEMEE) de Gembloux Agro-Bio Tech (ULg). L'autre partie des analyses physico-chimiques et chimiques était effectuée dans les Laboratoires de Pédologie de la Faculté d'Agronomie et de Chimie Analytique de la Faculté des Sciences (Unikin) à Kinshasa.

3.4 Analyses physico-chimiques et biologiques

3.4.1 Analyses physico-chimiques

3.4.1.1 Analyse granulométrique

La granulométrie, paramètre géopédologique, permet la détermination de la distribution pondérale des particules minérales selon leurs classes de dimension en dessous de 2 mm (Pansu et Gautheyrou, 2003; Bock, 1994 *in* Mze, 2008). L'analyse granulométrique s'est faite par la méthode à l'hydromètre à chaîne et permet la dissociation du matériau jusqu'à l'état de particules élémentaires, ce qui implique la destruction des agrégats.

Après destruction (oxydation) de la matière organique (action de ciment) par l'eau oxygénée (H_2O_2 30 %) à chaud et prétraitement à l'acide chlorhydrique dilué (HCl, 0,01N); la fraction sableuse a été séparée par tamisage (crible à trou de 63 ou 5 μm); la fraction argile-limon a été déterminée par la méthode de Köhn, après dispersion avec la solution de hexaméthaphosphate de sodium à 5 %. Les différentes fractions ont été identifiées selon "*USA textural triangle*", et exprimées en pourcentage massique.

3.4.1.2 Densité apparente

La densité apparente (D_a), qui est la masse d'un échantillon de sol sec sur le volume total, était mesurée par la méthode des cylindres sur les échantillons non perturbés et frais, connaissant le poids sec constant des échantillons à 105 °C et le volume des cylindres des prélèvements utilisés (Okalebo *et al.*, 2002; Van Ranst *et al.*, 1999). Et la couleur des sols a été

déterminée à l'état frais à l'aide des références colorées du code de Munsell (*Munsell soil color charts, édition 2000*).

3.4.1.3 Capacité de rétention au champ (CRC)

La capacité de rétention au champ du sol correspond à la teneur moyenne maximale en eau que peut retenir un sol contenu dans un pot de culture après saturation complète et ressuyage libre. La capacité de rétention au champ a été déterminée en plongeant des pots troués contenant les échantillons dans une bassine d'eau en veillant à ce que le niveau d'eau dans la bassine ne dépasse pas le niveau du sol dans les pots. L'eau monte par capillarité dans les pots. Après 24 heures, les pots sont retirés de la bassine et laissés s'égoutter pendant encore 24 heures. Le seuil en dessous duquel l'eau contenue dans le sol ne peut pas être drainée ou l'humidité résiduelle représente la différence de poids après séchage de l'échantillon à 105 °C pendant 24 heures (Anderson et Igram, 1993).

$$CRC = \frac{(\text{poids humide} - \text{poids sec}) \times 100}{\text{poids sec}}$$

3.4.1.4 Détermination du pH-Eau et du pH-KCl

Le pH est un indicateur de l'état d'une terre au plan agronomique et renseigne sur sa dégradation chimique éventuelle due à une désaturation, la présence de certains sels toxiques, son activité microbienne, et sur son niveau d'assimilabilité des éléments par la plante (Pansu et Gautheyrou, 2003). Le pH a été mesuré dans une suspension sol/H₂O et sol/KCl dans un rapport de 1/5 à température ambiante.

Un échantillon de sol tamisé (10 g) est placé dans l'erlenmeyer, mis en contact avec 50 ml d'eau distillée ou de 50 ml de KCl (1 M) et placé sur une enceinte d'agitation pendant 2 heures. La mesure est alors effectuée sur le surnageant, après un temps d'équilibre d'une demi-heure (dans un bécher après lavage ou décontamination avec 10 ml du même surnageant). Le pH-mètre (*EcoScan*) à électrode de verre a été utilisé pour mesurer le pH.

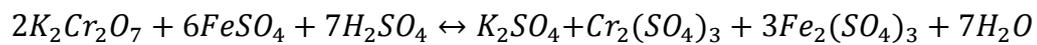
3.4.1.5 Acidité échangeable (AE)

L'échantillon est percolé par une solution de KCl 1 M non tamponnée qui permet d'extraire l'acidité échangeable (H⁺ et Al³⁺). Le titrage est effectué par volumétrie avec le NaOH 0,02 N. Le dosage de l'Al se fait par complexation avec le fluorure de sodium (NaF) 1 N neutralisé par la soude sous forme de Al(OH)₃ et titrage en retour des hydroxydes libérés avec le HCl 0,02 N (Pauwels *et al.*, 1992).



3.4.1.6 Dosage du carbone organique total

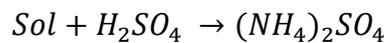
Le dosage de carbone permet de déterminer le taux de matière organique. La méthode de Walkley et Black (1934) utilisée à cet effet consistait en une oxydation de la matière organique par le dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en excès en milieu acide sulfurique concentré (H_2SO_4 , 96 %) à chaud et en présence du catalyseur (Ag_2SO_4) à partir d'un échantillon de 1 g de sol tamisé à 2 mm. Et le titrage de dichromate de potassium en excès par le sulfate ferreux (sel de Mohr) en présence de diphénylamine comme indicateur d'oxydoréduction. Les deux principales réactions mises en jeu sont:



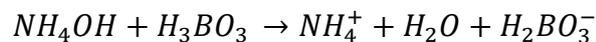
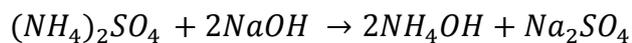
3.4.1.7 Dosage de l'azote Kjeldahl total

L'azote est déterminé après digestion de la matière organique par l'acide sulfurique concentré à l'ébullition suivi d'une distillation Kjeldahl d'un échantillon de 2 g de sol tamisé à 2 mm (Bremmer, 1965). La méthode s'effectue en trois étapes à savoir:

- La minéralisation de l'azote organique par attaque à l'acide sulfurique concentré à chaud en présence des catalyseurs ($CuSO_4$, K_2SO_4), selon la réaction chimique suivante:



- La distillation par entraînement à la vapeur de l'ammoniaque obtenu par l'action de la soude caustique ($NaOH$ 40 %) sur le sulfate d'ammonium formé lors de la minéralisation de l'azote organique. L'ammoniac est recueilli dans une quantité connue du mélange d'acide borique à 4 % plus l'indicateur mixte.



- La titration de l'ammoniaque libérée de la distillation par l'acide chlorhydrique (HCl , 0,05 N).



Le titrage est réalisé au moyen du titrateur automatique Radiometer.

3.4.1.8 Dosage de l'azote minéral

L'azote minéral a été dosé sous forme d'ions NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^- sur l'extrait de 10 g de sol au KCl (0,5 N) après agitation et centrifugation.

L'ammonium est mesuré après alcalinisation au NaOH de l'extrait en présence de l'hypochlorite (sous forme de chloramines) qui réagit avec le nitroprussiate de sodium et le thymol pour former le bleu d'indophénol mesurable par spectrophotométrie à 692 nm (*Kit Spectroquant N-NH₄⁺*).

Les nitrites ont été mesurés par leur réaction dans l'extrait avec l'acide sulfanilique pour former l'acide diazobenzène sulfonique - 4 qui réagit ensuite avec la N-(1-naphtyl)-éthylènediamine en milieu acide (pH 2 - 2,5) formant un colorant azoïque de couleur pourpre dont l'intensité est proportionnelle à la concentration. La densité optique est mesurée par spectrophotométrie à 525 nm (*Kit Spectroquant NO₂⁻*).

Les nitrates sont déterminés par la réaction avec le salicylate de sodium qui forme en milieu acide (H₂SO₄) le nitrosalicylate de sodium. Celui-ci prend une coloration jaune en milieu basique (NaOH/tartrate de sodium-potassium) qui est déterminé par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 420 nm.

3.4.1.9 Détermination du phosphore disponible

Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode de Bray 2 (Van Ranst *et al.*, 1999; Okalebo *et al.*, 2002). Après extraction par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) et de fluorure d'ammonium (NH₄F), le phosphore (extrait) a été filtré, puis coloré en utilisant la réaction de complexation du phosphore avec une solution acide de molybdate d'ammonium et de chlorure stanneux. La concentration en phosphore assimilable a été déterminée par colorimétrie (*UV-visible 1205 Spectrophotometer*).

3.4.1.10 Dosage du phosphore total et organique

Le phosphore a été déterminé après extraction de 1 g de sol calciné au four à moufle (phosphore total) pendant 2 h à 550 °C ou pas (phosphore inorganique) dans l'acide sulfurique après agitation pendant 16 h et centrifugation. L'extrait est traité au p-nitrophénol et neutralisé par le NaOH à 0,5 N. La détermination du phosphore est réalisée sur ce dernier extrait au bleu de molybdène à l'aide du *Kit Spectroquant* à 690 nm. Le phosphore organique est obtenu indirectement par différence entre le phosphore total et le phosphore inorganique.

3.4.1.11 CEC et cations basiques

La capacité d'échange cationique exprime sous certaines conditions, la quantité potentielle des cations susceptible de neutraliser les charges négatives du sol.

La capacité d'échange cationique a été déterminée par extraction (percolation) en milieu tamponné à l'acétate d'ammonium 1N, pH 7,0 pour saturer le sol par les cations NH₄⁺ dans un extracteur mécanique sous vide (*Centurion*). L'excès d'acétate d'ammonium est éliminé par lavage à l'alcool éthylique à 95 %. La quantité de NH₄⁺ adsorbé par le sol étant considérée comme la mesure de CEC, et l'azote ammoniacal est obtenu par distillation Kjeldahl directe de

l'échantillon (Van Ranst *et al.*, 1999). L'ammoniac distillé est dosé par la solution de HCl 0,05 N.

Les cations basiques étaient dosés dans l'extrait acétique par spectrophotométrie d'absorption atomique pour Ca^{2+} , Mg^{2+} et par émission pour le Na^+ , K^+ .

Les résultats obtenus (CEC et cations basiques) sont exprimés en méq/100 g de sol ou $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ de sol.

- *Caractéristiques dérivées des données analytiques,*

Somme des Bases: $SB = \sum(Ca + Mg + K + Na)$;

Taux de saturation: $TB = SB \times 100/CEC$, ou SB est la somme des bases et la capacité d'échange cationique effective : $CECE = SB + AE$

3.4.1.12 Les éléments minéraux totaux

Les éléments minéraux totaux (Cu, Fe, Zn, Mn, Pb) ont été déterminés par spectrophotométrie d'absorption atomique sur cendres après calcination de l'échantillon à 550 °C (Okalebo *et al.*, 2002; Biey, 2001).

3.4.2. Analyses biologiques des sols

3.4.2.1 Carbone microbien

Une prise d'essai de sol de 10 g (humides : 50-60 %) est soumise à des vapeurs de chloroforme (fumigation) qui détruit et lyse les cellules microbiennes vivantes (99 %) relargant leur contenu cellulaire dans le milieu (Joergensen, 1995; Ros *et al.*, 2006; Solaiman, 2007). Le sol fumigé ainsi que le sol non fumigé sont extraits au au moyen d'une solution 0,5 M de K_2SO_4 . Le carbone microbien (C_{mic}) est extrait sur les deux extraits et la différence entre les deux représente le carbone microbien qui est corrélé avec la biomasse par un facteur de calibration K_{CE} de 0,38. La mesure finale est faite à 350 nm de longueur d'onde (λ) dans des tubes de DCO préchauffés à 150 °C au préalable dans le réacteur de DCO.

3.4.2.2 Azote microbien

L'échantillon est préparé dans les mêmes conditions que pour le carbone microbien. L'azote est déterminé par dosage de l'azote Kjeldahl après digestion au minéralisateur *VELP* (à 150 °C, 30 min; 200 °C, 30 min et 380 °C, 1 h) en milieu acide concentré (H_2SO_4) catalysé par le $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1 % et suivi d'une distillation après alcalinisation au NaOH 35 %. Le distillat est récupéré dans l'acide sulfurique 0,004 N. L'ammonium est mesuré par la méthode au bleu d'indophénol (*Kit Spectroquant Merck NH_4^+*) sur les deux extraits fumigé et non fumigé; et la différence entre les deux mesures représente l'azote microbien qui est aussi corrélé avec la biomasse microbienne. L'azote microbien est calculé par : $N_{mic} = NE/KE$ ou $KE = 0,54$

(coefficient d'efficacité) et NE est la différence de l'azote fumigé et non fumigé après extraction au CH_3Cl .

3.4.2.3 Respiration basale et induite

La respiration est basée sur le fait que des échantillons de sol à 50-60 % de leur capacité au champ sont incubés à 20 °C dans des flacons *DURAN* fermés par des manomètres. Le CO_2 émis étant piégé par le NaOH en pastilles (solution), la consommation d'oxygène est proportionnelle à la dépression mesurée dans les flacons (Alef, 1995; Sparling, 1995). La vitesse de respiration est la pente de la partie linéaire de la courbe de consommation de l'oxygène en fonction du temps enregistré par les manomètres. La mesure de la respiration basale est pratiquée sur les échantillons tels quels et la respiration induite est mesurée après ajout d'un substrat [mélange de glucose, $(NH_4)_2SO_4$ et KH_2PO_4] par le *Système DBO WTW Oxitop*. Enfin, les logiciels *ACHAT OC* et *EXCEL* permettent de calculer les valeurs respirométriques.

3.4.2.4 Carbone facilement biodégradable (DBO₅)

La méthode est basée sur l'incubation d'échantillon à 20 ± 1 °C dans un flacon fermé, placé à l'obscurité pendant une durée donnée (généralement de 5 jours). Les micro-organismes présents dans l'échantillon, ou apportés par un inoculum, consomment l'oxygène dissous pour dégrader les matières dégradables (biodégradables) en présence d'une solution minérale contenant l'azote et le phosphore qui provoque une diminution de la pression partielle en oxygène dans l'espace de tête. Le CO_2 généré par la respiration microbienne étant capté par de la soude ou la potasse située dans l'insert fixé sur le couvercle, la pression partielle en CO_2 ne varie pas. Un manomètre mesure la diminution de la pression totale qui est donc égale à la diminution de la pression partielle en oxygène et donc proportionnelle à la consommation d'oxygène. La dépression mesurée est convertie directement en DBO. La nitrification est inhibée par l'ajout d'allylthiourée (*ATU*).

Pour l'étude, les paramètres ont été fixés à 5 g de sol, 365 ml de volume de remplissage en présence des différentes solutions salines et un inoculum constitué d'une liqueur mixte de boue de station d'épuration traitée préalablement aux ultrasons pour disperser les flocs microbiens. La durée de mesure était de cinq jours et la température d'incubation des flacons DBO était de 20 °C. Le carbone facilement métabolisable (C_{fm}) est obtenu par la relation : $C_{fm} (mgC.kg^{-1} sol) = DBO (mgO_2.l^{-1}.g^{-1} de sol) \times 12/32$.

3.4.3. Analyses enzymatiques

Dans le but d'évaluer l'activité catalytique des micro-organismes dans le sol qui transforment les formes organiques aux formes minérales assimilables pour les plantes de phosphore et de l'azote, nous avons dosé la phosphatase et l'uréase. La phosphatase joue un rôle important

dans la minéralisation du phosphore organique tandis que l'uréase est impliqué dans la minéralisation de l'azote.

3.4.3.1 Phosphatase

La méthode est basée sur la mesure de l'activité de la monophosphoestérase acide (pH 6,5) par la détermination du p-nitrophénol libéré à partir du p-nitrophényl phosphate après incubation du sol à 37 °C pendant 1 h dans une solution tampon (Alef *et al.*, 1995). Le dosage se fait par spectrophotométrie visible à la λ 400 nm après alcalinisation de la solution par le NaOH.

3.4.3.2 Uréase

Les échantillons de sol sont incubés pendant 2 h à 37 °C en présence d'urée selon la méthode tamponnée ou non tamponnée et l'ammonium libéré est extrait au KCl. Sa détermination est basée sur sa réaction avec le salicylate de sodium en présence du complexe dichloreisocyanurate de sodium coloré en vert au pH alcalin (Kander et Gerber, 1988). Le dosage se fait par spectrophotométrie (*Kit Sepctroquant de NH₄⁺*).

3.5 Nature et préparation des amendements utilisés

Le premier volet de cette étude portait sur la production d'amendement organique. L'amendement organique utilisé dans cette étude est le compost des biodéchets ménagers (déchets biodégradables solides) comprenant les déchets alimentaires, les déchets verts ménagers, les papiers, cartons et les déchets du marché). Les composts ont été obtenus par compostage à petite échelle en collaboration avec le Projet Compostière de Quartier (PCQ) de la Croix Rouge (CR) section de Lemba à Lemba Foire, des ordures ménagères issues de la collecte séparée dans les ménages aux environs du site de compostage et du marché central de la commune de Lemba. Le compostage a été réalisé par la méthode en andain à la surface de sol. Généralement, le choix de la méthode est dépendant de la quantité de matières, des moyens disponibles et de l'usage du compost (Mustin, 1987; Gobat *et al.*, 1998). Les différentes matières à composter étaient intimement mélangées pour avoir un produit homogène. Les paramètres clés du suivi de compostage étaient mesurés régulièrement: la température et l'humidité *in situ* tous les deux jours et le pH tous les quatre jours (Waas *et al.*, 2001; Okalebo *et al.*, 2002). L'arrosage de tas était assuré régulièrement pour maintenir l'humidité requise et les retournements se faisaient toutes les deux semaines pour aérer le tas. Le bilan empirique évalué après deux saisons successives a montré que le volume du produit final représentait plus ou moins le tiers des matières à composter. La durée du compostage était d'environ 3 mois. La caractérisation analytique des composts se faisait sur un échantillon composite parfaitement homogénéisé après prélèvement à différents endroits de chaque tas. Le tableau 10 ci-dessous donne les caractéristiques des composts de biodéchets utilisés. Les

mesures ont été réalisées au début de chaque campagne sur un échantillon composite. Trois analyses ont été effectuées pour chaque paramètre au niveau des échantillons composites prélevés.

En moyenne les caractéristiques des paramètres sont bonnes par rapport aux données de la littérature (Leclerc, 2001b; Gobat *et al.*, 2003; Mustin, 1987). Selon ces auteurs les caractéristiques essentielles dépendent de la composition de départ des déchets et doivent être comprise pour : le pH entre 6,5-8,5; les matières organiques entre 20-40 % ; le rapport C/N entre 10-20; l'azote total entre 0,5-1,8 % ; le potassium entre 0,6-1,8 % de K₂O; le phosphore total entre 0,4-1 % de P₂O₅; le magnésium entre 0,7-3,0 % de MgO; le calcium entre 3-12 % de CaO; etc. Concernant les métaux lourds, les valeurs obtenues (tableau 10) sont acceptables par rapport aux normes standards admissibles dans la plupart des pays occidentaux comme indiqué à la section 2.4.7 du chapitre II. Les résultats similaires ont été obtenus par Biey (2001) dans le cadre de son étude sur le biotraitement à petite échelle des ordures ménagères intitulé « Caractérisation des composts produits après séparation des déchets à la source et des déchets séparés à la décharge à Kinshasa (R.D. Congo).

Tableau 10. Composition et caractéristiques des composts des biodéchets ménagers utilisés au début de chaque campagne culturale et de la fumure minérale selon les caractéristiques du fabricant.

Caractéristiques	Amendements		
	CBDM (SC1)	CBDM (SC2)	FM
pH	7,91 (0,04)	7,58 (0,20)	-
MS (%)	55,44 (0,10)	64,56 (0,05)	-
COT (% MS)	27,02 (0,75)	23,75 (3,53)	-
N _{tot} (% MS)	2,7 (0,03)	1,9 (0,20)	12
C/N	10 (0,80)	12,2 (0,13)	-
P tot (P ₂ O ₅ % MS)	0,56 (0,02)	0,48 (0,10)	8
CaO (% MS)	3,42 (0,09)	3,76 (0,05)	-
MgO (% MS)	0,81 (0,07)	0,87 (0,02)	3
K ₂ O (% MS)	0,67 (0,03)	0,52 (0,16)	18
Cu (mg.kg ⁻¹ MS)	17,09 (1,25)	11,07 (1,73)	-
Mn (mg.kg ⁻¹ MS)	62,5 (3,17)	57,52 (2,18)	-
Zn (mg.kg ⁻¹ MS)	83,4 (4,42)	71,01 (2,01)	-
Fe (mg.kg ⁻¹ MS)	1381 (27,55)	1125 (13,37)	-
Pb (mg.kg ⁻¹ MS)	29,51 (2,82)	34,39 (5,10)	-

CBDM : composts de biodéchets ménagers, FM : fumure minérale (NPK), SC1 : saison culturale 1 et SC2 : saison culturale 2, Chiffre () : écart type.

Au niveau agronomique et environnemental, les composts de biodéchets obtenus sont considérés comme étant une matière résiduelle fertilisante, en raison du niveau de matière organique et des éléments majeurs et mineurs. Cependant, ces quantités d'éléments nutritifs

ne se retrouvent pas toujours entièrement sous forme assimilable ou disponibles aux cultures à court terme et c'est la raison pour laquelle elles ne peuvent se substituer qu'en partie aux engrais minéraux.

3.6 Conduite des essais

3.6.1 Dispositif expérimental

Selon les principes de Dagnelie (2006), un dispositif expérimental en blocs complètement aléatoire avec trois répétitions a été monté sur chaque site (Kimwenza, Mont Amba et Balume) et avec trois cultures-test selon les objectifs fixés dans cette étude. Sur chaque site, six traitements constitués de trois doses des composts de biodéchets ménagers (20, 40 et 60 t.ha⁻¹ MB) et de deux doses d'engrais minéraux NPK (100 et 200 kg.ha⁻¹) en plus du témoin sans amendement étaient expérimentés. Au total 18 parcelles élémentaires de 3 x 2,5 m étaient constituées et espacées entre-elles de plus ou moins 2 m selon la configuration du terrain sur chaque site (figure 13). L'application des traitements se fait en quatre saisons culturales décrites dans la suite du travail.

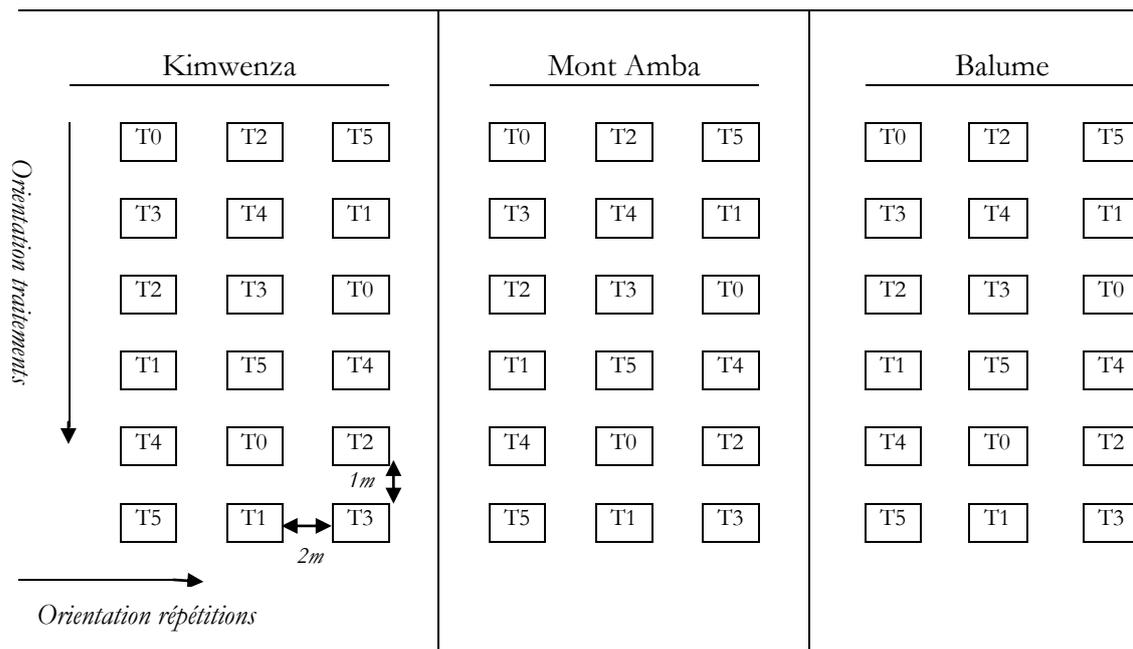


Figure 14. Schéma du dispositif expérimental dans les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.

Les symboles T0, T1, T2, T3, T4, T5 représentent les six traitements des fertilisants définis comme suit.

T0 : témoin absolu, correspond à la parcelle mise en culture sans apport des fertilisants, T1 : parcelle traitée aux composts à la dose de 20.t.ha⁻¹ MB, T2 : parcelle traitée avec 40 t.ha⁻¹ MB

CBDM, T3 : parcelle traitée avec 60 t.ha⁻¹ MB CBDM, T4 : parcelle traitée avec l'engrais NPK à 100 kg.ha⁻¹ et T5 : parcelle traitée avec l'engrais NPK à 200 kg.ha⁻¹.

3.6.2 Mode d'application et quantités

Le mode d'application et le choix des doses appliquées ont été basés sur les données de la littérature et des pratiques répandues dans la région. Certaines études concluent que la façon d'appliquer le compost ne semble pas influencer son efficacité. Mais, Dick et McCoy (1933 in Charland *et al.*, 2001), quant à eux différencient les méthodes d'application et les effets de celles-ci. Selon eux, l'application en surface du compost favorise l'amélioration de la structure des sols et réduit les phénomènes de lessivage et d'érosion, comparativement à la méthode d'incorporation des composts. L'application en surface permet également d'éviter la compétition pour l'azote entre la plante et les micro-organismes dans la zone racinaire.

La variété des composts rend difficile l'établissement de règles générales en vue de leur utilisation. De plus, il est difficile de donner des directives précises relatives aux quantités de compost à utiliser et on conseille d'appliquer entre 5 et 150 t.ha⁻¹ selon la nature du compost et le type de sol (Hofny-Collins, 2006; Gobat *et al.*, 1998; N'Dayegamiye *et al.*, 2005; Movahedi Naeini et Cook, 2000; etc.). Les quantités de composts décrits ci-dessus (section 3.5.1) et présentées dans le tableau 11 ont été appliquées simultanément sur chaque site pendant 4 saisons culturales en deux années (octobre 2007 à mai 2009). Pour le NPK, le choix se réfère aux habitudes répandues chez les agriculteurs en fonction de leur pouvoir d'achat, des champs exploités dans la Province de Kinshasa et aux recommandations des services du ministère de l'agriculture.

Tableau 11. Quantités des composts BDM apportées (t.ha⁻¹ MB) et d'engrais NPK (kg.ha⁻¹) au cours de l'expérimentation par saison culturale.

Type d'amendement	N° traitement	Saison culturale				Quantité totale apportée
		AC1		AC2		
		SC1	SC2	SC3	SC4	
	T0	0	0	0	0	0
CBDM	T1 (t.ha ⁻¹ MB)	20	20	20	20	80
	T2 (t.ha ⁻¹ MB)	40	40	40	40	160
	T3 (t.ha ⁻¹ MB)	60	60	60	60	240
NPK	T4 (kg.ha ⁻¹)	100	100	100	100	400
	T5 (kg.ha ⁻¹)	200	200	200	200	800

CBDM : composts de biodéchets ménagers, NPK : engrais minéraux, SC : saison culturale, AC1 : 1^{ère} année culturale, AC2 : 2^{ème} année culturale.

Les quantités d'éléments fertilisants pour chaque traitement: T1(299-245 kg N/ha, 62-62 kg P₂O₅/ha, 71-67 K₂O/ha), T2 (599-491 kg N/ha, 124-124 P₂O₅/ha, 146-134 kg K₂O/ha), T3 (898-736 kg N/ha, 186-186 kg P₂O₅/ha, 223-201 kg K₂O/ha), T4 (12-12 kg N/ha, 8 kg P₂O₅/ha, 18-18 K₂O/ha) et T5 (24-24 kg N/ha, 16-16 P₂O₅/ha, 36-36 K₂O/ha) respectivement à la première et deuxième année culturale.

Après la préparation des parcelles unitaires, chaque dose était appliquée par épandage superficiel de façon homogène, et cela une semaine avant le semis. Les mêmes apports ont été répétés chaque saison culturale pour le compost et le jour même avec l'engrais NPK.

3.6.3 Cultures-tests utilisées et opérations culturales

Trois cultures, le soja (*Glycine max* L. ; variété *vuangi TGX888-48C*), l'arachide (*Arachis hypogaea* L., variété *Bubanyi JL24*) et l'oseille (*Hibiscus sabbariffa* L.) ont été choisies pour servir de plantes-test dans les trois sites (SENASAEM, 2008), dans le but d'évaluer l'influence des amendements apportés sur le rendement en produits utiles. Le soja et l'arachide font partie des cultures les plus importantes cultivées en République Démocratique du Congo. La culture du soja et de l'arachide ont été encouragées dans le cadre du Plan de Rélançe Agricole en RDC. Elle est intéressante en RDC pour la sécurité alimentaire du fait de leur haute teneur en lipides et protéines (FAO, 2009). Leur cycle végétatif est de 3 à 4 mois, l'écartement dans et entre les lignes était respectivement de 15 – 20 cm et 20 - 25 cm. L'oseille est un des légumes qui assure un pouvoir économique aux maraîchers, son cycle végétatif est d'environ 2 mois, l'écartement appliqué entre les lignes était de 10 x 25 cm. Le soin d'entretien se limitait à 2 ou 3 binages et aucun traitement phytosanitaire n'a été apporté.

Au cours d'une saison culturale, chaque parcelle de l'essai recevait les trois cultures à la fois à raison de plus ou moins 5 lignes pour chaque culture dans la parcelle unitaire. D'une saison à l'autre, l'orientation des lignes et la disposition des cultures étaient interchangées pour minimiser l'effet des cultures et des rotations. Seul le rendement en produit utile a été considéré dans cette étude.

3.6.4 Durée des essais, échantillonnage et méthodes d'analyse des sols dans le temps

Dans l'agrosystème de la Province de Kinshasa, deux principales saisons culturales par an sont reconnues du fait des précipitations abondantes et inégalement réparties durant l'année, la saison A de septembre à janvier et la saison B de février à juin (Compère, 1974). L'étude a porté en tout sur quatre saisons culturales successives allant de la saison A 2008 à la saison B 2009.

Excepté les échantillons des sols prélevés pour le diagnostic de la fertilité à l'état initial, quatre campagnes d'échantillonnage des sols ont été menées, chaque fois entre la récolte de l'essai précédent et l'installation du suivant. Au total, 54 échantillons composites unitaires étaient récoltés sur les trois sites à chaque saison culturale (18 parcelles x 3 sites).

Les procédures de préparation et de conditionnement des échantillons des sols sont les mêmes que celles décrites plus haut ainsi que les méthodes d'analyses. Dans la présentation des résultats (figures), les quatre saisons culturales sont désignées en plus de l'état initial respectivement par les chiffres : **1**= état initial, **2** = première saison culturale (SA 2008), **3** =

deuxième saison culturale (SB 2008), **4** = troisième saison culturale (SA 2009) et **5** = quatrième saison culturale (SB 2009).

3.7 Analyses statistiques des données

L'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur a été effectuée à l'aide du logiciel *Minitab15*. La comparaison des moyennes des traitements au niveau de signification de 5 % a été opérée et aussi l'analyse de corrélation de *Pearson* entre différents paramètres étudiés et la dose de compost appliquée.

Chapitre 4. Propriétés et diagnostic de l'état agropédologique des sols des sites étudiés

4.1 Introduction

Beaucoup d'études de mise en valeur des sols acides en régions tropicales ont mis en évidence des limites dues à l'inadéquation de certains moyens utilisés par rapport aux types de sols considérés (Latham *et al.*, 1984 *in* Voundi, 1998). Mal connues, les contraintes minéralogiques, physiques, chimiques et surtout biologiques restent un préalable indispensable à toute investigation. Celles-ci affectent le niveau de productivité des sols et en Afrique en général, la productivité des terres agricoles n'est pas suffisante pour garantir la sécurité alimentaire des populations paysannes (Mze, 2007).

La Province de Kinshasa est essentiellement couverte de sols sableux dits sables ocres du système de *Kalahari* et ces sols ont un pouvoir agronomique très limité, notamment à cause, de leur faible capacité de rétention en eau et de leur réaction acide (Sys, 1983; Malele, 2003a). Ces propriétés constituent une limitation majeure de ces sols à toute production agricole et à une agriculture intensive sédentaire. La détermination des propriétés de tels sols constitue une étape importante dans l'évaluation de leur potentialité et usage. En République Démocratique du Congo, l'étendue du territoire associé au manque de données complique davantage la gestion des terres agricoles à tous les niveaux. Peu d'informations existent sur les caractéristiques physiques, minéralogiques, chimiques et biologiques des sols et ainsi, les limitations à leur fertilité chimique et biologique, sont mal connues. La connaissance de ces limitations serait le point de départ pour toute amélioration de l'état nutritif des sols et de la conservation du milieu naturel (Legros, 2007). Les propriétés physiques du sol affectent significativement la croissance des plantes et, renseignent principalement sur le pouvoir de rétention d'eau, l'aération et la facilité de pénétration des racines dans le sol. Les propriétés minéralogiques affectent la physique, la chimie et la biologie du sol, et indiquent les sources d'approvisionnement et de stockage des nutriments dans le sol.

L'objectif poursuivi dans ce chapitre consiste à caractériser les sols des sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume en vue de déterminer leur état agropédologique et de dégager les principales contraintes chimiques et biologiques susceptibles de limiter leur production agricole.

4.2 Matériels et méthodes

Les différentes méthodes d'échantillonnage des sols et d'analyses physico-chimiques et biologiques sont décrites dans le troisième chapitre de ce document.

4.3 Résultats et discussion

Nous présentons séparément les résultats des caractéristiques physico-chimiques et chimiques et ceux du statut microbiologique des sols étudiés.

4.3.1 Caractéristiques physiques

4.3.1.1 Granulométrie, densité apparente et CRC

Les résultats de l'analyse granulométrique des sols des 3 sites étudiés sont consignés dans le tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12. Quelques caractéristiques physiques des sols des sites étudiés.

Paramètres	Sols des sites		
	Kimwenza	Mont Amba	Balume
Texture (%)	Sable	Sable	Sable limoneux
Argile	2,00 (0,71)	4,75 (0,83)	10 (0,71)
Limon	6,50 (2,06)	2,50 (0,50)	1,75 (0,43)
Sable	91,50 (1,50)	92,75 (1,09)	88,75 (2,59)
CRC (%)	24,98 (0,14)	25,80 (0,00)	41,53 (0,19)

CRC : capacité de rétention au champ, Chiffre () : écart-type.

L'analyse granulométrique des sols étudiés a montré une texture essentiellement sableuse dans l'horizon superficiel qui traduit une certaine homogénéité du matériel parental constaté dans les études de Pain (1984) et Sys *et al.* (1961). Ce sont des sols constitués principalement de sables fins. La classification de ces sols selon l'« *USDA Taxonomy* » (Soil Survey Staff, 2006) et le *WRB* (2006) confirme davantage le caractère homogène des conditions de formation de ces sols. Ils peuvent être classifiés de *rubiques arenoferralsols (dystriques)* (WRB, 2006), c'est-à-dire « les sables ocres », appelés communément système de *Kalahari*. Les teneurs en argile et limon sont minimales dans les horizons superficiels. L'horizon superficiel de tous les sols étudiés contient environ moins de 10 % d'argile et environ plus de 2 % de limon, le reste étant naturellement constitué de sable. Une texture analogue a également été trouvée par Koy (2009) pour les sols du Plateau des Batéké (Mbankana, Mampu, Kinzono). Cette même étude a révélé que la fraction limon-argile est nettement dominée par le quartz, et la kaolinite est le minéral argileux important en plus de quelques oxydes résiduels (gibbsite et anatase). La présence d'horizons superficiels à texture grossière (sable) a été indiquée dans les sols de la région intertropicale et attribuée aux processus agissant simultanément ou séquentiellement sur les horizons comme la stratification des matériels parentaux, destruction de l'argile de l'épipédon, processus de migration ou d'accumulation d'argile, activité de vers de terre ou des termites, érosion d'argile ou de limon à partir de la surface du sol (Soil Survey Staff, 1975; Bravard et Righi, 1990; Marcelino, 1995; Koy, 2009).

La densité apparente des sols trouvés sur les trois sites est de $\pm 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$. Cette densité apparente de la couche superficielle se trouve dans la gamme de $1,1-1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, considérée par Taylor *et al.* (1966); Legros (2007) comme la densité des sols (minéraux) non récemment cultivés et non compactés. Cette valeur ne présente aucune restriction pour la pénétration des racines (London, 1991; De Geus, 1973; Baize *et al.*, 2008) et en plus de la porosité qui caractérise généralement les sols sablonneux ($> 40 \%$), cette valeur révèle que les sols étudiés sont d'excellentes propriétés physiques, due aux conditions optimales de drainage, de circulation de l'air et de pénétration facile des racines.

L'analyse de la capacité de rétention au champ (CRC) est de plus ou moins 25% pour les sols de Kimwenza et de Mont Amba; et 42% pour le sol de Balume (tableau 12). Ainsi, le sol de Balume semble avoir une capacité de rétention en eau beaucoup plus importante, en relation avec sa texture qui se justifierait par sa fraction argileuse élevée (tableau 12). En effet, comme d'autres caractéristiques physiques (conductivité hydraulique, perméabilité, densité apparente, etc.), la capacité de rétention en eau est grandement liée à la texture minéralogique qui détermine la structure du sol et peut être aussi influencée par les pratiques culturales (apports ou pertes en matière organique) (Mbonigaba, 2007; Mze, 2008). D'autres études ont montré que le taux des matières organiques a un effet direct sur la fonction de rétention en eau à cause de sa nature hydrophilique ou hydrophobique (Klute, 1986; Villar *et al.*, 1993 et Annabi, 2005). Dans le cas de notre étude le taux de matières organiques aurait faiblement contribué à la CRC. Ceci explique la faible rétention en eau combinée à de faibles teneurs en matière organique par rapport à la CRC limitée comme pour le sable pur.

4.3.2 Caractéristiques chimiques

Le tableau 13 cité ci-dessous contient les caractéristiques chimiques des échantillons composites des sols provenant des trois sites concernés par l'étude. Les résultats sont les moyennes de trois répétitions. En général, les directives proposées par London (1991), et dans la mesure du possible, combinées (associées) à celles des autres auteurs (ORSTOM *in* Sawadogo, 2006, etc.), ont été utilisées dans la discussion des résultats.

4.3.2.1 pH

Le pH est un paramètre important qui conditionne un grand nombre des réactions chimiques et microbiologiques dans le sol (Brady et Weil, 2002). Généralement, la plupart des plantes cultivées poussent convenablement dans un sol neutre ou légèrement acide c'est-à-dire de $5,5 < \text{pH} < 7$ (Landon, 1991). Les faibles valeurs de pH dans les sols limitent la croissance végétale par la diminution de la nitrification, la déficience en phosphore, la toxicité aluminique et manganique, et par la grande disponibilité des certains métaux lourds, etc.

Le tableau 13 révèle que tous les sols ont un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 5,5$, et sont donc caractérisés par une réaction acide. Les résultats du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ montrent que les sols de Kimwenza ($\text{pH} = 4,90$) et de

Mont Amba (pH = 4,4) sont fortement acides alors que celui de Balume (pH = 5,39) est moyennement acide. En outre, les résultats montrent dans tous les cas, que le pH-H₂O est supérieur au pH_{KCl}, indiquant la présence des colloïdes à charge négative dans les sols étudiés. Koy (2009) a rapporté les mêmes observations dans les sols de Mbakana (4,25), Mampu (pH = 4,90) et Kinzono (pH = 5,27) au Plateau des Batéké dans la Province de Kinshasa. Dans les mêmes conditions pédoclimatiques, Voundi (1998) et Dzaba (1987) ont enregistré des pH autour de 4,5 à 5,5 des sols de la région forestière au Cameroun et des sols ferrallitiques de la République du Congo respectivement.

Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites étudiés à l'état initial.

Paramètres	Sols des sites		
	Kimwenza	Mont Amba	Balume
pH-H ₂ O	4,90 (0,04)	4,40 (0,17)	5,39 (0,20)
pH _{KCl}	4,00 (0,02)	4,39 (0,02)	4,39 (0,01)
COT (%)	0,58 (0,03)	0,66 (0,02)	1,07 (0,05)
N _{tot} (%)	0,04 (0,01)	0,05 (0,01)	0,10 (0,04)
C/N	14,5 (0,41)	13,2 (1,07)	10,7 (3,92)
N-NH ₄ ⁺ (mg.kg ⁻¹)	1,79 (0,13)	1,56 (0,09)	2,43 (0,14)
N-NO ₂ ⁻ (mg.kg ⁻¹)	0,11 (0,02)	0,07 (0,02)	0,11 (0,02)
N-NO ₃ ⁻ (mg.kg ⁻¹)	10,41 (1,70)	7,03 (1,10)	10,84 (1,75)
N _{min} /N _{tot} (%)	0,31 (0,02)	0,20 (0,07)	0,14 (0,04)
P _{ass} (mg.kg ⁻¹)	6,94 (0,20)	12,75 (0,52)	15,25 (1,03)
P _{tot} (mg.kg ⁻¹)	101,90 (13,10)	144,16 (23,49)	427,99 (36,77)
Ca _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,22 (0,01)	0,22 (0,02)	0,27 (0,02)
Mg _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,16 (0,02)	0,15 (0,02)	0,11 (0,02)
K _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,07 (0,01)	0,06 (0,00)	0,07 (0,01)
Na _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,04 (0,02)	0,06 (0,01)	0,06 (0,01)
CEC (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	2,28 (0,03)	2,54 (0,07)	4,42 (0,13)
CECE (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,77 (0,07)	1,80 (0,01)	1,57 (0,04)
SBE (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,49 (0,05)	0,49 (0,01)	0,51 (0,03)
TS (%)	21,49 (1,92)	19,49 (0,11)	11,54 (0,38)
TS _{eff} (%)	27,68 (1,75)	29,70 (0,58)	32,48 (1,08)
H _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,28 (0,12)	1,31 (0,08)	1,06 (0,05)
Al _{éch} (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,16 (0,04)	1,21 (0,05)	0,99 (0,10)
Saturation Al (%)	50,88 (0,53)	47,64 (2,84)	22,40 (0,02)
Saturation Al _{eff} (%)	66 (1,00)	71,18 (2,84)	63,06 (0,12)
Fe (mg.kg ⁻¹)	42,52 (4,27)	33,20 (5,76)	52,91 (10,7)
Cu (mg.kg ⁻¹)	10,90 (1,10)	11,14 (0,70)	9,91 (1,30)
Mn (mg.kg ⁻¹)	31,10 (2,50)	21,20 (3,13)	40,80 (6,20)
Zn (mg.kg ⁻¹)	14,24 (1,38)	16,81 (2,70)	14,85 (1,50)

Chiffre () : écart-type.

4.3.2.2 Carbone organique (COT) et azote total (N_{tot})

La matière organique constitue une source principale par excellence d'éléments nutritifs (N, S, P, etc.) dans les sols tropicaux fortement altérés à faible réserve minéralogique.

Les teneurs en carbone organique et azote total respectivement $\leq 1\%$ et $\leq 0,1\%$ ont été obtenues sur les trois sites étudiés soit 0,58 et 0,04 à Kimwenza; 0,66 et 0,05 au Mont Amba et 1,07 et 0,1 à Balume. Confrontés aux valeurs guides proposées dans la littérature (Landon, 1991, ORSTOM *in* Sawadogo, 2006, etc.), les sols étudiés sont pauvres en carbone organique et en azote total. Koy (2009) a trouvé presque des résultats semblables (entre 0,85-1,15 pour le carbone et 0,04-0,07 pour l'azote total) au Plateau des Batéké et aussi Chaussod *et al.* (1992) dans un sol tropical ferrallitique (alfisol) du Vénézuéla. Les faibles teneurs en matières organiques doivent se répercuter négativement sur la structure des sols et générer de nombreuses déficiences de production et de résistance aux facteurs de dégradation (Ben Hassine *et al.*, 2008). Cette situation peut exposer ces sols à la dégradation par l'érosion hydrique lorsque les pentes deviennent fortes et favoriser un ruissellement efficace.

Le rapport C/N est moyen à Kimwenza et Mont Amba (13-15) et bas à Balume (10,7). Ceci indique pour le cas des sols de Kimwenza et Mont Amba, la présence d'une matière organique de mauvaise qualité, c'est-à-dire mal décomposable ou biodégradable. Ces rapports sont caractéristiques des sols à faible teneur en azote, due probablement à la faible vitesse de minéralisation de la matière organique (Boyer, 1982), combinée à une perte d'azote par le lessivage intense et continu propre aux régions tropicales caractérisées par des températures élevées et des fortes précipitations (Kanyankogote *et al.*, 2005). Selon, Landon (1991), dans les sols à $\text{pH} < 5,5$; les bactéries nitrifiantes et fixatrices d'azote sont détruites par l'acidité du sol, et la nitrification de la matière organique est significativement limitée, conduisant ainsi la déficience en azote. Le rapport $N_{\text{min}}/N_{\text{tot}}$ qui constitue un bon indicateur du taux de minéralisation le confirme pour les sols étudiés. Pour tous les sites, les quantités des formes minérales sont faibles, elles constituent seulement 0,1 à 0,3 % de l'azote total présent dans les sols. Le taux de minéralisation est faible dans tous les sols étudiés selon l'ordre de Kimwenza (0,3) > Mont Amba (0,2) > Balume (0,1) en raison du faible taux de matière organique. Et selon, Brady et Weil (2002), c'est seulement 1,5 à 3,5 % de l'azote organique qui se minéralise chaque année.

4.3.2.3 Phosphore

Les résultats des valeurs moyennes de phosphore assimilable et de phosphore total sont présentés dans le tableau 13. La teneur en phosphore disponible pour le sol de Kimwenza est de 7 mg.kg^{-1} , un peu plus de la moitié pour les deux autres sites, Mont Amba (13 mg.kg^{-1}) et Balume (15 mg.kg^{-1}). Koy (2009) a trouvé une moyenne de 15 mg.kg^{-1} de phosphore disponible dans trois sites de la région du Plateau des Batéké (tableau 1, section 1.2.2). Ces valeurs par rapport aux valeurs guides de Landon (1991) pour les sols tropicaux ($> 15 \text{ ppm}$) montrent que ces teneurs sont faibles pour tous les sols. Les niveaux faibles indiquent une déficience en phosphore dans les sols.

Quant au phosphore total, les valeurs sont très déficientes à Kimwenza, faibles au Mont Amba et moyennes à Balume (tableau 13). Il faut noter que dans bien des cas, le phosphore total peut être en abondance dans le sol, mais des carences peuvent être observées sur les cultures en raison des formes de regression (Mze, 2009).

Dans les sols acides tropicaux, le phosphate se combine au fer et à l'aluminium pour former des composés très peu solubles qui sont non disponibles pour les plantes (Troeh et Thompson, 2005; Ueküll et Mitert, 1995 *in* Kotchi *et al.*, 2010; Dabin, 1963). Cette fixation ainsi que leur degré d'insolubilité sont la cause principale des faibles teneurs en phosphore disponible dans les sols étudiés. Ces formes peuvent être solubilisées par les micro-organismes mais cela dépend du carbone disponible.

4.3.2.4 Capacité d'échange cationique et cations basiques

La capacité d'échange cationique (CEC) est l'aptitude d'un sol à stocker des cations échangeables. Pour un sol donné, la CEC est déterminée par les quantités relatives des différents colloïdes présents et par leur CEC respectives, formant un complexe communément appelé complexe argilo-humique (Koy, 2009).

Les valeurs de la CEC obtenues sont de l'ordre de 2,5 et 4,5 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ respectivement pour Kimwenza, Mont Amba et Balume. Ces valeurs sont très faibles par rapport aux valeurs guides (Landon, 1991; ORSTOM *in* Sawadogo, 2006). Ces sols contiennent par conséquent, des faibles réserves d'éléments nutritifs. Koy (2009) a trouvé dans les sols des Batéké que la CEC était compatible à leur minéralogie, dont la fraction argileuse est dominée par la kaolinite (phyllosilicate 1 :1) avec les hydroxydes ou les oxydes résiduels d'Al et de Ti. Ainsi, la charge nette sur le complexe adsorbant est négative et ceci est confirmé par ΔpH (KCl-H₂O) pour tous les sols étudiés. La texture essentiellement sableuse trouvée dans les sols, limite cependant leur capacité d'échange cationique.

En considérant la capacité d'échange cationique effective (CECE), des teneurs très faibles ont été également obtenues indiquant que ces sols ont une capacité de stockage limitée. Les sols caractérisés par une $\text{CECE} \leq 4 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$, comme les sols étudiés (tableau 13), ont une capacité limitée de rétention en éléments nutritifs particulièrement les cations (Sanchez *et al.*, 1982 *in* Voundi, 1998). Par conséquent, les pertes de cations par lessivage pourraient être attendues. D'excellentes propriétés physiques observées (section 4.3.1.1), prédisposent ces sols aux pertes d'éléments nutritifs par lessivage. Considérant des faibles taux de matière organique obtenue dans les sols de tous les sites, sa contribution à la capacité d'échange est faible par rapport aux minéraux argileux.

Les valeurs de Ca échangeables pour tous les sols étudiés sont inférieures à 0,35 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$. Elles sont ainsi inférieures à 1,0 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$, valeur limite supérieure des teneurs très faibles en

Ca échangeable. La déficience en Ca s'observe dans les sols à faibles CEC et $\text{pH} \leq 5,5$ (Landon, 1991).

Pour le Mg échangeable les valeurs trouvées sont également très faibles, $< 0,5 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ qui est la teneur seuil en déficience pour les sols tropicaux (Holland *et al.*, 1992 *in* Koy, 2009).

Les teneurs en K échangeables sont de l'ordre de $0,07 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$, de très loin plus petite que la valeur 0,2 considérée comme seuil de déficience en K (Landon, 1991).

Concernant le rapport Ca/Mg, les valeurs pour tous les sols sont < 3 et, suggèrent une inhibition possible de phosphore et une déficience en Ca (Landon, 1991). Selon Boyer (1982), les rapports Ca/Mg sont dans la gamme de 1,5-5,0; considérée comme optimale pour la plupart des cultures tropicales. Pour un bon équilibre entre le calcium et le magnésium, les rapports Ca et Mg devait être au moins 1 (Broyer, 1982). Les valeurs de rapport Ca/K sont en deçà de 6 et 12 comprises comme un bon équilibre pour ces deux cations dans les sols tropicaux (Boyer, 1982). Concernant le rapport Mg/K, Boyer (1982) a proposé 2,0 comme valeur limite inférieure pour les sols convenablement pourvus en Mg ($> 1,0 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ de sol), de 3,0 pour les sols contenant 0,3 à $1 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ de sols et une valeur de 3,5-4 pour les sols qui en sont vraiment déficients; la limite supérieure étant de l'ordre de 20-25 $\text{cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ pour les sols déficients en Mg et K. Pour tous les sols, le rapport Mg/K ne met pas en évidence une déficience constatée en Mg, mais indique seulement les faibles teneurs en magnésium et en potassium.

4.3.2.5 Taux de saturation en bases

Souvent, utilisée comme indicateur du niveau de fertilité des sols, la saturation en base est la proportion de la capacité d'échange cationique occupée par les cations basiques échangeables (Ca, Mg, K et Na), exprimée en pourcentage.

Les résultats consignés dans le tableau 13 révèlent que les taux de saturation sont très faibles dans tous les sols étudiés et sont respectivement de plus ou moins 12, 20, 22 % pour Balume, Mont Amba et Kimweza. Même calculée par rapport à la capacité d'échange cationique effective (CECE), la saturation en bases est toujours faible. Ces sols sont qualifiés de «*dystriques*» ou sols moins fertiles avec un taux de saturation $< 50\%$ (WRB, 2006; Quantin, 1985). Dans le cas d'espèce (*Arénoferralsols*), tous les éléments nutritifs sont concentrés dans les matières organiques du sol et ou dans la biomasse microbienne (WRB, 2006).

Le Ca, le Mg et le K sont considérés en agriculture comme les cations basiques les plus importants. Selon Wolf (2000), les valeurs idéales de saturations en bases pour les trois cations sont 70-85 % pour le Ca, 10-15 % pour le Mg et 4-7 % pour le K. Dans le cas de notre étude, un déséquilibre a été observé entre ces cations à cause probablement de leurs très faibles teneurs dans les différents sols étant donné leur degré d'altération. Selon Voundi

(1998), le déséquilibre entre le calcium et le magnésium dans les sols tropicaux est la résultante de l'inadéquation en Ca, dû à l'excès d'Al échangeable.

4.3.2.6 Acidité d'échange, Al échangeable et saturation en Al

L'acidification entraîne la diminution de pH de sol par lessivage des cations basiques en région tropicale humide dominée par de fortes précipitations et des températures élevées. D'après Rowell et Wild (1985), le processus d'acidification devient plus important dans les sols pauvres en cations basiques et des sols à textures grossières. L'acidité d'échange provient des ions hydrogène et aluminium, soit $1,3 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ pour les sols de Kimwenda et Mont Amba et $1,1 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ pour le sol de Balume (tableau 13).

Dans les sols où le $\text{pH} > 5,5$, l'aluminium est sous la forme $\text{Al}(\text{OH})_3$ et l'Al échangeable n'existe plus; dès que le pH devient inférieur à cette valeur, la teneur en Al échangeable augmente et devient le cation le plus abondant du complexe d'échange (Landon, 1991; Boyer, 1982; Reuss *et al.*, 1990). Dans les sols étudiés, les teneurs en Al échangeables sont de l'ordre de 1 à $1,2 \text{ cmol}_{(+)}.\text{kg}^{-1}$ et semble être faibles. Les valeurs correspondantes de saturation par rapport à la capacité d'échange cationique effective sont supérieures à 60 % et varie de 63 à 71 %. Selon Landon (1991), les sols saturés à plus de 60 % d'aluminium présentent une toxicité aluminique considérable, et pose de sérieux problèmes de croissance des plantes. Seules les cultures tolérantes (théier, caoutchouc, manioc, etc.) peuvent y croître normalement. D'après Voundi (1998), les sols dont la saturation aluminique est comprise entre 10 et 60 % présentent des problèmes d'acidité et l'aluminium présente des troubles de croissance végétale. Comme l'Al disponible vient des argiles lorsque le pH baisse, cette dégradation est toujours difficile à récupérer même si le pH remonte, l'Al précipite mais ne retourne que peu dans les argiles.

La désaturation des complexes adsorbants des sols tropicaux suite au lessivage des cations basiques, conduit généralement à leur enrichissement en Al et par conséquent, à l'acidification des sols (Dabin, 1984). Ceci explique que les valeurs de saturation en Al trouvées dans les sols étudiés seraient dues principalement au pH et à la faiblesse du statut en cations basiques suite au lessivage accentué par les conditions climatiques de la région caractérisées par de fortes précipitations.

4.3.2.7 Eléments nutritifs mineurs

Les microéléments du sol proviennent essentiellement de l'altération des roches et des minéraux. Leurs déficiences ou toxicités dépendent de leurs teneurs totales dans les sols. Les valeurs des teneurs en Fe, Mn, Zn et Cu des sols étudiés sont rapportées dans le tableau 13. Les valeurs de Zn et Cu obtenues sont inférieures aux valeurs indicatives (seuils limites) de toxicité dans les sols agricoles rapportées par Baize (2002) pour les législations néerlandaise (140 et $36 \text{ mg}.\text{kg}^{-1}$ de sol) et suisse (150 et $40 \text{ mg}.\text{kg}^{-1}$ de sol) par exemple. Dans l'ensemble,

nos résultats se trouvent dans la gamme de celles trouvées par Biey (2001) pour le sol de Mont Amba (Cu 11,7 mg.kg⁻¹; Fe 12 mg.kg⁻¹; Mn 6 mg.kg⁻¹; Zn 6,9 mg.kg⁻¹) et Koy (2009) pour le sol de Balume (Cu 2,08 mg.kg⁻¹; Fe 68,03 mg.kg⁻¹; Zn 15,53 mg.kg⁻¹; Mn 72,4 mg.kg⁻¹).

4.3.3 Caractéristiques microbiologiques

Les résultats moyens des caractéristiques liées à la biomasse, à l'activité microbienne et enzymatique pour les échantillons des sols des trois sites sont présentés dans le tableau 14. Il faut noter qu'il n'est pas toujours facile de comparer les caractéristiques microbiologiques dans la littérature, car les données varient fortement en fonction de nombreux facteurs tels que les conditions pédoclimatiques, les méthodes d'analyses, etc. Cependant, ces caractéristiques nous renseignent sur la minéralisation de la matière organique, la qualité potentielle de la MO et les changements effectués dans l'état de fertilité des sols, etc.

4.3.3.1 Azote et carbone de la biomasse microbienne

L'azote microbien et le carbone microbien, deux paramètres microbiologiques traduisant en même temps la biomasse microbienne, indiquent des valeurs faibles (tableau 14) dans les trois sites de l'étude. Seules les valeurs de C_{mic} obtenues à Balume (0,053 mg.g⁻¹ de sol) se situent d'après Dilly (2005) dans la marge régulièrement reconnue pour les sols de surface (0,050-5 mg.g⁻¹ sol), les deux autres sites étant en dessous de cette gamme.

Le rapport C_{mic}/N_{mic} sert d'indicateur du taux de minéralisation du carbone et de l'azote à partir des formes organiques de base, mais renseigne aussi sur la proportion relative de la composition microbienne. Un faible rapport pourrait traduire estime Moore *et al.* (2000), la prédominance de la communauté bactérienne et que d'après Ross et Sparling (1993), Dilly (2003), les champignons disposent d'un rapport plus élevé que les bactéries. La valeur de C_{mic}/N_{mic} trouvée à Balume est légèrement inférieure à celle de Kimwenza et les deux largement inférieures à celle du Mont Amba.

Le quotient métabolique (qCO_2), encore appelé respiration spécifique, sert d'indicateur de perturbation, de développement de l'écosystème microbien (l'état physiologique des micro-organismes) et également des conditions favorables à la disponibilité des nutriments (Wardle et Ghani, 1995 in Dilly *et al.*, 2005). Les valeurs élevées de qCO_2 ont été observées (tableau 14) dans tous les sites Kimwenza (2,71), Mont Amba et Balume (1,89). Ce qui explique, selon Dilly (2005), Leclerc (2001a) et Sparling (1997), les conditions de stress du milieu qui dans le premier cas se réfèrent aux faibles pH (ou l'activité bactérienne est réduite en milieu acide) et au taux de carbone organique (faible disponibilité).

Enfin, aux conditions pédoclimatiques comparables la taille du compartiment « biomasse microbienne » est directement fonction du carbone disponible pour satisfaire les besoins

énergétiques des micro-organismes (carbone du sol, plus ou moins biodégradable, et surtout carbone des entrées par les végétaux : résidus de culture et rhizodéposition). On constate dans le tableau 14 ci-dessous, la biomasse microbienne est beaucoup plus importante à Balume par rapport aux autres sites.

Tableau 14. Valeurs moyennes de carbone & azote microbien, respiration basale & induite par substrat, quotient d'activation respiratoire, quotient métabolique, carbone facilement métabolisable, activité de la monophosphoesterase acide, activité de l'uréase tamponnée & non tamponnée.

Paramètres	Sol de site		
	Kimwenza	Mont Amba	Balume
C_{mic} ($\mu\text{g C}\cdot\text{g}^{-1}\text{sol sec}$)	23,03 (2,13)	33,19 (1,57)	53,51 (6,25)
N_{mic} ($\mu\text{g N}\cdot\text{g}^{-1}\text{sol sec}$)	4,00 (0,30)	3,00 (0,76)	12,00 (1,01)
RB ($\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\text{sol sec}$)	0,23 (0,02)	0,23 (0,04)	0,37 (0,03)
RIS ($\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\text{sol sec}$)	1,13 (0,12)	1,63 (0,09)	3,59 (0,26)
C_{fm} ($\mu\text{g C}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{sol sec}$)	155,67 (7,19)	173,35 (10,34)	293,03 (25,70)
AU_{nt} ($\mu\text{g NH}_4^+\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}\text{sol sec}$)	6,57 (0,20)	11,82 (0,73)	13,20 (0,69)
AU_t ($\mu\text{g NH}_4^+\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}\text{sol sec}$)	15,42 (0,75)	17,82 (0,50)	22,93 (1,04)
APA ($\mu\text{mol PNP}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\text{sol sec}$)	0,24 (0,02)	0,32 (0,05)	0,50 (0,02)
$q\text{CO}_2$ ($\text{mg C}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{C}_{mic}\cdot\text{h}^{-1}$)	2,72 (0,46)	1,89 (0,20)	1,89 (0,06)
Q_R	0,20 (0,02)	0,14 (0,01)	0,10 (0,01)
C_{mic}/COT (%)	0,40 (0,04)	0,50 (0,01)	0,50 (0,03)
C_{fm}/COT (%)	2,68 (0,39)	2,63 (0,06)	2,74 (0,09)
N_{mic}/N_{tot} (%)	1,00 (0,15)	0,60 (0,13)	1,20 (0,40)
C_{mic}/N_{mic}	5,75 (0,08)	11,60 (2,01)	4,46 (0,12)

C_{mic} : carbone microbien, N_{mic} : azote microbien, RB : respiration basale, RIS : respiration induite par substrat, Q_R : quotient d'activation respiratoire, C_{fm} : carbone facilement métabolisable, AU_{nt} : activité de l'uréase non tamponnée, AU_t : activité de l'uréase tamponnée, APA : activité de la monophosphoesterase acide, $q\text{CO}_2$: quotient métabolique, Chiffre () : écart-type.

Les proportions de C_{mic} par rapport au COT sont $< 1\%$ sur les trois sites alors que celles de N_{mic} par rapport à N_{tot} représentent respectivement moins de 1% au Mont Amba et $\geq 1\%$ pour Kimwenza et Balume. Ces proportions ne sont normalement pas comprises entre $1-5\%$ et $1-6\%$ valeurs limites dans le sol respectivement pour le C_{mic}/COT et N_{mic}/N_{tot} sauf pour Kimwenza et Balume (Smith et Paul, 1990; Sparling, 1997; Leclerc, 2001a).

4.3.3.2 Respiration du sol et carbone facilement métabolisable

Les résultats de la respiration basale (RB) et de la respiration induite par le substrat (RIS) sont consignés dans le tableau 14. Il ressort de ce tableau que les valeurs de la respiration basale sont de l'ordre de $0,23$ et de $0,37 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ de sol sec respectivement pour les sols de deux sites de Kimwenza et Mont Amba; et de Balume. Les valeurs correspondantes de la respiration induite par le substrat sont de $1,13$ pour Kimwenza; $1,63$ pour Mont Amba et $3,59 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ de sol sec pour Balume.

La respiration microbienne du sol est donc plus importante au niveau du site de Balume en relation avec la disponibilité du matériel organique (Tejada *et al.*, 2006a, Tejada *et al.*, 2006b). Le taux le plus élevé du carbone organique de ce site peut être considéré, en accord avec Tejada *et al.* (2006b), Mbonigaba (2007), Mze (2008) et Ruganzu (2009), comme l'un des facteurs les plus importants affectant l'activité microbienne du sol. D'autres facteurs tels que l'aération, l'approvisionnement en eau dans le sol (saison sèche, saison de pluie), la température, le pH et la fourniture de chaque nutriment, sont également importants; mais la fourniture de l'énergie est très fréquemment le facteur limitant dans l'activité microbienne (Mamilov et Dilly, 2002).

Concernant le carbone facilement métabolisable (C_{fm}) qui est aussi une composante du carbone organique total, les valeurs obtenues sont faibles (tableau 14). Le rapport C_{fm}/COT indique mieux la qualité de la matière organique du sol (Fließbach *et al.*, 2006) et situe entre 2,6 % pour Kimwenza, Mont Amba et 2,74 % pour Balume du carbone total. Cette fraction du carbone présente, du point de vue chimique et microbiologique, aussi un grand intérêt que le carbone total dans un sol bien que la mesure de ce paramètre soit le plus souvent utilisée pour les eaux usées et les boues de stations d'épuration.

4.3.3.3 Activité enzymatique de la phosphatase et l'uréase

Les résultats des mesures des activités de la monophosphoestérase et de l'uréase (tamponnée et non tamponnée) sont rapportés dans le tableau 14. Les valeurs obtenues montrent des activités très faibles (Alef, 1995) et sont comprises entre 0,24 et 0,50 $\mu\text{mol.pNP.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ de sol sec pour APA; 6,57 et 13,20 $\mu\text{g.N-NH}_4.\text{g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ de sols sec pour U_{nt} et de 15,42 et 22,93 $\mu\text{g.N-NH}_4.\text{g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ sol sec pour U_r . Pour tous ces paramètres la répartition sur les trois sites suit la distribution de la matière organique des sols dans l'ordre croissant de Kimwenza < Mont Amba < Balume. Ces observations ont été faites par plusieurs auteurs (Gracia *et al.*, 1997; Pascua *et al.*, 1998; Bierderbeck *et al.*, 2005; Tejada et Gonzalez, 2006; Mbonigaba, 2007).

4.4 Conclusion partielle

Les niveaux des caractéristiques chimiques et microbiologiques étudiées permettent de dégager les principales contraintes à la productivité des sols dans les régions déterminées.

La caractérisation physique a révélé que les sols des sites étudiés ont une texture essentiellement sableuse (sable fin) dans l'horizon superficiel. La capacité de rétention est très faible et est fonction de la teneur en argile. La classification des sols comme *rubiques arenoferralsols (dystriques)* a confirmé davantage l'homogénéité des conditions de formation des sols de la Province de Kinshasa. Cependant, le site de Balume présente des bonnes caractéristiques physiques telles que la textures et capacité de rétention au champ, etc. que les deux autres sites de Kimwenza et Mont Amba.

La caractérisation chimique des sols a montré que ces derniers présentent une réaction acide ($\text{pH} < 5,5$), ont des très faibles teneurs en carbone organique total, en azote total, en phosphore disponible, en cations basiques échangeables et des faibles valeurs de la capacité d'échange cationique. Les sols étudiés sont généralement caractérisés par une balance cationique déséquilibrée, particulièrement entre le calcium et le magnésium. Du point de vue caractéristiques chimiques, le sol de Balume est plus riche en carbone organique total, azote total, phosphore total, etc. soit plus ou moins le double de deux autres sites.

S'agissant des caractéristiques microbiologiques, les résultats montrent une faible activité microbienne dans les sols de tous les sites; ces activités restent influencées par les taux de matière organique. Les caractéristiques microbiologiques sont meilleures à Balume que dans les deux autres.

La faible fertilité chimique et biologique combinée au faible potentiel de rétention d'eau restreint considérablement la production agricole des sols de la Province de Kinshasa. Ces sols nécessitent des techniques appropriées de gestion permettant de relever leur fertilité chimique jusqu'au niveau optimal, et d'accroître la production agricole.

De façon générale, le sol de Balume semble avoir un niveau de fertilité plus élevé que les sols des deux autres sites, bien que ces sols présentent les mêmes caractéristiques morphologiques.

Les solutions de recharge pour augmenter les teneurs en matières organiques de ces sols seraient les épandages des fumiers et des déchets organiques de toutes sortes, dont les boues des stations d'épuration. Des apports périodiques d'amendements organiques sont nécessaires pour maintenir un niveau optimal de MO des sols cultivés qui influencent plusieurs propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols qui sont à la base de leur qualité globale.

Chapitre 5. Effets de l'application des composts de biodéchets ménagers sur les propriétés physicochimiques et chimiques des sols

5.1 Introduction

Comme beaucoup de sols ferrallitiques (Chaussod *et al.*, 1992), les sols de la Province de Kinshasa sont pauvres et le rôle de la matière organique dans la « fertilité » est considérable. La mise en culture de ses sols conduit à une chute rapide de matières organiques et un effondrement de la fertilité tant chimique que biologique. Cela ne peut être réalisé que par l'application des matériels susceptibles d'augmenter le pH et par conséquent, accroître un niveau de fertilité élevé en y apportant les éléments nutritifs pour les cultures. Dans les sols fortement altérés, le relèvement du pH à des valeurs 6 ou 7 par exemple requiert des apports fréquents en chaux à cause de l'effet tampon faible que présentent ces sols (Kanyankogote *et al.*, 2005). Et la pratique de l'agroforesterie (exemple à Batéké avec *Acacia auriculiformis* A. Cumm ex Benth), la jachère et la technique de culture sur brûlis ont montré leurs limites du fait que le relèvement de la fertilité et de la maintenance des sols n'augmente qu'à long terme d'une part et la perte en matière organique et en azote à chaque nouvelle période de culture d'autre part (Kasongo *et al.*, 2009). Or, les fertilisants organiques constituent une source essentielle de matières organiques dans le sol et d'éléments nutritifs pour les plantes. La connaissance de leurs niveaux dans les sols agricoles renseigne sur leur potentialité fertilisante (Mze, 2008). De même, les matières organiques jouent un rôle prépondérant dans la pédogenèse et peuvent modifier de manière drastique les propriétés physiques (résistance à l'érosion, etc.), chimiques et biologiques du sol (Ros *et al.*, 2006a; Jouquet *et al.*, 2010). L'accumulation de la matière organique dans le sol est un processus lent, beaucoup plus lent que son déclin (Ros *et al.*, 2006b). Cependant, l'ampleur de l'amélioration dépend de la composition chimique des amendements organiques appliqués au sol (Tejada *et al.*, 2009b). Selon Mustin (1987); Epstein (1997); deux caractéristiques importantes du compost qui influencent les modifications dans les sols sont : son contenu en substances humiques fortement chargées qui s'intègre dans le siège des réactions d'échange cationique, ainsi que la libération des éléments nutritifs majeurs par minéralisation. Il devient alors important de suivre leur dynamique dans les sols agricoles généralement anthropisés ou dans les sols marginaux mis en culture (Gobat *et al.*, 1998; Brady et Weil, 2002).

Les bonnes pratiques agricoles impliquent de fréquentes applications d'engrais organiques à la fois classiques, tels que les fumiers ou les résidus de plantes, ainsi que non conventionnels tels que les différents types de compost (Weber *et al.*, 2006). La caractérisation des composts des biodéchets ménagers (chapitre 3) a indiqué que ces matériaux possèdent des prescriptions requises pour améliorer la qualité des sols tropicaux pauvres et acides. Ceci constituerait une solution alternative qui permettrait aux petits fermiers et à la population locale disposant de faibles capitaux, d'augmenter leur production agricole grâce aux ressources locales disponibles

et bon marché par rapport aux intrants chimiques conventionnels. Ros *et al.* (2006a) ont rapporté que l'utilisation de composts de déchets organiques est devenue de plus en plus populaire à travers toute l'Europe réduisant ainsi l'usage des engrais artificiels et contribue également à résoudre les graves problèmes environnementaux concernant l'élimination de grandes quantités des déchets à stocker dans les décharges (Weber *et al.*, 2006).

Bien que la littérature soit fournie en ce qui concerne les effets des déchets organiques sur les propriétés physico-chimiques et chimiques, très peu d'informations sont disponibles dans le cas de sols tropicaux en zones humides en particulier pour la République Démocratique du Congo. Elle mérite encore davantage d'être enrichie concernant son impact sur la dynamique des propriétés chimiques notamment, la réaction du sol, la matière organique, les éléments nutritifs, la capacité d'échange cationique, l'acidité d'échange; en plein champ dans un écosystème sablonneux de sols acides de la Province de Kinshasa et en quatre essais d'apports consécutifs aux différentes doses. La plupart des études réalisées sur la valorisation de ces produits ont été en milieux contrôlés et à très petite échelle par transfert de biomasse et/ou l'utilisation des composts spécifiques (Mbonigaba, 2007). D'autres n'ont été conduites que sur des périodes trop courtes, en une saison culturale pour pouvoir observer véritablement les changements dans les caractéristiques des sols.

5.2 Matériels et méthodes

Les méthodes d'analyses chimiques sur les échantillons des sols prélevés (0 – 30 cm de profondeur) chaque saison culturale durant les essais de fertilisation sont décrites dans la section 3 du document ainsi que la conduite des essais de fertilisation.

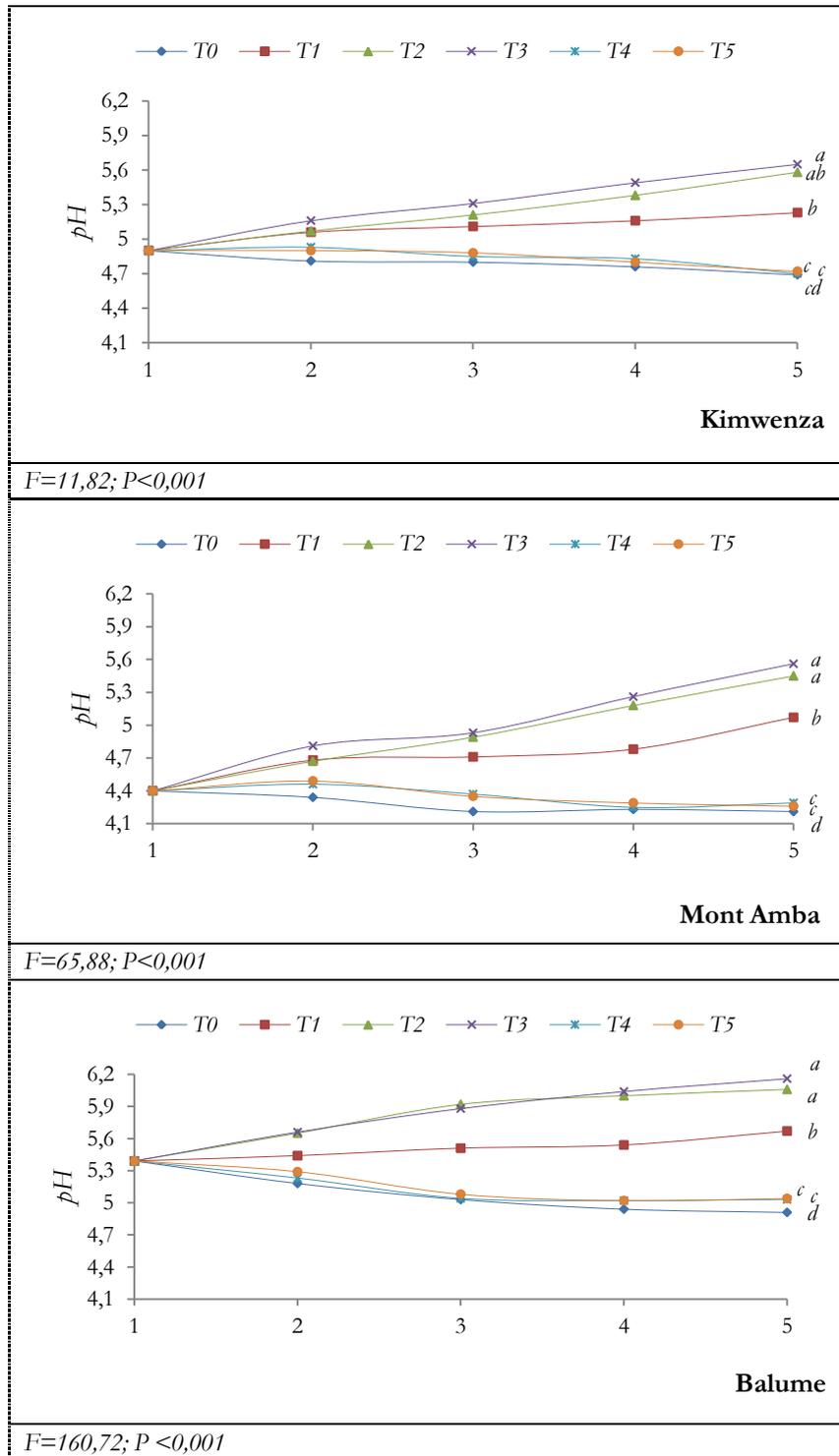
5.3 Présentation des résultats et discussion

Les résultats de l'évolution des différents paramètres physico-chimiques étudiés sont présentés dans les figures 15 à 21 pour les trois sites et les tableaux 15 à 21 qui concernent la 4^{ème} saison culturale. L'examen de ces résultats permet de constater que les apports en matières organiques ont induit l'augmentation du taux de carbone organique total, de l'azote, du phosphore, des complexes adsorbants et une diminution sensible de l'Al échangeable.

5.3.1 pH

Il apparaît que les apports en matières organiques (composts BDM) augmentent le pH_{H_2O} au cours des différentes saisons culturales (figure 15). Cette augmentation est fonction des doses apportées.

A l'état initial, les sols de Kimwenza et de Mont Amba étaient qualifiés des sols acides et celui de Balume de moyennement acide (voir section 4.3.2). Après quatre saisons culturales d'apports organiques répétés, les sols amendés varient des sols acides ($pH < 5,5$) aux sols faiblement ou moyennement acides ($5,5 \leq pH \leq 6,2$) selon les normes d'interprétation de



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 15. Evolution du pH dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

Landon (1991) surtout pour les sites de Kimwenza et Balume. Cependant, les sols non amendés (T0) et/ou amendés aux engrais minéraux deviennent fortement acides ($\text{pH} < 4,95$).

Les résultats de l'ANOVA des données à la fin de l'expérimentation pour les trois sites sont résumés en annexe (annexe 4). Ils montrent qu'il existe des différences significatives ($p < 0,05$), voire très significatives ($p < 0,001$) entre traitements appliqués dans les différents sites à la même période expérimentale (annexes 4.1- 4.3). La comparaison des moyennes du $\text{pH}_{\text{-H}_2\text{O}}$ ($p < 0,05$) pour les différents traitements, sur différents sites et à la même période est signalée à la figure 15 et dans le tableau 20.

Il en résulte que le traitement témoin comme les traitements aux engrais minéraux NKP présentent un groupe à deux classes (*cd, d*) à Kimwenza et un autre groupe (*c, d*) au Mont Amba et à Balume, et les différences observées entre les valeurs de pH de ces traitements ne sont pas significatives. Au regard des comparaisons établies, les différences entre les valeurs du $\text{pH}_{\text{-H}_2\text{O}}$ pour tous les traitements à base des composts et ceux d'engrais minéraux NPK sont très hautement significatives ($p < 0,001$). Ceci confirme l'effet positif (bénéfique) des apports en matières organiques lié à toutes les doses appliquées, sur le $\text{pH}_{\text{-H}_2\text{O}}$ des sols de Kimwenza, Mont Amba et Balume. Les traitements aux composts présentent un groupe à trois classes représentées par les lettres *a, ab, b* à Kimwenza, et un groupe à deux classes *a, b* au Mont Amba et Balume d'après le test de Tukey ($\alpha = 0,05$) (figure 15, tableau 20).

L'apport des matières organiques par leurs contenus en bioéléments minéraux (Ca et Mg), leur grande capacité d'échange cationique et de leur effet tampon rehausse le pH du sol (Leclerc, 2001a; Gobat *et al.*, 2003; Schvartz *et al.*, 2005). Cette augmentation serait due non seulement à l'effet tampon de la MO, à la teneur en cations basiques essentiellement le Ca et Mg mais aussi à des micro-organismes filamenteux qui prennent naissance dans les apports organiques et qui vont chercher en profondeur d'autres éléments et les répartissent dans toute la colonne de sol colonisée (Mze, 2008). Les composts des biodéchets appliqués contiennent en moyenne 3,59 % de CaO et 0,84 % MgO. Et d'autre part, l'augmentation du pH s'expliquerait également par la complexation de l'aluminium par la matière organique avec comme conséquence la baisse de l'acidité. Ainsi, l'augmentation des protons (H^+), la perte en cations basiques suivie d'une baisse de la CEC, expliquerait partiellement l'acidification des sols non amendés et ou des sols amendés aux engrais minéraux. Celle-ci est sous l'influence de plusieurs facteurs d'ordre biologique tel que l'immobilisation des bases échangeables par les micro-organismes du sol et d'autres comme les exportations répétées par la culture non accompagnées de restitutions, et des conditions pédoclimatiques comme la forte précipitation, l'érosion ou l'altération des sols et le lessivage (Van Wambeke, 1995).

La fumure organique influe également positivement sur le pH par : - la fourniture de carbone organique aux micro-organismes qui consomment les protons comme source d'énergie; - le phénomène d'adsorption des anions organiques sur les surfaces des hydroxydes de Fe et Al,

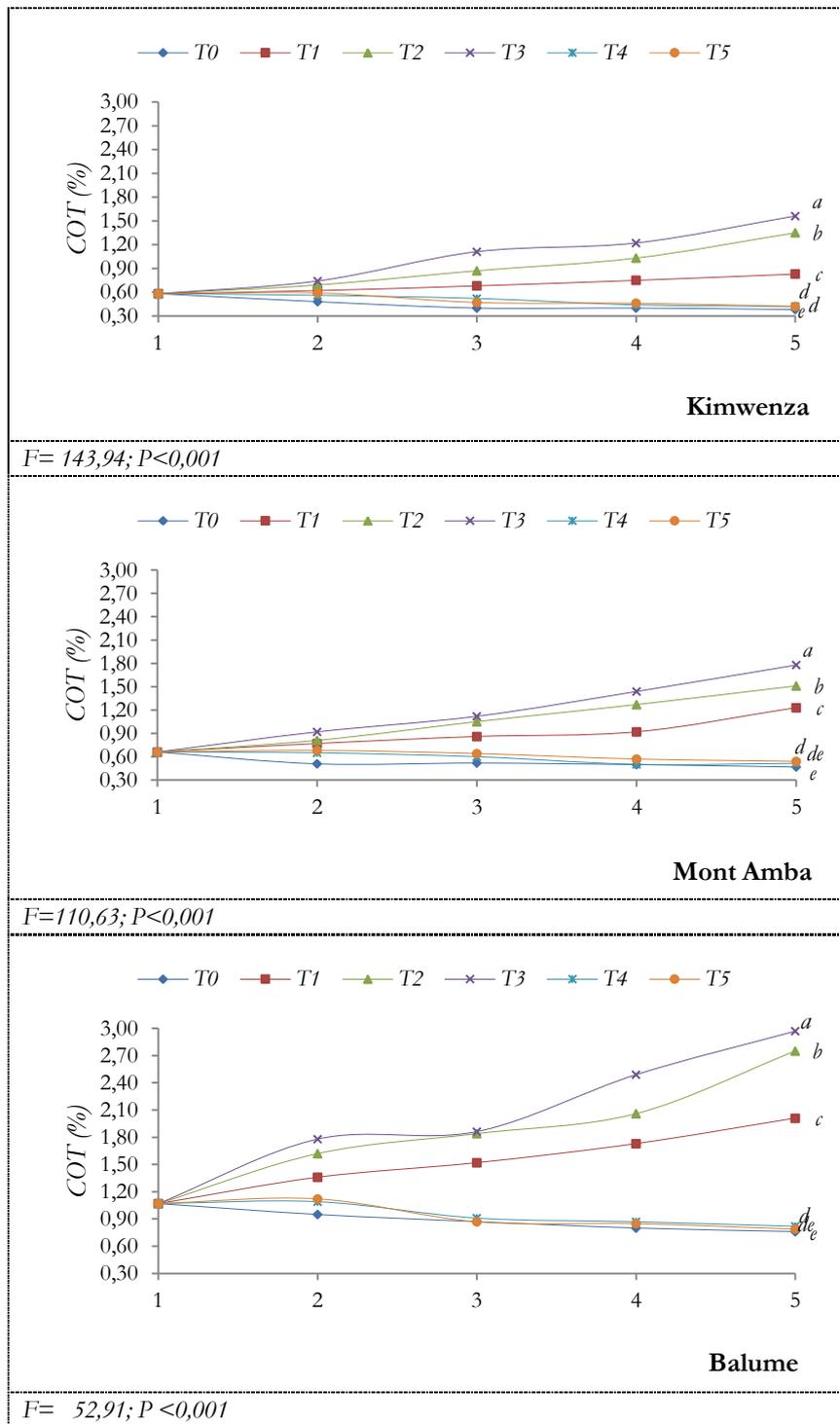
et libération des ions OH⁻; - la libération du Ca par décomposition ou soit la consommation des protons par ammonification suite à une activité microbienne intense qui résulte de la réduction des cations métalliques (Wong et Swift, 2003); - l'abaissement considérable de la toxicité aluminique par complexation (Duchaufour, 2001); - et l'augmentation de pH_{H₂O} par sulfato-réduction par accumulation des carbonates ou bicarbonates (CaCO₃ ou CaH[(CO)₃]₂) suite au CO₂ provenant de l'activité microbienne ou de la respiration végétale issue des sulfures hydrolysables (Na et Ca) en milieu aqueux (H₂O) par réduction des sulfates contenus dans la matière organique (Dommergues et Mangenot, 1970). La figure a (annexe 5) présente la relation dose de CBM et le pH_{H₂O} à la fin de l'expérimentation qui montre une relation significative au seuil de 5 % selon le test de corrélation de Pearson.

L'étude montre une augmentation du pH_{H₂O} d'environ 0,8 – 1,2 unité dans l'ensemble après quatre campagnes d'application répétée de 60 t.ha⁻¹ (MB) en matière brute des composts de biodéchets. Cette augmentation corrobore les résultats des études antérieures dans la région de Grands Lacs d'Afrique. Mze (2008) et Mbonigaba (2007) ont obtenu également une augmentation de pH de 0,5 à 1 unité après application répétée sur quatre saisons culturales des composts de déchets ménagers et végétaux. Cependant, on constate que cette augmentation est variable selon le degré d'acidité de départ dans les trois sites; et les sols fortement acides ou moins acides ont tendance à s'opposer aux modifications du pH. C'est l'effet tampon qui permet de stabiliser le pH et s'opposer ainsi aux fortes augmentations malgré des apports répétés (Schvartz *et al.*, 2005).

Les pH des témoins et des traitements à l'engrais NPK ont baissé légèrement dans tous les sites respectivement de 0,2 à 0,5 unité pour les témoins et de 0,1 à 0,4 unité pour le NPK et présage une acidification des sols. Selon, Monkiedje *et al.*, (2006), les amendements chimiques augmentent graduellement l'acidité de sol. L'acidité a un impact négatif sur le développement des micro-organismes du sol (Leclerc, 2001a).

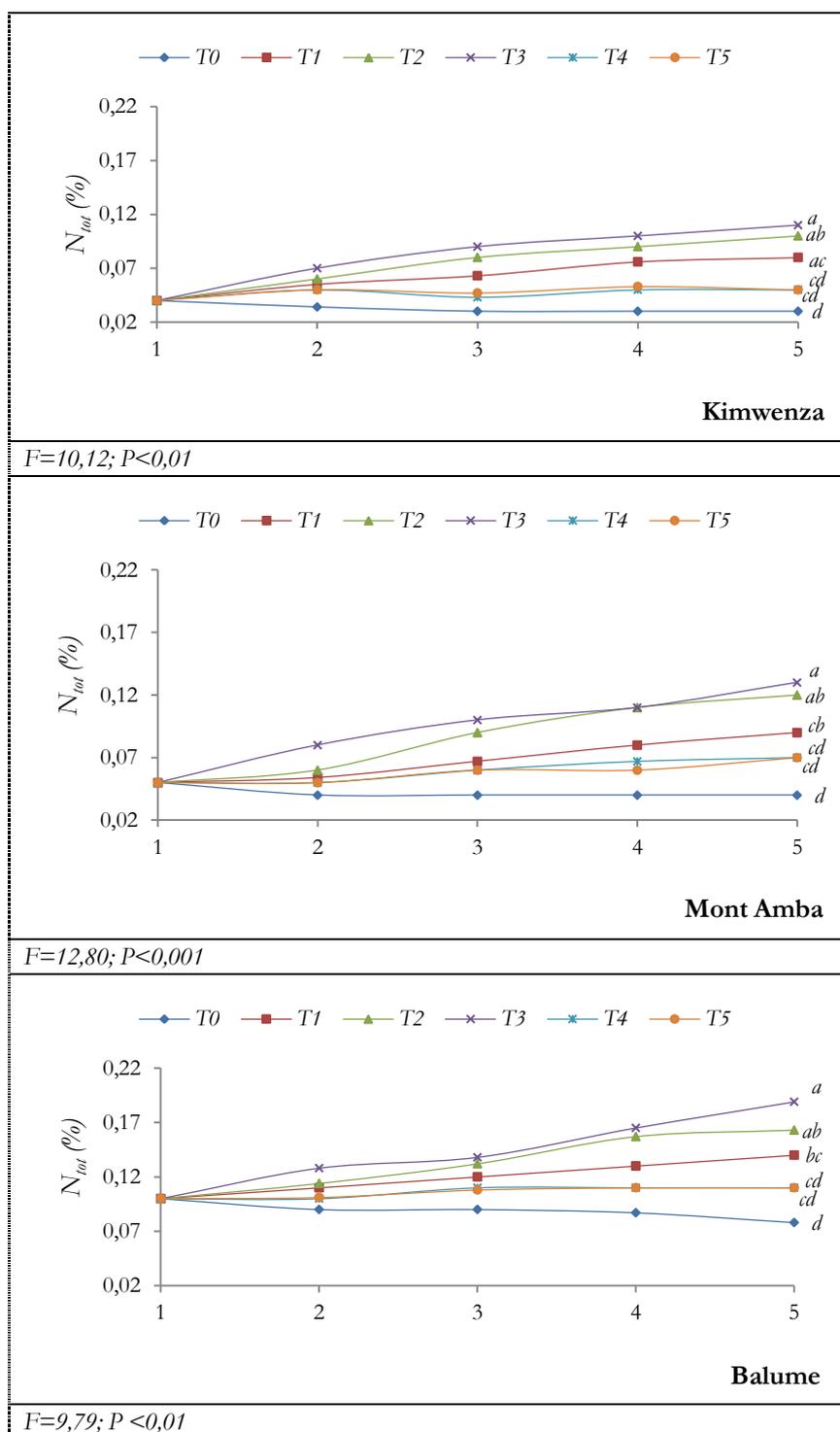
5.3.2 COT & N_{tot}

La matière organique du sol joue un rôle important dans le développement et le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Elle est source d'éléments nutritifs pour les plantes et les micro-organismes du sol, et peut modifier de manière drastique les propriétés physiques du sol. Les résultats de l'évolution du carbone organique total et de l'azote total sont respectivement présentés par les graphiques des figures 16 – 17 et le tableau 20. Les résultats montrent que les apports répétés en matières organiques ont augmenté le taux de carbone organique et de l'azote total dans les trois sites. Les augmentations sont fonction de doses des composts appliquées. Concernant le COT, le taux a été presque multiplié par 2,5 à 3 respectivement à Balume et Kimwenza, et au Mont Amba, passant de 1,07 à 2,97 % et de 0,66 à 1,71; de 0,58 à 1,50 % sous le traitement T3 (60 t.ha⁻¹ MB).



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 16. Evolution du carbone organique total (COT) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 17. Evolution de l'azote total (N_{tot}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

Le compost, par son contenu en matière organique (tableau 10), est un amendement capable de rehausser considérablement le taux de carbone organique dans le sol en fonction de la dose apportée. Une tendance à la réduction de la teneur en COT a été généralement observée dans les parcelles témoins (T0) et amendées aux engrais minéraux NPK (T4, T5) pour toutes les unités expérimentales. La diminution observée de la teneur en COT des témoins à la fin de l'expérimentation est d'environ 0,19; 0,20 et 0,31 unité respectivement au Mont Amba, Kimwenza et Balume. On note un enrichissement en matières organiques des sols en relation avec les apports comme le montre la figure a (annexe 5) ou la corrélation de Pearson est hautement significative au seuil de 1 %, excepté dans les parcelles témoins et amendées aux engrais minéraux NPK ou le sol s'est appauvri suite aux exportations des récoltes. Les taux de réduction du carbone organique dans les parcelles au NPK seraient dus à la stimulation de l'activité métabolique suite à l'apport des éléments N, P, K des engrais. Or dans les champs amendés aux engrais minéraux NPK et les témoins, les micro-organismes sont sous stress écologique (pH défavorable, CRC insuffisante, etc.) et leur maintien requiert suffisamment d'énergie qu'ils puisent dans le stock du carbone existant.

Dans ces conditions, on observe une diminution du carbone organique dans le sol, un accroissement de l'activité respiratoire et du quotient métabolique (qCO_2) en tant qu'indicateur indirect (Dilly, 2005). Ce phénomène pourrait s'avérer néfaste pour l'état nutritionnel (Mbonigaba, 2007) et rendrait difficile la gestion durable des sols. Meng *et al.* (2005), ont observé une diminution significative du carbone organique total dans les exploitations sous fertilisation minérale seule.

L'ANOVA à un facteur contrôlé des résultats à la dernière saison (annexes 4.4-4.6) montre qu'il existe des différences significatives ($p < 0,001$) entre les traitements en ce qui concerne leurs effets sur la teneur en carbone organique total, et ce pour les trois sites. La séparation des moyennes des données à la fin de l'expérimentation met en évidence cinq groupes représentés par les lettres *a, b, c, d, e* à Kimwenza; six groupes *a, b, c, d, de, e* au Mont Amba; et à Balume. Les comparaisons des moyennes (figure 12, tableau 20) montrent une augmentation plus importante pour les traitements à base des composts des biodéchets que pour les traitements aux engrais NPK (100 à 200 kg.ha⁻¹). Le traitement T3 (60 t.ha⁻¹ MB) fait une différence (très hautement significative, $p < 0,001$) sur chacun des sites (groupe *a*) par rapport aux moyennes de tous les autres traitements considérés.

Quant à l'azote total, il est la somme des différentes formes d'azote dans le sol. Il se trouve dans la solution du sol sous forme inorganique (anions nitrate et nitrite, le cation ammonium) et sous forme organique (acides aminés, non aminés et diverses autres espèces chimiques). C'est la forme organique qui prédomine mais cette forme n'est pas assimilable par les plantes et doit de ce fait être converti par minéralisation en formes inorganiques solubles (Calvet, 2003; Troeh et Thompson, 2005; Brady et Weil, 2002; Mbonigaba, 2007).

Les résultats de N_{tot} montrent la même tendance que le COT dans les différents sites (figure 17). Le taux de N_{tot} a été multiplié par 2; 2,5; 3 sous traitement T1 (20 t.ha⁻¹ MB), T2 (40 t.ha⁻¹ MB) et (60 t.ha⁻¹ en MB) à Kimwenza ; et 1,6; 2,4; 2,6 au Mont Amba sous les mêmes traitements; et 1,3; 1,6; 1,9 sous les mêmes traitements à Balume. La relation dose des CBM et l'azote total est très hautement significative au seuil de 1 %, selon le test de corrélation de Pearson à la fin de l'expérimentation pour tous les sites (annexe 5, figure a). Par contre, le témoin T0 a perdu 0,01; 0,02 et 0,02 unité respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume. En ce qui concerne les traitements aux NPK, on note une augmentation légère de 0,01 à 0,02 unité. Les quantités trouvées pour le témoin et pour les parcelles aux NPK indiquent sans aucun doute que l'azote sous forme minérale étant soit absorbé par les plantes en période de croissance soit lessivé vu les fortes précipitations observées dans la région et en plus l'engrais minérale est peu retenu par le sol pauvre en CEC et en MO. La diminution observée dans le témoin résulte de l'épuisement par l'exportation des cultures de l'azote potentiellement disponible au cours des essais (Weber *et al.*, 2006).

D'après les résultats de l'ANOVA, la séparation des moyennes des résultats de la dernière saison pour le site de Kimwenza identifie cinq groupes *a, ab, ac, cd, d*; et cinq autres groupes identiques *a, ab, bc, cd, d* pour Mont Amba et Balume (figure 17, tableau 20). L'augmentation de la quantité de l'azote total dans les sols est étroitement liée à l'accumulation de la matière organique dans les sols et peut être attribuée aux mêmes effets que l'augmentation du carbone organique. Cela peut concerner également un effet direct de l'azote provenant des composts qui sont lentement minéralisés dans les sols (Ros *et al.*, 2006b; Charland *et al.*, 2001; Weber *et al.*, 2006, Jouquet *et al.*, 2010). L'augmentation significative des taux de carbone organique total et de l'azote total constatée à court ou long terme suite aux apports répétés des composts dans les différents sites étudiés confirme les travaux de la littérature (Pérez-de-Mora *et al.*, 2006; Mbonigaba, 2007; Mze, 2008; Movahedi Naeini et Cook, 2000; Ros *et al.*, 2003; Ros *et al.*, 2006a; Ros *et al.*, 2006b; etc.). Même le statut de jachère apporte plus de matières organiques que la mise en culture dans les champs témoins non amendés (Mze, 2008).

Les composts utilisés sont des amendements contenant plus ou moins 30 % de matière organique (tableau 10), ce qui fait qu'ils sont susceptibles de relever considérablement le taux du carbone organique et de l'azote total dans le sol. On rappelle également que l'augmentation de l'azote peut se faire par fixation microbienne suite à leur croissance en présence du carbone.

Bilan analytique de COT et N_{tot}

Le bilan analytique de l'évolution de la matière organique en stock de carbone organique total présenté dans le tableau 15 montre que les quantités de carbone trouvées sont beaucoup plus importantes que les quantités de carbone organique apportées par les matières organiques.

Ceci peut être le résultat d'un développement d'une flore microbienne et du système racinaire influencés par les apports des matières organiques (Mze, 2008), sans oublier les aspects méthodologiques et d'échantillonnage. Les racines contribuent de façon importante à la matière organique du sol (CE, 2009; Chantigny et Angers, 2005). C'est l'effet turnover de la matière organique qui régule les processus des gains et des pertes (Duchaufour, 2001). Dans un processus de turnover de la MO, la biomasse microbienne est considérée comme un réservoir labile de nutriments.

Par contre avec les témoins et les amendements aux NPK, on enregistre des pertes beaucoup importantes. Ceci s'expliquerait du fait que ces traitements n'ont pas reçu d'apports en matière organique et en plus ces pertes peuvent être amplifiées par une minéralisation intense compte tenue des conditions hydriques et thermiques favorables. Et aussi, l'emploi d'engrais minéraux accélère la décomposition de la matière organique dans le sol (Gros, 1979; Meng *et al.*, 2005) et à cours terme dans les conditions expérimentales, les cultures mises en place ne permettraient pas encore à un retour plus élevé en matière organique récoltée. A long terme en l'absence de tout apport, une perte significative des stocks organiques des sols accentuera le processus de détérioration de la qualité de sol car la matière organique est considérée comme un composant vital d'un sol sain (Naman *et al.*, 2001).

Tableau 15. Bilan analytique des apports en carbone organique total par les matières organiques des composts de biodéchets ménagers et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.

Traitements	Apport COT (kg.C.ha ⁻¹) cumulé de 4 saisons	Variation de COT (kg.C.ha ⁻¹) sur base des teneurs analytiques du sol		
	Site ⁻¹	Kimwenza	Mont Amba	Balume
T0	0	-7200	-6840	-11160
T1	12133	9000	20520	33840
T2	24266	27720	30600	60480
T3	36399	35280	40320	68400
T4	0	-5760	-5040	-9000
T5	0	-3960	-4320	-10080

Par conséquent, dans une certaine mesure, l'abondance de MO régira la biodisponibilité des nutriments. Ces résultats confirment l'étude de Mze (2008) qui corrobore les résultats antérieurement obtenus par Mbonigaba (2007) en milieu tropical sur la variation des teneurs en carbone dans les sols au Rwanda et en RDC (Bukavu). De même, l'étude de Quenum *et al.*(2004) a mis en évidence un bilan de MO (humique) positif de l'évolution de la matière organique du sol dans les systèmes sous cultures commerciales et prairies sous la fertilisation par les fumiers de bovins et de poulets.

Les apports de composts peuvent également améliorer la structure des sols. L'étude de Watt (2001 *in* N'Dayegamiye *et al.*, 2005) qui comparait les effets d'un apport des boues (mixtes de

papetière, de station d'épuration) et des composts d'ordures ménagères sur certaines propriétés du sol, a montré que les composts d'ordures ménagères se sont montrés supérieurs aux autres. Les effets positifs seraient attribuables à l'action des substances humiques (matières organiques) du compost sur l'agrégation et la stabilité des agrégats.

Concernant le stock de l'azote total, le bilan est positif dans les parcelles amendées aux composts et aux engrais minéraux (tableau 16). La présence des cultures légumineuses capables de fixer l'azote par fixation symbiotique pourraient influencer positivement ce bilan. Pour les composts, le taux de minéralisation est en principe faible pour favoriser les exportations importantes par les cultures ou un lessivage important. Les gains les plus importantes ont été enregistrés avec les amendements minéraux (T4 & T5) par rapport aux apports pendant que les pertes ont été observées dans les parcelles des témoins. Il apparaît que l'engrais NPK utilisé puisse influencer positivement l'azote total. Mais les gains restent de loin meilleurs bien que les doses apportées étant faibles en azote comparés avec les amendements des composts BDM pour tous les traitements.

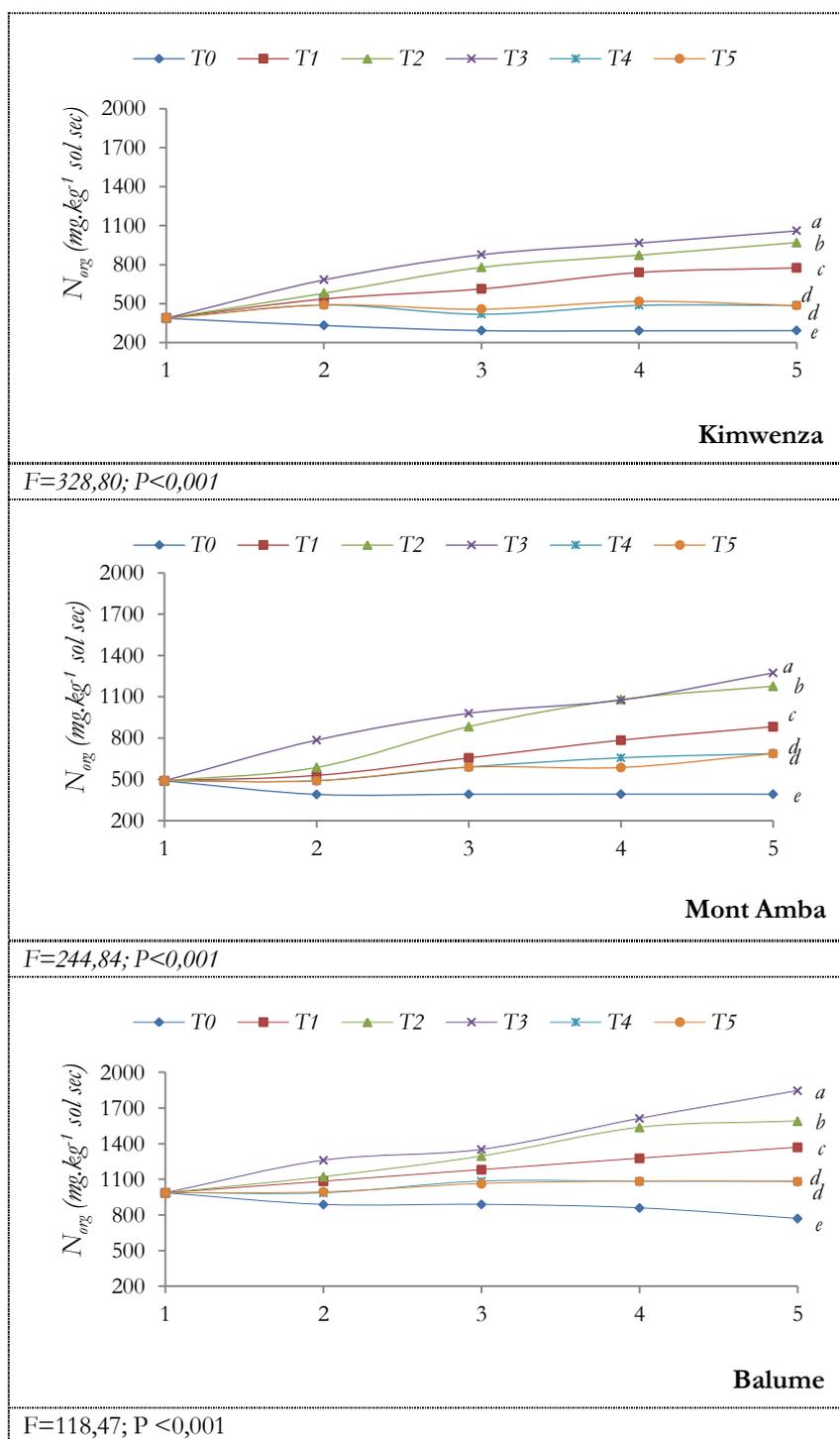
Tableau 16. Bilan analytique des apports en azote total par les amendements organiques des composts BDM et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.

Traitements	Apport N_{tot} (kg.ha ⁻¹) cumulé de 4 saisons	Variation du N_{tot} (kg.ha ⁻¹) sur base des teneurs analytiques du sol		
	Site ⁻¹	Kimwenza	Mont Amba	Balume
T0	0	-360	-360	-720
T1	1089	1440	1080	1080
T2	2179	2160	2520	2160
T3	3268	2880	2880	3240
T4	48	360	720	144
T5	96	360	720	360

5.3.4 Azote organique (N_{org}) et minéral (N_{min})

L'allure de courbes de l'évolution du taux de l'azote organique (figure 18 ci-dessous) est similaire à celle des courbes de l'azote total du fait que l'azote total des sols est constitué à plus de 90 % d'azote organique.

L'ANOVA à un facteur contrôlé des résultats à la fin de l'expérimentation (annexe 4.10-4.12) montre qu'il existe des différences très hautement significative ($p < 0,001$) entre traitements, sur les trois sites. La séparation des moyennes des résultats à la quatrième saison fait ressortir pour tous les sites cinq groupes représentés par les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* (figure 18, tableau 20). Les valeurs extrêmes sont symbolisées par les lettres *a* et *e* respectivement pour T3 et T0. L'augmentation de la teneur en azote organique reste faible pour les traitements à base de NPK soit +25 % pour la dose de 200 kg.ha⁻¹ à Kimwenza, + 40 % au Mont Amba et 10 % à Balume alors que les témoins perdent de 25, 20 et 22 % de leur teneur en azote organique



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 18. Evolution de l'azote organique (N_{org}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

respectivement. La faible augmentation de la teneur en azote organique avec les traitements aux engrais NPK observée dans certains sites serait attribuée au phénomène de turnover de la biomasse microbienne.

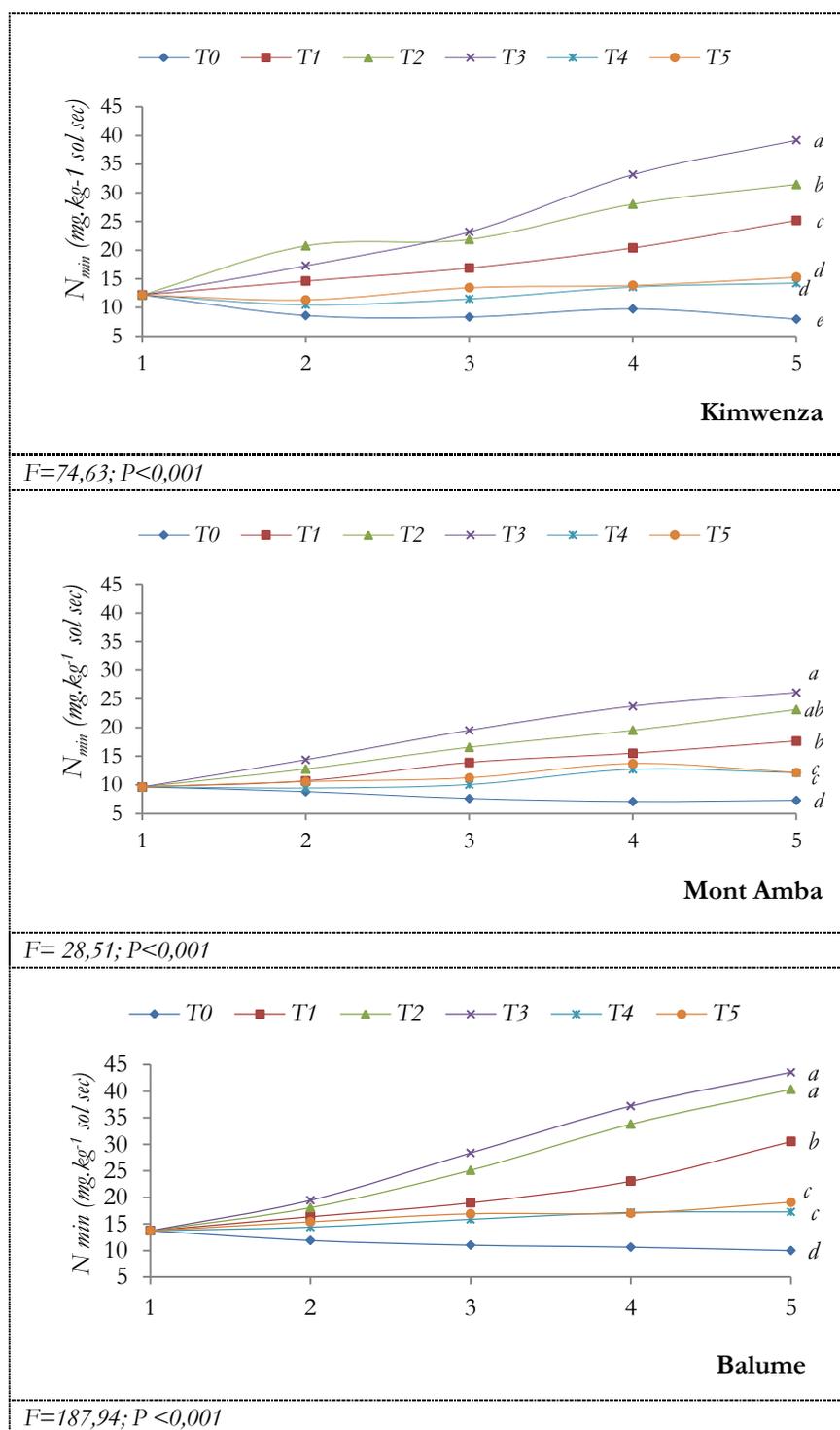
Concernant l'azote minéral, la figure 19 ci-dessous présente les graphiques de l'azote minéral (N_{\min}) dans les trois sites de l'étude et le tableau 20, les résultats à la fin de l'expérimentation. Les teneurs de l'azote minéral résultent de la somme en ses deux composantes principales, l'azote nitrique (NO_3^-) et l'azote ammoniacal (NH_4^+). Les niveaux de l'azote minéral des traitements à base des composts et le témoin se distinguent les uns des autres par rapport aux traitements aux engrais NPK. Cependant, on observe une augmentation de l'azote minéral au cours des saisons pour les traitements aux composts. Ceci peut s'expliquer soit par un artefact dû au séchage des échantillons qui prend en compte l'azote ammoniacal et nitrique extrait de la matière organique stockée dans le sol dans la mesure de l'azote minéral, ou soit par les faibles exportations par les cultures et par conséquent occasionne l'accroissement du stock de l'azote minéral dans le sol.

Les résultats de l'ANOVA à un facteur contrôlé de la dernière saison (annexes 4.13-4.15) indiquent, pour les différents sites, qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre traitements. Sous le traitement T3 (60 t.ha⁻¹ MB), la teneur en N_{\min} a été multipliée par des facteurs 4,93; 3,57 et 4,36; respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume, pendant que dans les parcelles témoins le taux de N_{\min} a baissé de -34,72; -24,19 et -28,15 %. Les traitements au NPK induisent une augmentation du taux de N_{\min} de $\pm 3,12$ unités à Kimwenza; $\pm 2,53$ unités au Mont Amba et $\pm 5,25$ unités à Balume qui restent faible par rapport aux traitements à base de composts.

De plus, on constate à partir du tableau 20 (figure 19) que, les moyennes des teneurs en azote minéral sont classifiées en cinq groupes distincts (*a, b, c, d, e*) à Kimwenza et (*a, ab, b, c, d*) au Mont Amba et de quatre groupes (*a, b, c, d*) à Balume. Les groupes extrêmes symbolisés par les lettres *a* et *e* ou *d* ou *de* sont constitués de T3 (60 t.ha⁻¹ MB) et de T0 (témoin).

L'augmentation des teneurs en azote organique et minéral dans les sols amendés par des composts a été démontrée par plusieurs auteurs qui confirment aussi nos observations (Rodriguez *et al.*, 1996; Cuevas *et al.*, 2000; Hartl *et al.*, 2003; Mbonigaba, 2007; Mze, 2008; etc.). Rodrigues *et al.* (1996) a constaté des amplitudes d'augmentation des teneurs en azote minéral dans le même ordre de grandeur en utilisant 50 et 100 t.ha⁻¹ des composts de déchets urbains. La contribution de la partie organique est toujours beaucoup plus importante que la partie minérale.

Les proportions de l'azote minéral (tableau 17) comme composante de l'azote total (N_{\min}/N_{tot}) du sol restent faibles pour tous les traitements et assurent une bonne réserve en azote. Les niveaux de l'azote sont satisfaisants avec les apports en matières organiques des



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 19. Evolution de l'azote minéral (N_{min}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

différents traitements à Balume, et pour les traitements T2 et T3 à Kimwenza et au Mont Amba.

Les rapports N_{\min}/N_{tot} et $N_{\text{org}}/N_{\text{tot}}$ pour la dernière saison et pour les trois sites sont contenus dans le tableau 17. Les proportions de l'azote minéral comme composante de l'azote total varient de 2,47 à 3,70 % à Kimwenza, de 1,61 à 2,06 au Mont Amba et de 1,26 à 2,61 à Balume. Par contre, le taux de l'azote organique dans tous les cas varie par rapport à l'azote total de 96,38 - 97,53; de 97,94 - 98,39 et de 97,39 - 98,74 %, respectivement à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.

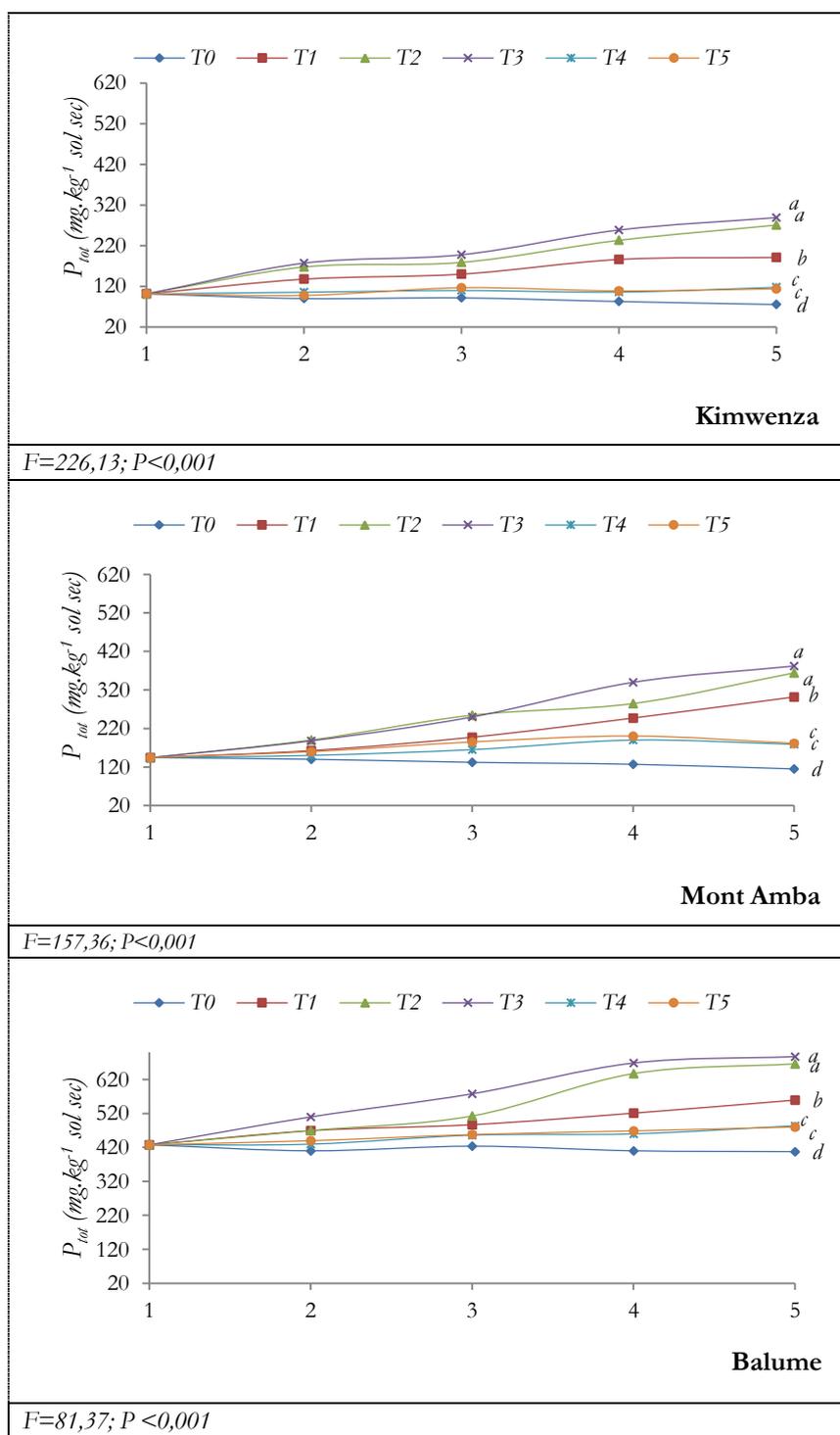
Tableau 17. Proportion en % entre les formes azotées pour les résultats moyens de la dernière saison culturale pour les trois sites.

Traitements	Kimwenza		Mont Amba		Balume	
	N_{\min}/N_{tot}%.....	$N_{\text{org}}/N_{\text{tot}}$%.....	N_{\min}/N_{tot}%.....	$N_{\text{org}}/N_{\text{tot}}$%.....	N_{\min}/N_{tot}%.....	$N_{\text{org}}/N_{\text{tot}}$%.....
T0	2,68 (0,18)	97,32 (0,18)	1,83 (0,09)	98,18 (0,06)	1,26 (0,08)	98,74 (0,08)
T1	2,47 (0,72)	97,53 (0,72)	2,00 (0,20)	98,00 (0,20)	2,35 (0,48)	97,65 (0,48)
T2	3,26 (0,73)	96,89 (0,73)	1,96 (0,02)	98,04 (0,02)	2,61 (0,24)	97,39 (0,24)
T3	3,70 (0,64)	96,74 (0,64)	2,06 (0,04)	97,94 (0,04)	2,30 (0,12)	97,70 (0,12)
T4	2,84 (0,14)	97,16 (0,14)	1,61 (0,33)	98,39 (0,33)	1,69 (0,14)	98,31 (0,14)
T5	3,11 (0,59)	97,16 (0,59)	2,03 (0,09)	97,97 (0,09)	1,82 (0,39)	98,18 (0,39)
CV (%)	13,67	0,42	8,00	0,16	22,89	0,47

Tenant compte du contenu de l'azote apporté par les composts (T3, tableau 16) à la fin des essais, les quantités de N_{\min} sont de l'ordre de 104,72 kg.ha⁻¹ au Mont Amba, 141,05 kg.ha⁻¹ au à Kimwenza et de 156,74 kg.ha⁻¹ à Balume qui représentent respectivement 3,16; 4,26 et 4,73 % de l'azote organique total apporté par les composts. Dans l'ensemble le taux de minéralisation du traitement T1 (20 t.ha⁻¹ MB) varie de 5,73 à 9,96 et de 3,78 à 5,13 % pour le traitement T2 (40 t.ha⁻¹ MB). Ces taux sont des estimations qui ne tiennent pas compte de la quantité assimilée et/ou exportée par les plantes, lessivée ainsi que celle partiellement immobilisée par les micro-organismes du sol. Pour Gabrielle *et al.* (2005), seules les quantités comprises entre 3 et 8 % de l'azote apporté étaient minéralisées après quatre ans d'application des composts et Mbonigaba (2007), 6 % au terme de deux ans pour un traitement de 60 t.ha⁻¹. Selon Troeh et Thompson (2005), le taux de minéralisation annuel de l'azote varie de 1 à 5 % et 110 kg.ha⁻¹ d'azote minéral est nécessaire pour une bonne croissance des plantes dans le sol. Cette condition est obtenue avec déjà le traitement T1 à Balume (109,94 kg.ha⁻¹) et T2 pour presque tous les sites en deux ans d'essais.

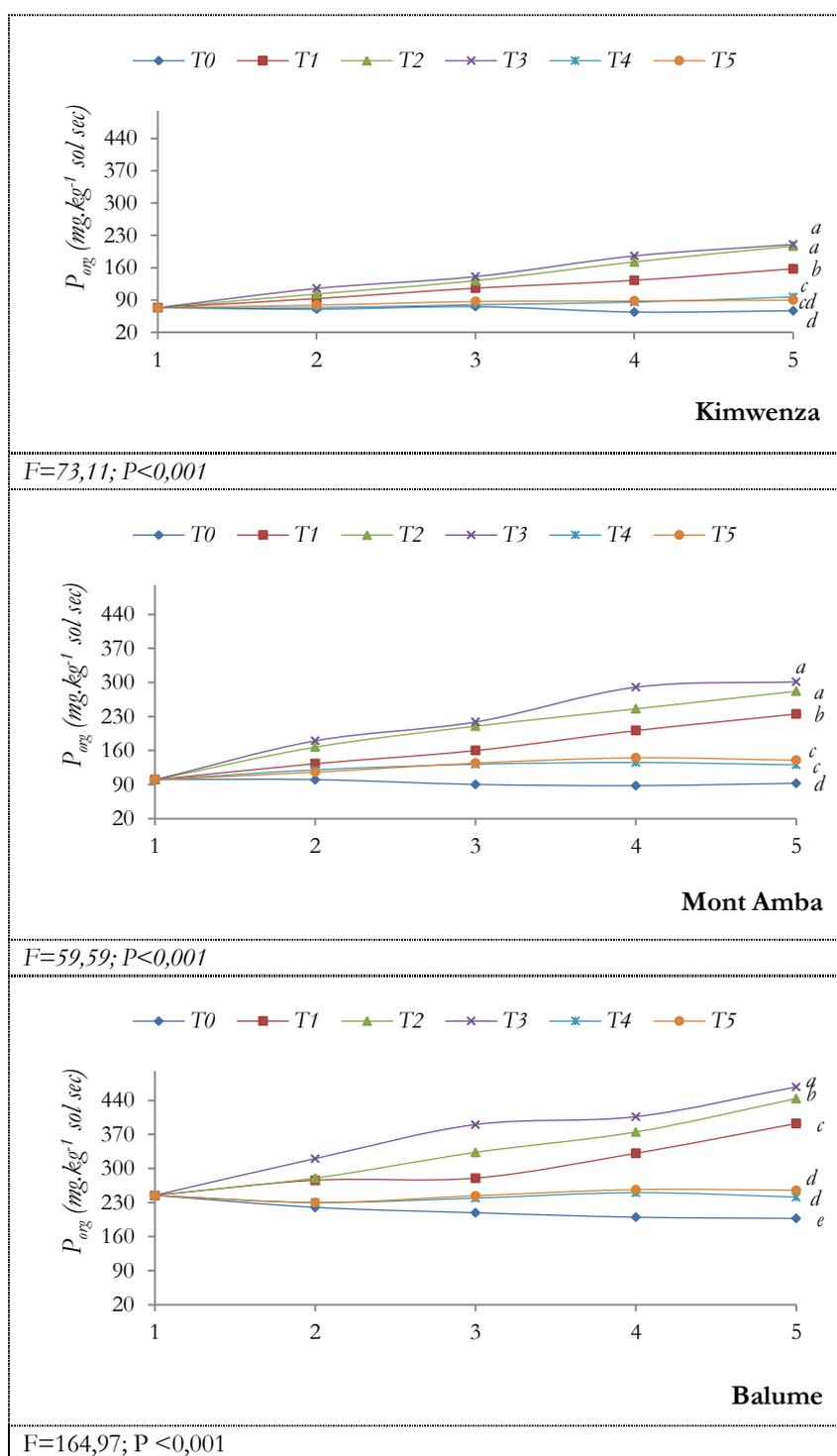
5.3.5 Phosphore total, phosphore organique et phosphore disponible

Les résultats de l'évolution des différents types de phosphore pour les trois sites de l'étude sont présentés par les graphiques des figures 20, 21, 22 et le tableau 20 à la fin des essais. Globalement, il en découle que le P_{tot} , P_{org} et le P disponible ont considérablement augmenté



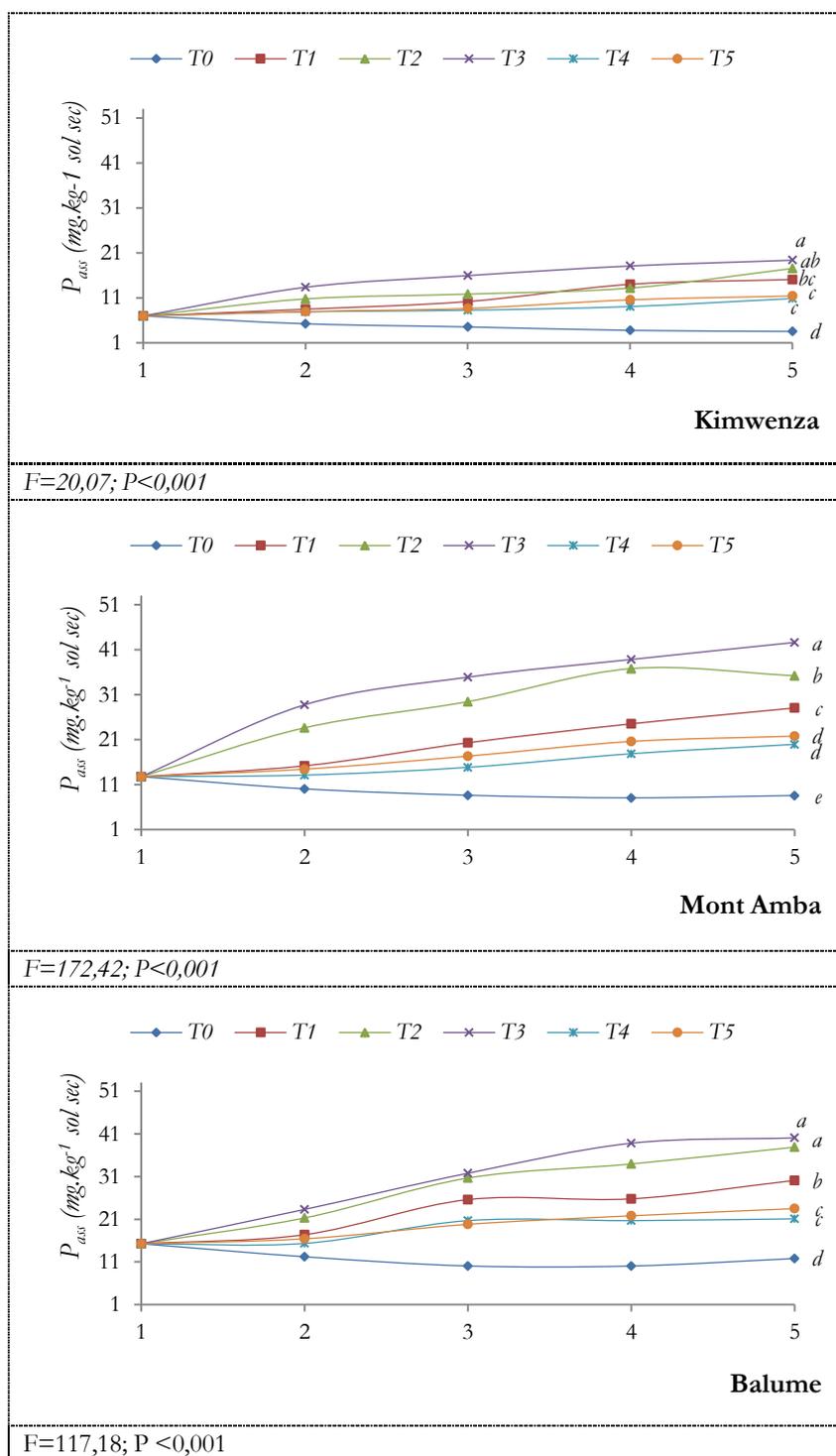
0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; et 1= état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 20. Evolution du phosphore total (P_{tot}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 21. Evolution du phosphore organique (P_{org}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 22. Evolution du phosphore assimilable (P_{ass}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

dans les parcelles amendées en fumures organiques. Ces augmentations sont fonction des doses appliquées.

Concernant le P_{tot} , au terme de quatre saisons culturales, il est multiplié par les facteurs de 4,5 à Kimwenza; 2,8 au Mont Amba et 1,6 à Balume en apportant des composts de biodéchets à la dose supérieure (T3). Les parcelles non amendées ont occasionné une perte de 17 (6,15 mg $P.kg^{-1}$), 23 (39,29 mg $P.kg^{-1}$) et 5 % (20,49 mg $P.kg^{-1}$) respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume dont la plus importante est à Kimwenza.

Les observations similaires sont faites pour le phosphore organique repris par les graphiques de la figure 21 et le tableau 20. Le phosphore organique suit la même tendance que le P_{tot} , selon Essington (2004), le P_{org} constitue entre 19 et 70 % du phosphore total; et pour Richardson *et al.* (2005), le P_{org} peut aller au-delà de 80 %. Les proportions du P_{org} comme composante majeure du phosphore total varient de 72,67 à 86,23 % à Kimwenza, 72,80 à 80,68 % au Mont Amba et 47,67 à 70,03 % à Balume (tableau 18).

Le tableau 18 ci-dessous mentionne les données des rapports P_{ass}/P_{tot} et P_{org}/P_{tot} à la fin des essais et pour les trois sites. Ce tableau montre que les proportions du phosphore extractible par rapport à la teneur totale en phosphore restent faibles pour tous les apports (compost et NPK). Mais on constate que les proportions de phosphore assimilables sont plus importantes à Kimwenza et au Mont Amba qu'à Balume. Ce tableau montre que dans les sols pauvres (Kimwenza & Mont Amba), l'apport de NPK favorise plus la dynamique de fournir du phosphore disponible que dans un milieu relativement riche au départ par rapport aux deux sites. Par contre, les rapports du phosphore organique sur le phosphore total sont élevés (> 50 %) sauf, pour le témoin (T0) à Balume. Le taux de minéralisation du phosphore pour un même traitement augmente globalement de Kimwenza à Balume.

Tableau 18. Proportions entre les formes du phosphore pour les résultats moyens de la dernière saison sur les trois sites de l'étude.

Traitements	Kimwenza		Mont Amba		Balume	
	P_{ass}/P_{tot}	P_{org}/P_{tot}	P_{ass}/P_{tot}	P_{org}/P_{tot}	P_{ass}/P_{tot}	P_{org}/P_{tot}
%/.....	%/.....	%/.....	
T0	4,64 (0,55)	86,23 (15,15)	7,50 (0,90)	80,68 (11,70)	2,84 (0,20)	47,67 (1,56)
T1	8,17 (2,64)	84,15 (15,56)	9,35 (0,68)	78,37 (7,81)	5,38 (0,44)	70,03 (1,48)
T2	6,50 (0,34)	75,51 (4,72)	9,19 (0,86)	72,80 (8,75)	5,69 (0,10)	66,66 (1,36)
T3	6,76 (1,07)	72,67 (2,95)	11,19 (0,97)	78,98 (9,94)	5,82 (0,09)	67,99 (0,39)
T4	9,13 (0,12)	82,91 (10,70)	11,13 (0,61)	72,94 (7,05)	4,37 (0,36)	49,92 (3,78)
T5	9,79 (1,64)	79,52 (14,52)	12,02 (0,74)	77,04 (10,04)	4,65 (0,02)	50,77 (0,34)
CV (%)	23,15	5,95	15,01	3,88	21,26	16,13

Cependant, de l'échelle parcellaire extrapolée à l'hectare tenant compte de la densité apparente moyenne et de la couche arable, on observe des augmentations des quantités variables de P_{tot} après les apports organiques répétés selon la dose indiquée dans le tableau

19. D'après, Mérelle (1998), le sol renferme de 3 à 10 t P_2O_5 .ha⁻¹ de phosphore total et seulement moins de 1 % du phosphore total se révèle disponible pour la nutrition végétale dans la plupart des sols (Richardson *et al.*, 2005) ou soit 10 à 30 kg.ha⁻¹ pour Troeh et Thompson (2005); voire encore 20 à 40 kg.ha⁻¹ pour Syers *et al.* (2008).

Les graphiques de la figure 22 révèlent que le phosphore disponible (assimilable) a atteint des valeurs variant de 15,05 - 19,39 mg P.kg⁻¹ de sol à Kimwenza, de 29,05 - 42,61 mg P.kg⁻¹ de sol au Mont Amba et 30,07 - 40,07 mg P.kg⁻¹ à Balume en apportant les composts de biodéchets ménagers. Ces augmentations sont fonction des doses apportées de matières organiques.

Dans les parcelles témoins la moyenne observée à la fin des essais est de 3,52; 8,53 et 11,7 mg P.kg⁻¹ MS respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume. Les résultats de la figure 22 montrent également que dans les parcelles fertilisées avec l'engrais minéral NPK, les effets de traitement ne sont pas plus marqués que dans celles avec le compost. On voit bien que les amendements organiques parviennent à maintenir (entretenir) le P disponible à un niveau acceptable, car le seuil critique est de 8-10 mg P.kg⁻¹ MS pour un sol contenant un taux de matière organique compris entre 2 et 5 % (Hien *et al.*, 1993 *in* Sawadogo, 2006; Odet *et al.*, 1989). Par contre en l'absence d'amendement, le P disponible devient un facteur limitant pour les plantes cultivées soit par sa fixation par d'autres composés du sol et son insolubilité, plus particulièrement dans les sols acides tropicaux.

De toutes les observations faites ci-dessus, les résultats similaires ont été obtenus par Parkinson *et al.* (1999); Cuevas *et al.* (2000); Pérez-de-Mora *et al.* (2006); Mbonigaba (2007); Mze (2008); etc.

Globalement, les résultats de l'ANOVA pour les données de P_{tot} , P_{org} et de P_{ass} de la dernière campagne d'échantillonnage des sols sur différents sites sont résumés dans les annexes 4.16-4.21. Ils indiquent en général qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements pour les trois sites. Pour le phosphore disponible, la différence est qualifiée de significative ($p < 0,05$). Le test de séparation des moyennes de P_{tot} distingue quatre groupes différents symbolisés par les lettres *a*, *b*, *c*, *d*. pour les différents sites (figure 20, tableau 20). Les traitements T2 & T3; ainsi que T4 & T5 forment chacun un même groupe. Pour le P_{org} , les résultats de l'ANOVA des moyennes obtenues à la fin de l'expérimentation sont classés en cinq groupes différents *a*, *b*, *c*, *cd*, *d* à Kimwenza et *a*, *b*, *c*, *d*, *e* à Balume; en quatre groupes *a*, *b*, *c*, *d* au Mont Amba (figure 21, tableau 20). Avec le phosphore disponible, on distingue cinq groupes représentés par les lettres *a*, *ab*, *c*, *bc*, *d* à Kimwenza et *a*, *b*, *c*, *d*, *e* au Mont Amba ; et quatre groupes *a*, *b*, *d*, *d* à Balume (figure 22, tableau 20). Ces résultats mettent en évidence l'influence bénéfique des apports des matières organiques sur les indicateurs phosphoriques de la fertilité des sols.

Lorsqu'on examine le bilan des apports en phosphore total (tableau 19) par les amendements organiques sur l'ensemble de l'expérimentation, on constate des gains qualitatifs beaucoup plus importants que sans apports initiaux. De même, les apports d'engrais minéraux NPK ont induit des améliorations du stock de phosphore total dans les sols des différents sites. Le site de Balume se comporte mieux que les deux autres sites.

Tableau 19. Bilan des apports en phosphore total par les amendements (organiques, minéraux) et évolution des stocks dans le sol sur quatre saisons culturales dans les différents sites.

Traitements	Apport P _{tot} (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹) cumulé de 4 saisons	Variation du P _{tot} (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹) sur base des teneurs analytiques du sol			
		Site ⁻¹	Kimwenza	Mont Amba	Balume
T0	0		-51	-324	-170
T1	248		572	1256	1086
T2	496		984	1773	1964
T3	744		1215	1921	2142
T4	32		135	2878	460
T5	64		98	305	614

D'après Benali *et al* (1999), les composts agissent sur le phosphore du sol rendant soluble du phosphore qui ne l'était pas auparavant. Sa disponibilité dépend donc plus davantage des réactions de fixation du phosphore que de la minéralisation de la matière organique. Le compost, en plus d'apporter du phosphore au sol, retire cet élément de la solution du sol, ainsi, les phosphates sont fixés par les composés métalliques du compost (Charland *et al.*, 2001). Mais d'après Mze (2007), ce sont les activités biologiques notamment l'activité des phosphatases acides des racines et aussi des micro-organismes induits par les apports. L'activité de la phosphatase augmente avec le déficit en phosphore dans le sol et provoque une accumulation de phosphore inorganique disponible aux plantes à la suite des paramètres chimiques (Djadjaglo et Richter, 2008; Kotchi *et al.*, 2010). Selon, Mérelle (1998), le sol renferme la quantité de phosphore total dans l'ordre de 3 à 10 t P₂O₅.ha⁻¹ et ce qui peut expliquer les augmentations observées. Ces augmentations ont été aussi observées dans les études de Mbonigaba (2007) et Mze (2008) avec les composts de différents types qui les attribuent aux symbioses mycorhiziennes développées par les micro-organismes dans le sol. Ces résultats confirment également les travaux de Kotchi *et al.* (2010) selon lesquels, plus le taux de matières organiques est élevé, plus le phosphore est disponible.

5.3.6 Complexe adsorbant

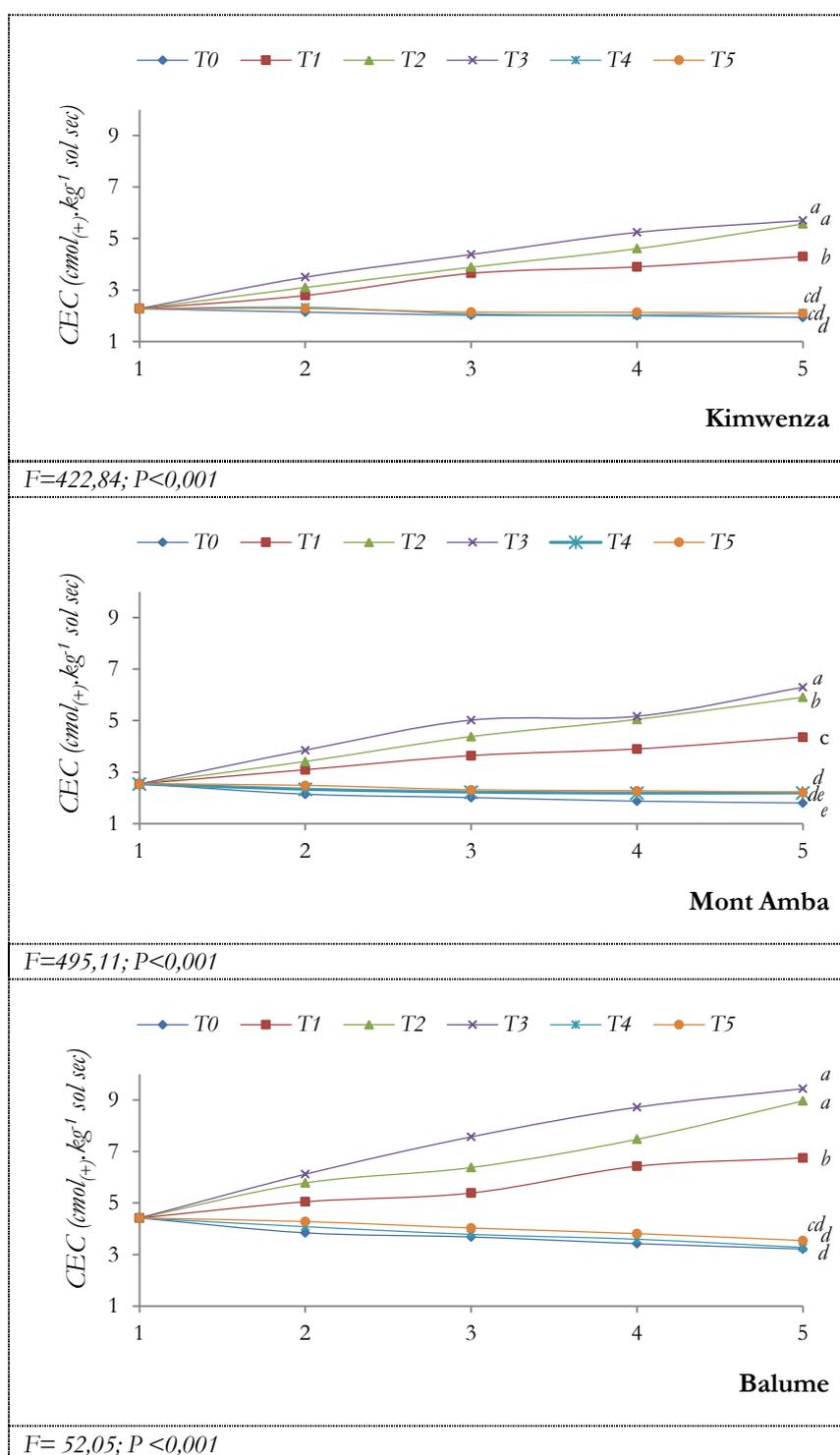
Les figures 23, 24, et 25 présentent les graphiques des quelques paramètres choisis, liés au complexe adsorbant et le tableau 20 à la fin des essais. Seules la capacité d'échange cationique (CEC), la saturation en bases effectives et en aluminium effective sont prises en compte.

5.3.6.1 Capacité d'échange cationique

Les graphiques de la figure 22 montrent que la capacité d'échange cationique augmente dans les parcelles amendées par le compost dès le premier essai (saison culturale 2) alors qu'on note une diminution dans celles fertilisées aux engrais minéraux NPK et non traitées (témoins). On observe presque les mêmes effets pour les traitements T2 & T3 qui affichent des taux élevés dans les sols des trois sites et les deux doses d'engrais minéraux NPK se confondent nettement avec le témoin à Kimwenza et Balume. Les mêmes observations sont faites avec la CECE que nous ne présentons pas ici. A la fin de l'expérimentation, la relation dose et la capacité d'échange cationique montre une relation significative positive selon le test de corrélation de Pearson au seuil de 5 % comme montré par la figure a (annexe 5).

L'augmentation de la CEC est plus dépendante de l'accroissement de la matière organique que de la faible fraction argileuse trouvée dans les sols et du pH indirectement par son comportement réactionnel avec ces deux colloïdes (argiles et matières organiques). La capacité d'échange cationique est reliée aux complexes argilo-humiques formés de l'humus et des particules minérales par l'intermédiaire des cations Ca^{+2} , Fe^{+2} et Al^{+3} ; responsables de l'amélioration des propriétés du sol que le compost contribue à former (Charland *et al.*, 2001). Ces complexes sont composés d'un noyau argileux saturé par une des molécules organiques. Plusieurs études ont d'ailleurs montré des fortes corrélations entre la CEC et le contenu en carbone organique d'une part et le pH dans le sol d'autre part (Willet, 1994; Osei et Kwakye, 1997 *in* Mbonigaba, 2007; Mze, 2008, Mbonigaba, 2007). L'accroissement de la CEC suite à l'application des composts a été également mis en évidence par plusieurs auteurs (Epstein et Wu, 1994; Cuevas *et al.*, 2004; Clément et N'Dayegamiye, 2009; Mbonigaba, 2007).

Les tableaux de l'ANOVA à un facteur contrôlé des résultats (annexes 4.25-4.27) montrent qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements appliqués par rapport à leurs effets sur la CEC. La comparaison statistique des valeurs moyennes de CEC selon les différents traitements à la fin des essais permet de catégoriser quatre et cinq groupes, respectivement à Kimwenza (*a, b, cd, d*), Balume (*a, b, cd, d*) et Mont Amba (*a, b, c, d, de, e*) indiqués à la figure 23 et dans le tableau 20. Les traitements T2 & T3 forment des rangs supérieurs et les doses d'engrais minéraux NPK appliquées forment presque une catégorie combinée avec les parcelles témoins pour tous les sites. Le traitement T3 (60 t.ha^{-1} MB) affiche sa supériorité sur tous les sites. Avec une quantité de 60 t.ha^{-1} MB des composts par saison, la CEC augmente de 0,85 0,94 et 1,25 unité par saison respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Blume. Les valeurs de CEC sont passées de 2,28 à $5,57 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ à Kimwenza; de 2,54 à $6,30 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ au Mont Amba et de 4,42 à $9,44 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ à Balume soit un accroissement de plus de 100 % (147,8 Kimwenza, 132,68 Mont Amba et 113,57 % Balume). Ceci confirme le fait que l'application de compost augmente généralement la capacité d'échange cationique des sols.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 23. Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

Les baisses de la CEC induites par les apports continus d'amendements minéraux NPK sont de l'ordre de 1,05 unité (0,9 à 1,2) à Balume; de 0,29 (0,23 à 0,35) au Mont Amba et de 0,19 (0,18 à 0,19) à Kimwenza. Dans les parcelles témoins, une baisse de -0,35; -0,74 et -0,52 a été observée respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume. Ces baisses de la CEC peuvent s'expliquer par l'effet de la dégradation de la matière organique en termes de carbone organique total et du pH du sol.

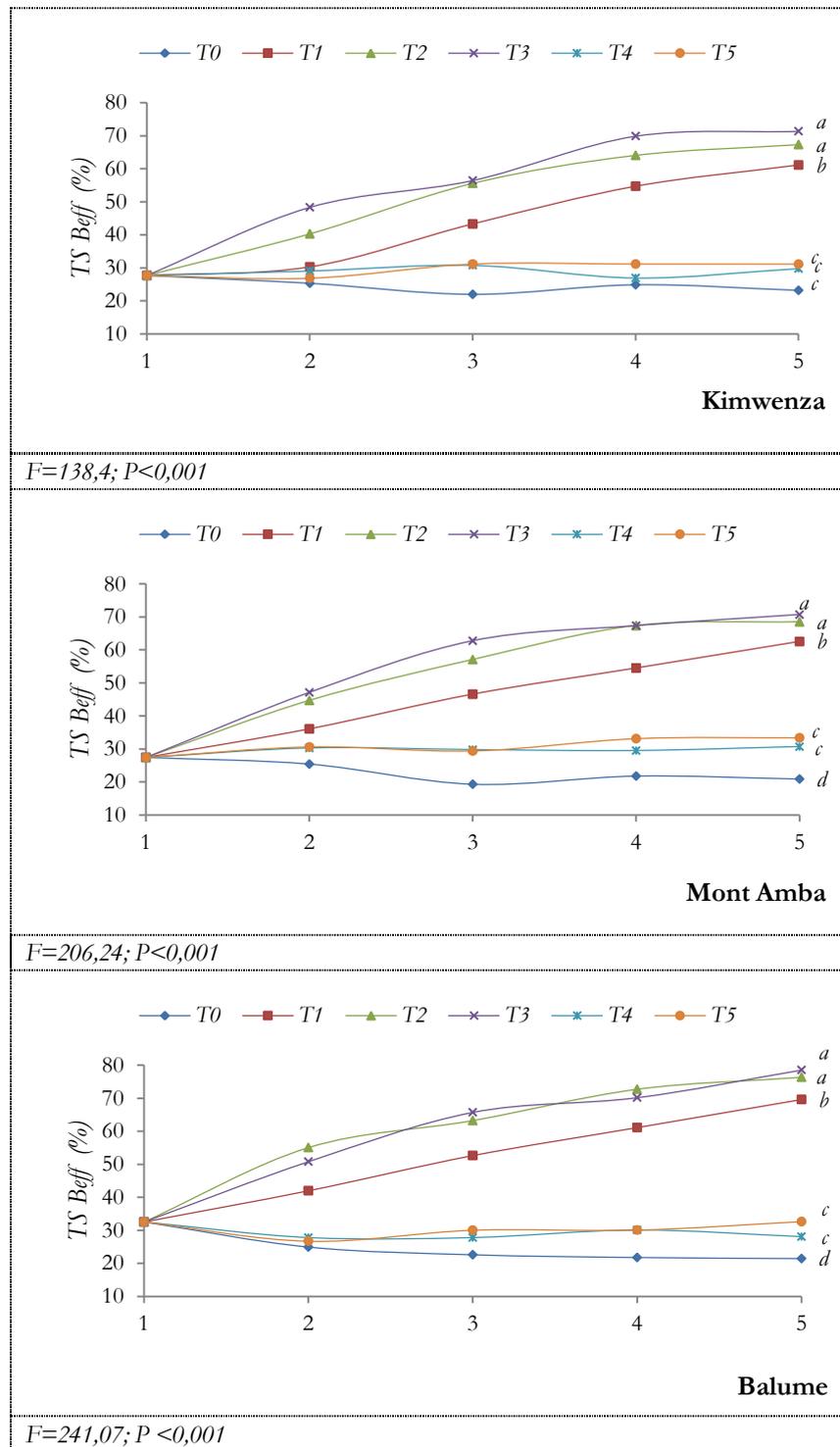
5.3.6.2 Saturation en bases

Comme il apparaît sur les graphiques de la figure 24, les traitements à base des composts de biodéchets ménagers accroissent le taux de saturation effective (TSB_{eff}) en cations basiques dans les sols dès le début des essais en plein champ. Le niveau de ce paramètre diminue très peu et ou se stabilise dans les parcelles fertilisées avec l'engrais NPK comme celles non traitées malgré les fluctuations saisonnières.

Globalement, il en découle que la saturation en bases effectives calculée sur base de la CECE augmente sensiblement dans les parcelles amendées avec des composts de biodéchets ménagers et les effets sont perceptibles dès la première saison dans tous les sites de l'étude. L'ANOVA à un facteur contrôlé pour les valeurs moyennes de la dernière saison (annexes 4.28-4.30) montre qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements. En plus, le test de comparaison des moyennes ($\alpha = 0,05$) pour les résultats de la même campagne d'échantillonnage à la fin des essais permet de distinguer trois groupes *a*, *b*, *c* à Kimwenza; et quatre groupes *a*, *b*, *c*, *d* au Mont Amba et à Balume (figure 25, tableau 20).

Le complexe au départ saturé à plus ou moins 28 % à Kimwenza et Mont Amba; 33 % à Balume devient supérieur à 70 % dans tous les sites sous le traitement de T3 qui se confond avec T2 au Mont Amba et Balume. On constate donc un effet positif de l'action des cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+) de la matière organique sur l'Al échangeable, le pH et la CEC. Paino *et al.* (1996) ont obtenu des taux de saturation variant de 24 à 84 % avec 1,2 à 25,6 % du compost en volume et Mbonigaba (2007) de taux de 27 à plus ou moins 65 % Gakuta, de 46 à 80% à Tonga avec une dose de 60 t.ha⁻¹ MB après quatre saisons d'apports. Entre 60 et 80 %, le taux de saturation devient élevé pour le cas des sols tropicaux (London, 1991). De même, aucune différence des moyennes n'est jugée significative entre les doses des fertilisants minéraux NPK prises deux à deux d'une part, et comparées aux témoins d'autres part sauf pour Mont Amba et Balume.

Cependant, les doses d'engrais minéraux NPK utilisées affectent très peu la saturation en bases et les faibles valeurs sont observées dans les parcelles témoins. Etant donné que la matière organique et la CEC diminuent dans les sols traités aux fumures minérales NPK, la quantité d'éléments N, P et K non assimilés par les plantes et les micro-organismes est sujette



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 244. Evolution du taux de saturation effective en bases ($ST B_{eff}$) dans le sol en fonction des traitements au cours des quatre saisons culturales.

au lessivage dans les conditions climatiques de la région caractérisée par de fortes précipitations.

Aussi, l'augmentation de l'acidité (contrairement à la somme des bases échangeables) tend à diminuer le pourcentage de saturation en cations basiques. Les effets similaires ont été observés par Russell *et al.* (2006); Mbonigaba (2007).

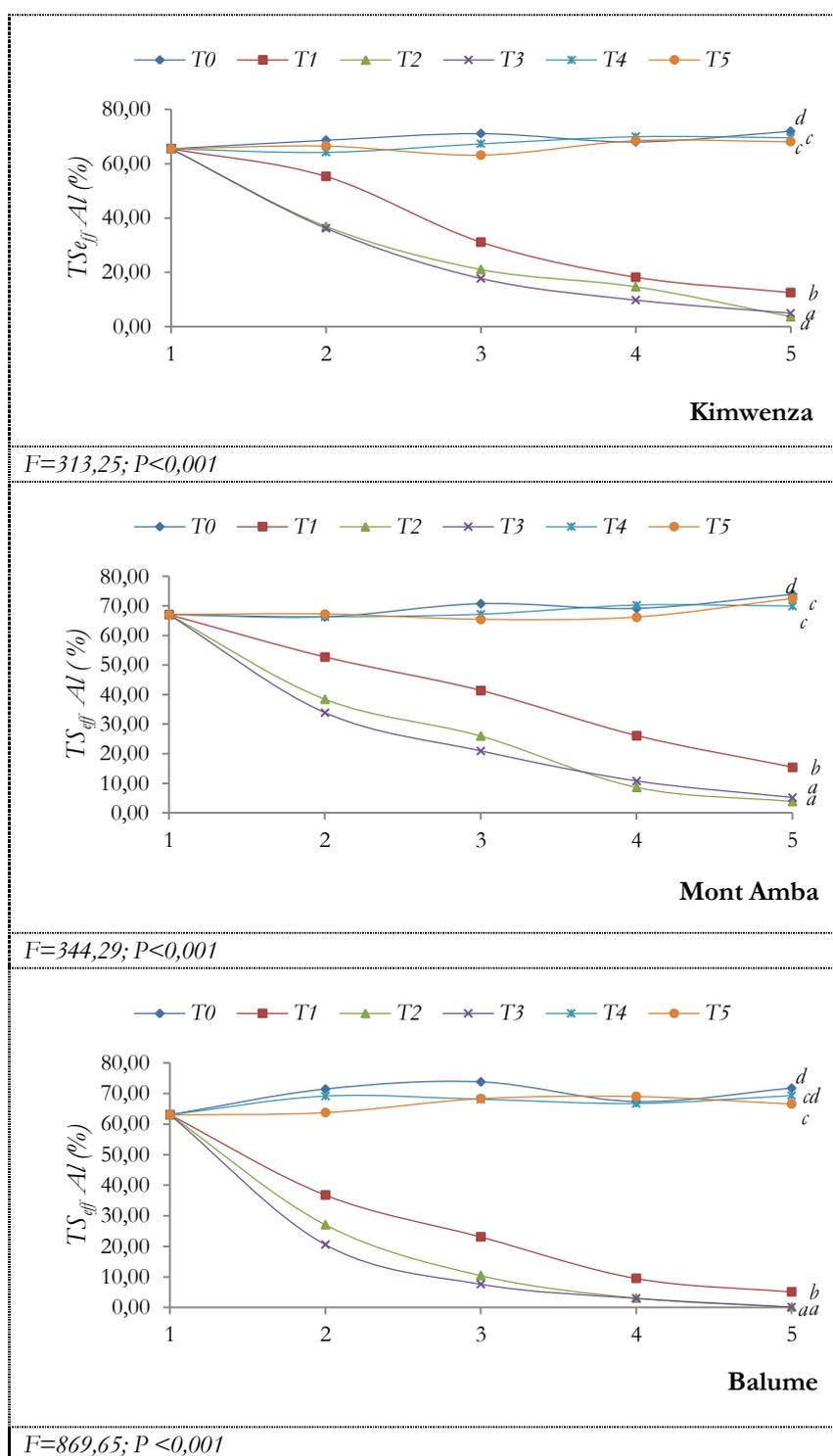
5.3.7 Saturation en Al

La figure 25 donne les graphiques du taux de saturation en aluminium effective dans les trois sites de l'étude de la province de Kinshasa. Il apparaît que le taux de saturation effective en Al a considérablement baissé dans les parcelles amendées aux composts de biodéchets dans les trois sites. A contrario, les traitements à base d'engrais minéraux NPK tendent à hausser très peu la teneur en saturation en Al aussi que le témoin sans amendement dans tous les sites.

Les tableaux de l'ANOVA à un facteur contrôlé sur les résultats de la quatrième saison (annexe 4.31-4.33) indiquent, pour les trois sites, qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements par rapport à leurs effets sur la saturation effective en Al. La comparaison des moyennes ($\alpha = 0,05$) à la fin des essais permet de ranger les traitements dans quatre classes distincts (*a, b, c, d*) au Mont Amba, à Balume et trois classes (*a, b, c*) à Kimwenza (figure 25, tableau 20). Les groupes des moyennes élevées sont constitués des traitements à base d'engrais NPK (T4 & T5) et le témoin T0, les valeurs faibles sont formées par les traitements à base des composts des biodéchets.

Au terme de l'expérimentation, l'Al échangeable a presque disparu sur le complexe adsorbant dans les parcelles amendées avec le traitement de 40 et 60 t.ha⁻¹ MB des composts de biodéchets. Le taux de saturation effective a été réduit de plus 60 % à ≤ 5 % dans les champs amendés avec 60 t.ha⁻¹ MB des composts de biodéchets ménagers respectivement à Kimwenza-Mont Amba (± 5 %) et Balume (0,13 %). Avec le traitement de NPK et le témoin, le taux de saturation effective en Al est passé de 66 à 72 % à Kimwenza soit une augmentation de + 6 %; de 71 à 74 % soit une augmentation de + 3 % et de 63 à 71 % soit une augmentation des + 8 %. Le témoin a aussi augmenté de + 6 % à Kimwenza, + 3 % au Mont Amba et + 8 % à Balume.

En fin de compte, l'Al passe de la forme toxique à la forme liée à la matière organique moins toxique dont le facteur principal qui contrôle son activité (phénomène de complexation) dans la solution du sol reste le pH par son pouvoir tampon (Hue *et al.*, 1986 *in* Mbonigaba, 2007; Wong et Swift, 2003). La capacité tampon du compost (pH 7,78) étant élevée par rapport à celles des sols amendés (4,90 à Kimwenza ; 4,40 au Mont Amba et 5,39 à Balume), le flux de protons va du sol vers les matériaux organiques humifiés et il en résulte une augmentation du pH, et par conséquent une diminution de la teneur en Al (Mbonigaba, 2007).



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 25. Evolution de la saturation effective en Al ($ST_{\text{eff}} \text{ Al}$) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

Selon Bray et Weil (2002), l'apport de la matière organique permet d'améliorer l'acidité de sols par la fixation de l'Al par la matière organique (matière humique), la formation des complexes et des composés peu solubles non échangeables de l'aluminium.

La réduction de la saturation en Al par l'usage des composts a déjà été largement discutée par plusieurs auteurs, dont Wong *et al.* (1995), Wong et Swift (2003), Willert et Stehouwer (2003), Mbonigaba (2007), etc. Cependant, la matière organique s'avère encore plus efficace lorsqu'elle accroît en même temps la CEC (Sanchez et Miller, 1986).

5.3.8 Corrélations entre les paramètres physico-chimiques et chimiques

Les tableaux des annexes 4.67-4.69 et le tableau 21 contiennent les coefficients de corrélation (Pearson) entre les paramètres physico-chimiques et chimiques choisis pour les trois sites de l'étude. Sur le site de Kimwenza, les paramètres sont hautement corrélés entre eux. Par contre au Mont Amba et à Balume, ils sont très hautement corrélés. Globalement, l'augmentation des paramètres (pH, P_{tot} , CEC, STB_{eff} , TS_{eff} Al) s'expliquerait par l'accroissement de la matière organique qui apporte les éléments nutritifs. On observe des corrélations hautement significatives entre le pH et le TSB_{eff} (0,853 à Kimwenza, 0,939 au Mont Amba et 0,950 à Balume) du fait que les composts utilisés contiennent des cations basiques (CaO à 4% et MgO à 0,8 %) et par effet tampon de la majorité des molécules complexes. Le CEC sous fertilisation dépend d'apports en composts sur l'équilibre des réactions d'échanges cationiques entre le complexe adsorbant et la solution du sol. Son comportement est régi par la variation des cation basiques, la teneur en aluminium et le pH. Les corrélations positives très hautement significatives établies entre la CEC et le COT (0,947 à Kimwenza, 0,978 au Mont Amba et 0,944 à Balume), entre la CEC et pH (0,843 à Kimwenza et au Mont Amba et 0,954 à Balume), confirment ses suppositions. Quant au TS_{eff} Al, il montre des corrélations négatives très hautement significatives avec tous les paramètres. Elles traduisent le fait que l'amélioration du pH et de la saturation du complexe adsorbant en cations basiques conduit à la neutralisation de l'aluminium échangeable. Lorsque le complexe adsorbant devient moins saturé en ces cations basiques, l'aluminium devient disponible.

Tableau 20. Comparaison des moyennes à la fin de la quatrième saison des paramètres physico-chimiques des sols en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.

Kimwenza											
	pH-H ₂ O	COT	N _{tot}	N _{org}	N _{min}	P _{tot}	P _{org}	P _{ass}	CEC	TSB _{eff}	TS _{eff} Al
	.....%.....			.....mg.kg ⁻¹.....					.....cmol(+).kg ⁻¹%.....
T0	4,69(0,08) <i>cd</i>	0,38(0,01) <i>e</i>	0,03(0,01) <i>d</i>	302,05 (35,95) <i>e</i>	7,95 (0,42) <i>e</i>	75,75 (4,59) <i>d</i>	66,75 (8,12) <i>d</i>	3,52 (0,21) <i>d</i>	1,93 (0,10) <i>d</i>	20,24 (1,35) <i>c</i>	71,97 (4,30) <i>d</i>
T1	5,23(0,20) <i>b</i>	0,83(0,05) <i>c</i>	0,08(0,02) <i>ac</i>	730,05 (37,12) <i>c</i>	19,18 (0,23) <i>c</i>	191,25 (7,56) <i>b</i>	157,50 (14,08) <i>b</i>	15,03 (3,13) <i>bc</i>	4,30 (0,09) <i>b</i>	55,58 (1,85) <i>b</i>	12,50 (2,41) <i>b</i>
T2	5,58(0,17) <i>ab</i>	1,35(0,03) <i>b</i>	0,10(0,02) <i>ab</i>	978,55 (37,07) <i>b</i>	31,45 (1,80) <i>b</i>	271,25 (32,99) <i>a</i>	206,88 (37,08) <i>a</i>	17,51 (1,22) <i>ab</i>	5,57 (1,01) <i>a</i>	62,71 (5,59) <i>a</i>	3,62 (0,83) <i>a</i>
T3	5,65(0,06) <i>a</i>	1,56(0,12) <i>a</i>	0,11(0,02) <i>a</i>	1140,82 (60,10) <i>a</i>	39,18 (2,25) <i>a</i>	289,25 (16,27) <i>a</i>	210,50 (18,24) <i>a</i>	19,39 (2,00) <i>a</i>	5,70 (0,19) <i>a</i>	65,74 (1,13) <i>a</i>	4,91 (1,59) <i>a</i>
T4	4,70(0,08) <i>c</i>	0,42(0,02) <i>d</i>	0,05(0,02) <i>cd</i>	485,88 (32,81) <i>d</i>	14,22 (3,61) <i>d</i>	118,25 (17,25) <i>c</i>	96,63 (9,63) <i>c</i>	10,81 (1,72) <i>c</i>	2,10 (0,08) <i>cd</i>	22,24 (3,68) <i>c</i>	69,61 (2,03) <i>c</i>
T5	4,72(0,05) <i>c</i>	0,47(0,03) <i>d</i>	0,05(0,01) <i>cd</i>	571,70 (82,90) <i>d</i>	18,30 (0,50) <i>d</i>	113,75 (3,36) <i>c</i>	90,95 (19,19) <i>cd</i>	11,41 (1,54) <i>c</i>	2,09 (0,17) <i>cd</i>	23,11 (3,28) <i>c</i>	68,15 (1,70) <i>c</i>
CV (%)	8,10	57,18	41,24	41,01	48,52	48,52	41,24	40,20	45,31	41,59	89,15
Mont Amba											
T0	4,21 (0,01) <i>d</i>	0,47 (0,05) <i>e</i>	0,04 (0,00) <i>d</i>	402,70 (36,18) <i>e</i>	7,30 (0,24) <i>d</i>	115,02 (11,52) <i>d</i>	92,30 (13,58) <i>d</i>	8,53 (0,34) <i>e</i>	2,08 (0,15) <i>e</i>	20,16 (4,25) <i>d</i>	73,86 (3,36) <i>d</i>
T1	5,07 (0,04) <i>b</i>	1,23 (0,05) <i>c</i>	0,08 (0,02) <i>bc</i>	882,35 (42,22) <i>c</i>	17,65 (1,53) <i>b</i>	301,70 (15,61) <i>b</i>	235,00 (16,73) <i>b</i>	28,05 (1,01) <i>c</i>	4,36 (0,09) <i>c</i>	62,55 (1,85) <i>b</i>	15,42 (0,83) <i>b</i>
T2	5,45 (0,04) <i>a</i>	1,51 (0,09) <i>b</i>	0,12 (0,02) <i>ab</i>	1166,85 (29,11) <i>b</i>	23,15 (3,18) <i>ab</i>	364,37 (17,77) <i>a</i>	281,78 (20,88) <i>a</i>	35,18 (1,68) <i>b</i>	5,91 (0,16) <i>b</i>	68,49 (0,44) <i>a</i>	3,89 (0,64) <i>a</i>
T3	5,56 (0,10) <i>a</i>	1,78 (0,11) <i>a</i>	0,13 (0,01) <i>a</i>	1313,91 (27,13) <i>a</i>	26,09 (2,90) <i>a</i>	382,35 (17,59) <i>a</i>	301,03 (28,90) <i>a</i>	42,61 (1,72) <i>a</i>	6,30 (0,18) <i>a</i>	70,7 (1,98) <i>a</i>	5,21 (0,91) <i>a</i>
T4	4,29 (0,05) <i>c</i>	0,52 (0,04) <i>de</i>	0,07 (0,02) <i>cd</i>	687,89 (41,02) <i>d</i>	12,11 (0,99) <i>c</i>	179,06 (6,67) <i>c</i>	130,21 (9,24) <i>c</i>	19,91 (0,36) <i>d</i>	2,19 (0,07) <i>de</i>	30,69 (1,80) <i>c</i>	69,93 (2,37) <i>c</i>
T5	4,26 (0,03) <i>c</i>	0,54 (0,01) <i>d</i>	0,07 (0,01) <i>cd</i>	685,85 (18,82) <i>d</i>	14,15 (1,03) <i>c</i>	181,19 (9,36) <i>c</i>	139,97 (19,19) <i>c</i>	21,78 (1,74) <i>d</i>	2,21 (0,03) <i>d</i>	33,39 (3,45) <i>c</i>	72,55 (1,67) <i>c</i>
CV (%)	11,93	52,03	35,67	53,59	40,14	39,76	40,52	40,52	48,91	41,80	80,20
Balume											
T0	4,91 (0,02) <i>c</i>	0,76 (0,02) <i>e</i>	0,08 (0,01) <i>d</i>	770,02 (19,02) <i>e</i>	9,98 (0,40) <i>d</i>	407,50 (10,92) <i>d</i>	197,50 (10,75) <i>e</i>	11,78 (1,09) <i>d</i>	3,21 (0,38) <i>d</i>	21,42 (2,62) <i>d</i>	71,71 (2,34) <i>d</i>
T1	5,67 (0,14) <i>b</i>	2,01 (0,17) <i>c</i>	0,13 (0,02) <i>bc</i>	1229,46 (47,36) <i>c</i>	30,54 (2,90) <i>b</i>	559,75 (13,56) <i>b</i>	392,50 (17,56) <i>c</i>	30,07 (1,73) <i>b</i>	6,75 (0,64) <i>b</i>	69,61 (2,85) <i>b</i>	5,05 (0,26) <i>b</i>
T2	6,06 (0,03) <i>a</i>	2,75 (0,37) <i>b</i>	0,16 (0,02) <i>ab</i>	1589,65 (49,99) <i>b</i>	40,35 (1,86) <i>a</i>	666,25 (27,24) <i>a</i>	443,75 (9,17) <i>b</i>	37,89 (0,87) <i>a</i>	8,97 (0,29) <i>a</i>	76,33 (1,02) <i>a</i>	0,14 (0,01) <i>a</i>
T3	6,16 (0,10) <i>a</i>	2,97 (0,18) <i>a</i>	0,19 (0,02) <i>a</i>	1846,46 (58,97) <i>b</i>	43,54 (1,43) <i>a</i>	687,75 (22,34) <i>a</i>	467,50 (12,52) <i>a</i>	40,07(1,92) <i>a</i>	9,44 (1,04) <i>a</i>	78,54 (2,38) <i>a</i>	0,13 (0,00) <i>a</i>
T4	5,03 (0,02) <i>c</i>	0,82 (0,05) <i>d</i>	0,10 (0,01) <i>cd</i>	1082,73 (47,91) <i>d</i>	17,27 (0,60) <i>c</i>	483,75 (13,56) <i>c</i>	241,00 (11,49) <i>d</i>	21,09 (1,16) <i>c</i>	3,27 (0,19) <i>d</i>	28,07 (2,66) <i>c</i>	69,28 (3,61) <i>cd</i>
T5	5,04 (0,02) <i>c</i>	0,79 (0,01) <i>de</i>	0,11 (0,02) <i>cd</i>	1180,91(53,32) <i>d</i>	19,09 (0,30) <i>c</i>	502,50 (29,48) <i>c</i>	255,00 (13,24) <i>d</i>	23,50 (1,37) <i>c</i>	3,54 (0,77) <i>cd</i>	32,63 (2,40) <i>c</i>	66,56 (2,29) <i>c</i>
CV (%)	9,30	55,81	28,00	26,69	46,08	18,57	31,70	35,78	45,33	47,16	60,47

Les moyennes suivies de lettres différentes au sein d'une colonne sont différentes au niveau $p < 0,05$ et le chiffre () = écart-type.

Tableau 21. Corrélations entre paramètres physico-chimiques et chimiques choisis pour les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.

Kimwenza

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	CEC	TS _{eff} Al	TSB _{eff}
pH	1,000						
COT	0,856	1,000					
N _{tot}	0,810	0,816	1,000				
P _{tot}	0,861	0,983	8,222	1,000			
CEC	0,843	0,947	0,811	0,982	1,000		
TS _{eff} Al	-0,810	-0,911	-0,840	-0,954	-0,984	1,000	
TSB _{eff}	0,853	0,919	0,825	0,961	0,981	-0,984	1,000

Mont Amba

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	CEC	TS _{eff} Al	TSB _{eff}
pH	1,000						
COT	0,933	1,000					
N _{tot}	0,942	0,879	1,000				
P _{tot}	0,946	0,982	0,875	1,000			
CEC	0,843	0,978	0,869	0,966	1,000		
TS _{eff} Al	-0,907	-0,963	-0,823	-0,972	-0,966	1,000	
TSB _{eff}	0,939	0,963	0,847	0,981	0,962	-0,983	1,000

Balume

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	CEC	TS _{eff} Al	TSB _{eff}
pH	1,000						
COT	0,973	1,000					
N _{tot}	0,902	0,831	1,000				
P _{tot}	0,993	0,955	0,937	1,000			
CEC	0,954	0,944	0,911	0,959	1,000		
TS _{eff} Al	-0,934	-0,939	-0,817	-0,915	-0,909	1,000	
TSB _{eff}	0,950	0,951	0,848	0,935	0,925	-0,988	1,000

5.4 Conclusion partielle

L'évaluation de l'application en quatre saisons culturales (deux années) des composts produits à partir des biodéchets ménagers a contribué à l'amélioration de la plupart des propriétés physico-chimiques et chimiques des sols étudiés. Les niveaux moyens de l'azote, du phosphore sont élevés dans les sols amendés avec de grandes quantités de composts. Le pH, le carbone organique total et le complexe adsorbant augmentent également avec la dose appliquée de la matière organique des composts. Le taux de saturation en aluminium évolue de manière inversement proportionnel au pH du sol, et le degré de solubilité de l'aluminium échangeable diminue avec l'augmentation de doses des composts appliqués. Les doses élevées des composts (40 et 60 t.ha⁻¹) permettent de réduire sensiblement les formes toxiques d'aluminium. Le pH apparaît comme le facteur déterminant dans la diminution du taux de saturation. En plus, les apports sont positivement corrélés au niveau de 1 ou 5 % (Pearson) avec la plupart de paramètres étudiés. L'exception est faite avec les parcelles non amendées aux composts et ou fertilisées aux engrais minéraux NPK, ou ils tendent à baisser.

Les différences significatives ont été observées entre les différentes doses des composts utilisés et des engrais minéraux NPK sur la plupart des caractéristiques des sols étudiés quant à leurs effets. La différence entre la dose T2 (40 t.ha⁻¹) et T3 (60 t.ha⁻¹) n'est significative pour la plupart des paramètres étudiés. Les résultats montrent une certaine efficacité des engrais minéraux utilisés à faibles doses pour certains paramètres, mais tendent à dégrader d'autres et à acidifier le sol.

Bien que, les apports en matières organiques des composts semblent améliorer les propriétés physico-chimiques et chimiques des sols, l'étude montre que le niveau de fertilité obtenu reste fragile dans les cas des sols acides tropicaux sableux en plus des conditions climatiques qui prévalent dans le milieu, caractérisées par des fortes précipitations et des températures élevées. De ce point de vue, il est important de mettre en place un système de gestion qui assure la conservation des sols et leur utilisation rationnelle dans le but d'une agriculture soutenable. La valorisation des déchets comme source des matières organiques doit être encouragée dans le système global de gestion des déchets à Kinshasa.

Enfin, le suivi des paramètres physico-chimiques et chimiques ne suffit pas pour prédire de l'état de santé d'un sol dans un écosystème donné, il convient également de suivre les paramètres biologiques qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 6. Effets des composts de biodéchets ménagers sur les indicateurs microbiologiques de la qualité des sols

6.1 Introduction

Les propriétés physiques et chimiques ont été utilisées pour évaluer l'effet de l'application de différentes sources de matière organique sur le sol au cours de l'expérience à moyen terme dans beaucoup d'études. Cependant, ces propriétés changent très lentement et ont besoin de nombreuses années pour fournir un résultat significatif. En revanche, les propriétés biochimiques et microbiologiques sont très réactives et fournissent des informations immédiates et précises sur les petits changements survenus dans le sol. En fait, ils peuvent ainsi indiquer le potentiel du sol à soutenir l'activité microbologique et l'état du sol pour la culture (Tejada *et al.*, 2008b).

Les changements anthropiques survenus dans le sol affectent le comportement des micro-organismes tout autant que les paramètres chimiques qui renseignent sur l'état de la fertilité. Ils répondent rapidement aux modifications intervenues et reflètent les risques environnementaux pour l'écosystème. Spécialement dans les sols tropicaux, où le turnover des compartiments est très rapide, la détermination de la biomasse microbienne donne une indication de l'évolution des stocks organiques dans les sols sous différentes formes de maniement (Chaussod *et al.*, 1992; Uzêda *et al.*, 1996). Les enzymes peuvent également réagir aux changements dans la gestion des sols plus rapidement que d'autres variables chimiques ou physiques et peuvent donc être utiles comme des indicateurs précoces de changement biologique (Bandick et Dick, 1999 *in* Tejada *et al.*, 2008a; Mondini *et al.*, 2007). Ce sont des bons indicateurs de la fertilité des sols, car ils sont impliqués dans les cycles des éléments nutritifs les plus importants (Tejada *et al.*, 2006a).

C'est pourquoi, pour comprendre le fonctionnement des sols, l'importance croissante est accordée à la détermination des paramètres biochimiques différents, telles que les activités enzymatiques du sol et de celles liées (ceux liés) à la biomasse microbienne (Bastida *et al.*, 2007). Par conséquent, il se pose une difficulté dans le choix d'indicateurs microbiologiques idéaux parmi la multitude des composants microbiologiques et les voies biochimiques qui en résultent dans le sol (Ros *et al.*, 2006b; Bastida *et al.*, 2008). Deux groupes d'indicateurs microbiologiques importants de la qualité des sols sont généralement étudiés : ceux relatifs à l'estimation de l'abondance des micro-organismes et ceux relatifs à l'estimation de l'activité microbienne dans le sol. L'avantage de ces paramètres réside dans leur sensibilité aux changements qui peuvent intervenir dans le sol (Nannipieri *et al.*, 1990 et Dick et Tabatabai, 1993 *in* Bastida *et al.*, 2008 ; Ros *et al.*, 2006b).

Le compost est un amendement organique pourvoyeur de l'humus et dans une moindre mesure est un fertilisant contenant des éléments minéraux nutritifs nécessaires pour l'alimentation des plantes. Pourtant, quel que soit son potentiel fertilisant chimique, il

contient, de plus, un important réservoir des micro-organismes endogènes et devrait influencer énormément la taille, la structure et l'activité de la population microbienne résiduelle du sol (Tejada *et al.*, 2006ab; Téjada *et al.*; 2009b, Mbonigaba, 2007).

Comme pour les paramètres chimiques, les réponses des caractéristiques microbiologiques suite à l'apport d'un amendement aux sols peuvent être traduites soit par une diminution ou une augmentation de leurs amplitudes, tout en étant fonction de la nature du matériau apporté et des types des sols à amender (Mondini *et al.*, 2007; Garcia-Gil *et al.*, 2000; Albiach *et al.*, 2000; Pérez-Piqueres *et al.*, 2006). Elles sont basées sur la présence des micro-organismes, de la disponibilité des nutriments et des conditions édaphiques (acidité, etc.).

De ce qui précède, l'objectif de cette étude était d'évaluer les effets des amendements en composts à différentes doses sur quelques propriétés biologiques de sol, telles que la biomasse microbienne, la respiration de sol et les activités enzymatiques (phosphatase acide, uréase) et leur répercussion dans les sols sableux acides types *arenoferralsols*, de l'agrosystème humide tropical d'Afrique centrale de la Province de Kinshasa en plein champ et en quatre saisons culturales.

6.2 Matériels et méthodes

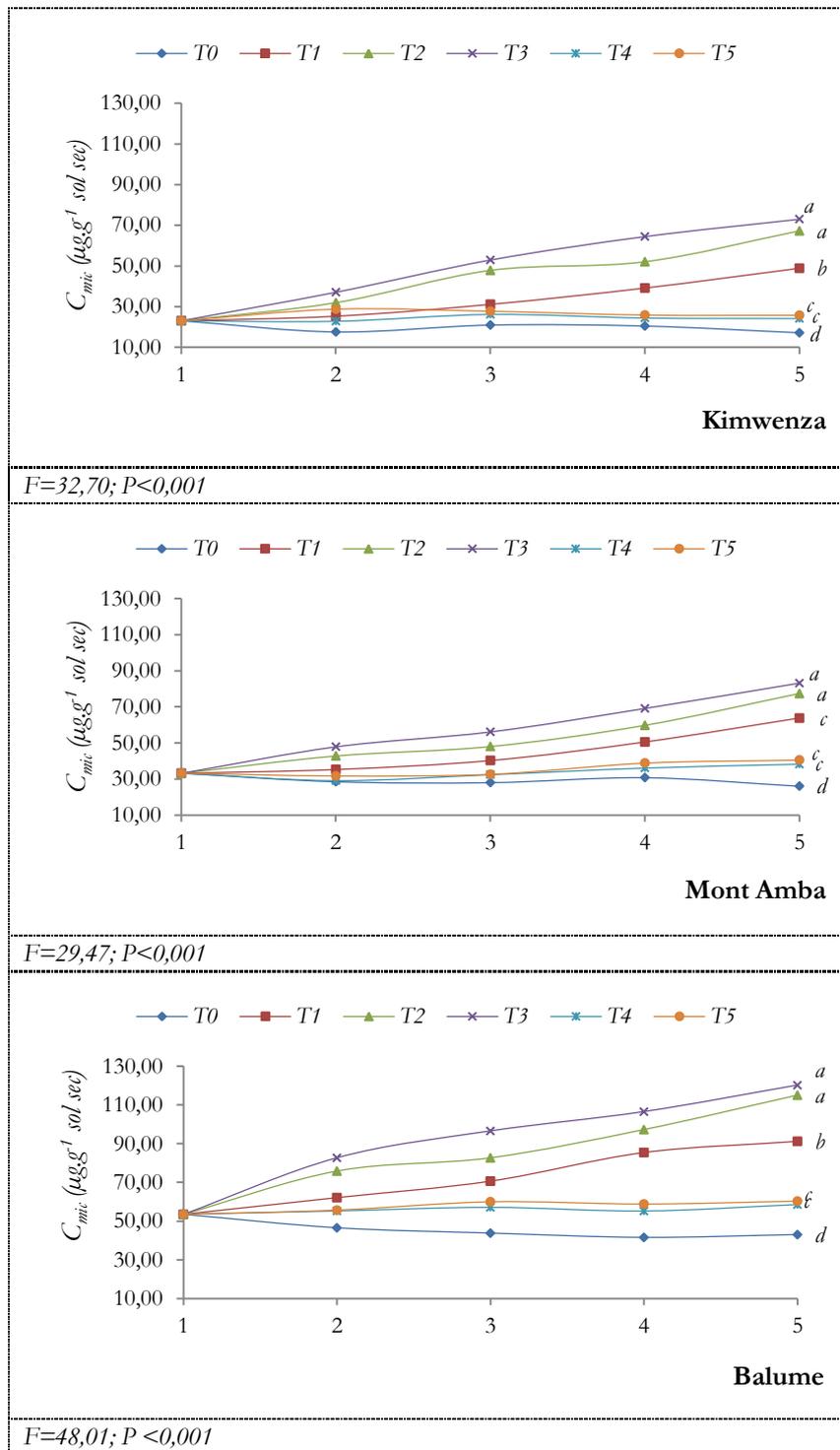
Les méthodes d'échantillonnage des sols, d'analyses des paramètres biologiques et de la conduite des essais de fertilisation pendant les quatre saisons culturales sont décrites au chapitre 3.

6.3. Présentation des résultats et discussion

6.3.1 Biomasse microbienne

La biomasse microbienne (mesurée ici par le carbone microbien) fait partie des pools labiles de la matière organique et sert comme réservoir important des éléments nutritifs dans le sol. Les graphiques de la figure 26 présentent les résultats du carbone microbien (C_{mic}) pour les trois sites des sols de l'étude dans la Province de Kinshasa.

On constate une nette augmentation du taux de carbone microbien dans toutes les parcelles fertilisées aux composts par rapport aux engrais minéraux NPK et au témoin. La relation dose et ce paramètre comme l'atteste la figure b de l'annexe 5 est significativement corrélée selon le test de Pearson au niveau 5 % à la fin des essais sur les trois sites. Cependant, l'ANOVA à un facteur contrôlé pour la dernière saison (annexes 4.34-4.36) montre qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les différents traitements sur le carbone microbien. La comparaison des moyennes montre que les traitements à base des composts forment des classes nettement supérieures aux autres, représentés par les lettres *a* et *b* à Kimwenza, Mont Amba (figure 26, tableau 23). Le carbone microbien est beaucoup plus



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 26. Evolution du carbone microbien (C_{mic}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

important à Balume comme à l'état initial (section 4.3.3, tableau 14) suivi du Mont Amba et de Kimwenza. Sous la forte dose (T3) de compost des biodéchets, le taux du C_{mic} à l'état initial a été multiplié par 3,2; 2,5 et 2,3 respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume. On enregistre ainsi des valeurs de 48,83 à 73 $mg.kg^{-1}$ à Kimwenza, de 63,72 à 83,11 $mg.kg^{-1}$ et de 91,22 à 120,21 $mg.kg^{-1}$ à Balume. Cependant, les doses d'engrais minéraux NPK, ont induit en moyenne une légère hausse de $\pm 11,73$; 22,09 et 12,82 % respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume au terme de l'expérimentation.

Azote microbien

Les résultats de l'évolution du taux de l'azote de la biomasse microbienne sont présentés par les graphiques de la figure 27 ci-dessous. Le taux de l'azote microbien augmente dans toutes les parcelles aux composts, faiblement aux engrais minéraux NPK et pas du tout dans les champs non amendés. L'ANOVA à un facteur contrôlé pour les résultats de la dernière saison (annexe 4.37- 4.39), montre qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements, vis-à-vis de leurs effets sur le N_{mic} sur les trois sites. Les traitements à base des composts affichent une supériorité dans l'ensemble par rapport à ceux à base d'engrais minéraux NPK et aux témoins comme dans le cas du carbone microbien. Et la relation dose apportée en fin d'expérimentation et l'azote microbien sont corrélés significativement au seuil de 1 % à Balume et de 5 % pour les deux autres sites selon le test de corrélation de Pearson (annexe 5, figure b). Les quatre campagnes d'échantillonnage des sols montrent que les valeurs de N_{mic} sont élevées à Balume par rapport aux deux autres sites. La comparaison des valeurs moyennes ($\alpha = 0,05$) permet de les grouper en cinq classes à Kimwenza (*a, b, c, cd, d*), en quatre classes (*a, b, c, d*) au Mont Amba et à Balume (figure 28, tableau 23).

A la fin des essais, l'azote microbien des parcelles amendées au compost des biodéchets a été multipliée par un facteur de 2,3 à 3,4 à Kimwenza; 4,6 à 6,5 au Mont Amba et 1,7 à 2,6 à Balume selon les traitements apportés. Les valeurs de l'azote microbien varient de 3,73 à 13,60 $mg.kg^{-1}$ à Kimwenza, de 3,05 à 19,47 $mg.kg^{-1}$ au Mont Amba et de 9,76 à 31,87 $mg.kg^{-1}$ à Balume pour les traitements T0 à T5. Dans les champs témoins sans aucun amendement, le taux de N_{mic} a légèrement diminué à Kimwenza et Balume tandis qu'il est resté stable au Mont Amba. Des faibles augmentations ont été observées avec les traitements aux engrais minéraux NPK.

Bien que les micro-organismes du sol constituant la biomasse microbienne ne représentent pas une fraction importante des matières organiques et inorganiques de sels nutritifs dans la plupart des écosystèmes, ils sont désormais reconnus pour leur capacité à effectuer des transformations biochimiques des éléments fertilisants majeurs N, P et S, ainsi que C (Monkiedje, 2006). La biomasse microbienne est un meilleur indicateur potentiel de la fertilité des sols que le carbone organique qui met en évidence les changements intervenus dans sa

gestion (Davet, 1996; Brookes et Joergensen, 2006; Ros *et al.*, 2006a; Ros *et al.*, 2006b). Les résultats obtenus confirment cette hypothèse. L'apport des matières organiques des composts comme source des nutriments et d'énergie (riche en substrat carboné) favorise l'amélioration des conditions de développement des micro-organismes dans le sol (pH, capacité de rétention en eau, etc.) et à son tour, l'enrichissement en nutriment dans le sol (Monkiedje *et al.*, 2006).

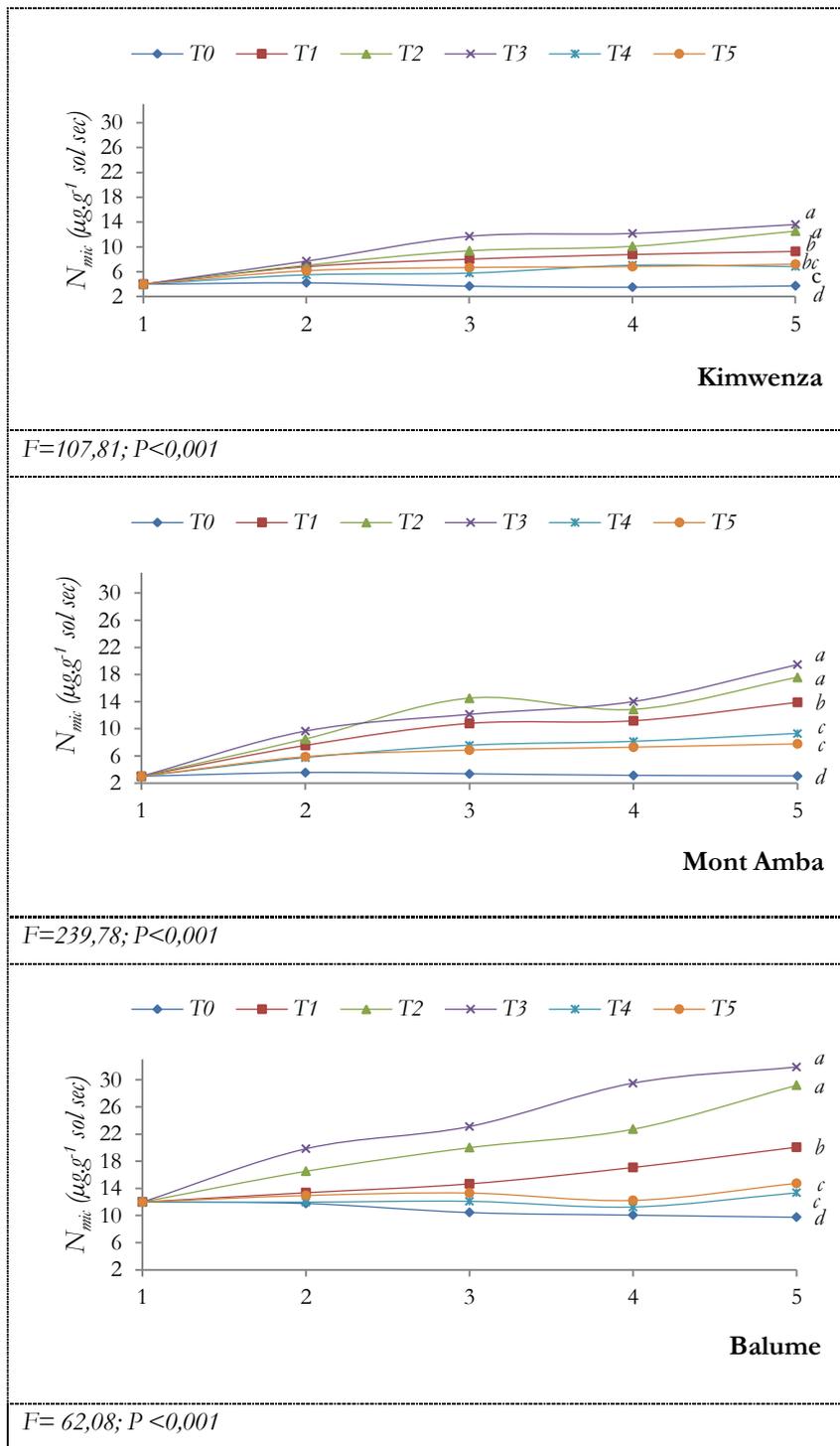
En plus, les composts de biodéchets ménagers sont pourvoyeurs de micro-organismes exogènes au sol (Tejada *et al.*, 2006b; Tejada *et al.*, 2009b). Saison *et al.* (2006); Tejada *et al.* (2008a); Tajeda *et al.* (2009a), Tejada *et al.* (2009b), etc. ont établi que la population microbienne endogène au compost contribue, une fois appliqué au sol, indépendamment de la biomasse résiduelle, aux modifications qui surviennent sur les caractéristiques microbiologiques dans les sols. Il apparaît ainsi un effet double des apports de composts admis aussi dans la littérature (Gracia-Gil *et al.*, 2000; Ros *et al.*, 2006b; Adl, 2003).

En outre, la biomasse microbienne du sol de la quatrième saison culturale a été plus élevée que ceux des trois premières saisons en raison de l'effet résiduel cumulatif de la matière organique après chaque application dans les parcelles traitées aux composts. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature, montrent que la biomasse du sol ainsi que la respiration réagissaient rapidement en termes d'activités après incorporation des différents engrais organiques (Dinesh *et al.*, 2004; Davet, 1996; Tejada *et al.*, 2009; Ros *et al.*, 2006). L'importance de la biomasse microbienne dans le sol après amendement organique est essentiellement le résultat de la disponibilité du carbone dans l'amendement (Bouzaiane *et al.*, 2002).

Dans les sols tropicaux à pH < 5,5; l'acidité et la toxicité (Al & Fe) limitent le développement des micro-organismes et par conséquent leurs activités. (Davet, 1996). Toute mise en culture continue dans ces sols (comme dans notre cas), sans recyclage ou apports des matières organiques affectent toute activité microbienne.

Une élévation considérable du taux de C_{mic} dans un sol (tropical) suite à l'application continue du compost (végétal) a été rapportée dans la littérature (Mze, 2008; Mbonigaba, 2007; Ros *et al.*, 2006a; Ros *et al.*, 2006b; Willson *et al.*, 2001; Tejada *et al.*, 2006ab; Tejada *et al.*, 2009b; etc. Cependant, l'augmentation de la biomasse microbienne ne traduit pas nécessairement l'amélioration de la fertilité, mais sous certaines conditions la biomasse microbienne peut augmenter dans les sols fertilisés tout en demeurant peu active et moins utile (Biederbeck *et al.*, 1984; Sparling, 1997). Le rapport C_{mic}/COT est représentatif de la qualité et de la disponibilité de la matière organique.

Par contre, la stabilité relative de la biomasse d'un sol donné est le résultat d'équilibre dynamique de l'activité biologique représenté par le rapport C_{mic}/N_{mic} . A tout instant, les



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 27. Evolution de l'azote microbien (N_{mic}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales

micro-organismes dégradent des substrats, synthétisent de la matière organique nouvelle, puis sont à leur tour lysés en fonction des conditions environnementales du sol (Bouzaiane *et al.*, 2002). Les valeurs du rapport C_{mic}/N_{mic} (tableau 22) ont diminué dans les champs amendés par le compost par rapport aux témoins non fertilisés et aux valeurs obtenues à l'état initial. Les valeurs faibles (< 6) suggèrent une prédominance de la population bactérienne par rapport aux champignons dans la décomposition de la matière organique (intensité de minéralisation/immobilisation) (Joergensen *et al.*, 1995; Ros et Sparling, 1993; Moore *et al.*, 2000; Dilly, 2003).

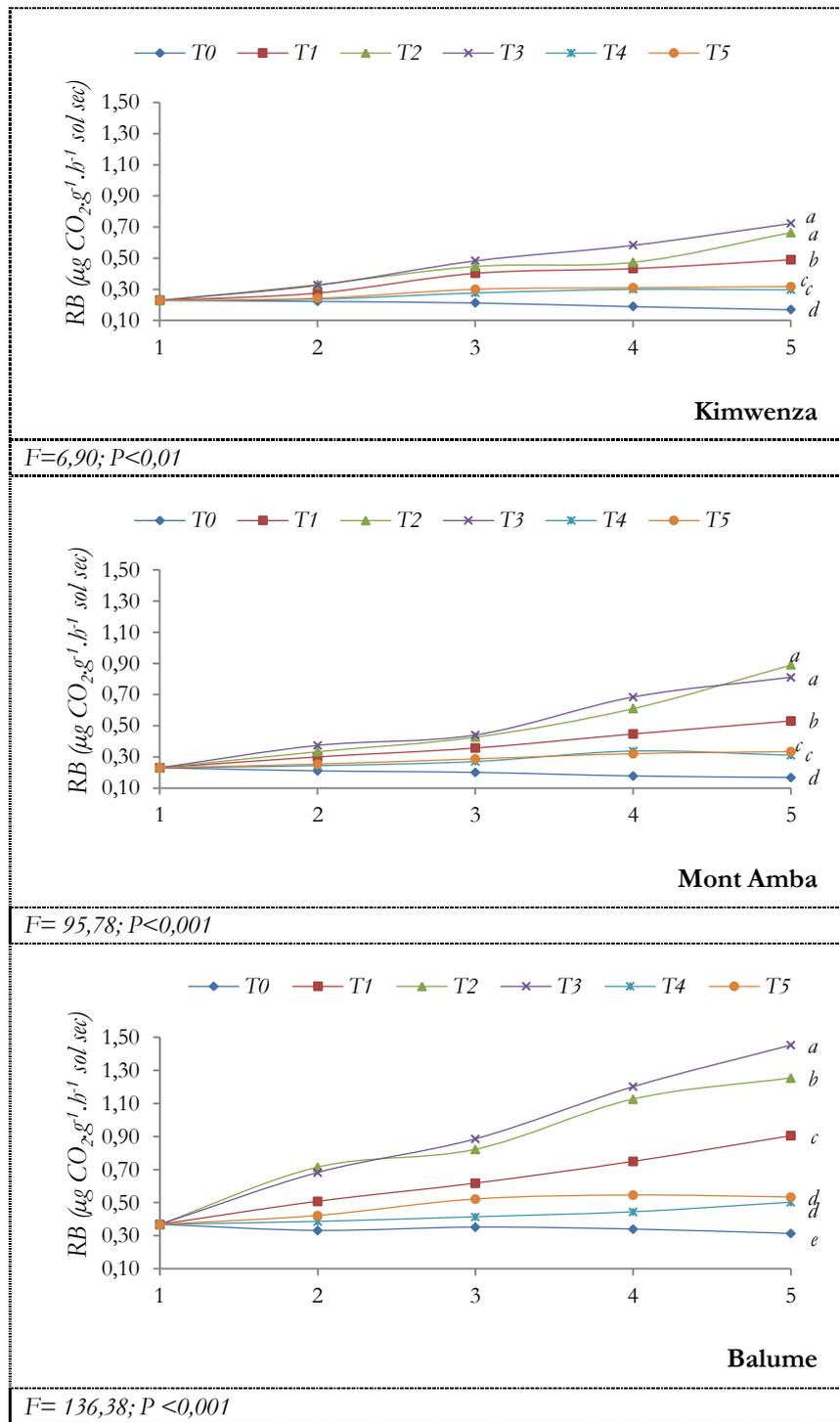
Le C_{mic} et N_{mic} dans les parcelles traitées aux NPK ont faiblement augmenté par rapport à ceux traités au compost. D'après Mbonigaba (2007), les petites augmentations de l'activité microbienne observées pour les fertilisants minéraux NPK est mauvais signe à long terme car, l'utilisation du carbone organique restant par les micro-organismes aérobies comme source d'énergie entraînerait une diminution de la teneur en matière organique dans les sols. Les faibles quantités de la biomasse microbienne dans les parcelles témoins peuvent être justifiées par la diminution progressive des nutriments qui entraînent la mort des micro-organismes (Ruganzu, 2009). Ces derniers, en se décomposant libèrent les éléments qui sont directement absorbés par la culture ou lessivés si pas repris par les micro-organismes.

Entre les différents sites, les valeurs de la biomasse microbienne (carbone et azote microbiens) obtenues à Balume sont supérieures aux deux autres sites. Les teneurs en carbone organique et en azote total différentes au départ (± 2 fois supérieurs) pourraient expliquer l'écart entre les résultats.

6.3.2 Activité microbienne

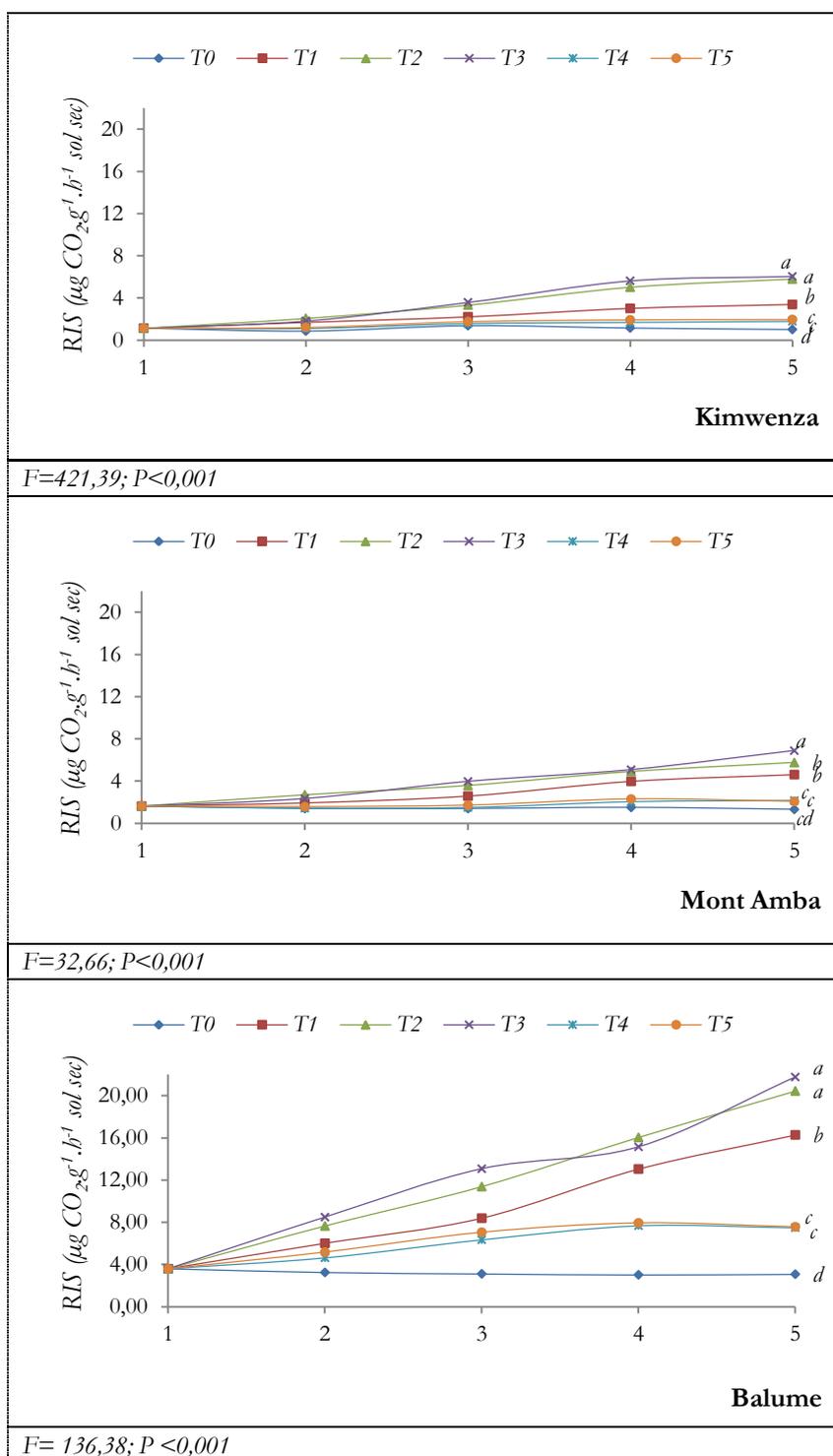
La respiration et l'activité microbienne sont des indices biologiques qui reflètent la quantité des micro-organismes présents et actifs dans le sol. Les mesures respirométriques pour évaluer l'activité microbienne des sols sont présentées par les graphiques des figures 28,29 et le tableau 23. Il s'agit de la respiration induite par substrat (RIS) qui traduit une activité potentielle après ajout d'ingrédients nutritifs [$C_6H_{12}O_6$, $(NH_4)_2SO_4$, KH_2PO_4], et la respiration basale (RB) qui reflète l'activité du sol (actuelle) en fonction de la population microbienne et de la disponibilité du carbone dans les conditions actuelles et renseigne sur le turnover des matières organiques du sol (Pell *et al.*, 2006; Ros *et al.*, 2006b; Tejada *et al.*, 2009a; Dinesh *et al.*, 2004)).

De façon générale, un effet significatif des apports des composts a été observé sur les taux de respiration microbienne en comparaison avec celui des traitements témoins ou aux engrais minéraux NPK. En plus, les courbes de ces différentes figures (figures 28-29) font apparaître que les intensités respiratoires basales et induites de la biomasse augmentent en fonction des apports en matières organiques. Et cela, dès la première application des composts de biodéchets ménagers. La relation dose apportée en matières organiques et les différentes intensités respiratoires observées à la fin de l'expérimentation montrent une relation très



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 28. Evolution de la respiration basale (RB) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 29. Evolution de la respiration induite par substrat (RIS) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

significative (5 %) au seuil de la corrélation de Pearson (annexe 5, figure b) dans chaque site de l'étude.

La dynamique de l'activité microbienne suit la même tendance que celle de la biomasse exprimée par le carbone et l'azote microbien.

Concernant la respiration basale (RB), à la fin des essais, l'intensité respiratoire basale obtenue initialement a été multipliée par les facteurs de 1,87 à 3,13 à Kimwenza; 2,3 à 3,87 au Mont Amba et 2,56 à 3,91 à Balume; en fonction des doses appliquées par l'apport des composts de biodéchets ménagers. Les teneurs varient de 0,49 à 0,72 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ à Kimwenza, de 0,53 à 0,89 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ au Mont Amba et de 0,91 à 1,45 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ à Balume. Pour les amendements aux engrais minéraux NPK, les intensités ont été multipliées par un facteur de $\pm 1,39$ à Kimwenza et de $\pm 1,43$ pour les sites de Mont Amba et de Balume.

Quant à la respiration induite par le substrat (RIS), au terme de quatre saisons culturales avec les apports répétés d'amendements, les intensités respiratoires induites suivent la même tendance que les respirations basales à la différence qu'ici les valeurs sont beaucoup plus grandes. Et par rapport à l'état initial, l'intensité respiratoire induite a été multipliée par le facteur de 2,99 à 5,35 à Kimwenza; de 2,83 à 4,23 au Mont Amba et 4,53 à 6,06 à Balume selon les doses apportées des composts de biodéchets ménagers. Les valeurs vont de 3,38 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ à 6,04 à Kimwenza, de 4,62 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ à 6,89 au Mont Amba et de 16,27 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ à 21,76 à Balume. Les apports d'engrais minéraux NPK ont induit un facteur multiplicateur faible de $\pm 1,73$; 1,33 et 2,11 respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume mais l'azote apporté est inférieur à celui des composts. Le témoin a baissé très faiblement de 0,12; 0,31 et 0,52 unité de $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ MS respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume par rapport aux valeurs initiales.

Globalement, les données analytiques (RB et RIS) de l'ANOVA à la fin des essais pour les différents traitements sont résumées dans les tables en annexes (4.40-4.45). Les résultats montrent qu'il existe des différences très significatives ($p < 0,001$) entre les traitements sur différents sites pour la même période. La comparaison des moyennes permet de catégoriser respectivement quatre groupes (*a, b, c, d*) à Kimwenza, Mont Amba et cinq (*a, b, c, d, e*) à Balume pour la respiration basale (figure 28, tableau 23); et quatre groupes à Kimwenza (*a, b, c, d*), Mont Amba (*a, b, c, cd*) et Balume (*a, b, c, d*) pour la respiration induite par substrat (figure 29, tableau 23).

De même, les observations faites sur l'influence d'apports de la matière organique sur la biomasse microbienne restent également valables pour les activités respiratoires. L'augmentation constatée est attribuée à la disponibilité des éléments C, N, P apportés par les composts des biodéchets (N'Dayegamiye *et al.*, 2004; N'Dayegamiye *et al.*, 2005).

Dans l'ensemble des sites étudiés, la même tendance est observée comme pour la dynamique des matières organiques (COT, N_{tot} , etc.) et celle du $\text{pH}_{\text{-H}_2\text{O}}$ des sols; les indicateurs microbiologiques de la fertilité des sols vont dans le même sens.

A une augmentation du pH d'environ une unité (dose T3) correspond une augmentation bien significative de l'activité microbienne (Van de Werf, 1990; Ellis *et al.*, 1998). Cependant, des faibles augmentations de l'activité basale et induite dans les parcelles fertilisées aux engrais minéraux NPK supposent une métabolisation résiduelle du carbone organique, alors que ces fumures n'apportent pas des matières organiques. D'après certains auteurs (Römheld et Neumann, 2006; Giri *et al.*, 2005; Gobat *et al.*, 2003), la biomasse racinaire et les excréments des racines dans la rhizosphère pourraient contribuer à l'augmentation de la biomasse et par conséquent de son activité.

Dans les champs témoins, les valeurs de RB et RIS ont baissé, dû essentiellement à l'absence des substrats facilement métabolisable du fait de la diminution du carbone organique, en plus à une d'acidité élevée du sol comme l'indique la valeur de pH. Dans l'ensemble, la respiration est très sensible à la physiologie et aux conditions nutritionnelles des micro-organismes (Stenström *et al.*, 1998 et Malivov et Dilly, 2007). La perturbation de la vie édaphique est un risque important pour une productivité durable du sol dans la mesure où l'activité biologique est un indicateur de la bonne santé d'un sol (Ouattara *et al.*, 2010). Les valeurs de Q_R (quotient d'activation respiratoire) obtenues à la fin des essais dans les parcelles (tableau 22) sont légèrement faibles par rapport à celles à l'état initial à Kimwenza et Balume; et légèrement supérieures au Mont Amba. Les faibles valeurs de Q_R supposeraient d'une part un développement microbien important induit lors de la mesure de la respiration induite par substrat (RIS) et d'autre part aux conditions environnementales du milieu comme l'acidité (pH, Al) qui affecteraient l'activité des micro-organismes (respiration basale) (Mbonigaba, 2007).

Par ailleurs, comparaison faite avec les résultats sur les trois sites, on peut remarquer que pour les mêmes traitements les valeurs de RIS sont nettement supérieures à celles de RB et les valeurs du quotient d'activation respiratoire Q_R sont $< 0,3$ (tableau 22) considérées comme seuil des caractéristiques des sols pollués (ISO-17155, 2002). Le Q_R est légèrement supérieur dans les champs témoins et amendés aux engrais minéraux NPK. Dans les champs aux composts, Q_R diminue et RIS induit une augmentation de l'activité respiratoire suite à l'ajout dans le milieu réactionnel des nutriments riches en N, P (sulfate d'ammonium, dihydrogénophosphate de potassium), et en présence de la disponibilité du carbone facilement métabolisable (glucose). Dans ces conditions, les micro-organismes acquièrent donc des nutriments nécessaires pour leur développement et survie qui se traduisent par une augmentation de l'activité respiratoire. On note également que l'activité respiratoire des micro-organismes dépend de la disponibilité du carbone métabolisable, de l'azote et du

phosphore disponible (Cleveland *et al.*, 2002; Ilstedt *et al.*, 2003; Ilstedt et Singh, 2005; Tekhay *et al.*, 2006). Ces deux derniers seraient des facteurs limitants pour la respiration basale.

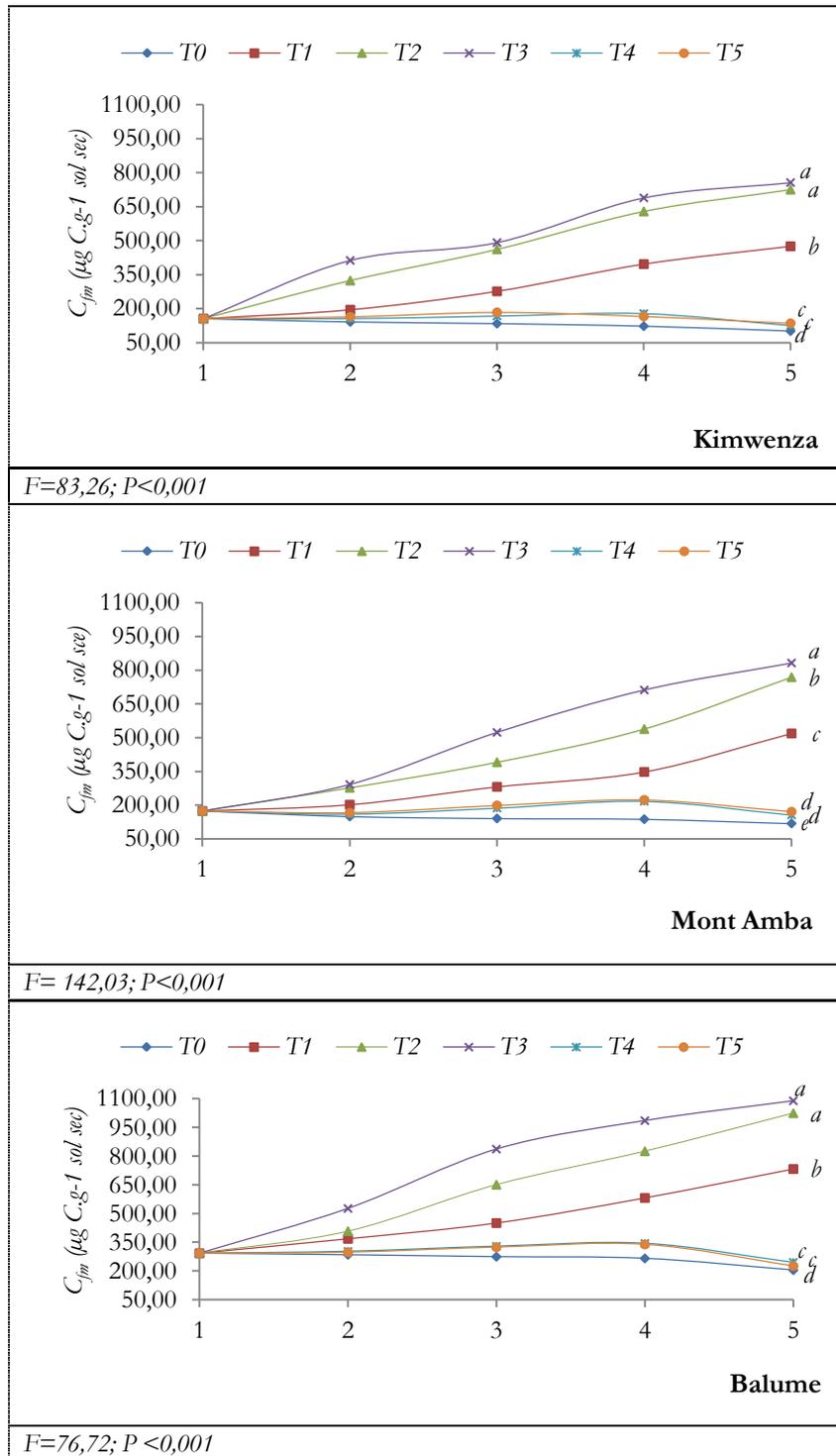
Le qCO_2 (quotient métabolique) est utilisé comme un bioindicateur de perturbation ou de développement favorable des micro-organismes dans leur écosystème qui reflète l'efficacité d'utilisation de carbone organique (Dinesh *et al.*, 2010). Le quotient métabolique a également augmenté dans les champs amendés aux composts à Balume, au Mont Amba et à Kimwenza les valeurs trouvées sont inférieures à celles d'engrais minéraux NPK. En plus, les valeurs de qCO_2 sont relativement supérieures aux valeurs de départ (tableau 14). L'accroissement de qCO_2 est souvent lié au stress qui peut s'expliquer par le changement du substrat (nutriments disponibles dans les composts, exigences d'entretien, etc.) utilisé par la population microbienne restée inchangée et/ou par la modification de la composition (structure) de la communauté microbienne par apport exogène de composts, en plus des perturbations intervenues dans les échantillons des sols avant analyse (Dilly *et al.*, 2005; Insam *et al.*, 1996; Ros *et al.*, 2006b; Mbonigaba, 2007).

6.3.3 Carbone facilement métabolisable

Les résultats de l'évolution de la fraction du carbone facilement métabolisable (C_{fm}), indice de la qualité du carbone sont présentés par les graphiques de la figure 30 et le tableau 23. Ces graphiques font ressortir une augmentation systématique du taux de C_{fm} induite par les traitements à base des composts de biodéchets ménagers sur les différents sites. Leur supériorité est nette par rapport aux apports d'engrais minéraux NPK dans les sites concernés.

L'ANOVA à un facteur contrôlé pour les données de la dernière campagne (annexes 4.46-4.48) montre qu'il existe effectivement des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements sur les trois sites de l'étude. La comparaison des moyennes à la dernière saison révèle que les traitements à base des composts occupent les classes des moyennes supérieures par rapport à celles des parcelles constituées d'engrais minéraux NPK et des témoins. A Kimwenza et à Balume, on observe quatre classes symbolisées par les lettres *a*, *b*, *c* et *d*; tandis qu'au Mont Amba on observe cinq classes *a*, *b*, *c*, *d* et *e* (figure 30, tableau 23). Les teneurs observées pour chaque campagne varient dans l'ordre supérieur de Balume par rapport aux deux autres sites pour les mêmes doses des composts. Les niveaux atteints sont proportionnels au niveau du carbone organique total avant tout traitement dans les sols des trois sites.

En fin d'essais, les taux du C_{fm} obtenu à l'état initial ont été multipliés par les facteurs 3,05 à 4,86 à Kimwenza; 2,99 à 4,80 au Mont Amba et 2,47 à 3,72 à Balume pour les traitements à base des composts de biodéchets ménagers. Les traitements aux composts ont induit une augmentation de 319,33 à 600,58 $mg.kg^{-1}$ à Kimwenza; de 344,65 à 658,4 $mg.kg^{-1}$ au Mont



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 30. Evolution du carbone facilement métabolisable (C_{fm}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

Amba; et de 429,97 à 796,22 mg.kg⁻¹ à Balume. Cependant, les traitements à base d'engrais minéraux NPK ont induit une perte du C_{fm} d'au moins 30,42 mg.kg⁻¹ à Kimwenza contre 17,6 au Mont Amaba et 66,81 à Balume. Par contre, sans amendement, le sol a perdu 35,14 % du C_{fm} à Kimwenza; 32,07 % au Mont Amba et 30,10 % à Balume à la fin de l'expérimentation.

L'augmentation du taux de carbone facilement métabolisable constaté suite aux apports continus (quatre fois en deux années culturales) de matières organiques (composts) dans les différents sites de l'étude concorde avec ce qu'ont rapporté plusieurs auteurs (Mze, 2008; Mbonigaba, 2007; Pérez-de-Mora *et al.*, 2005; Tejada *et al.*, 2006ab ; Tejada *et al.*, 2008ab, etc.). Ainsi, la disponibilité de matières organiques stimule la croissance des micro-organismes qui jouent un rôle important dans la décomposition de matières organiques fournissant ainsi aux plantes les éléments nutritionnels nécessaires.

Les proportions du C_{fm} comme composante du carbone organique total (C_{fm}/COT, tableau 22) à la fin des essais sont globalement supérieures dans les champs fertilisés que ceux de l'état initial.

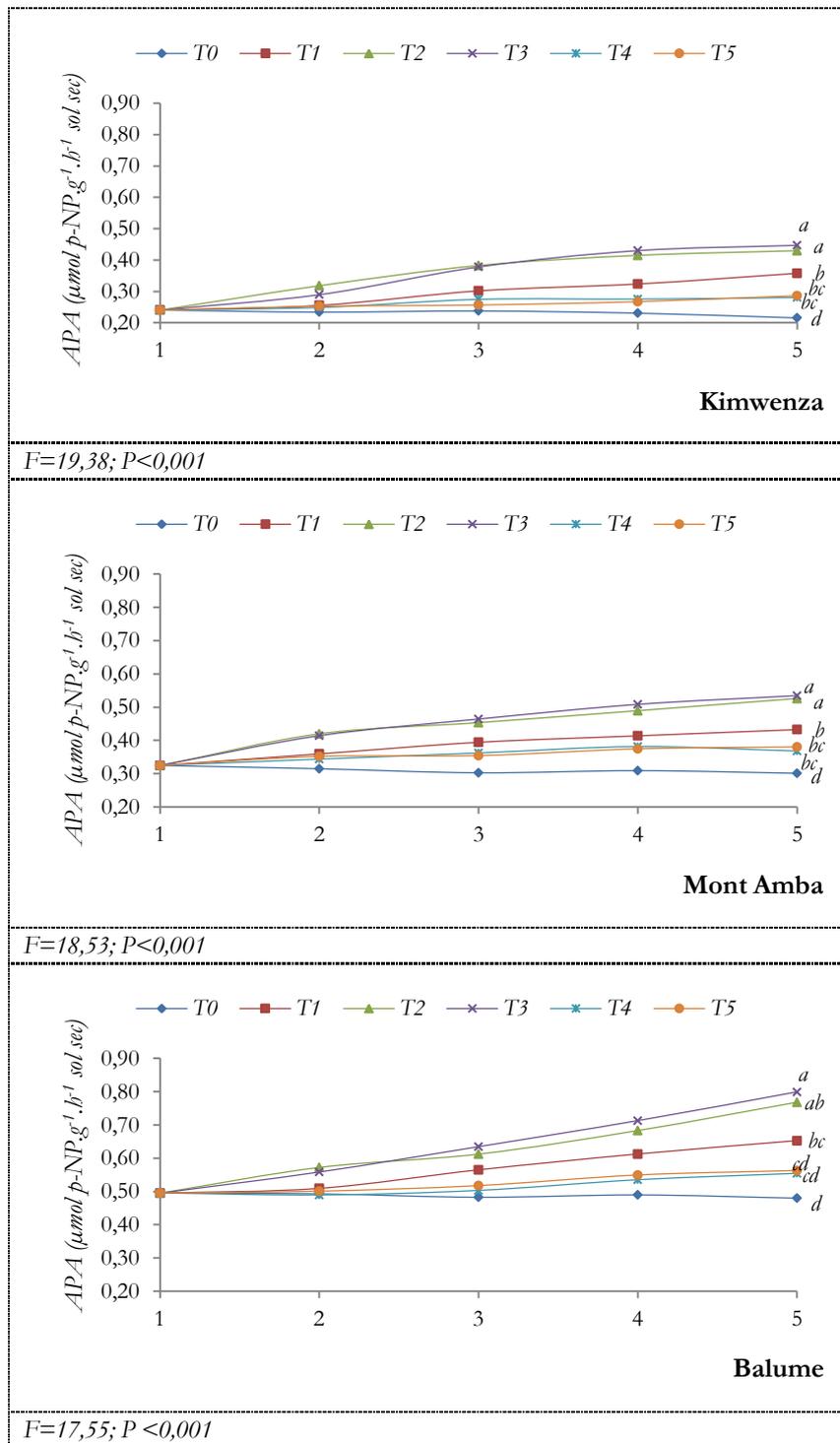
Si la respiration induite par substrat vise à apprécier l'efficacité des micro-organismes du sol à dégrader la matière organique dans les conditions nutritionnelles optimisées, la détermination du carbone facilement assimilable obtenue par la mesure de DBO₅, vise pour sa part à évaluer la fraction du carbone du sol que les micro-organismes peuvent métaboliser en un temps donné et sous des conditions d'incubation précise. Et le rapport C_{fm}/COT du tableau 22 renseigne également sur la qualité du substrat organique du sol tout autant que le quotient microbien (Q_R) et la respiration spécifique (qCO₂). Globalement, le rapport C_{fm}/COT pour les données de la dernière campagne a augmenté dans les parcelles amendées.

6.3.4 Activités enzymatiques

6.3.4.1 Activité de la phosphatase acide

Les résultats de l'évolution de l'activité de la monophosphoestérase acide (APA) sont indiqués par les graphiques de la figure 31 et le tableau 23 qui présentent les résultats moyens à la fin des essais.

On constate sur les courbes de la figure 31 que les différentes doses des composts et d'engrais minéraux NPK induisent une augmentation de l'activité de la monophosphoestérase acide sur les trois sites. Sous le traitement T3, l'intensité de l'activité enregistrée sur les trois sites, passe de 0,24 à 0,45 μmol p-NP.g⁻¹.h⁻¹ de sol sec à Kimwenza; de 0,32 à 0,53 μmol p-NP.g⁻¹.h⁻¹ de sol sec au Mont Amba et de 0,50 à 0,88 μmol p-NP.g⁻¹.h⁻¹ de sol sec à Balume. Cependant, les doses T2 et T3 des composts de biodéchets; et les doses d'engrais minéraux NPK ne montrent pas des différences entre elles pour l'activité du monophosphoestérase acide sur les trois sites. Pour les parcelles témoins, leurs activités enzymatiques de la phosphatase acide



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 31. Evolution de l'activité enzymatique de l'acide monophosphoestérase (APA) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

ont légèrement baissé dans tous les sites. La relation dose des composts et activité de la phosphatase à la fin de l'expérimentation indiquent (figure b, annexe 5), une relation significative au seuil de 5 % selon la corrélation de Pearson.

Il ressort de l'ANOVA à un facteur contrôlé relative aux données de la dernière saison culturale (annexes 4.49-4.51) qu'il existe pour les trois sites, des différences hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements quant à leurs effets sur l'activité de la monophosphoestérase acide. Le test de comparaison des moyennes montre que les traitements T2 et T3 forment le groupe à moyennes supérieures sur les trois sites par rapport aux autres. Ainsi, on distingue quatre groupes de moyennes à Kimwenza et Mont Amba symbolisé par les lettres *a*, *b*, *bc* et *d*; et cinq groupes à Balume symbolisés par les lettres *a*, *ab*, *bc*, *cd* et *d* à la dernière saison de l'expérimentation (figure 31, tableau 23).

La phosphatase joue un rôle important dans la minéralisation du phosphore organique qui détermine la dynamique du phosphore dans le sol. L'augmentation de la teneur en phosphore assimilable observée sur les trois sites dans les champs amendés en composts résulterait de l'hydrolyse des phosphates organiques en ions libres (PO_4^{-3}) grâce à l'activité de la phosphatase, plus particulièrement de la monophosphoestérase acide (Mbonigaba, 2007; Gobat *et al.*, 1998 ; Tejada *et al.*, 2009ab). Les résultats de l'étude montrent que l'activité de la monophosphoestérase acide a augmenté dans les parcelles aux composts que dans celles amendées aux NPK dans les trois sites.

L'augmentation de la phosphatase s'expliquerait aussi par l'accroissement de la biomasse microbienne en termes de taille et de la structure de la population d'une part, par le développement végétal d'autre part et aussi par le changement avec les propriétés chimiques et physiques du sol (Tejada *et al.*, 2009b; Monkiedje *et al.*, 2006). Ceci est important, spécialement dans les zones à risque de désertification et des zones où la perte de sol est un réel problème.

Cette augmentation serait imputée au développement végétal résultant de l'apport des éléments N, P, K solubles (Masto *et al.*, 2006; Kanchikerimath et Sing, 2001; Grego *et al.*, 2003; Shaw et Burns, 2006 ; Mbonigaba, 2007) essentiels pour les plantes (effet rhizosphère) mais aussi des micro-organismes stimulés par le NPK.

Enfin, l'effet des composts sur l'activité enzymatique a fait l'objet de plusieurs études dont les résultats sont parfois contradictoires (Pérez-de-Mora *et al.*, 2006; Tejada *et al.*, 2006a; Tejada et Gonzalez, 2006; etc.).

Les enzymes de sols sont étudiés jusqu'à présent à travers des essais d'incubation dans les laboratoires, sous des conditions différentes de leur environnement naturel, ce qui est à l'origine de controverse dans l'interprétation des résultats; d'où l'intérêt de toujours tenir compte de la nature du compost, du type de sol à amender, du type de culture et des

conditions expérimentales dans l'appréciation des données fournies par la littérature (Mbonigaba, 2007; Tejada *et al.*, 2006a).

6.3.4.2 Activité de l'uréase non tamponnée et tamponnée

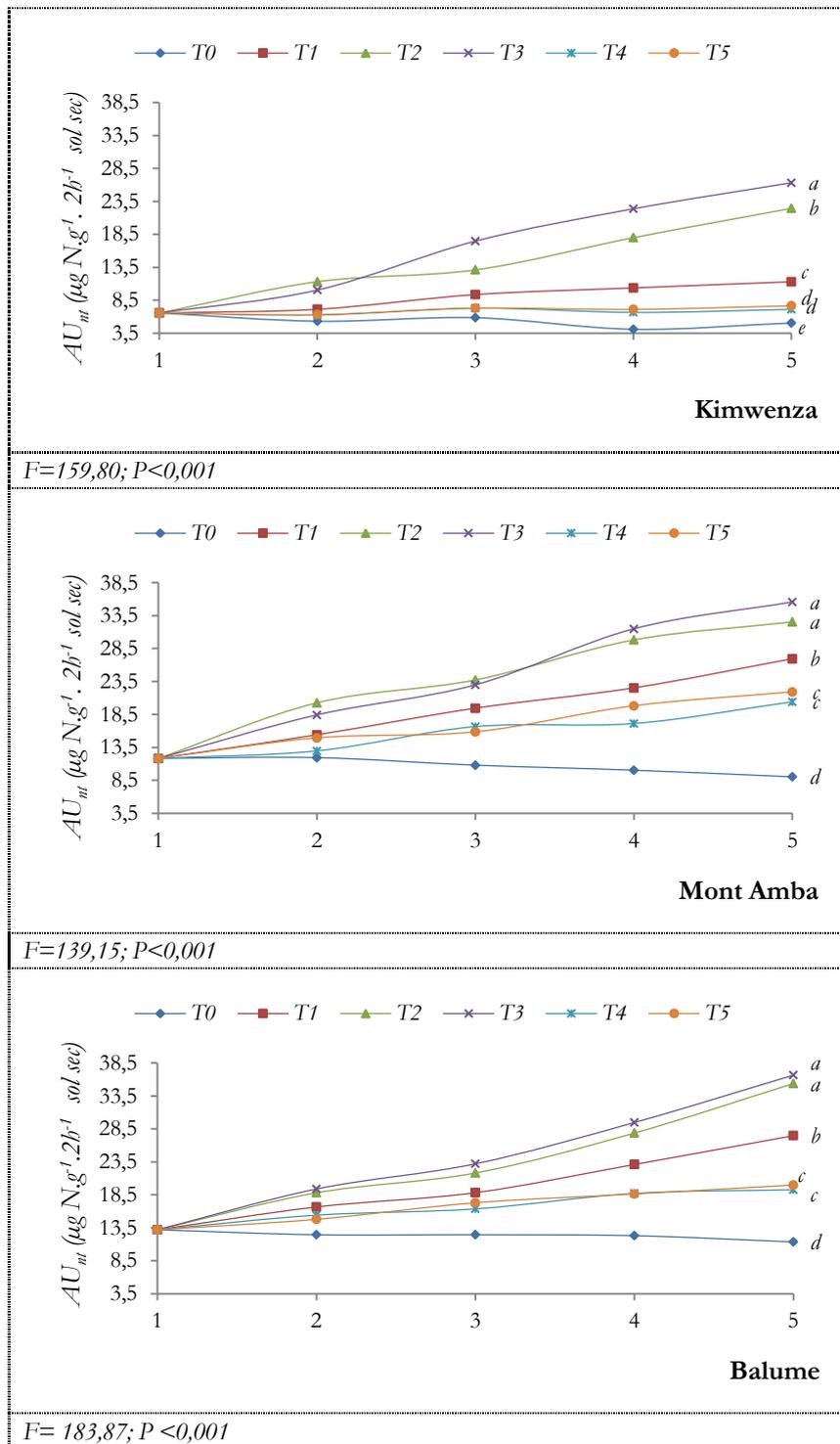
Les graphiques des figures 32 et 33 illustrent l'évolution de l'activité de l'uréase non tamponnée (AU_{nt}) et tamponnée (AU_t) pendant les quatre périodes d'échantillonnage en fonction des traitements apportés dans les trois sites. L'activité de l'uréase augmente en fonction des doses des composts apportés sur les trois sites.

Et entre les trois sites, les activités de l'uréase non tamponnée et tamponnée enregistrées à la fin des essais varient comme au début de l'expérimentation, dans l'ordre de Balume > Mont Amba > Kimwenza pour un même traitement.

Concernant, l'uréase non tamponnée, son activité a augmenté d'un facteur de 4, 3 et 2,78 respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume avec la plus grande dose de traitement (T3) à la fin des essais par rapport de l'état initial. Les activités observées dans les parcelles témoins par contre, ont baissé de plus ou moins - 23 % et - 14,15 % respectivement à Kimwenza-Mont Amba et Balume. Des différences significatives sont montrées par l'analyse de la variance contrôlée à un facteur (annexes 4.52-4.54) pour tous les sites. On distingue cinq classes symbolisées par les lettres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* à Kimwenza; quatre classes *a*, *b*, *c* et *d* au Mont Amba; et à Balume (figure 32, tableau 23).

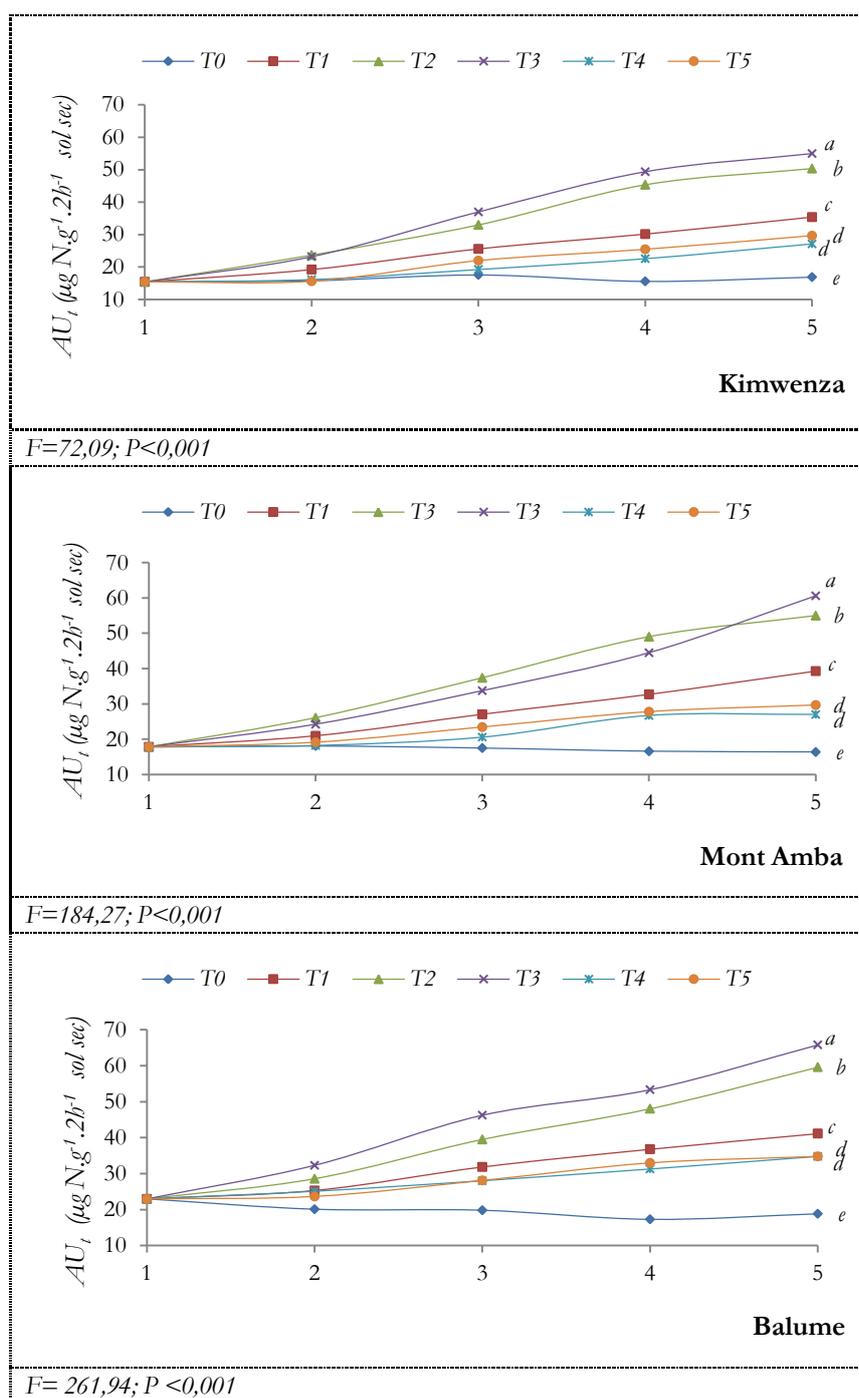
Et pour l'uréase tamponnée, son activité a été multipliée par le facteur de $\pm 3,5$ à Kimwenza et Mont Amba; et par 3 à Balume à la fin des essais avec la plus grande dose des composts de biodéchets (T3). Les champs témoins ont induit une baisse de l'intensité des activités de l'uréase tamponnée de - 1,45; - 4,13 $\mu\text{g N-NH}_4\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}$ respectivement au Mont Amba, Balume et une légère hausse de 1,46 à Kimwenza. Pour les traitements constitués d'engrais minéraux NPK, les valeurs de AU_t sont passés de 15,42 à $\pm 28,38 \mu\text{g N-NH}_4\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}$ de sol sec à Kimwenza; de 17,82 à $\pm 28,34 \mu\text{g N-NH}_4\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}$ de sol sec au Mont Amba; et de 22,93 à 34,76 $\mu\text{g N-NH}_4\cdot\text{g}^{-1}\cdot 2\text{h}^{-1}$ de sol sec à Balume. L'analyse de la variance à un facteur contrôlé montre que les différences entre traitements mis en jeu sont très hautement significatives ($p < 0,001$) au Mont Amaba et à Balume et significative ($p < 0,05$) à Kimwenza. Les classes des moyennes supérieures sont constituées par les différentes doses des composts et sont symbolisées par les lettres *a* et *c* à Kimwenza; *a*, *b* et *c* au Mont Amba; et Balume. Les témoins sur chaque site forment une classe extrême à part de faibles valeurs symbolisées par la lettre *e* à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume (figure 33, tableau 23).

L'augmentation de la biomasse constatée sur différents sites fait également augmenter les activités de l'uréase; et est aussi probablement conditionnée par un bon couvert végétal dû à des bonnes conditions de croissance végétale (disponibilité des éléments nutritifs et stabilité structurale des sols). Ceci confirme, l'existence d'un lien direct entre l'apport en compost et la



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 32. Evolution de l'activité enzymatique uréase non tamponnée (AU_{nt}) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1 = état initial; 2, 3, 4, 5 = saison culturale.

Figure 33. Evolution de l'activité enzymatique uréase tamponnée (AU_1) dans le sol en fonction des traitements sur les trois sites au cours des quatre saisons culturales.

stimulation de l'activité des micro-organismes. Tejada *et al.* (2006ab) avaient trouvé une augmentation de l'activité de l'uréase après l'application des divers déchets organiques.

Enfin, la stimulation des activités enzymatiques suggère dans les sols traités que les amendements utilisés ne contenaient pas des substances toxiques pour la croissance des micro-organismes. Sous d'autres conditions, les enzymes contrecarrent toute action inhibitrice des composés toxiques (Tejada *et al.*, 2009b).

Et les activités enzymatiques à la fin de l'expérimentation étaient plus élevées que de la troisième, deuxième et première saison culturale, respectivement, due de l'effet résiduel de la matière organique apportée au sol dans différents sites.

6.3.5 Corrélations entre paramètres biochimiques

L'augmentation de la biomasse microbienne affecte positivement la respiratoire du sol et les activités enzymatiques observées dans les sols des différents sites (tableaux 24). Plusieurs auteurs ont rapporté que l'apport des amendements organiques, activait les micro-organismes pour produire les enzymes liées au cycle des éléments nutritifs les plus importants. L'augmentation de l'activité de ces enzymes a été proportionnelle aux doses des composts appliquées. Ainsi, les corrélations entre paramètres microbiologiques choisis observées sont représentées par leurs coefficients dans le tableau 24 et en annexe (tableaux 4.67- 4.69). Dans cette étude, la respiration basale (RB) est corrélée très hautement significative avec la biomasse microbienne mesurée par le carbone microbien (0,751 à Kimwenza, 0,944 au Mont Amba et 0,975 à Balume). De même, les indicateurs biologiques, carbone microbien (C_{mic}) et respiration basale (RB) sont fortement corrélés aux activités enzymatiques prises en compte (APA, AU_n) dans l'ensemble de l'étude et pour les trois sites. Les corrélations positives significatives ($p < 0,05$) et très hautement significatives ($p < 0,001$) ont été également observées pour les paramètres de la biomasse microbienne et les composantes de la matière organique. Le carbone (COT) par exemple est corrélé très hautement significative au carbone microbien (0,888) à Kimwenza, (0,907) au Mont Amba et (0,925) à Balume. Il est également hautement significative corrélé au RB (0,759) à Kimwenza et très hautement significative au Mont Amba (0,924) et à Balume (0,939). Les activités enzymatiques (APA, AU_n) sont de même corrélées de manière très hautement significatives avec le COT. Des fortes corrélations ont été également rapportées par plusieurs études, dont celles de Mbonigaba (2007), Ros *et al.* (2006b), Borken *et al.* (2002), N'Dayegamiye *et al.* (2005), etc. Ces résultats confirment l'existence d'un lien direct entre l'apport des composts et la stimulation de l'activité des micro-organismes. Ils apportent les nutriments et le carbone comme source d'énergie pour les micro-organismes.

Tableau 22. Proportions entre les formes microbiennes et totales du carbone, de l'azote total, du carbone facilement métabolisable comme composante du carbone organique total; et le quotient d'activation respiratoire (Q_R) et le quotient métabolique (qCO_2) en fonction des traitements pour les données moyennes de la dernière saison culturale sur les trois sites.

Kimwenza						
Traitements	C_{mic}/COT	N_{mic}/N_{tot}	C_{fm}/COT	C_{mic}/N_{mic}	Q_R	qCO_2
	.....%.....				mg C-CO ₂ .g ⁻¹ .Cmic. ⁻¹ .h ⁻¹	
T0	0,53 (0,09)	1,24 (0,04)	4,58 (0,65)	2,66 (0,42)	0,17 (0,04)	2,71 (0,53)
T1	0,59 (0,02)	1,16 (0,05)	5,27 (0,54)	5,72 (0,93)	0,14 (0,01)	2,74 (0,14)
T2	0,50 (0,06)	1,25 (0,29)	5,36 (0,86)	5,37 (0,30)	0,11 (0,00)	2,68 (0,49)
T3	0,47 (0,02)	1,24 (0,25)	5,37 (0,36)	4,84 (0,50)	0,12 (0,01)	2,69 (0,26)
T4	0,46 (0,04)	1,37 (0,15)	3,53 (0,48)	2,98 (0,19)	0,17 (0,02)	3,39 (0,44)
T5	0,41 (0,01)	1,44 (0,23)	3,56 (0,27)	2,87 (0,48)	0,16 (0,01)	3,40
CV (%)	11,20	7,27	17,30	31,09	15,45	11,07
Mont Amba						
T0	0,55 (0,10)	0,76 (0,14)	8,53 (1,43)	2,51 (0,04)	0,13 (0,05)	1,78 (0,20)
T1	0,52 (0,05)	1,55 (0,27)	4,58 (0,23)	4,21 (0,51)	0,11 (0,02)	2,27 (0,20)
T2	0,51 (0,07)	1,46 (0,17)	4,40 (0,44)	5,09 (0,16)	0,15 (0,03)	3,14 (0,10)
T3	0,47 (0,08)	1,50 (0,19)	4,27 (0,57)	4,67 (0,49)	0,12 (0,01)	2,66 (0,20)
T4	0,65 (0,17)	1,33 (0,31)	4,10 (0,67)	2,88 (0,52)	0,14 (0,03)	2,21 (0,41)
T5	0,60 (0,11)	1,11 (0,06)	5,20 (1,24)	3,27 (0,08)	0,16 (0,03)	2,22 (0,41)
CV (%)	10,97	21,30	29,68	25,10	12,67	17,80
Balume						
T0	0,57 (0,02)	1,22 (0,11)	4,41 (0,39)	2,70 (0,08)	0,10 (0,02)	1,97 (0,36)
T1	0,45 (0,07)	1,43 (0,22)	4,55 (0,71)	3,60 (0,57)	0,06 (0,00)	2,72 (0,05)
T2	0,42 (0,08)	1,83 (0,46)	3,94 (0,60)	3,72 (0,70)	0,06 (0,00)	2,96 (0,03)
T3	0,40 (0,06)	1,68 (0,13)	3,77 (0,35)	3,67 (0,19)	0,07 (0,01)	3,29 (0,14)
T4	0,56 (0,03)	1,21 (0,11)	4,38 (0,05)	3,00 (0,23)	0,07 (0,01)	2,33 (0,29)
T5	0,60 (0,12)	1,34 (0,28)	4,09 (0,75)	2,87 (0,13)	0,07 (0,01)	2,40 (0,49)
CV (%)	15,52	15,74	6,59	12,77	21,60	16,69

C_{mic} : carbone microbien, COT : carbone organique total, N_{mic} : azote microbien, N_{tot} : azote total, RB : respiration basale, RIS : respiration induite par substrat, Q_R : quotient d'activation respiratoire, C_{fm} : carbone facilement métabolisable, qCO_2 : quotient métabolique. Chiffre () : écart-type.

Tableau 23. Comparaison des moyennes à la quatrième saison des paramètres biologiques en fonction des traitements appliqués dans les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.

Kimwenza								
	C_{mic}	N_{mic}	C_{fm}	RB	RIS	AU_{nt}	AU_t	APA
	.....mg.kg ⁻¹.....			.....µg CO ₂ .g ⁻¹ .h ⁻¹.....		..µg N-NH ₄ .g ⁻¹ .2h ⁻¹		µmol p-NP.g ⁻¹ .h ⁻¹
T0	17,09 (2,25) <i>d</i>	3,73 (0,06) <i>d</i>	100,97 (08,49) <i>d</i>	0,17 (0,02) <i>d</i>	1,01 (0,02) <i>d</i>	5,04 (0,16) <i>e</i>	16,88 (2,31) <i>e</i>	0,22 (0,04) <i>d</i>
T1	48,83 (2,48) <i>b</i>	9,27 (0,91) <i>b</i>	475,00 (51,15) <i>b</i>	0,49 (0,09) <i>b</i>	3,38 (0,09) <i>b</i>	11,29 (0,96) <i>c</i>	35,37 (4,31) <i>c</i>	0,36 (0,03) <i>b</i>
T2	67,19 (7,05) <i>a</i>	12,53 (0,71) <i>a</i>	725,00 (22,27) <i>a</i>	0,66 (0,05) <i>a</i>	5,79 (0,39) <i>a</i>	22,45 (1,85) <i>b</i>	50,34 (2,87) <i>b</i>	0,43 (0,03) <i>a</i>
T3	73,00 (2,15) <i>a</i>	13,60 (0,51) <i>a</i>	756,25 (25,41) <i>a</i>	0,72 (0,04) <i>a</i>	6,04 (0,12) <i>a</i>	26,31 (1,33) <i>a</i>	54,97 (1,19) <i>a</i>	0,45 (0,04) <i>a</i>
T4	24,14 (1,93) <i>c</i>	6,83 (0,77) <i>c</i>	125,25 (10,10) <i>c</i>	0,30 (0,03) <i>c</i>	1,78 (0,04) <i>c</i>	7,11 (0,37) <i>d</i>	27,11 (1,17) <i>d</i>	0,32 (0,04) <i>bc</i>
T5	25,71 (1,36) <i>c</i>	7,21 (1,17) <i>bc</i>	135,06 (8,71) <i>c</i>	0,32 (0,03) <i>c</i>	1,95 (0,13) <i>c</i>	7,65 (0,26) <i>d</i>	29,65 (1,40) <i>d</i>	0,33 (0,05) <i>bc</i>
CV (%)	51,04	38,34	72,62	44,75	59,00	66,83	40,58	24,46
Mont Amba								
T0	26,02 (1,80) <i>d</i>	3,05 (0,57) <i>d</i>	117,76 (10,45) <i>e</i>	0,17 (0,03) <i>d</i>	1,32 (0,36) <i>cd</i>	9,04 (1,06) <i>d</i>	16,37 (0,47) <i>e</i>	0,30 (0,04) <i>d</i>
T1	63,72 (3,18) <i>b</i>	13,91 (0,51) <i>b</i>	518,00 (48,39) <i>c</i>	0,53 (0,07) <i>b</i>	4,62 (0,36) <i>b</i>	26,95 (2,51) <i>b</i>	39,29 (2,61) <i>c</i>	0,43 (0,06) <i>b</i>
T2	77,31 (5,89) <i>a</i>	17,57 (0,83) <i>a</i>	768,15 (21,38) <i>b</i>	0,89 (0,05) <i>a</i>	5,76 (0,82) <i>b</i>	32,56 (1,54) <i>a</i>	54,99 (2,03) <i>b</i>	0,53 (0,03) <i>a</i>
T3	83,11 (9,61) <i>a</i>	19,47 (1,15) <i>a</i>	831,75 (33,94) <i>a</i>	0,81 (0,03) <i>a</i>	6,89 (0,15) <i>a</i>	35,56 (1,77) <i>a</i>	60,62 (2,13) <i>a</i>	0,53 (0,02) <i>a</i>
T4	38,20 (5,60) <i>c</i>	9,31 (0,71) <i>c</i>	155,75 (14,59) <i>d</i>	0,31 (0,01) <i>c</i>	2,16 (0,48) <i>c</i>	20,41 (0,75) <i>c</i>	27,00 (1,51) <i>d</i>	0,42 (0,06) <i>bc</i>
T5	40,52 (3,03) <i>c</i>	7,79 (0,80) <i>c</i>	170,06 (11,15) <i>d</i>	0,33 (0,04) <i>c</i>	2,07 (0,45) <i>c</i>	21,91 (0,80) <i>c</i>	29,67 (1,21) <i>d</i>	0,42 (0,06) <i>bc</i>
CV (%)	38,67	48,16	60,20	52,39	54,62	39,12	44,98	19,94
Balume								
T0	43,01 (3,23) <i>d</i>	9,76 (0,12) <i>d</i>	204,82 (7,85) <i>d</i>	0,31 (0,03) <i>e</i>	3,07 (0,15) <i>d</i>	11,35 (0,34) <i>d</i>	18,80 (0,46) <i>e</i>	0,48 (0,05) <i>d</i>
T1	91,22 (5,79) <i>b</i>	20,06 (2,43) <i>b</i>	723,00 (52,14) <i>b</i>	0,91 (0,07) <i>c</i>	16,27 (0,11) <i>b</i>	27,48 (0,68) <i>b</i>	41,12 (1,22) <i>c</i>	0,65 (0,08) <i>bc</i>
T2	115,04 (5,48) <i>a</i>	29,20 (3,00) <i>a</i>	1024,50 (49,65) <i>a</i>	1,25 (0,07) <i>b</i>	20,44 (2,16) <i>a</i>	35,38 (0,82) <i>a</i>	58,57 (2,18) <i>b</i>	0,77 (0,04) <i>ab</i>
T3	120,21 (9,83) <i>a</i>	31,87 (1,37) <i>a</i>	1089,25 (31,90) <i>a</i>	1,45 (0,06) <i>a</i>	21,76 (0,83) <i>a</i>	36,66 (0,51) <i>a</i>	65,78 (1,39) <i>a</i>	0,88 (0,07) <i>a</i>
T4	58,52 (5,43) <i>c</i>	13,36 (0,57) <i>c</i>	245,75 (14,93) <i>c</i>	0,50 (0,05) <i>d</i>	7,49 (0,64) <i>c</i>	19,26 (0,60) <i>c</i>	34,76 (2,74) <i>d</i>	0,55 (0,03) <i>cd</i>
T5	60,35 (9,26) <i>c</i>	14,74 (0,82) <i>c</i>	226,49 (10,90) <i>c</i>	0,53 (0,02) <i>d</i>	7,56 (0,58) <i>c</i>	19,97 (0,58) <i>c</i>	34,76 (0,39) <i>d</i>	0,56 (0,04) <i>cd</i>
CV (%)	36,08	41,27	64,44	50,38	55,49	39,75	40,72	18,17

Les moyennes suivies de lettres différentes au sein d'une colonne sont différentes au niveau $p < 0,05$, chiffre () : écart-type.

C_{mic} : carbone microbien, N_{mic} : azote microbien, RB : respiration basale, RIS : respiration induite par substrat, Q_R : quotient d'activation respiratoire, C_{fm} : carbone facilement métabolisable, AU_{nt} : activité de l'uréase non tamponnée, AU_t : activité de l'uréase tamponnée, APA : activité de la monophosphoestérase acide, qCO_2 : quotient métabolique.

Tableau 24. Corrélations entre paramètres microbiologiques et avec quelques paramètres physico-chimiques et chimiques choisis pour les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.

Kimwenza

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	C _{mic}	RB	APA	AU _{nt}
C _{mic}	0,824	0,888	0,799	0,923	1,000			
RB	0,607	0,759	0,525	0,764	0,751	1,000		
APA	0,924	0,954	0,751	0,948	0,890	0,734	1,000	
AU _{nt}	0,846	0,975	0,823	0,964	0,851	0,783	0,922	1,000

Mont Amba

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	C _{mic}	RB	APA	AU _{nt}
C _{mic}	0,952	0,907	0,847	0,948	1,000			
RB	0,966	0,924	0,911	0,939	0,944	1,000		
APA	0,951	0,894	0,875	0,894	0,874	0,937	1,000	
AU _{nt}	0,969	0,918	0,920	0,942	0,913	0,925	0,906	1,000

Balume

	pH	COT	N _{tot}	P _{tot}	C _{mic}	RB	APA	AU _{nt}
C _{mic}	0,943	0,925	0,796	0,929	1,000			
RB	0,972	0,937	0,868	0,969	0,975	1,000		
APA	0,952	0,915	0,936	0,967	0,873	0,912	1,000	
AU _{nt}	0,989	0,943	0,909	0,988	0,949	0,971	0,950	1,000

COT : carbone organique total, *N_{tot}* : azote total, *P_{tot}* : phosphore total, *C_{mic}* : carbone microbien, *RB* : respiration basale, *AU_{nt}* : activité de l'uréase non tamponnée, *APA* : activité de la monophosphoestérase acide.

6.4 Conclusion partielle

Les résultats montrent que tous les indicateurs microbiologiques de la fertilité des sols sont améliorés (augmentés) avec l'apport des composts de biodéchets ménagers. Ils ont été affectés positivement dans les quatre saisons culturales en deux années d'expérimentation, les effets sont proportionnels aux doses apportées et les différences entre traitements utilisés sont significatives pour les différents paramètres retenus. Dans les parcelles témoins, on assiste à une tendance à la diminution.

Pour les champs fertilisés avec les fumures organiques et dans la moindre mesure aux engrais minéraux NPK, la disponibilité des nutriments aurait probablement joué un rôle capital dans le développement de la biomasse microbienne, l'augmentation des intensités respiratoires et la production des activités enzymatiques. De même, l'incorporation des micro-organismes endogènes aux matières organiques des composts apportés et les sécrétions racinaires dans la rhizosphère ont aussi contribué à l'influence globale des matières apportées. Pour les parcelles aux engrais minéraux, l'augmentation de l'activité microbienne occasionne une perte de la matière organique et du carbone facilement biodégradable.

Entre les trois sites de l'étude, l'amplitude des réponses des indicateurs microbiologiques aux apports organiques varie dans l'ensemble dans l'ordre de Balume > Mont Amba > Kimwenza, ce qui implique l'effet pédologique sur l'activité de la biomasse microbienne.

Il a été établi que les traitements qui améliorent les comportements des indicateurs chimiques de la fertilité des sols ont aussi affecté le comportement des indicateurs microbiologiques et vice versa. Des apports fréquents des amendements organiques sont donc nécessaires pour améliorer de façon durable les propriétés du sol à défaut de disposer des engrais minéraux généralement coûteux. Donc, il est possible de mettre en place une politique de gestion de sols acides sableux fragiles des zones humides tropicales qui assure à la fois leur conservation et une agriculture soutenue, durable. Enfin, la réaction des cultures aux fertilisants organiques et leur efficacité font l'objet du dernier chapitre.

Chapitre 7. Efficience des composts de biodéchets ménagers sur les rendements des cultures

7.1 Introduction

Compte tenu de la production insuffisante des principales cultures, le besoin se fait sentir d'informations susceptibles de permettre l'amélioration de la production agricole en République Démocratique du Congo en général, et dans la région de Kinshasa en particulier.

Parmi les facteurs pouvant expliquer les faibles rendements des cultures figurent les limitations imposées par les sols ou leur gestion. Il s'agit de la dégradation des sols, due à l'appauvrissement en matière organique et en azote, l'acidité à cause des effets habituels d'accompagnement (toxicité aluminique et manganique) et la déficience en nutriments. Ces facteurs sont connus de tous comme étant à la base de la chute de productivité des sols agricoles d'Afrique tropicale (Oguntoyinbo *et al.*, 1991; Hassan *et al.*, 2007).

Donc, la connaissance des facteurs limitants est un préalable important dans la recherche d'une efficacité agronomique, économique et environnementale de la production agricole. Cette dernière recommande une utilisation et une gestion des sols basés sur des diagnostics fiables (Mvondo *et al.*, 2003). Il est particulièrement important d'identifier les carences des sols et les besoins des cultures en éléments nutritifs. Cette information est nécessaire pour des recommandations judicieuses de fertilisants. Or, dans la région de Kinshasa où les systèmes culturaux sont de plus en plus intensifs pour faire face à la croissante démographique, les recommandations de fertilisation sont inexistantes ou aléatoires. C'est le cas notamment dans le Plateau des Batéké et à Kimwenz a, où se concentre la quasi-totalité des activités agricoles de la Province de Kinshasa.

Les études conduites en milieu naturel et en serre (laboratoire) ont montré que les ressources locales comme les déchets organiques et les roches naturelles, appliquées aux sols tropicaux pauvres et acides peuvent fournir les éléments nutritifs nécessaires pour l'alimentation et la croissance des plantes et par conséquent, accroître le rendement des plantes cultivées (Bado et Hien, 1998; Voundi, 1998; Kanyankogote *et al.*, 2005; Theodoro et Leonardos, 2006; Mbonigaba, 2007; Mze, 2008; Koy, 2009; Ruganzu, 2009; Kochi *et al.*, 2010). Les investigations menées aux chapitres précédents ont montré par ailleurs qu'appliqués aux *arenoferralsols* (ou *sols ferrallitiques*) de la région de Kinshasa, les composts de biodéchets par leurs contenus variés en humus (matières organiques), en éléments minéraux et micro-organismes, améliorent significativement les propriétés chimiques et biologiques des sols. Ils peuvent constituer des amendements précieux et bon marché, et soulager tant soit peu les petits paysans et les fermiers de Kinshasa souvent incapables de faire face au coût de l'application régulière des intrants chimiques hydrosolubles (qui seuls ne peuvent corriger de manière efficace les contraintes des sols acides à long terme). Ces matériaux sont actuellement disponibles en quantités réduites et à faible prix à Kinshasa, et ils seront

disponibles en plus grande quantité dès qu'un système de valorisation des déchets organiques par compostage sera mis en place. A cet effet, il s'avère indispensable d'avoir des informations concernant la réponse des plantes suite à l'utilisation directe de ces matériaux comme amendements dans les sols acides tropicaux.

L'objectif poursuivi dans ce chapitre est d'apprécier l'influence des apports en matières organiques des composts sur l'évolution des rendements de quelques plantes cultivées et sur l'évolution de ces rendements au cours de quatre saisons culturales et d'évaluer ainsi l'efficacité agronomique des amendements appliqués. Un essai agronomique a été mis en place afin de déterminer les réponses du soja, de l'arachide et de l'oseille aux fumures organiques des composts de biodéchets ménagers à court terme en deux années, soit quatre saisons culturales. Les déterminations concernaient particulièrement, les effets des amendements sur le rendement de la partie utile des plantes utilisées (biomasse aérienne ou graines). Par exemple, l'introduction du soja dans la région de Kinshasa, où les contraintes climatiques et édaphiques sont connues, est récente. Elle participe à la stratégie régionale de diversification des productions agricoles afin de lutter contre la malnutrition infantile, de faire face à la croissance démographique, de trouver une source d'azote «naturelle» et d'accroître le pouvoir économique des paysans.

7.2 Matériels et méthodes

Pour mieux apprécier l'effet des composts utilisés sur la productivité des sols des trois sites de notre étude, trois cultures ont été choisies dont les détails, les itinéraires techniques suivis et la procédure utilisée pour les traitements des résultats sont décrits au chapitre 3.

7.3 Présentation et discussion des résultats

7.3.1 Rendement des cultures

Les rendements moyens du soja, de l'arachide et de l'oseille à la quatrième saison culturale sont consignés dans le tableau 25 et les rendements au cours de chacune des quatre saisons culturales pour les trois sites figurent dans le tableau de l'annexe 6.1. Les graphiques des figures 34, 35 et 36 présentent l'évolution des rendements relatifs de chaque culture dans chaque site.

On constate que les rendements respectifs des cultures sans aucune fertilisation dans les trois sites baissent au cours des saisons culturales successives. Par contre, dans les champs amendés par les composts de biodéchets ménagers et par les fertilisants minéraux (NPK), les rendements en graines d'arachide, en graines de soja et en biomasse de l'oseille ont augmenté. Les augmentations sont fonction des doses apportées en matières organiques des composts BDM et des doses d'engrais minéraux NPK.

Tableau 25. Comparaison des moyennes des rendements à la quatrième saison pour chaque plante-test utilisée et pour les traitements appliqués sur les 3 sites.

Tr	Kimwenza			Mont Amba			Balume		
	Oseille	Arachide	Soja	Oseille	Arachide	Soja	Oseille	Arachide	Soja
	Rdt (t.ha ⁻¹ MS)			Rdt (t.ha ⁻¹ MS)			Rdt (t.ha ⁻¹ MS)		
T0	0,25 (0,01) e	0,14 (0,02) e	0,20 (0,02) e	0,53 (0,06) e	0,17 (0,07) d	0,22 (0,01) e	0,60 (0,07) d	0,36 (0,04) e	0,26 (0,03) e
T1	0,71 (0,05) cd	0,79 (0,09) b	0,95 (0,03) cd	0,92 (0,03) b	0,87 (0,03) b	1,19 (0,08) bc	1,01 (0,07) b	1,07 (0,25) c	1,23 (0,13) c
T2	1,01 (0,11) ab	1,04 (0,16) ab	1,21 (0,11) b	1,12 (0,07) a	1,28 (0,07) a	1,38 (0,13) ab	1,17 (0,03) a	1,35 (0,12) ab	1,45 (0,07) b
T3	1,21 (0,09) a	1,14 (0,05) a	1,41 (0,03) a	1,20 (0,06) a	1,42 (0,09) a	1,58 (0,10) a	1,28 (0,07) a	1,55 (0,10) a	1,70 (0,15) a
T4	0,70 (0,04) cd	0,69 (0,04) cd	0,85 (0,06) cd	0,73 (0,03) cd	0,63 (0,01) c	0,97 (0,05) d	0,85 (0,10) dc	0,75 (0,11) cd	0,88 (0,06) d
T5	0,82 (0,07) bc	0,77 (0,05) bc	1,09 (0,14) bc	0,81 (0,09) bc	0,83 (0,03) b	1,05 (0,07) cd	0,99 (0,06) c	1,06 (0,20) c	1,10 (0,10) cd
CV (%)	44,02	46,40	41,54	22,20	52,11	44,11	45,84	41,51	24,42

Les moyennes suivies des lettres différentes au sein d'une colonne sont différents au niveau $p < 0,05$ et le chiffre () : écart-type. T0 : témoin; T1 : 20 t.ha⁻¹; T2 : 40 t.ha⁻¹; T3 : 60 t.ha⁻¹ de compost; et T4 : 100 kg.ha⁻¹; T5 : 200 kg.ha⁻¹ de NPK.

Quant aux engrais minéraux NPK, leurs apports en éléments fertilisants étant très limités en azote (12-24 kg N/ha/saison culturale), en phosphore (08-16 kg P₂O₅/ha/saison culturale) et en potassium (18-36 kg K₂O/ha/saison culturale); il parait difficile de les comparer avec les composts (tableau 26). Cependant, on note un effet positif sur les rendements.

Tableau 26. Apport moyen par traitement et types d'amendements d'éléments fertilisants N, P₂O₅ et K₂O par saison culturale.

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	kg N/ha MS	kg P ₂ O ₅ /ha MS	kg K ₂ O/ha MS
T0	0	0	0
T1	299 (AC1) - 245 (AC2)	62	74 (AC1) - 67 (AC2)
T2	599 (AC1) - 491 (AC2)	125	146 (AC1) - 134 (AC2)
T3	898 (AC1) - 736 (AC2)	187	223 (AC1) - 201 (AC2)
T4	12	08	18
T5	24	16	36

T0 : témoin; T1 : 20 t.ha⁻¹; T2 : 40 t.ha⁻¹; T3 : 60 t.ha⁻¹ de compost; et T4 : 100 kg.ha⁻¹; T5 : 200 kg.ha⁻¹ de NPK, AC1 : première année culturale et AC2 : deuxième année culturale.

L'ANOVA à un facteur contrôlé effectuée sur les rendements en fin d'expérimentation révèle une différence très significative ($p < 0,001$; annexes 4.58-4.66) entre les traitements.

A la dernière saison, par rapport au témoin sans amendement, les rendements obtenus en **graines de soja** dans les parcelles amendées aux composts de biodéchets ménagers avec la dose T3 (60 t. ha⁻¹ MB) sont multipliés par un facteur de 5,68; 5,27 et 5,36 respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume. Les rendements suivent l'ordre croissant de Balume >

Mont Amba > Kimwenza à la même dose depuis la première saison culturale. La diminution des rendements en graines de soja dans les champs non amendés après quatre saisons culturales atteint 21 % à Balume; 24 % au Mont Amba; et 20 % à Kimwenza.

Les tests de comparaison des moyennes effectués sur les données de la dernière saison culturale (tableau 25) mettent en évidence cinq classes des moyennes à Kimwenza (*a, b, bc, cd, e*) et Balume (*a, b, c, cd, e*); le traitement T2 et T3 constituent un groupe de moyenne élevée; et six classes au Mont Amba (*a, ab, bc, cd, d, e*).

La faible production des sols témoins peut être attribuée aux facteurs caractéristiques des sols acides : pH acide, toxicité Al et Mg, déficiences en nutriments (Ca, Mg, P, K, B et Zn) (Fageria, 1994). Le soja est une culture très sensible à l'acidité qui limite la production des nodules dépendant de l'activité microbienne favorisée par la fixation symbiotique de l'azote (Anetor et Akrinrinde, 2006 *in* Koy, 2009). Selon Koy (2009), l'accroissement de nodulation par fixation symbiotique de l'azote (disponibilité et alimentation de l'azote) par les plantes de soja contribuerait à relever considérablement le rendement. A propos des engrais minéraux, notons que leur effet positif ne peut être attribué ici qu'aux éléments P et K apportés, l'azote ayant vraisemblablement été que très peu utilisé dans le cas de cette légumineuse dont on a constaté la bonne capacité fixatrice par l'existence de nodosités actives. Les légumineuses, comme n'importe quelle autre plante, utilise aussi bien l'azote du sol et des engrais que l'azote provenant de leur association symbiotique (Danso et Eskew, 1984). La quantité d'azote fixé par une légumineuse dépend, de l'environnement, des caractéristiques génétiques des bactéries et de la plantes hôtes.

En **culture d'arachide**, les rendements en graines obtenus en fin d'expérimentation ont occasionné une hausse équivalant au rendement moyen du témoin (T0) multiplié par un facteur de 3,15; 4,00; 3,28; 2,78 et 3,00; respectivement pour les traitements T1 (20 t.ha⁻¹), T2 (40 t.ha⁻¹), T3 (60 t.ha⁻¹), T4 (NPK, 100 kg.ha⁻¹) et T5 (NPK, 200 kg.ha⁻¹) à Kimwenza. Pour le Mont Amba, le rendement a été multiplié par les facteurs 3,38; 4,52; 5,69; 2,47 et 3,33; respectivement pour les traitements T1, T2, T3, T4 et T5. A Balume, les facteurs suivants 2,25; 2,71; 3,08; 1,81 et 2,13 pour les mêmes traitements ont été observés.

Pour les trois sites, en rapport avec le rendement en graines de l'arachide, l'ANOVA relative à la quatrième saison culturale, montre qu'il existe des différences significatives (tableau 25) entre les traitements appliqués.

Les résultats du test de comparaison des moyennes ($p < 0,05$) des rendements sur les différents sites à la même période (annexe 4.61-4.63), montrent que le témoin forme un groupe à part représenté par la lettre *e* à Kimwenza et Balume et par la lettre *d* au Mont Amba. Les traitements à base d'engrais NPK forment un groupe intermédiaire et les traitements aux composts constituent le groupe *a* ou *ab* pour le T2 et T3; et T1 *b* ou *c*.

Globalement, on note quatre groupes (*a, b, ab, c*) dans le site du Mont Amba, cinq groupes (*a, ab, c, cd, e*) dans le site de Balume et six groupes (*a, b, ab, bc, cd, et e*) dans le site de Kimwenza.

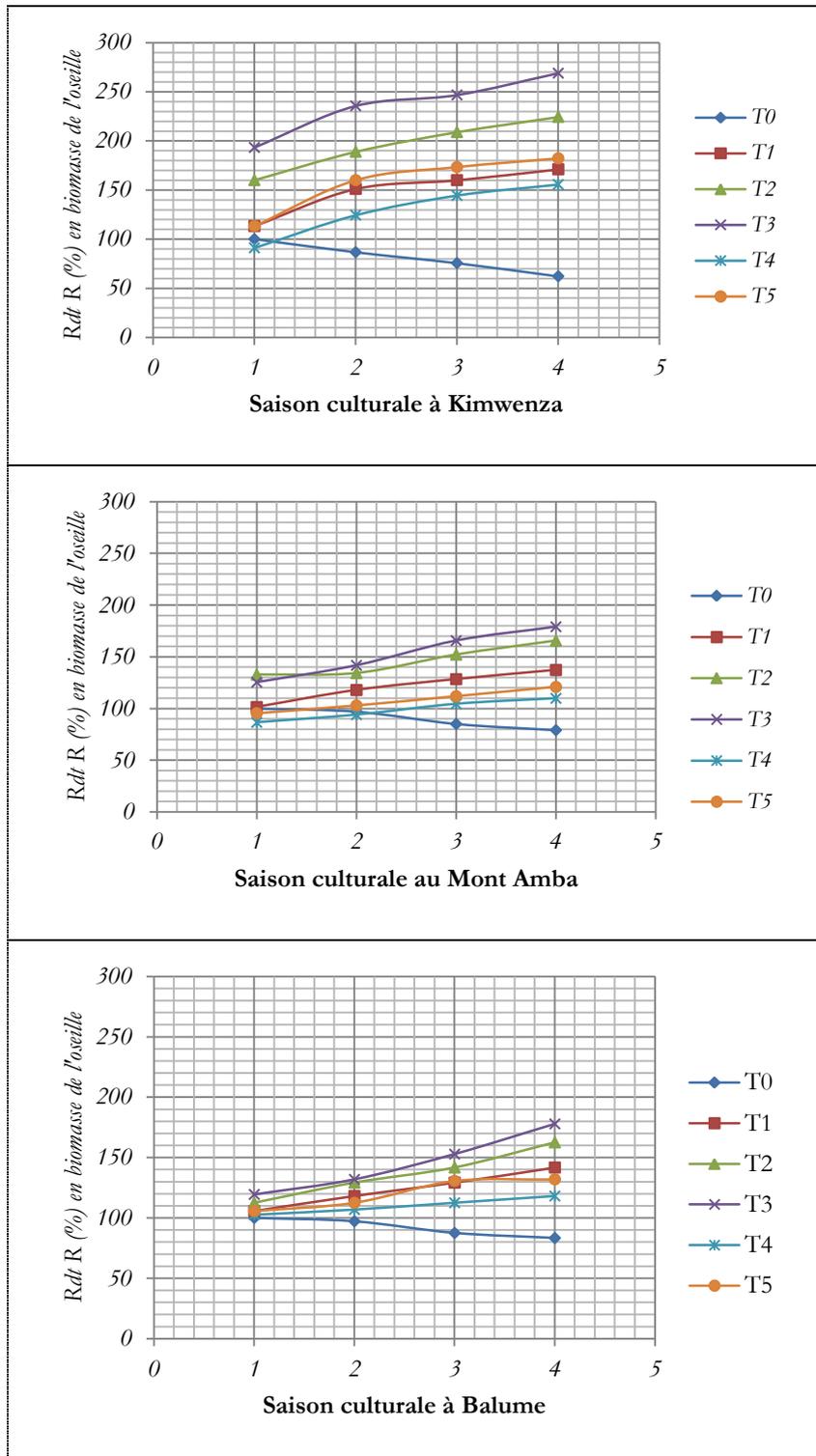
Quant à la **culture de l'oseille**, à la fin des essais, les apports organiques ont induit les rendements en biomasse équivalant aux rendements moyens des témoins multipliés par les facteurs de 1,81; 2,38 et 2,89 à Kimwenza; de 1,33; 1,61 et 1,68 au Mont Amba; et de 1,13; 1,36 et 1,45 à Balume pour les traitements respectivement T1, T2 et T3. Avec les traitements à base d'engrais minéraux NPK, il a été multiplié par un facteur de $\pm 1,16$ à Balume; 1,13 au Mont Amba; et 1,74 à Kimwenza. Les baisses enregistrées avec les témoins sont de 37,8 % à Kimwenza; 9 % au Mont Amba et 16,7 % à Balume à la quatrième saison culturale. L'ANOVA à un facteur contrôlé à la fin des essais (annexe 4.58-4.60) montre qu'il existe des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les traitements considérés vis-à-vis de leurs effets sur le rendement en biomasse de l'oseille. Le test de comparaison des moyennes met en évidence la supériorité des traitements T2 et T3 sur les autres. Les traitements T2 & T3 forment la même classe de moyenne *a* au Mont Amba et à Balume (tableau 25).

Globalement, dans l'ensemble de sites étudiés et pour toutes les cultures, les rendements observés dans les parcelles amendées en matières organiques se révèlent supérieurs à ceux du milieu habituel. Les systèmes de production sont en général du type traditionnel (faible usage ou absence d'intrants, faible densité de semis, trop d'associations culturales, mauvais entretien du terrain, etc.). Les rendements des témoins sont comparables aux rendements moyens obtenus en culture traditionnelle. Le rendement moyen dans la région est de $\pm 0,9$ t.ha⁻¹ pour le soja et de $\pm 1,2$ t.ha⁻¹ pour l'arachide en milieu contrôlé (SENASSEM, 2008). Il ressort également des résultats obtenus que les apports en composts tout comme les fertilisants minéraux NPK ont influencé positivement les rendements des différents plants-test utilisés. Et entre les trois sites, les rendements des différentes cultures évoluent dans l'ordre de Balume > Mont Amba > Kimwenza. Cela résulterait des conditions physiques, chimiques et biologiques du sol qui sont meilleures à Balume qu'au Mont Amba et à Kimwenza.

Lorsqu'on examine les rendements relatifs moyens (par rapport au témoin T0) au cours de l'expérimentation (figures 34-36), on constate que les apports répétés de matières organiques des composts de biodéchets ménagers et d'engrais minéraux NPK ont tendance à améliorer les rendements en graines de soja, de l'arachide et de la biomasse de l'oseille dans tous les sites. L'effet des fertilisants minéraux a été beaucoup plus marqué sur les 2 sites de Kimwenza et du Mont Amba (moins fertiles) que celui de Balume. Entre cultures, les rendements relatifs sont élevés en cultures de soja suivi de la culture de l'arachide et enfin de la culture de l'oseille. Généralement, les sols pourvus en nutriments réagissent efficacement aux apports externes des éléments nutritifs et la réponse des cultures est relativement grande

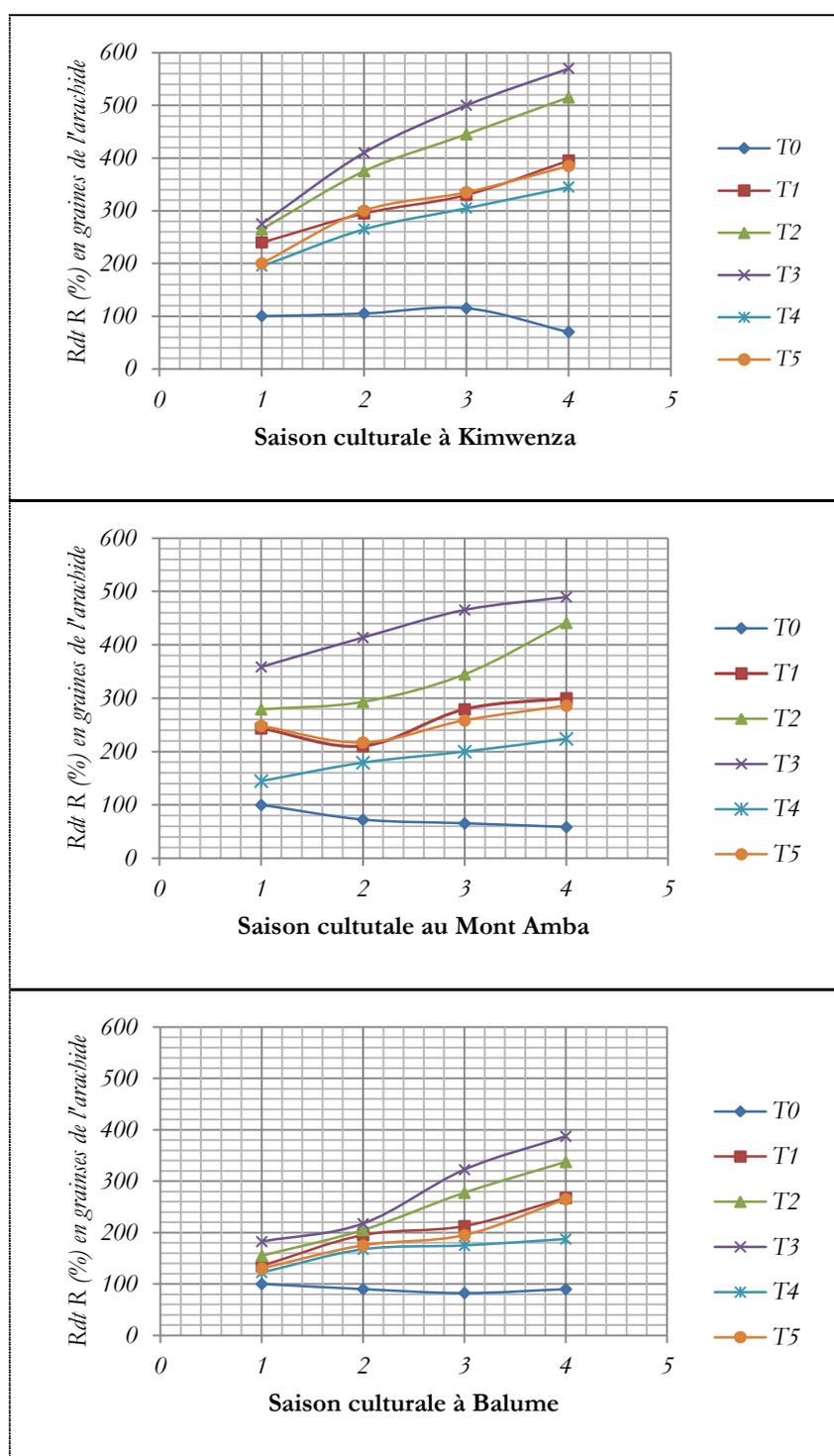
(Mze, 2008; N'Dayegamiye *et al.*, 2005; Deblay, 2006). Dans le cadre de notre étude, les doses élevées d'engrais minéraux NPK ($> 200 \text{ kg.ha}^{-1}$ de 12-08-18) sont nécessaires pour obtenir les rendements importants. Mais pour limiter l'usage d'engrais minéraux aux doses plus élevées, les doses d'au moins (\geq) 40 t.ha^{-1} MB (soit 24 t.ha^{-1} MS) pourraient suffire pour atteindre des rendements optimums. Cette dose T2 (40 t.ha^{-1} MB) donne des rendements qui ne sont pas significativement différents de 60 t.ha^{-1} MB (tableau 25). Dans bien des cas, les rendements obtenus avec les engrais minéraux (100 et 200 kg.ha^{-1}) ne sont pas différents de ceux des parcelles traitées avec 20 t.ha^{-1} (MB) des composts de biodéchets ménagers. Ainsi donc, pour maintenir ou accroître la productivité des sols, il est nécessaire d'y apporter des matières organiques, si possible à fortes doses, sinon en petites quantités avec un complément d'engrais minéraux. L'apport d'engrais minéraux seuls ne peut pas maintenir à long terme la productivité des sols à cause du lessivage et de la dégradation des propriétés des sols (Alvarez, 2005; Nyiranez *et al.*, 2009 *in* N'Dayegamiye et Drapeau, 2009; Deblay, 2006; Mbonigaba, 2007).

Les baisses des rendements relatifs à la dernière saison culturale (figures 34-36) par rapport au témoin (T0) sont élevées au Mont Amba en culture de l'arachide (41,4%) puis à Kimwenza en culture de l'oseille (37,8%) et au Mont Amba en culture de soja (26,3%). Pour les parcelles témoins, l'absence d'apports organiques s'accompagne d'une perte en matières organiques et en nutriments, d'une acidification des sols, d'une réduction de la biomasse et de l'activité microbienne, d'une insolubilisation du phosphore qui ensemble contribuent à la baisse sensible des rendements des cultures (Deblay, 2006). Il n'ya pas eu d'effet symbiotique perceptible chez les témoins (T0).



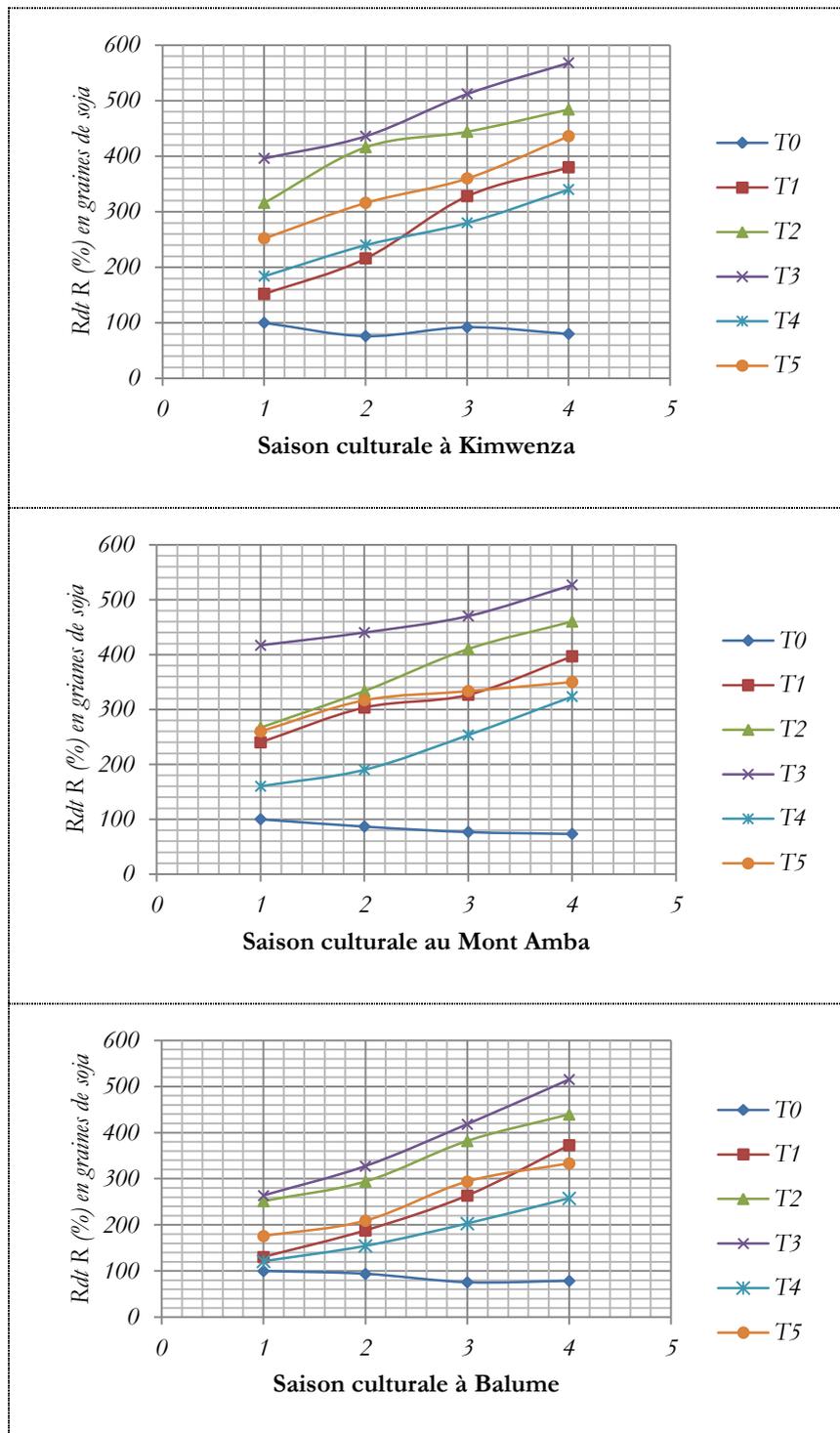
T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1, 2, 3, 4 = saison culturale.

Figure 34. Evolution du rendement relatif en biomasse de l'oseille en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1, 2, 3, 4 = saison culturale.

Figure 35. Evolution du rendement relatif en graines d'arachide en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.



T0 : témoin; T1 : 20 t/ha; T2 : 40 t/ha; T3 : 60 t/ha de compost; et T4 : 100 kg/ha; T5 : 200 kg/ha de NPK; & 1, 2, 3, 4 = saison culturale.

Figure 36. Evolution du rendement relatif en graines de soja en fonction des traitements appliqués sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.

7.3.2 Efficience agronomique des amendements apportés

Le tableau 27 présente les résultats de l'évolution de l'efficience agronomique sur chaque culture dans les 3 sites au cours de l'expérimentation tandis que la figure 37 présente la moyenne des quatre saisons culturales pour les amendements organiques. Seul, le rendement en produit récolté ou utile (graines ou biomasse) est pris en compte.

L'efficience agronomique (EA) représente le rendement physique de la culture engendrée par l'apport de l'engrais (fertilisant), elle se calcule suivant l'équation ci-dessous et s'exprime en kg MS/kg d'engrais apporté.

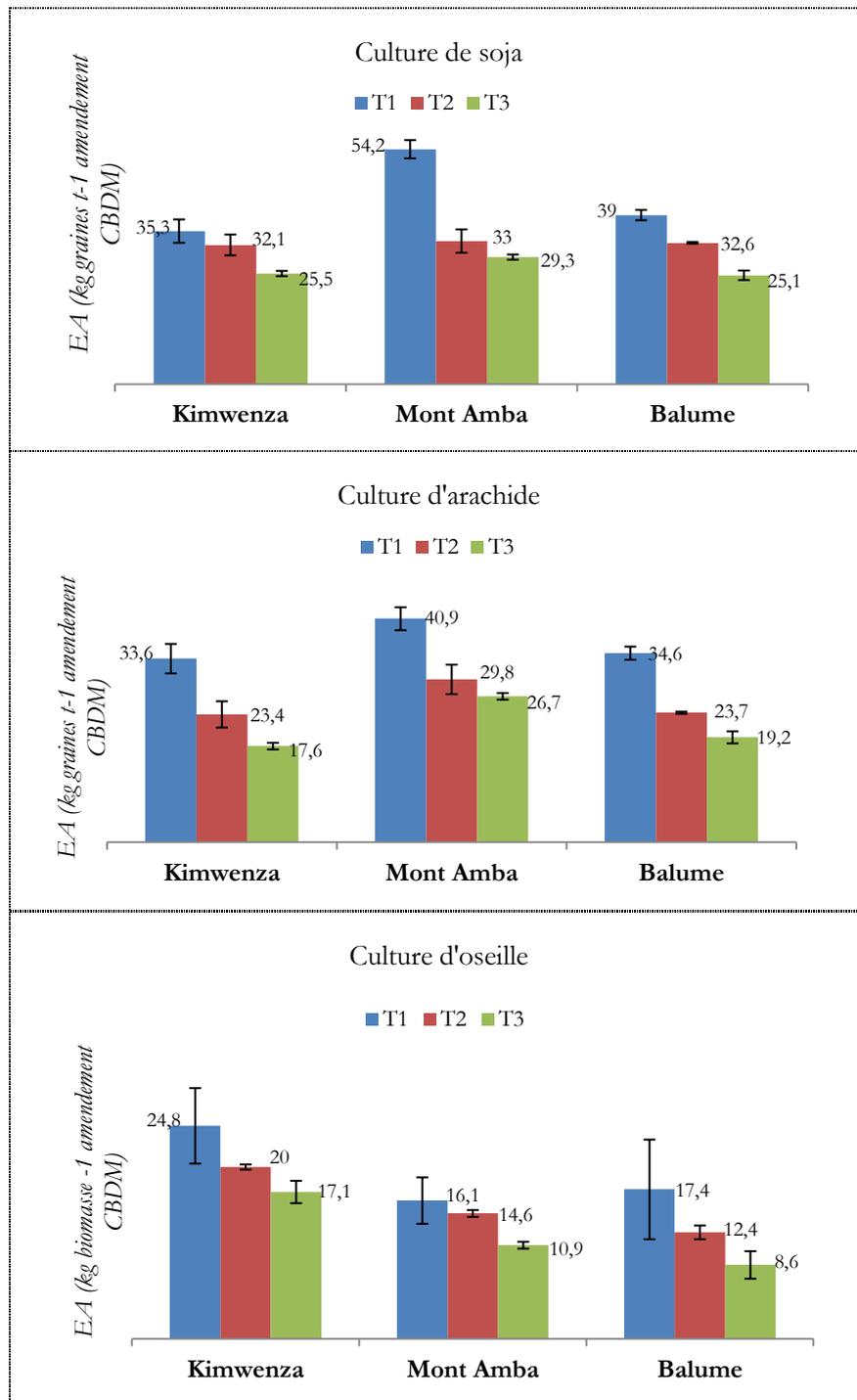
$$EA = \frac{R(e) - R(t)}{Q(e)}$$

EA = efficience agronomique de l'engrais, R(e)= rendement de l'engrais, R(t)= rendement du témoin sans engrais et Q(e) = Quantité d'engrais apportée.

Tableau 27. Efficience agronomique (Ea) des composts BDM (en kg MS/t) au cours des saisons culturales en fonction des cultures et traitements à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.

		Kimwenza			Mont Amba			Balume		
Culture	SC	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
		.....kg/t.....			..... kg/t.....			.....kg/t.....		
Oseille	SC1	5,0 (1,4)	11,9 (4,3)	11,2 (4,1)	1,0 (0,3)	9,9 (6,3)	5,3 (2,6)	3,3 (0,4)	3,9 (0,2)	3,9 (0,2)
	SC2	15,9 (4,6)	16,3 (3,6)	14,8 (4,9)	6,9 (1,8)	10,7 (1,9)	7,2 (0,9)	8,4 (1,3)	7,4 (1,2)	5,8 (0,7)
	SC3	19,0 (3,7)	19,9 (4,8)	16,6 (5,6)	11,4 (0,2)	11,8 (0,7)	8,7 (0,4)	12,4 (3,0)	8,5 (1,0)	7,3 (0,4)
	SC4	24,8 (4,4)	20,0 (2,7)	17,1 (5,8)	16,1 (0,3)	14,6 (0,4)	10,9 (0,8)	17,4 (1,3)	12,4 (0,4)	8,6 (1,6)
Arachide	SC1	25,3 (3,2)	14,7 (0,8)	10,6 (1,7)	35,5 (1,9)	23,6 (3,9)	22,6 (0,1)	12,6 (8,8)	9,9 (4,1)	9,7 (3,9)
	SC2	29,6 (1,3)	19,5 (0,8)	14,4 (0,6)	35,6 (3,6)	26,1 (2,0)	26,1 (0,3)	25,1 (9,4)	15,3 (4,3)	12,6 (2,3)
	SC3	28,1 (1,9)	15,7 (4,6)	14,9 (0,3)	36,4 (3,0)	25,4 (2,5)	25,0 (1,1)	27,8 (4,4)	18,8 (1,6)	15,4 (0,9)
	SC4	33,6 (0,6)	23,4 (0,4)	17,6 (0,4)	40,9 (4,3)	29,8 (0,6)	26,7 (0,2)	34,6 (3,7)	23,7 (1,3)	19,2 (0,5)
Soja	SC1	11,4 (3,3)	24,4 (2,6)	22,3 (2,1)	38,2 (1,9)	22,7 (4,2)	28,5 (0,1)	9,3 (1,3)	22,5 (4,1)	16,4 (2,0)
	SC2	21,8 (1,5)	21,0 (2,5)	24,7 (0,9)	48,6 (7,2)	28,2 (4,2)	30,1 (1,8)	18,9 (4,0)	26,2 (1,9)	19,8 (2,6)
	SC3	27,7 (3,9)	29,3 (3,9)	23,2 (1,6)	47,3 (1,8)	29,0 (3,8)	27,5 (1,0)	27,0 (1,5)	28,1 (2,1)	21,1 (2,3)
	SC4	35,3 (2,7)	32,1 (2,1)	25,5 (1,2)	54,2 (2,4)	33,0 (2,7)	29,3 (0,2)	39,0 (0,6)	32,6 (0,6)	25,1 (1,1)

T1 (20 t.ba⁻¹ MB, CBDM), T2 (40 t.ba⁻¹ MB, CBDM), T3 (60 t.ba⁻¹ MB, CBDM), SC (saison culturale), chiffre () : écart-type.



T1 : 20 t.ba⁻¹ MB; T2 :40 t.ba⁻¹ MB; T3 : 60 t.ba⁻¹ MB; EA : effiencce agronomique des amendements; CBDM : composts des biodéchetts ménagers.

Figure 37. Effiencce agronomique des différents traitements et cultures à la fin de l'expérimentation sur les 3 sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume.

Il ressort des résultats des tableaux 27 et 28 que, pour tout amendement apporté, l'efficacité agronomique des amendements aux différents traitements augmente au cours des saisons culturales dans tous les sites quelle que soit la culture considérée. Les fluctuations saisonnières affectant les rendements des cultures, elles affectent également l'efficacité agronomique déterminée à partir des rendements culturels des amendements. Aussi, plus la dose d'amendements augmente plus l'efficacité agronomique tend à diminuer. Concernant les amendements organiques, les résultats indiquent que leurs effets ne sont pas liés aux seules concentrations des éléments nutritifs dans les sols des sites étudiés.

Par contre, les engrais minéraux ont une efficacité agronomique plus grande parce que leurs éléments sont disponibles et facilement absorbés par les cultures (tableau 28). La faible efficacité agronomique des amendements organiques est probablement attribuée à la décomposition lente de ces derniers pour la mise à disposition des éléments nutritifs dans le sol. La matière organique joue un rôle important dans le sol, s'avère favorable à la croissance des micro-organismes qui induisent une activation de la solubilisation des éléments nutritifs. Les éléments nutritifs rendus suffisamment disponibles au fil du temps dans le sol sont efficacement utilisés par les plantes cultivées.

Dans le cas de notre étude, le traitement de 60 t.ha⁻¹ MB (ou 36 t.ha⁻¹ MS) donne les meilleurs rendements. Ce traitement a une efficacité agronomique faible. Par contre, la dose de 20 t.ha⁻¹ MB (soit 12 t.ha⁻¹ MS) est beaucoup plus efficace que 40 ou 60 t.ha⁻¹ MB. Ces résultats (tableau 26 et figure 37) montrent l'intérêt et la nécessité en cas de faibles disponibilités en matières organiques d'utiliser des doses faibles. Ceci confirme les études de Mbonigaba (2007), Mze (2008), Duprat-Invernizzi *et al.* (2006), etc. qui préconisent l'usage des petites quantités des composts en culture de légume de salade, blé, choux, maïs, pomme de terre, etc. Globalement, les doses variaient de 10-20 t.ha⁻¹ du compost frais en culture de blé (Duprat-Invernizzi *et al.*, 2006), 5-10 t.ha⁻¹ MS (fumier de ferme et compost) en culture de maïs et pomme de terre (Mze, 2008), < 10 t.ha⁻¹ MS de compost des végétaux en culture de choux, haricot (Mbonigaba, 2007), etc. Des doses des composts de 10 - 25 t.ha⁻¹ MS en culture de soja, 25 - 30 t.ha⁻¹ MS en culture des petits pois, 30 - 40 t.ha⁻¹ MS en culture de manioc, 15 - 20 t.ha⁻¹ MS en culture d'igname ont été préférés par Nyabyenda (2005) au Rwanda.

Tableau 28. Efficienc e agronomique (EA) des engrais minéraux NPK au cours des saisons culturales en fonction des traitements et cultures dans les trois sites de Kimwenza, au Mont Amba et à Balume en kg MS/t NPK.

Culture	SC	Kimwenza		Mont Amba		Balume	
		T4	T5	T4	T5	T4	T5
		.....kg/t.....		..... kg/t.....		.....kg/t.....	
Oseille	SC1	-	-	-	-	-	217 (103)
	SC2	650 (041)	983 (066)	-	-	450 (082)	392 (123)
	SC3	1479 (016)	1422 (048)	267 (015)	308 (286)	900 (179)	772 (404)
	SC4	2200 (094)	1720 (077)	550 (462)	583 (260)	1300 (184)	1013 (107)
Arachide	SC1	1867 (492)	1016 (201)	1266 (776)	2133 (592)	867 (206)	600 (367)
	SC2	2533 (459)	1483 (120)	2183 (085)	2108 (185)	2100 (255)	1150 (361)
	SC3	2977 (278)	1728 (91)	2744 (382)	2338 (286)	2622 (351)	1517 (365)
	SC4	3608 (241)	2079 (068)	3250 (124)	2579 (083)	2942 (504)	2012 (274)
Soja	SC1	2100 (245)	1900 (000)	1800 (081)	2366 (125)	700 (082)	1250 (147)
	SC2	3117 (062)	2450 (082)	2450 (552)	2916 (062)	1383 (473)	1575 (162)
	SC3	3644 (042)	2750 (119)	3400 (368)	3233 (157)	2322 (235)	2256 (042)
	SC4	4368 (143)	3138 (027)	4417 (429)	3458 (083)	3216 (509)	2738 (097)

T4 (100 kg.ha⁻¹, NPK), T5 (200 kg.ha⁻¹, NPK), SC (saison culturale), chiffre () : écart-type.

Par conséquent, pour une fertilisation agronomique efficace, et dans des conditions de pénurie de matière organique les doses ≤ 20 t.ha⁻¹ MB des composts BDM par saison culturale (≤ 12 t.ha⁻¹ MS) suffiraient. Le choix de l'application doit être guidé par la disponibilité des matériaux et des moyens financiers mais, aussi de la surface des sols à traiter. Un apport concomitant d'engrais chimiques, même à faible dose, par exemple 200 kg.ha⁻¹ de notre engrais (12-08-18), accroîtrait la productivité. Pour une agriculture soutenable, il serait judicieux de considérer comme complémentaires les engrais minéraux (NPK) et les amendements organiques (CBDM). Il serait réaliste d'utiliser de petites quantités de N soit 400 kg.ha⁻¹ d'engrais 12-08-18 ou mieux à partir d'un engrais présentant un équilibre NPK plus adapté et ≤ 12 t.ha⁻¹ MS (20 t.ha⁻¹ MB) des composts BDM pour favoriser la restitution de la matière organique et des éléments minéraux au sol. Du fait de l'augmentation des rendements, donc aussi de l'augmentation des résidus végétaux réincorporés au sol (racines, tiges, feuilles, gousses, ...), celui-ci verrait ses teneurs en MO augmenter progressivement à long terme. Les études ont montré que les fumures minérales et organiques devaient être

intiment liées dans les sols pauvres par l'intermédiaire des restitutions organiques dont l'importance dépend des rendements dans la restauration du cycle de la fertilité des sols (restitution et économie de la matière organique). L'objectif serait d'éviter l'utilisation des doses élevées (fortes) d'engrais minéraux pas toujours disponibles ni bon marché en mettant l'accent sur l'utilisation des amendements organiques en fonction de leurs disponibilités en termes de ressource, de temps et de moyens.

7.3.3 Efficience agronomique des éléments fertilisants

Les résultats de l'efficience des éléments fertilisants sont présentés dans les tableaux 29-30 et concernent les trois éléments majeurs l'azote (N), le phosphore (P_2O_5) et le potassium (K_2O) à la fin de l'expérimentation dans les trois sites. Les tableaux 6.2, 6.3 et 6.4 de l'annexe 6 donnent l'évolution de l'efficience agronomique apparente (EAE) des éléments fertilisants pour les quatre saisons culturales dans les trois sites. Exprimés en $kg\ MS.kg^{-1}$ de l'élément, ils ont été calculés à partir du rendement total de la biomasse de l'oseille ou du rendement en graines de l'arachide et du soja pour chaque traitement (tableau 25) et de la quantité de l'élément apportée par saison (tableau 26) suivant l'équation ci-dessous.

$$EAE = \frac{R(f) - R(t)}{Q(e.f)}$$

EAE= efficience agronomique de l'élément fertilisant, R(f)= rendement du fertilisant, R(t)= rendement du témoin sans ce fertilisant et Q(e.f)= quantité de l'élément fertilisant appliqué.

Des tableaux de l'annexe 6 (6.2 – 6.4), on constate que l'efficience agronomique apparente des éléments fertilisants (N, P_2O_5 , K_2O) augmente généralement au cours des saisons culturales sur tous les sites. De même, les traitements à faibles doses sont plus efficaces que les traitements à fortes doses quel que soit le type d'amendement considéré (tableaux 29 et 30) c'est-à-dire le traitement T1 pour les composts et T4 pour les engrais minéraux. Entre les différentes cultures les valeurs sont faibles en cultures d'oseille pour chaque élément et dans chaque site. Généralement, les valeurs obtenues à la quatrième saison sont plus élevées. Elles se situent pour l'azote (N) entre 1,15 à 1,99 $kg\ MS.kg^{-1}$; 0,76 à 2,57 $kg\ MS.kg^{-1}$; 0,82 à 1,85 $kg\ MS.kg^{-1}$ respectivement à Kimwenza, Mont Amba et Balume; pour le phosphore (P_2O_5) entre 5,04 à 7,35 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Kimwenza, 3,35 à 11,29 $kg\ MS.kg^{-1}$ au Mont Amba et 3,62 à 10,84 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Balume; et pour le potassium (K_2O) entre 4,43 à 6,16 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Kimwenza, 2,94 à 9,93 au Mont Amba et 3,18 à 7,15 à Balume pour l'ensemble des cultures avec les composts (tableau 29). Elles sont beaucoup plus importantes en fertilisation minérale (NPK) (tableau 30), pour l'azote (N) entre 18,40 – 36,35 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Kimwenza, entre 4,58 - 36,81 $kg\ MS.kg^{-1}$ au Mont Amba et 10,69 - 26,81 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Balume ; pour le phosphore (P_2O_5) entre 27,60 - 54,58 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Kimwenza, 6,87 - 55,21 $kg\ MS.kg^{-1}$ au Mont Amba et 16,04 – 40,21 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Balume; et pour le potassium (K_2O) entre 12,27 - 24,26 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Kimwenza, entre 3,06 - 24,54 $kg\ MS.kg^{-1}$ au Mont Amba et 7,13 - 17,87 $kg\ MS.kg^{-1}$ à Balume.

Tableau 29. Efficiéce agronomique apparente des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) contenus dans les composts en kg MS.kg⁻¹ de l'élément, à la quatrième saison à Kimwéenza, au Mont Amba et à Balume.

Culture	Tr	Kimwéenza			Mont Amba			Balume		
		N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅.....kg MS/kg.....	K ₂ O.....kg MS/kg.....	N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅.....kg MS/kg.....	K ₂ O.....kg MS/kg.....	N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅.....kg MS/kg.....	K ₂ O.....kg MS/kg.....
Oseille	T1	1,15 (0,17)	5,04 (0,76)	4,43 (0,67)	0,76 (0,02)	3,35 (0,07)	2,94 (0,06)	0,82 (0,06)	3,62 (0,28)	3,18 (0,24)
	T2	0,95 (0,13)	4,17 (0,58)	3,70 (0,51)	0,69 (0,02)	3,04 (0,08)	2,69 (0,07)	0,59 (0,02)	2,59 (0,08)	2,29 (0,07)
	T3	0,86 (0,04)	3,77 (0,17)	3,31 (0,15)	0,52 (0,04)	2,77 (0,17)	1,99 (0,15)	0,47 (0,01)	2,05 (0,05)	1,80 (0,04)
	T1	1,99 (0,03)	6,99 (0,13)	6,15 (0,12)	1,94 (0,20)	8,51 (0,90)	7,48 (0,79)	1,64 (0,18)	7,20 (0,78)	6,34 (0,69)
	T2	1,11 (0,03)	4,87 (0,13)	4,32 (0,12)	1,41 (0,03)	6,20 (0,12)	5,49 (0,11)	1,12 (0,06)	4,93 (0,28)	4,37 (0,24)
	T3	0,83 (0,02)	3,66 (0,08)	3,22 (0,07)	1,25 (0,01)	5,57 (0,04)	4,89 (0,04)	0,91 (0,02)	4,00 (0,11)	3,51 (0,09)
Arachide	T1	1,68 (0,13)	7,35 (0,57)	6,16 (0,48)	2,57 (0,11)	11,29 (0,50)	9,93 (0,44)	1,85 (0,03)	10,84 (0,15)	7,15 (0,10)
	T2	1,52 (0,10)	6,69 (0,43)	5,68 (0,36)	1,56 (0,13)	6,87 (0,55)	8,00 (0,64)	1,54 (0,03)	6,79 (0,12)	6,01 (0,10)
	T3	1,21 (0,06)	5,31 (0,23)	4,43 (0,21)	1,39 (0,01)	6,11 (0,04)	5,36 (0,04)	1,19 (0,05)	5,23 (0,23)	4,59 (0,20)

Tr (traitement), T1 (20 t.ha⁻¹ MB, CBDM), T2 (40 t.ha⁻¹ MB, CBDM), T3 (60 t.ha⁻¹ MB, CBDM), chiffre () : écart-type.

Entre les trois éléments, on observe que l'utilisation du phosphore (P₂O₅) est plus efficace par rapport au potassium (K₂O) et à l'azote (N) (tableau 29) dans le cas des traitements avec les composts. Le constat similaire a été observé par Mbonigaba (2007) avec les composts de végétaux et Ruganzu (2009) avec les biomasses végétales fraîches en culture de maïs au Rwanda. En fertilisation minérale (NPK), le phosphore (P₂O₅) s'est aussi montré plus efficace que l'azote (N) et le potassium (K₂O) (tableau 30).

Lorsqu'on considère les résultats à la fin de l'expérimentation, on constate que l'efficacité des éléments fertilisants obtenue par l'utilisation des fertilisants minéraux est largement supérieure à celle obtenue avec les fertilisants organiques. La faible valeur observée d'efficacité agronomique d'éléments fertilisants pour les composts est probablement attribuée à sa minéralisation lente pour fournir les éléments minéraux aux sols et aux cultures comme dit plus haut. Et entre les sites, les valeurs sont plus élevées à Kimwéenza et au Mont Amba qu'à Balume. La différence entre les sites peut s'expliquer par leurs caractéristiques physico-chimiques et biologiques initiales plus faibles (chap 5). Les sites de Kimwéenza et Mont Amba pauvres au départ laissent apparaître des efficacités plus élevées que le site de Balume.

Tableau 30. Efficience agronomique apparente des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) contenus dans les engrais minéraux NPK en kg MS.kg⁻¹ de l'élément, à la quatrième saison à Kimwenza, au Mont Amba et à Balume.

Culture	Tr	Kimwenza			Mont Amba			Balume		
		N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅	K ₂ O	N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅	K ₂ O	N.....kg MS/kg.....	P ₂ O ₅	K ₂ O
Oseille	T4	18,40 (0,87)	27,60 (1,31)	12,27 (0,58)	4,58 (1,10)	6,87 (5,78)	3,06 (2,57)	10,69 (3,67)	16,04 (5,50)	7,13 (2,44)
	T5	14,55 (0,69)	21,82 (1,04)	9,71 (0,46)	4,86 (2,17)	7,29 (1,25)	3,24 (1,45)	8,40 (0,50)	12,66 (0,80)	5,63 (0,35)
Arachide	T4	30,07 (2,02)	45,10 (3,02)	20,05 (1,34)	27,08 (1,02)	40,63 (1,55)	18,19 (0,69)	24,51 (4,20)	36,77 (6,30)	16,4 (2,80)
	T5	17,33 (0,57)	25,94 (0,85)	11,53 (0,38)	21,49 (0,69)	32,24 (1,09)	14,33 (0,46)	16,77 (2,28)	25,16 (3,43)	11,20 (1,50)
Soja	T4	36,35 (1,19)	54,58 (1,79)	24,26 (0,80)	36,81 (3,57)	55,21 (5,36)	24,54 (2,38)	26,67 (0,49)	40,21 (0,74)	17,87 (0,33)
	T5	26,15 (0,23)	39,22 (0,34)	17,43 (0,15)	28,82 (0,69)	43,23 (1,04)	19,21 (0,46)	22,95 (0,01)	34,43 (0,01)	15,30 (0,54)

Tr (traitement), T4 (100 kg.ha⁻¹, NPK) et T5 (200 kg.ha⁻¹, NPK), chiffres () : écart-type.

De ces résultats, il apparaît clairement que le phosphore (P₂O₅) est l'élément le plus limitant de la production agricole, en deuxième lieu vient le potassium (K₂O) puis l'azote des sols des sites étudiés dans le cas des traitements aux composts (T1, T2, T3). Le fait que la proportion de phosphore assimilable dans le sol est plus étroitement liée aux propriétés intrinsèques des sols qu'à celles des composts (Traoré, 1998) et que seul 0,04 à 0,07 % du phosphore des composts (Garcia *et al.*, 1992) peut être disponible pourraient expliquer cela. L'emploi d'un engrais phosphaté soluble reste la meilleure alternative pour accroître à court terme la disponibilité du phosphore dans les sols à fort pouvoir fixateur avec comme conséquence l'accroissement des rendements. Les corrélations sont significatives entre le phosphore et les rendements des cultures (annexes 4.67- 4.69) qui confirme la contribution efficace du phosphore à la nutrition des cultures. Pour les traitements aux engrais minéraux (NPK), le phosphore est aussi l'élément le plus limitant suivi de l'azote dû à de faibles quantités apportés de N (12-24 kg N/ha/saison culturale) par l'engrais et puis du potassium. Concernant l'azote, la réponse des cultures est liée à sa disponibilité immédiate qui est aussi essentielle pour les plantes. C'est le cas pour les fertilisants minéraux. Pour les composts, leur taux de minéralisation étant faible, soit 6 % des apports par les composts (Gabrielle *et al.*, 2005), la faible valeur fertilisante azotée contribue plutôt à l'entretien de la matière organique des sols (Houot *et al.*, 2004). D'autre part l'assimilation rapide de l'azote des engrais minéraux par les cultures peut affecter (court-circuiter) les autres mécanismes concurrents qui interviennent dans son cycle biogéochimique normal (immobilisation, etc.) (Recous *et al.*, 1997). Dans ces conditions, selon Mbonigaba (2007), on nourrit directement la plante seulement dans la mesure où cela ne permet pas un retour plus élevé en matière organique récoltée au lieu d'approvisionner le sol qui, à son tour, doit « s'occuper » de la nutrition végétale. Cependant, les plantes légumineuses ont la spécificité

de fixer l'azote de l'air grâce à des bactéries présentes au sein d'organes racinaires (nodosités). C'est le cas des résultats des tableaux 29 et 30 qui montrent des valeurs élevées d'azote pour la culture du soja suivi de l'arachide par rapport à la culture d'oseille et pour chaque traitement dans chaque site. A Kimwenza, l'azote est deux fois plus efficient pour le soja que pour l'oseille, au Mont Amba 8 fois et à Balume 2,5 fois lorsqu'on considère le traitement T4.

Lorsqu'on examine l'efficience agronomique relative des éléments fertilisants des amendements organiques par rapport aux amendements minéraux (tableaux 31, 32) à la fin de l'expérimentation, on constate qu'elle est supérieure avec le traitement T5 (200 kg.ha⁻¹) que T4 (100 kg.ha⁻¹) pour tous les sites. L'efficience agronomique relative de chacun des éléments fertilisants semble être plus favorable avec le traitement T4 que T5. La valeur la plus élevée de chaque élément est observée avec le traitement T1 bien que la comparaison s'est faite sur base des doses d'éléments non équivalentes. L'efficience agronomique relative de l'azote est faible ($\leq 20\%$) pour tous les sites et est élevée en culture d'oseille (seule culture non légumineuse). Ceci indique la supériorité de l'efficacité des éléments lorsqu'ils proviennent des engrais minéraux solubles. Dans ces conditions, seuls les engrais minéraux peuvent suppléer immédiatement aux carences. Ces résultats montrent également l'importance d'utiliser les plus petites quantités d'amendements combinés (organiques et minéraux) pour une meilleure rentabilité et durabilité.

Tableau 31. Efficience agronomique relative des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) en % à la quatrième saison culturale à Kimwenza, au Mont Amba et Balume par rapport au traitement T4 (100 kg.ha⁻¹ NPK).

Culture	Tr /T4	Kimwenza			Mont Amba			Balume		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(%).....		(%).....		(%).....		
Oseille	T1/T4	6,21 (0,65)	18,17 (1,91)	35,96 (3,79)	13,71 (5,56)	40,10 (16,26)	79,36 (32,18)	9,04 (3,92)	26,43 (11,46)	52,30 (22,68)
	T2/T4	5,14 (0,48)	15,06 (1,40)	30,01 (2,80)	12,19 (4,73)	35,75 (13,85)	71,20 (27,60)	6,26 (2,28)	18,35 (6,68)	36,57 (13,31)
	T3/T4	4,67 (0,02)	13,65 (0,06)	26,98 (0,12)	9,28 (3,29)	27,03 (9,64)	53,36 (19,36)	5,05 (2,09)	14,80 (6,13)	29,21 (12,10)
Arachide	T1/T4	5,32 (0,34)	15,56 (0,99)	30,79 (1,96)	7,20 (1,01)	21,05 (2,96)	41,61 (5,85)	6,77 (0,42)	19,80 (1,24)	39,19 (2,46)
	T2/T4	3,70 (0,26)	10,85 (0,76)	21,62 (1,56)	5,22 (0,16)	15,28 (0,47)	30,40 (0,94)	4,67 (0,53)	13,68 (1,57)	27,26 (3,12)
	T3/T4	2,78 (0,12)	8,15 (0,36)	16,09 (0,72)	4,69 (0,22)	13,73 (0,63)	27,11 (1,25)	3,81 (0,54)	11,16 (1,58)	22,04 (3,12)
Soja	T1/T4	4,62 (0,47)	13,50 (1,37)	25,46 (2,59)	7,09 (1,00)	20,73 (2,93)	41,02 (5,79)	6,92 (0,07)	26,97 (0,28)	40,02 (0,42)
	T2/T4	4,19 (0,40)	12,29 (1,18)	23,48 (2,26)	4,25 (0,07)	12,46 (0,21)	32,64 (0,56)	5,76 (0,19)	16,89 (0,56)	33,66 (1,12)
	T3/T4	3,33 (0,26)	9,76 (0,77)	18,32 (1,45)	3,81 (0,34)	11,17 (1,01)	22,04 (1,99)	4,45 (0,26)	13,02 (0,77)	30,06 (2,35)

Tableau 32. Efficience agronomique relative moyenne des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) en % à la quatrième saison culturale à Kimwenza, au Mont Amba et Balume par rapport au traitement T5 (200 kg.ha⁻¹ NPK).

Culture	Tr /T5	Kimwenza			Mont Amba			Balume		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(%).....		(%).....		(%).....		
Oseille	T1/T5	7,86 (0,85)	23,00 (2,50)	46,16 (9,04)	20,01 (10,14)	58,53 (29,65)	75,23 (32,18)	9,84 (1,28)	29,79 (3,74)	57,55 (9,68)
	T2/T5	6,50 (0,63)	19,05 (1,84)	38,47 (7,08)	18,23 (9,51)	53,40 (27,85)	67,80 (12,08)	7,00 (0,41)	20,51 (1,21)	41,05 (2,96)
	T3/T5	5,90 (0,07)	17,29 (0,21)	34,29 (3,16)	13,27 (6,33)	38,86 (18,53)	51,20 (7,33)	5,54 (0,31)	16,23 (0,91)	32,28 (3,35)
Arachide	T1/T5	9,20 (0,21)	26,91 (0,01)	53,24 (1,20)	9,06 (1,21)	26,51 (3,60)	52,45 (7,12)	9,83 (0,27)	28,74 (0,78)	56,88 (1,53)
	T2/T5	6,40 (0,11)	18,75 (0,31)	37,37 (0,62)	6,57 (0,10)	19,25 (0,29)	38,36 (0,58)	6,76 (0,59)	19,82 (1,55)	39,50 (3,10)
	T3/T5	4,82 (0,25)	14,12 (0,73)	27,88 (1,45)	5,91 (0,23)	17,30 (0,68)	34,14 (1,35)	5,52 (0,53)	16,16 (1,73)	31,90 (3,41)
Soja	T1/T5	6,41 (0,45)	18,74 (1,31)	35,57 (2,46)	8,94 (0,57)	26,51 (3,60)	51,75 (3,32)	8,08 (0,26)	31,53 (1,01)	46,79 (1,90)
	T2/T5	5,82 (0,32)	17,04 (0,94)	32,57 (1,80)	5,42 (0,32)	15,87 (0,29)	41,57 (2,43)	6,74 (0,35)	19,75 (1,03)	39,36 (2,05)
	T3/T5	4,63 (0,18)	13,54 (0,52)	25,42 (0,98)	4,83 (0,08)	14,14 (0,24)	27,92 (0,47)	5,20 (0,41)	15,23 (1,19)	30,06 (2,35)

Tr (traitement), T1 (20 t.ha⁻¹ MB, CBDM), T2 (40 t.ha⁻¹ MB, CBDM), T3 (60 t.ha⁻¹ MB, CBDM), T5 (200 kg.ha⁻¹, NPK).

7.3 Conclusion partielle

Les rendements des cultures utilisées pour les trois sites ont considérablement augmenté suite aux apports des différentes doses de composts et d'engrais minéraux NPK. Dans les trois sites, pour les trois cultures, le rendement baisse si on n'apporte rien (T0). Les augmentations par rapport aux témoins sont proportionnelles aux quantités apportées dans chaque parcelle. Les effets du traitement T5 (60 t.ha⁻¹ MB) aux composts BDM donnent les meilleurs rendements qui ne sont pas significativement différents du traitement T2 (40 t.ha⁻¹ MB). Les apports de la fertilisation minérale, bien que très faibles, ont un effet positif sur les rendements, et cet effet est croissant en fonction de la dose de l'engrais NPK. Le site de Balume donne des meilleurs rendements suivi du site de Mont Amba et de Kimwenza.

Dans les champs amendés par les composts, la disponibilisation des éléments nutritifs majeurs de la matière organique et son effet sur l'acidité ont joué un rôle capital dans l'augmentation des rendements. L'accroissement du pH et la neutralisation partielle de l'Al échangeable agiraient indirectement sur le rendement des cultures. La majorité des plantes ont une productivité réduite dans les sols acides pour des raisons de toxicités aluminique et manganique, de déficience en cations basiques, de fixation du phosphore, etc. Dans nos essais, les rendements obtenus dans les champs fertilisés (compost & NPK) sont supérieurs à ceux enregistrés en culture traditionnelle sans fertilisation. En référence aux rendements obtenus, les doses des composts ≥ 40 t.ha⁻¹ MB (soit 24 t.ha⁻¹ MS) conviendraient pour limiter tout recours aux intrants minéraux dans les sols sablonneux de la Province de Kinshasa qui peut maintenir à long terme la productivité. Mais, du point de vue de l'efficacité agronomique, ce sont les doses ≤ 20 t.ha⁻¹ MB qui seront recommandées pour une application régulière et à long terme. Cependant, du fait des faibles disponibilités en composts des éléments disponibles, un complément d'engrais minéraux est à préconiser.

Le phosphore s'est révélé comme étant l'élément limitant suivi du potassium dans la productivité des sols étudiés amendés aux composts (Kimwenza, Mont Amba, Balume). Une politique sage de gestion des composts disponibles paraît être la suivante :- utiliser les composts à doses faibles ou moyennes, de l'ordre de 5 à 20 t.ha⁻¹ MB (10 t.ha⁻¹ par exemple); - compléter l'apport des composts par un apport d'engrais minéraux de type NPK dont l'équilibre et la dose optimum sont à rechercher et à adapter pour chaque type de culture et pour chaque site. L'élément nutritif limitant apparaîtra et sera celui qui déterminera la dose et la composition d'engrais minéraux qui prend alors toute sa valeur : il est apporté aux doses adaptées et minimales sur un substrat sol nettement amélioré par le compost dont le rôle d'amendement est primordial et dont le rôle nutritif pour les plantes est certes important mais reste insuffisant compte tenu des disponibilités locales. On rejoint bien ici les constatations des études de Mbonigaba (2007), Mze (2008), Duprat-Invernizzi *et al.* (2006),

etc. qui préconisent l'usage des petites quantités de compost en culture de légume (salade, choux, maïs, pomme de terre, etc.).

Le rendement n'est qu'une des composantes pour évaluer les effets des fumures organiques sur la production agricole. Pour une évaluation complète, il importe aussi d'associer l'influence des fertilisations sur la qualité des récoltes en particulier via l'analyse des végétaux.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

8. Conclusions générales et perspectives

En milieu tropical humide, l'évolution naturelle des sols aboutit le plus souvent à des sols altérés (sols ferrallitiques), acides et déficients en nutriments. Généralement, dans cet écosystème caractérisé par de fortes précipitations et des températures élevées, des processus pédogénétiques favorables à l'altération des minéraux, les mauvaises pratiques agricoles conduisent à l'acidification des sols qui résulte soit de l'intensification agricole, soit des pertes des nutriments (cations basiques) par lixiviation, et/ou des exportations des éléments par des cultures non compensées par les restitutions. Dans certains milieux, la pression démographique conduit à la mise en culture de terres fragiles et/ou marginales (flancs de montagnes). La mise en jachère (longue durée) et la culture sur brûlis (perte de matières organiques) pratiquées traditionnellement sont devenues problématiques dans le cas d'une intensification de l'agriculture. Ceci conduit à une baisse de la fertilité des sols et par là, à une diminution de la productivité agricole.

Dans le contexte de la ville de Kinshasa, il nous est apparu opportun de mettre un accent sur la valorisation de la matière organique des déchets solides ménagers par leur recyclage en agriculture sous forme de compost. La production des déchets ménagers de cette ville est estimée à $3,5 \cdot 10^3$ tonnes /jour (Nzuzi, 2008). Le compost peut constituer une ressource disponible localement et bon marché. Le recyclage a le double avantage d'une part d'assainir le milieu citadin, d'accroître les conditions d'hygiène et de réduire les dommages pour l'environnement, et d'autre part, il constitue un amendement pour fertiliser les sols permettant d'accroître la production agricole.

L'objectif général de ce travail était d'étudier l'incidence des apports de matières organiques sous forme de composts de biodéchets ménagers sur les dynamiques des paramètres chimiques et biologiques des sols sablonneux acides de la Province de Kinshasa en République Démocratique du Congo, ainsi que leurs impacts sur la productivité agricole. Les différents résultats obtenus conduisent à formuler les conclusions qui suivent.

L'étude a montré l'importance des amendements organiques disponibles, en l'occurrence le compost des déchets des ordures ménagères dans l'amélioration de la fertilisation des sols acides tropicaux de la région de Kinshasa. La mise en place d'un pilote de compostage à petite échelle et la caractérisation du produit a révélé que le compostage est un mode simple de traitement des déchets ménagers qui permet une valorisation agricole de ces matières organiques et une limitation des impacts environnementaux défavorables. Le compost obtenu possède les caractéristiques requises pour servir d'amendement des sols tropicaux pauvres et acides. Une étude préliminaire concernant les propriétés et contraintes potentielles à la productivité des sols de la Province de Kinshasa a indiqué que ces derniers sont essentiellement sableux, présentent une réaction acide ($\text{pH} < 5,5$) avec une toxicité aluminique. De plus, ils sont pauvres en matière organique (très faibles teneurs en carbone <

2 % et azote < 0,1 %) et en nutriments minéraux et possèdent une faible capacité de stockage en eau et en éléments nutritifs. La faible fertilité chimique, biologique (faible activité) et le faible potentiel de rétention d'eau se sont avérés comme les principales limitations du potentiel agronomique de ces sols. Les sols des trois sites de l'étude, Kimwenza, Mont Amba et Balume, ont été classifiés comme *rubiques arenoferralsols (dystriques)*, indiquant l'uniformité des conditions de formation des sols de la Province de Kinshasa. Toutefois les valeurs des paramètres liés à la matière organique (COT & N_{tot}), au complexe adsorbant, au phosphore assimilable et les paramètres microbiologiques étudiés (C_{min}, N_{min}, RB, RIS, C_{fm}, APA, U_{t&ent}) sont plus élevés à Balume que dans les deux autres sites Kimwenza, et Mont Amba.

Sur les trois sites, au terme de quatre saisons culturales successives, les apports continus des composts de biodéchets ménagers ont induit une augmentation du pH de 0,8 à 1,2 unité et une diminution considérable de l'aluminium échangeable proportionnelles aux doses appliquées. L'effet des matières organiques sur le pH apparaît comme la principale variable pouvant expliquer la diminution du taux d'aluminium échangeable dans les différents sites. Cela est dû à des teneurs élevées en cations basiques, essentiellement le Ca⁺² et le Mg⁺², la valeur élevée de CEC et à l'effet tampon des matières organiques des composts. De plus, une forte corrélation positive a été observée entre le pH et la CEC du sol, indiquant l'intérêt que présente l'accroissement du pH dans la gestion des sols sablonneux.

Les composts de biodéchets ménagers ont augmenté la biodisponibilité des éléments majeurs N et P ainsi que la somme des cations basiques échangeables sur les trois sites, et ce proportionnellement aux quantités apportées. Outre, le contenu en phosphore des amendements organiques qui favorisent l'augmentation du phosphore total et sa biodisponibilité, on ne peut pas exclure l'effet également positif des micro-organismes mis en évidence par une activité biologique plus intense. A la fin de l'expérimentation le sol (sable limoneux) de Balume s'est enrichi davantage en matières organiques avec les doses de 40 et 60 t.ha⁻¹ MB de CBM. L'apport de la fumure minérale NPK au cours des quatre saisons culturales successives a eu comme résultats la diminution du pH donc l'acidification de sol, la perte de carbone organique, et l'augmentation de l'aluminium échangeable dans les trois sites. En absence de tout apport d'amendement ou d'engrais, les sols sont susceptibles de devenir fortement acides et les pertes en éléments minéraux deviennent encore plus importantes après quatre saisons culturales.

L'évaluation de l'apport de matières organiques des composts de biodéchets ménagers sur la dynamique des indicateurs biochimiques de la fertilité des sols révèle que les matières organiques contribuent significativement à l'amélioration de la biomasse microbienne et de leur activité métabolique dans le sol. En effet, suite aux apports de compost, tous les paramètres biochimiques de la fertilité (carbone & azote microbiens, respiration basale et induite, carbone facilement métabolisable, activités enzymatiques du monophosphoestérase

acide et des uréases non tamponnée et tamponnée) ont augmenté en fonction des doses appliquées. Par contre, dans les sols non amendés, ces paramètres tendent à baisser. Dans les parcelles amendées en compost, la biodisponibilité des nutriments aurait joué un rôle crucial dans le développement de la biomasse microbienne, l'augmentation des intensités respiratoires et la production d'activités enzymatiques. De plus, l'apport des micro-organismes exogènes des sols par les composts et les sécrétions racinaires dans la rhizosphère auraient aussi contribué à l'influence globale des différentes fumures apportées.

L'évaluation des rendements (biomasse & graines) des cultures tests utilisées a montré des valeurs supérieures dans les parcelles fertilisées au compost. Dans tous les cas, l'augmentation des productions agricoles est proportionnelle à la dose des fertilisants apportés. Par contre, dans les parcelles non amendées par le compost les rendements ont baissé au cours du temps. Si la dose de 60 t.ha⁻¹ MB donne régulièrement les rendements les plus élevés, la dose T1 de 20 t.ha⁻¹ MB (soit 12 t.ha⁻¹ MS) s'avère la plus efficace du point de vue agronomique sur base des rendements des cultures obtenus par rapport à la quantité des fumures apportées. Les matières organiques des biodéchets ont joué un rôle primordial sur la réduction de l'acidité et sur la mise à disposition d'éléments nutritifs majeurs, ce qui a induit l'augmentation de la production végétale. Le rôle positif de matières organiques sur les propriétés physiques (aération, humidité, etc.) et sur les propriétés microbiologiques (minéralisation des bioéléments aux plantes, etc.) n'est pas négligeable dans le processus de disponibilité des nutriments. On observe également des fortes corrélations positives avec le carbone organique total, l'azote, le phosphore, le pH et les paramètres microbiologiques avec les rendements dans les parcelles traitées au compost.

Les engrais minéraux (NPK, 12-08-18) se sont montrés plus efficaces par rapport aux quantités d'éléments fertilisants (N, P, K) apportés que les traitements aux composts de biodéchets ménagers. Entre amendements, ce sont les traitements aux faibles doses (T1 & T4) qui sont les plus efficaces. Le phosphore s'est avéré être l'élément le plus limitant de la production agricole des sols dans tous les sites et pour les différents amendements. L'azote vient ensuite, ce qui n'a rien d'étonnant compte tenu que les cultures pratiquées étaient majoritairement des légumineuses.

Cette étude démontre enfin que la valeur agronomique des matières organiques étudiées (composts de biodéchets) consiste non seulement dans leur aptitude à fournir des éléments nutritifs aux plantes, mais également dans leur capacité à améliorer les propriétés du sol propices à la croissance des plantes et des micro-organismes du sol. Ainsi, des apports fréquents des engrais organiques sont donc nécessaires pour améliorer de façon durable les propriétés du sol. Une politique raisonnée de gestion est d'apporter au sol des faibles doses de matières organiques (5-10 t.ha⁻¹ MS) avec un supplément d'engrais minéraux (azotés, phosphatés, ...) à identifier pour une application régulière et à long terme qui tient compte de

la disponibilité en compost et des ressources financières nécessaires pour acquérir des intrants complémentaires.

Perspectives

Bien que l'application de matières organiques permette d'améliorer sensiblement la qualité des sols, certaines études méritent encore d'être menées afin d'approfondir l'influence de ces amendements sur les sols sablonneux acides, et de dégager les possibilités d'une utilisation plus efficiente et plus rentable.

Par exemple, il resterait à quantifier la part des micro-organismes exogènes apportés par les matières organiques des composts et la part endogènes provenant du sol. Il serait aussi utile d'étudier d'autres paramètres de l'activité biologique des sols comme par exemple les populations d'arthropodes et de vers de terre.

Il conviendrait surtout d'examiner la manière d'optimiser le couplage des fertilisations organiques (ressources limitées en qualité) et des fertilisations minérales (onéreuses) dans la perspective d'une agriculture intensive et d'assurer le renforcement de la fertilisation organo-minérale en privilégiant la valorisation des matériaux naturels locaux disponibles. Ces ressources locales concernent entre autres les engrais verts, les déchets des fermes, des animaux d'élevage ou des industries agroalimentaires, les composts de biodéchets et les matériels géologiques disponibles dans la région de Bas-Congo.

Il serait aussi utile d'évaluer les effets et arrières effets de l'application des amendements organiques et minéraux à long terme sur des sols sablonneux acides de la Province de Kinshasa en fonction des résultats, de proposer de nouveaux systèmes de culture mieux adapter (taux de présence de légumineuses, alternance plantes sarclables et autres, espèce et variétés adaptées) au contexte sol-climat et à la demande alimentaire locale.

Il importe aussi d'étudier l'influence des différentes fertilisations sur la qualité nutritive des récoltes.

Enfin, comme alternative dans la gestion des déchets solides ménagers de la ville de Kinshasa et contre la mise en décharge ou les pratiques actuelles (abandon à l'air libre, rejet dans les cours d'eaux, enfouissement dans les parcelles, incinération), il faut favoriser le recyclage à grande échelle de ces matières organiques pour une valorisation en fertilisation des sols dégradés. Ceci devrait faire également l'objet d'une étude approfondie qui pourrait permettre d'établir un bilan entre les besoins actuels des sols en matière organique tenant compte des cultures pratiquées et les potentialités de production de celle-ci par diverses sources. Au niveau des petites exploitations comme dans les périmètres de maraîchage urbain de Kinshasa, il serait important de développer une approche plus intégrée impliquant la collecte et la valorisation efficace des déchets ménagers par la production des composts tout en tenant à la préservation de l'équilibre environnemental. Dès lors que l'utilisation des composts de biodéchets ménagers (ou toute

autre source de MO) peut en partie constituer une alternative ou un complément à la fertilisation minérale de sols acides sablonneux dans la région de Kinshasa, il faudrait tout de même évaluer son impact sur la qualité générale des sols. Si un contrôle sérieux de la matière première (tri, séparation) n'est pas mis en pratique, les composts de biodéchets peuvent contenir des substances polluantes (métaux lourds) ou toxiques.

Cependant, on estime que la ville de Kinshasa avec une population de plus 7 millions d'habitants produit $3,5.10^3$ t/j déchets solides ménagers (Nzuzi, 2008) dont 50 % de matières organiques compostables (CRB, 1999). Cette quantité de déchets solides ménagers devrait permettre de produire par an plus de 200.000 tonnes de composts en cas de mise en place d'un système de collecte efficace. Sur base de l'application de 10 tonnes par ha, la quantité totale produite annuellement permettrait d'amender une surface totale de 21.000 ha (figure 3 en annexe 7). La dose des composts à apporter sera fonction de la superficie des terres cultivables et elle sera complétée par des quantités d'autant plus faibles d'engrais minéraux à déterminer selon le système pratiqué (succession des cultures, traitements des sous-produits non récoltés, ...) et selon le niveau d'intensification souhaité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

9. Références bibliographiques

- Adl S.M. (2003). *The ecology of soil decomposition*. CABI Publishing, Wallingford, UK. 335 p.
- Albrecht, R. (2007). Co-compostage de boues de station d'épuration et des déchets verts: nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique. Thèse de doctorat, Université Paul Cezanne Aix-Marseille III, France, 170 p.
- Alef, K. (1995). Soil respiration. In Alef K. et Nannipieri P. (eds), *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London: academic press, pp 214-218.
- Alef, K., Nannipieri, P., Trazar-Cepade, C. (1995). Phosphatase activity. In Alef, K., Nannipieri, P. (eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press Limited, UK, 335-344.
- Alvarez, R. (2005). A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*, **21**: 38-52
- Amir, S. (2005). Contribution à la valorisation des boues de station d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 302p.
- Anderson, J.M. ; Ingram J.S.S. (1993). Tropical soil biology and fertility. *A hand book of methods*. Wallingfor (UK), 2nd edition, CAB, pp 221.
- Anid, P.J. (1983). Contribution à la caractérisation des composts de déchets urbains : évaluation de leur état de maturation et des risques éventuels de contamination métallique des cultures. Thèse de doctorat, FSAGx, Gembloux, Belgique, 152p.
- Annabi, M. (2005). Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, France, 237p.
- Bado, V.B., Hien, V. (1998). Efficacité agronomique des phosphates naturels du Burkina Faso sur le riz pluvial en sol ferrallitique. *Cahiers Agricultures*, **7**: 236-8
- Baert, G. (1995). Properties and chemical management aspects of soils in different parent rocks in the lower Congo. Ph.D., Earth Sciences, Ghent University, Belgium.
- Baert, G., Embrechts, J., De Dapper, M., Mapaka, M. (1991). Cartographie des sols, évaluation des terres. Feuille de Kinshasa. Etude de la reconnaissance au 200.000 ème. Texte explicatif n°7. Région : Kinshasa, Sous-région : Lukaya, Catarctes. Université de l'Etat de Gand (ITC), A.G.C.D.
- Baize, D. (2002). Examen critique des valeurs limites « sols » de la réglementation française. In Baize, D., Tercé, M. (Eds). *Les elements traces métalliques dans les sols. : approches fonctionnelles et spatiales*. INERA, Paris, France, 137-154 pp.
- Baize, D., Girard, M.C., Boulaine, J., Cheverry, C., Ruelain, A. (2008). Référentiel Pédologique. Association française pour l'étude du sol, édition Quae, 453 p.
- Bastida, F., Kandeler, E., Moreno, J.L., Ros, M., Garcia, C. Hernandez, T. (2008). Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*, **40**: 318-329.

- Batista, F., Moreno, J.L., Hernandez, T., Garcia, C. (2007). Microbial activity in non-agricultural degraded soils exposed to semiarid climate. *Science of total environment*, **378**, 183-186.
- Bauduin, M. (1986). Valeur agronomique des déchets urbains. TFE, FSAGx, Gembloux, Belgique, 40p.
- Baziramakenga, R., Simard, R.R. (1998). Low molecular weight aliphatic acid content of composted manures. *Journal of Environment Quality*, **27 (3)**: 557-561.
- Bazzoffi, P., Pelligrini, S., Rocchini, A. Morondini, M., Grasselli, O. (1998). The effects of urban refuse compost and different tractors tyres on soil physical properties, soil erosion and maize yield. *Soil Tillage Res.*, **48**: 275-286.
- Beau (1975). Atlas de Kinshasa. Institut Géographique du Zaïre, Kinshasa.
- Ben Hassine, H., Aloui, T., Gallali, T., Bouzid, T., El Amri, S., Ben Hassine, R. (2008). Évaluation quantitative et rôle de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. *Agrosol*. **19 (2)** : 4-17.
- Benali, M., Simard, R.R., Cambouris, A.C., Nolin, M.C. (1999). Phosphorus pools as influenced by papermill compost. *Proc. Soil Soc. Am.* An Meeting, Salt-Lake City, UT.
- Bertrand, R., Gigou, J. (2000). La fertilité des sols tropicaux. Edt Maison neuve et Larose, Paris, France, p 397.
- Bhattacharyya P., Pal R., Chakraborty A., and Kikraborti K. (2001). Microbial biomass and activity in laterite soil amended with municipal solid waste compost. *J. Agronomy & Crop Science*, **187**, 207-211.
- Biederbeck V.O., Zentner R.P., Campbell C.A. (2005). Soil microbial population and activities as influenced by legume green fallow in a semiarid climate. *Soil Biol. Biochem.* **37**: 1775-1784.
- Biederbeck, V.O., Campbell, C.A., Zentner, R.P. (1984). Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in Southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil. Sci.*, **64**: 273-274.
- Biey, M.E. (2001). Small-scale biotreatment of domestic refuse. Thesis doctor in applied biological sciences. Faculteit Landbouwkundje en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent.
- Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A., Antoun, H. (2006). Evaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. *Agrosol*. **17 (1)** : 65-72.
- Bolan, N.S., Hedley, M.J. (2003). Role of carbon, nitrogen and sulfur cycles in soil acidification. In Rengel, Z. (Eds), *Hand Book of Soil Acidity*. Marcel Dekker, Inc, Ney York, USA, 26-56 pp.
- Borken W., Muhs A., Beese F. (2002). Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. *For. Ecol. Manage.* **159**: 49-58.
- Bouzaiane, O., Hassen, A., Jedidi, N. (2002). Détermination de la biomasse C et N par la méthode de Fumigation-Extraction dans un sol amendé de résidus organiques. *Proceeding of International Symposium on Environmental Pollution Control and Wast Management*, Tunis (EPCOWM), 406-416.

- Boyer, J. (1982). Les sols ferrallitiques. Tome X : facteur de fertilité et utilisation des sols. Initiations – Documentations Techniques, n° 52, ORSTOM, Paris, France.
- Brady, N.C., Weil, R.R. (2002). The nature and properties of soils. 13th edition. Pearson Education, Inc., New Jersey, USA. 960p.
- Bravard, S., Righi, D. (1990). Podzols in Amazonia. *Catena*, **17**: 461-475.
- Bremner, J.M. (1965). Total nitrogen. In C.A. Black, Editor, Methods of Soils Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties (Second ed). Agronomy series n°9, ASA, SSSA, WI, USA.
- Bresson, L.M., Koch, C., Le Brissonnais, Y. Barriuso, E. Lecomte, V. (2001). Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65**: 1804-1811.
- Brookes P.C., Joergensen R.G. (2006). Microbial biomass measurement by fumigation-extraction. In Bloem J., Hopkins D.W., Benedetti A. (Eds.). *Microbiological methods for assessing soil quality*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 77-92.
- Calvet, R. (2003). Le sol, propriétés et fonctions. Tome 2. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales. Edts France Agricole, Dunod, pp 471.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G. (2008). Soil Simpling and Methods and Analysis. *Canadian Society of Soil Science*, Canada, 1193p.
- Chantigny, M., Angers, D. (2005). Activité microbiologique et qualité des sols: quoi de neuf sous nos pieds ? *Colloque en agroenvironnement « des outils d'intervention à notre échelle »*, CRAAQ, Drummondville, Canada, 10p.
- Chaoui, M.I., Zebilske, L.M., Ohno, T. (2003). Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability. *Soil Biol. Biochem.*, **35**: 295-302.
- Charland, M., Cantin, S., St Pierre, M.-A., Côté, L. (2001). Recherche sur les avantages à utiliser le compost. Dossier CRIQ 640-PE27158 (R1), Rapport final. Recyc-Quebec, 35 p.
- Charnay, F. (2005). Compostage des déchets urbains dans les pays en développements: élaboration de la démarche méthodologique pour une production perenne de compost. Thèse de doctorat, Université de Limoge, France, p227.
- Chaussod, R., Zuvia, M., Breuil, M.C., Hetier, J.M. (1992). Biomasse microbienne et « statut organique » des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien de Llonos sous différents systèmes de culture. *Cab. Orstom., sér. Pédol.*, **vol. XXVII, n° 1**: 59-67.
- Clément, M.F., N'Dayegamiye, A. (2009). Rotation dans la culture de pomme de terre : bilans humiques et logiciel de calcul. *Colloque sur la pomme de terre. CRAAQ*, Québec, 6 p.
- Cleveland C.C., Townsend A.R., Schmidt S.K. (2002). Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies. *Ecosystems* **5**: 680-691.
- Commission Européenne (CE). (2009). Réduction du taux de matière organique. In « L'agriculture durable et la conservation des sols ». Processus de dégradation des sols, *Fiche technique n°3*, 4p (<http://soco.jrc.europa.eu>)

- Compère, P. (1970). Cartes des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. 25, Bas-Congo. B, Notice explicative de la carte de la végétation, I.N.E.A.C., Bruxelles, p 35.
- Culot, M. (1996). Assainissement et valorisation des déchets organiques urbains par compostage. *In* Cahier Technique: la problématique des déchets solides dans les villes africaines d'importance moyenne. Séminaire, FUSAGx-CWBI, du 2-6 décembre 1996, Gembloux, p. 5.
- CRB (1999). Assainissement et compostage des ordures des marchés à Kinshasa. Avant projet, RDC, 36p.
- Culot, M., Bastien, C., Etienne, M., Becker, H. (1999). Evaluation des actions à mener en vue de l'assainissement global (déchets et eaux) de la ville de Kigali. Rapport final, FUSAGx, Gembloux, p 78.
- Cuveas, G., Blazquez, R., Martinez, F., Walter, I. (2000). Composted MSW. Effects on soil properties and natives vegetation in a dregraded semiarid Shrubland. *Compost Sci. Util.*, **8 (4)** : 303-309.
- Dabin, B. (1963). Appréciation des besoins en phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTROM, *Série Pédologique*, **3** :27-42.
- Dabin, B. (1984). Les sols acides tropicaux. Cah. ORSTOM, *Série Pédologique*, 21 : 7-19.
- Dagnelie, P. (2006). Statistique théorique et appliquée. Inférence statistique à une et à deux dimensions. Tome 2. Deuxième édition, De boeck université, Bruxelles, Belgique, 734 p.
- Dagnelie, P. (2003). Principes d'expérimentation : planification des expériences et analyses de leurs résultats. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 397 p.
- Damien, A. (2004). Guide du traitement des déchets. 3^e édition Dunod. ISBN 9782100074853.
- Danso, S.K.,A., Eskew, D.L. (1984). Enhancing biological nitrogen fixation. *AIEA, Bulletin*, vol **26 (2)** : 24-33.
- Davet, P. (1996). Vie microbienne du sol et production végétale. INERA, Paris, France, 383 p.
- De Bartoldi, M., Vallini, G., Pera, A. (1983). The biology of composting. A review. *Waste Management & Research*, **1**: 157-176.
- De Geus, J.G. (1973). Fertiliser guide for the tropics and subtropics. 2nd edition. Centre d'étude de l'azote, Zurich.
- De Haan, S. (1981). Result of municipal waste compost research aver more than fifty years at the institute for Soil Fertility at Haren. Gorningen, the Netherland. *Neth. J. Agric. Sci.*, **29**: 49-61.
- De Saint Moulin, L. & J. L., Kalombo Tshibanda, 2005. Atlas de l'organisation administrative de la RDC, CEPAS, Kinshasa, p. 15.
- Deblay, S. (2006). Fertilisation et amendements. Educagri éditions, 2^{ème} édition, Paris, 129 p.

- Debosz, K., Petersen, S.O. Kure, L.K., Ambus, P. (2002). Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Appl. Soil Ecol.*, **19**: 237-248.
- Deubel, A., Merbach, W. (2005). Influence of microorganisms on phosphorus bioavailability in soils. In : Boscuit, F., Varma, A. (eds), *Microorganisms in soils: Roles in Genesis and Functions*. Springer-Berlin Heidelberg, 177-191 pp.
- Diaz, E., Roldan, A., Lax, A., Albaladeja, J. (1994). Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat. *Geoderma*, **63**: 277-2888.
- Dick, W.A., McCoy, E.L. (1993). Enhancing Soil Fertility by Addition of Compost. Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects. Harry, A., Hoitink, J., Harold, M., Keener (éditeurs), Wooster, Ohio, 622-644 pp.
- Dicky, R.P. (1997). Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In Plankhurst, C.E., Doubé, B.M., Gupta, V.V.S.R. (eds). *Biological indicator of soil health*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 121-156 pp.
- Dilly, O. (2003). Regulation of the respiratory quotient of soil microbiota by availability of nutrients. *FEMS Microb. Ecol.* **43**, 375-381.
- Dilly, O. (2005). Microbial energetic in soil. In Buscot F., Varma A. (Eds), *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, pp 123-138.
- Dilly, O. (2006). Soil Microbial Activity. In : Bloem, J., Hopkins, D., Benedetti, A. (Eds), *Microbiological methods for assessing soil quality*. Cambridge (USA), CABI publishing, pp 114-116.
- Dilly, O., Gnaß, A., Pfeiffer, E.-M. (2005). Humus accumulation and activities in calcareous epigeic fluvisols under grassland and forest diked in 30 years. *Soil Biology & Biochemistry* **37**, 2163-2166.
- Dinesh, R. Suryanarayana, M.A., Ghoshal Chaudhuri, S., Sheeja, T.E. (2004). Long-term influence of leguminous cover crops on the biochemical properties of a sandy clay loam Fluventic Sulfaquent in a humid tropical region of India. *Soil & Tillage Research* **77**, 69-77.
- Dinesh, R., Srinivasan, Hamza, S., Parthasarathy, V.A., Aipe, K.C. (2010). Physico-chemical, biochemical and microbial properties of the rhizospheric soils of tree species used as supports for black pepper cultivation in the humid tropics. *Geoderma*, **158**: 252-258.
- Djadjaglo, D., Richter, C. (2008). Efficacité de prélèvement du phosphore par les plantes *Sorghum bicolor* (L.) Moench et *Phaseolus vulgaris* L. *Agrosol.* **19** (2): 45-50.
- Dommergues, Y., Mangenot, F. (1970). *Ecologie microbienne du sol*. Paris, Masson & Cie, 796 p.
- Duchaufour, P. (2001). *Introduction à la science du sol*. Sol, Végétation et Environnement, 6e édition, Dunod, Paris, p 315.
- Dzaba, D. (1987). Contribution à l'étude des amendements calcaire sur la dynamique du phosphore des sols acides de la République Populaire du Congo. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, pp.

- Ellis, S., Howe, M.T., Goulding, K.W.T., Muggleston, M.A., Dendooven, L. (1998). Carbon and nitrogen dynamic in a grassland with varying pH. Effect of pH on the denitrification potential and dynamics of the reduction enzymes. *Soil Biol. Biochem.* **30 (3)**: 359-367.
- Emmerling, C., Schloter, M., Hartmann, A., Kandeler, A. (2002). Functional diversity of soil organisms. A review of recent research activities in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **165**, 408-420.
- Epstein E., Wu N. (1994). *The SAMM compost Pilot Project Agricultural Study*. Final Report. E&A Environmental Consultants, Inc., Canton, MA, USA. 118 p.
- Epstein, E. (1997). *The science of composting*. Technomic Publishing Company Inc, Lancaster, Pennsylvania, USA, 487 p.
- Erich, M.S., Fitzgerald, C.B., Porter, G.A. (2002). The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. *Agriculture Ecosystem & Environment*, **88**: 79-88.
- Essington M.E. (2004). *Soil and water chemistry. An integrated approach*. CRC Press LLC., Boca Raton, Florida, USA. 534 p.
- Fageria, N.K. (1994). Soil acidity affects availability of nitrogen, phosphorus and potassium. *Better crops international*, **10**: 9-8.
- Fahem, A.K. (1978). Les sols. In LACLAVÈRE G. (ed) *Atlas de la République Démocratique du Congo*. Paris : édition Jeune Afrique, p 71.
- FAO (2005). *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*. Rome, Italie, 63 p.
- FAO (2009). *Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture*. Rep. Dém. du Congo, 66p.
- FAO. (1990). *Guidelines for soil description*. 3rd Edition (revised), Soil Resources, Management and Conservation Service. Land and Water Development Division, Rome, Italy, p 70.
- Farinet, J.L., Copin, Y. (1994). Dossier traitement des déchets : transpaille, plant en mottes, lagunage. *Agriculture et développement (1)* : 47-55.
- Farinet, J.L., Niang (2004). Le recyclage des déchets et effluents dans l'agriculture urbaine. In : Smith odanrewaja B. (ed.), Moustier Paule (ed.), Mougeot Luc J.A. (ed). *Développement durable de l'Agriculture urbaine en Afrique francophone. Enjeux, concepts et méthodes*, CIRAD, Montpellier, p. 143-172.
- Farinet, J.L., Sow, O.S. (1997). Anaerobic pilot scale treatment of municipal refuse in Sahel. In Wilderer P.A. (ed), Delegenés J.P. (ed), Trätler D.C. (ed), Graja S. (ed), Garding: BayFORREST. International Conference on treatment of solid waste and wastewaters. 1, 28 et 29-04, Narbonne, France, 255-264p.
- Fließbach, A., Oberholzer, H.R., Gunst, L., Mäder, P., (2006). Soil organic matter and biological soil quality indicator after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst; Environ.*, **118**: 273-274.
- Francou (2003). *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage des déchets urbains: influence de la nature des déchets et du processus de compostage*. Recherche

- d'indicateurs pertinents. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 289p.
- Gabrielle B., Da-Silveira J., Houot S., Michelin J. (2005). Field-scale modelling of carbon and nitrogen dynamics in soils amended with urban waste composts. *Agric. Ecosyst. Environ.* **110**: 289-299.
- Garcia, C. Hernandez, T., Costa, F., Pascual, A. (1992). Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments. *J. Sci. Food Agric.*, **59**: 313-319.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, F. (1997). Potential use deshydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, **1-2**: 123-134.
- Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste composts application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* **32**: 1907-1913.
- Gaucher, G. (1981) : Les facteurs de la pédogenèse. Traité de pédologie agricole, tome II.
- Grego, S., Moscatelli, M.L., Dimatia, E., Marinari, S., Cacciari, I. (2003). Activité biochimique de la rhizosphère d'Acacia raddiana au nord et au sud de Shara. In « Un arbre au désert : Acacia raddiana » edt Grouzis, M., Le Floch, E., IRD, 231-247.
- Girard, M.C., Walter C., Remy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (2005). Sols et environnement. Édition Dunod, Paris, 800p.
- Giri, B., Giang, P.H., Kumari, R., Prasard, R., Varma, A. (2005). Microbial diversity in soils. In : Buscot, F. et Varma, A. (eds) *Microorganisms in soils: Roles in Genesis and Functions*, Springer-Berling Heidelberg: 19-55.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. (1998). Le sol vivant. Bases de pédologie - Biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 521p.
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, M. (2003). Le sol vivant. Bases de pédologie- Biologie des sols. 2^e ed. Révisée et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 568p.
- Godden, B. (1986). Etude du processus de compostage du fumier de bovin. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Université Libre de Bruxelles, 136p.
- Godden, B., Penninckx, M.J. (1987). Biochemistry of manure compost: lignin biotransformation and humification. *Compost production, Quantity and Use*, 238-244.
- Gros, A. (1979). Engrais. Guide pratique de la fertilisation. 7^e édition revue et complétée, La Maison Rustique, Paris, France, 382p.
- Hartl B., Putz B., Ertart. (2003). Influence of rates and timing of biowaste compost application on rye yield and soil nitrate levels. *Eur. J. Soil Biol.* **39**: 129-139.
- Hassan, A.M., Chude, V.O., Ibrahim, S.A., Nnwanko, P.C. (2007). Effect of hydrated lime on growth of maize at Federal Capital Territory, Abuja. *Internat., J. of Agri. Research*, **2(5)**: 495-499.
- He, X.T., Traina, S.J., Terry, J.L. (1992). Chemical properties of municipal solid waste compost. *J. Environ. Qual.* **21**: 318-329.

- Hofny-Collins, A.H. (2006). The potential for using composted municipal waste in agriculture: the case of Accro, Ghana. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 300p.
- Holland, M.D., Allen, R.G., Campbell, K., Grimble, R.J., Stickings, J.C. (1992). Natural and human resource studies and landuse option. Department of Nyong and So'o. Cameroon., Natural Resources Institute, Kent.
- Houot, S., Francou, C., Vergé-Leviell, C., Michelin, J., Bourgeois, S., Linères, M., Morel, P., Parnaudeau, V., Bissonais, Y., Dignac, M.F., Dumat, C., Cheiab, A., Poitreau, M. (2004). Valeur agronomique et impacts environnementaux de compost d'origine urbaine : variation avec la nature du compost. *AGREDE, Dossier de l'environnement de l'INRA n°25*: 107-123.
- Iglesias-Jmenez, E., Perez Garcia, V., Espino, M., Hernandez, J.M. (1995). City refuse as a phosphorus source to overcome the P-fixation capacity of sesquioxide-rich soils. *Plant & Soils*, **148**: 115-127.
- Ikerra S.T., Semu E., Mrema J.P. (2006). Combining *Tithonia diversifolia* and Minjingu phosphate rock for improvement of P availability and maize grain yields on a chromic acrisol in Morogoro, Tanzania. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **76**: 249-260.
- Ilstedt U., Giesler R., Nordgren A., Malmer A. (2003). Changes in soil chemical and microbial properties after a wildfire in a tropical rainforest in Sabah Malaysia. *Soil Biol. Biochem.* **35**: 1071-1078.
- Ilstedt, U., Singh S. (2005). Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing Acrisol (Ultisol) compared with compost. *Soil Biol. Biochem.* **35**, 1071-1078.
- Insam H., Hutchinson T.C., Reber H.H. (1996). Effects of heavy metal stress on the metabolic quotient of the soil microflora. *Soil Biol. Biochem.* **28**: 691-694.
- ISO (2002). Soil quality-Determination of abundance and activity of soil microflora using respiration curves. Reference number: ISO 17155. First edition, Switzerland, 13 p.
- Jakobsen, S.T. (1995). Aerobic decomposition of organic waste 2. Value of compost as a fertilizer. *Res. Cons. & Recycl.*, **13**: 57-71.
- Joergensen R.G., Anderson T.H, Wolters V. (1995). Carbon and nitrogen relationship in the microbial biomass of soils in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Biol. Fert. Soils* **19**: 141-147.
- Joergensen, R.G. (1995). The fumigation-extraction method for microbial biomass nitrogen. In Alef, K., Nannipieri P. (Eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press Limited, London, UK., pp 388-390.
- Joergensen, R.G., Figge, R.M., Kupsh, L. (1997). Pflanzenernahr. *Bodenk.*, **160**:21-24.
- Jouquet, P., Plumere, T., Thu, T.D., Rumpel, C., Duc, T.T., Orange, D. (2010). The rehabilitation of tropical soil using compost and vermicompost is affected by the presence of endogenic earthworms. *Applied Soil Ecology* **46**: 125-133.
- Kaiser, P. (1981). Analyse microbiologique des composts. Rapport du colloque international: compost, amendements humique et organique, 43-71.

- Kanchikerimath D., Singh D. (2001). Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agric., Ecosyst. Environ.* **86**: 155-162.
- Kander, E., Gerber H. (1988). Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biol. Fertil. Soils.* 6 : pp 68-72.
- Kanyankogote, P., Van Ranst, E., Verdoody, A., Baert, G. (2005). Effet de la lave trachybasaltique broyée sur les propriétés chimiques de sols de climat tropical humide. *Etude et Gestion des Sols*, Volume **12 (4)** : 301-311.
- Kasongo, R.K., Van Ranst, E., Verdoody, Kanyankogote, P, Baert, G. (2009). Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau (D.R. Congo). *Soil Use and and Management*, **25**:21-27.
- Kihanda F.M., Warren G.P., Micheni A.N. (2006). Effect of manure application on crop yield and soil properties in a long-term field trial of semi-arid Kenya. *in*: Bationo A., Wswa B., Kihara J., Kimetu J. (eds). *Advances in integrated soil fertility management in sub saharan Africa: Challenges and opportunities. Nutr. Cycl. Agroecosyst*, Springer, **76**:341-354.
- Kikufi, A. (2006). Etude phytogéographique de la végétation des marées à Kinshasa. Cas de N'Djili et de Kingabwa. DEA en Sciences/Biologie, Université de Kinshasa, Kinshasa, p 75.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. In Klute A. (eds). *Methods of soil analysis. Part I. Agron. Monog.* 9.2nd ed. ASA, Madison, WI, 635-662pp.
- Kombebe, B.M.F. (2004). Diagnostic de la fertilité des sols dans la cuvette central congolaise; cas des series Yangambi et Yakonde. Thèse de doctorat, FUSAGx, Gembloux, 421 p.
- Kotchi, V., YAO, K.A., Sitapha, D. (2010). Réponse de cinq variétés de riz à l'apport de phosphate naturel de Tilmes (Mali) sur les sols acides de la région forestière de Man (Côte d'Ivoire). *J. appl. Biosc.* (**31**) : 1895-1905.
- Koy, K.R. (2009). Amélioration de la qualité des sols sableux du plateau de Batéké (R D Congo) par application des matériels géologiques et des déchets organiques industriels locaux. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre, Université de Gand, Gent, p 323.
- Ladmirat, H. (1964). Carte géologique à l'échelle du 1/200.000, notice explicative de la feuille Léopoldville, Service géologique de la Rép. Dém. du Congo (Léopoldville) et le Musée Royal d'Afrique centrale (Tervueren) Léopoldville, 1-17.
- Landon, J.R. (1991). Booker Tropical Soil Manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Longman, Booker Take limed, Oxon, UK. 474p.
- Lardinois, L. (1993). Organic waste. Option for small-scale resource recovery Urban solid waste serie 1. Eds Arnold van Klundert, Amsterdam, Netherland, pp 117.
- Latham, P., Konda Ku M. (2007). Plantes utiles du Bas-Congo. Armée du salut, Kinshasa, p 315. ISBN : 9780955420818.
- Leclerc, B. (2001 a). Guide des matières organiques. ITAB, 2^e éd., Tome 2, Paris, 91p.
- Leclerc, B. (2001 b). Guide des matières organiques. ITAB, 2^e éd., Tome 1, Paris, 238p.
- Legros, J.P. (2007). Les grands sols du monde. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Espagne, p 566.

- Leifeld, L., Siebert, S., and Kögel-Knabner, I. (2002). Changes in the chemical composition of soil organic matter after application of compost. *European Journal of Soil Science*, **53**, 299-309.
- Lin, Q., Brookes, P.C. (1996). Comparison of methods to measure biomass in unamended ryegrass-amended and fumigated soils. *Soils Biology & Biochemistry*, **28**: 933-939.
- Linag, Y.C., Yang, Y.F., Yang, C.G., Shen, Q.Q., Zhoer, J.M., Yang, L.M. (2003). Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic matter in anthropogenic soil. *Geoderma*, **115**: 149-160.
- Lubini, A., (1997). Utilisation des plantes par les Yansi de l'entre Kwilu-Kasai (Zaire). In Proceeding XIIIème Plenary Meeting AETFAT, Malawi, 1, 53-74.
- Makumbelo, E., Lukoki, L., Paulus, J. Sj., Luyindula, N. (2002). Inventaires des espèces végétales mises en cultures dans les parcelles en milieu urbain, ca de la commune de Limeté-Kinshasa-RDC. *Tropicultura*, **20 (2)**: 89-95.
- Malele, M.S. (2003a). Contribution à la remise en valeur des terres forestières dégradées de la zone périurbaine de Kinshasa (République Démocratique du Congo). XIIe Congrès forestier mondial, FAO, Québec, Canada. www.fao.org, 14/07/2006.
- Malele, M.S.(2003b). Situation des ressources génétiques forestières de la République Démocratique du Congo. FAO, Division des ressources forestières-Département des forêts, Rome, 44p.
- Malinov, A. Sh., Dilly, O. M. (2007). Microbioal characteristics during the initial stage of litter decomposition in forest and adjacent cropland soil. *Ecological Engineering* **31**, 147-153.
- Mamilov, A.S., Dilly, O. (2002). Soil microbial eco-physiology as affect by short-term variations in environmental conditions. *Soil Biology & Biochemistry* **34**, 1283-1290.
- Marcelino, V. (1995). Characteristics and genesis of sandy soil of Lower Congo. Ph.D. thesis in Earth Science, Ghent University, Belgium.
- Martens, D.A., Johanson, J.B., Frankenberger, Jr.W.T. (1992). Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. *Soil Science*, **153**: 53-61.
- Masto R.E., Chhonkar P.K., Singh D., Patra A.K. (2006). Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical Inceptisol. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 1577-1582.
- Mbonigaba M.J.J. (2007). Etude de l'impact des composts à base de biomasse végétale sur la dynamique des indicateurs physico-chimiques, chimiques et microbiologiques de la fertilité des sols: application sur trios sols acides tropicaux du Rwanda. Thèse de doctorat, FUSAGx, Gembloux, p 243.
- McDowell, R., Sharpley, A.N. (2003). Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or organic fertilizer. *Agriculture Ecosystem & Environment*, in Press.
- Meng, L., Ding, W., Cai, Z. (2005). Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on NO₂ emission, soil quality and crop production in a sandy loam soil. *Soil Biol. Biochem.* **37**: 2037 – 2045.
- Mérelle, F. (1998). L'analyse de terre aujourd'hui. GEMAS, Nantes, France, 184 p.

- Mibeya, B. E (2009). Contribution à la cartographie des zones inondables de la ville de Kinshasa (cas de la commune de N'Djili dans le bassin versant de la N'Djili). TFE, Gembloux Agro Bio Tec., Université de Liège, Gembloux, 62p.
- Micheal, D.M. (1999). Transformation of other elements. *In*: David, M.S., Jeffry, J.F., Peter, G.H., David, A.Z. (eds), *Principles and Applications of Soil Microbiology*, New Jersey, USA: Prentice hall, Inc, 369-386 pp.
- Mondini, C., Cayuela, M.L., Sinicco, T., Sanchez-Monedero, M. A., Bertolne, E., Bardi, L. (2007). Soil application of meat and bone meal. Short-term effects on mineralization dynamics and soil biochemical and microbiological properties. *Soil Biology & Biochemistry* **40**, 462-474.
- Moniteur Belge (2009). Utilisation de déchets organiques en agriculture. Arrêté [C-2009/27131] Service Public Wallonie, Direction générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. Département du sol et des déchets, 51484-51509.
- Monkiedje, A. Spiteller, M., Fotio, D., Sukul, P. (2006). The effect of land use on soil health indicators in peri-urban agriculture in the humid forest zone of southern Cameroon. *J. Environ. Qual.*, **35**, 2402-2409.
- Moore J.M., Klose S., Tabatabai A.M. (2000). Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biol. Fertil. Soils* **31**: 200-210.
- Morel R. (1996). *Les sols cultivés*. 2^{ème} édition. Lavoisier : Techniques et Documentation, Paris, France. 389 p.
- Movahedi Naeini, S.A.R. et Cook, H.F. (2000). Influence of municipal compost on soil under maize. *Soil Use and Management* **16**, 215-221.
- Mulaji, K.C. (2006). Analyse de la gestion des déchets solides ménagers de la ville de Kinshasa (République Démocratique du Congo). TFE, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 75p.
- Mustin, M. (1987). Le compost. Gestion de la matière organique. Paris, édition François Dupuis, 954 p.
- Muzingu, B. (2010). Les sites maraichers coopérativisés de Kinshasa en RD Congo. Contraintes environnementales et stratégies des acteurs. Thèse, Faculté des Sciences Economiques, Sociales et Politiques, UCL, Belgique, 169p.
- Mvondo, A. J-P., Boukong, A., Mainam, F., Yombo, G., Njokou-Tchoutang, G., Beyegue-Djonko, H. (2002). Fertilisation des sols dans les monts Mandara à l'Extrême-Nord du Cameroun. *In Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs faces à des nouveaux défis*. Actes du colloque, 27-31 mai, Garoua, Cameroun.
- Mze, S.P. (2008). Influence d'apports en matières organiques sur l'activité biologique et la disponibilité du phosphore dans deux sols de la région des grands lacs d'Afrique. Thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 240 p.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A. (2009). Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux Sainte-Rosalie. *Agrosol*. **20 (1)** : 15-22.

- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A., Huard, S., Thibault, Y. (2004). Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol. *Agrosol*. **15 (2)** : 83-90.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A., Laverdière, M.R. (2005). Effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et certaines propriétés du sol. *Agrosol*. **16 (2)** : 57-71.
- Naman, F., Soudi, B., Chiang, C. (2001). Etat actuel de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides au Maroc. *Etude et Gestion des Sols* **8 (4)** : 269-277.
- Ngikam, E., Rousseaux, P., Vermande, P. (1993). Traitement des déchets urbains : une unité de compostage des ordures ménagères dans un quartier d'habitat spontané à Yaoundé. *Cahier Agriculture* de l'AUPELF-UREF n°2-246-9, Montpellier.
- Nyabyenda, P. (2005). *Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique*. Légumineuses alimentaires, Plantes à tubercules et racines, Céréales. Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 223 p.
- Nzaba (1983). Contribution à l'étude de l'influence des amendements calcaires sur la dynamique du phosphore des sols acides de la République Populaire du Congo et ses conséquences sur la nutrition phosphorique des plantes. Thèse de doctorat, FUSAGx, Gembloux.
- Nzuzi, L. (1999). La gestion des déchets domestiques: Bilan annuelle d'une expérience pilote de l'Hôtel de ville de Kinshasa. *Med. Fac. Landbouw. Univ. Gent*, 64/1, p 107-114.
- Nzuzi, L. (2008). Kinshasa : *ville et environnement*. Kinshasa: l'Harmattan, 282p.
- Odet, J., Musard, M., Wacquant, C. (1989). Mémento de fertilisation des cultures légumières. Paris : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes (Ctif), 398 p.
- Ogoke, I.J., Carsky, R.J., Togum, A.O., Dashiell, K.E. (2003). Maturity class and P effects on soy bean grain yield in moist savanna of West Africa. *J. Agron. Crop Sci.*, **189** : 442-427.
- Oguntoyinbo, Aduayi, F.J., Sobulo, R.A. (1991). Effectiveness of some local liming materials in Nigeria as ameliorants of soil acidity. *J. Plant Nutr.*, **19**: 999-1016.
- Öhlinger, R. (1995). Sample preparation. In : Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R. (eds) *Methods in soil biology*. Germany: Springer, 9-11p.
- Okalebo, J.R., Gatua K., Woomer P.L. (2002). Laboratory methods of soil and plant analysis: a working manual. Second edition, SACRED Africa, Nairobi, Kenya, p 128.
- Osei B.A., Kwakye P.K. (1997). Estimation of effective exchange capacity of some selected soils of Ghana based on their texture and organic carbon content. In. Ahenkorah Y., Owusu-Bennoah E., Amatepkor J. K., Dowuona G. N. N., Abokoe M. K. Quasnsh C., Kwakye P. K., Tiriku P. K. (Eds.). *Proceedings of the 14th and 15th annual general meetings of the Soil Science Society of Ghana*. Accra, Ghana: SSSG, pp. 101-105.
- Ouattara, B., Savadogo, P.W., Traoré, O., Koulibaly, B., Sedogo, M.P., Traoré, A.S. (2010). Effet des pesticides sur l'activité microbienne d'un sol ferrugineux tropical du Burkina Faso. *Camroon Journal of Experimental Biology*, **6 (1)** : 11-20.
- Pain, M. (1978). Climat. In Laclavere G. Ed. *Atlas de la République Démocratique du Congo*. Paris, éd. Jeune Afrique, p 71.

- Pain, M. (1984). Kinshasa: la ville et la cité. Etudes urbaines, ORSTOM, Paris, ???
- Paino V., Peillex J.P., Montlahuc O., Cambon A., Bianchini J.P. (1996). Municipal tropical compost: Effects on crops and soil properties. *Compost Sci. Util.* **4 (2)**: 62-69.
- Pansu, M., Gautheryrou J. (2003). L'analyse du sol. Minéralogie, organique et minérale, éd IRD, Springer-Verlag, France, p 93.
- Parkinson R.J., Fuller M.P., Groenhof A.C. (1999). An Evaluation of greenwaste compost for the production of forage maize (*Zea mays* L.). *Compost Sci. Util.* **7(1)**: 72-80.
- Pascual J.A., Hernandez M.T., Garcia C., Ayuso M. (1998). Enzymatic activities in an arid soil amended with urban organic wastes: laboratory experiment. *Bioresour. Technol.* **64**: 131-138.
- Paul, E.A., Clark, F.E. (1996). Soil microbiology and biochemistry. Second edition, California: academic press Inc, et London: academic press limited, 340 p
- Pauwels, J.M., Van Ranst, E., Verloo, M., Mvondo, ZE A. (1992). Manuel de laboratoire de pédologie. Méthodes d'analyses des sols et des plantes, Equipement, Gestion de stocks de Verrerie et des Produits Chimiques. Publication agricole 28, AGCD, Dschang-Bruxelles, p 265.
- Pauwels, L. et Nzayilu, N. (1993). Guide des arbres et arbustes de la région de Kinshasa-Brazzaville. Meise, Jardin Botanique National de Belgique, Bruxelles, 495p.
- Pedneault, A. (1994). Effets du compost sur les plantes. Québec Vert, 18-20.
- Pell M., Stenström J., Granhall U. (2006). Soil respiration. In Bloem J., Hopkins D.W., Benedetti A. (Eds.). *Microbiological methods for assessing soil quality*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 117-126.
- Pérez-de-Mora, A., Burgos, P., Madejon, E., Cabrera, F., Jackel, P., Schloter, M. (2006). Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of growth and different amendments. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 327-341.
- Pérez-Piqueres A., Edel-Herman V., Alabouvette C., Steinberg C. (2006). Response of soil microbial communities to compost amendments. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 460-470.
- Perucci, P. (1990). Effect of the addition of municipal solid waste compost on microbial biomass and enzymes activities in soil. *Biology and Fertility of Soil*, **10**: 221-226.
- Petersen, J. (2003). Nitrogen fertilizer replacement value of sewage sludge, composted household and farmyard manure. *Journal of Agricultural Science*, **140**: 169-182.
- Pierzynski, G.M., Sims J.T., Vance G.F. (2000). *Soil and Environmental Quality*. 2nd edition. Boca Raton, Florida, USA. 459 p.
- Pommel, B. (1982). Aptitude de plusieurs déchets urbains à fournir du phosphore aux cultures. *Agronomie*, **2**, 9.
- Quantin, P. (1985). Characteristics of the Vanuatu andosols. In Caldas and Yaalon (eds) *Catena supplement 7*: 100-105.
- Quenum, M., Giroux, M., Royer, R. (2004). Etude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation. *Agrosol.* **15 (2)**: 57-71.

- RDC (2009). Etude du secteur agricole. Rapport préliminaire. Bilan-Diagnostic et Note d'orientation. Ministère de l'Agriculture, Pêche et Elevage, RDC, 307p.
- RDC (2006). Document de la stratégie de croissance et de réduction de la pauvreté (DSRP). République Démocratique du Congo, 102p.
- RDC (2005). Communication initiale sur le changement climatique. Ministère de l'Environnement et Conservation de la Nature, République Démocratique du Congo (RDC), 173p.
- Recous S., Loiseau P., Machet J.M., Mary B. (1997). Transformation et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairie. In INERA (Eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Les colloques, Editions de l'INERA, Paris, France. pp. 105-120.
- Reuss, J.O., Roswall, E.C., Hopper, R.W. (1990). Aluminium solubility, calcium-aluminium exchange, and pH in acid fresh soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**:374-380.
- Rice C.W., Fabrizzi K., White P. (2007). Benefits of soil organic carbon to physical, chemical and biological properties of soils. in: Kimble J.M., Rice C.W., Red D., Mooney S., Follett R.F., Lal R. (eds). *Soil carbon management. Economic, Environmental and societal benefits*. CRS Press, Taylor and Francis group, 155-178pp.
- Richardson E.A., George T.S., Hens M., Simpson R.J. (2005). Utilisation of soil organic phosphorus by higher plants. In Turner B.L., Frossard E., Baldwin D.S. (Eds.). *Organic phosphorus in the environment*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 165-184.
- Rodrigues M., Lopez-Real J., Lee H. (1996). Use of composted societal organic wastes for sustainable crop production. In de Beltoldi M., Sequi P., Lemmes B., Papi T. (Eds.). *The Science of Composting*. Blackie Academic & Professional, London, UK, pp. 447-456.
- Römheld V., Neumann G. (2006). The rhizosphere: contribution of the soil-root interface to sustainable soil systems. In Uphoff N., Ball A.A., Fernandes E., Herren H., Husson O., Laing M., Palm C., Pretty J., Sanchez P., Sanginga N., Thies J. (Eds.). *Biological approaches to sustainable soil systems*. Taylor & Francis Group LLC., New-York, USA, pp. 91-107.
- Ros R., Pascual J.A., Garcia C., Hernandez M.T., Insam H. (2006). Hydrolase activities, microbial community in soil after long-term amendment with different composts. *Soil Biol. and Bioch.*, **(38)** 12, 3443-3452.
- Ros, M., Garcia, C., Hernandez, T. (2003). Soil microbial activity after restoration of semiarid soil by organic amendments. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**, 463-469.
- Ros, M., Klammer S., Knapp B., Alchberger K., Insam H. (2006). Long-term effect of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity. *Soil Use and Management*, **22**, 209-218.
- Ross D.J., Sparling G.P. (1993). Comparison of methods to estimate microbial C in litter and soil under Pinus radiata on coastal sand. *Soil Biol. Biochem.* **25**: 1591-1599.
- Rousseau, G. (2005). Analyses multidimensionnelles des effets de la rotation et d'un compost urbain sur la sclerotiniose du soja et de la santé du sol. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université de Laval, Québec, Canada, pp 220.
- Rowell, D.L., Wild, A. (1985). Les sols acides tropicaux. Cah. ORSTOM, *Sér. Pédo.*, **21**:7-19.

- Ruganzu, V. (2009). Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols acides par l'apport de biomasses végétale naturelle fraîche combinées à du travertin au Rwanda. Thèse de doctorat, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, Gembloux, Belgique, 199p.
- Russell A.E., Laird D. A. Mallarino A. P. (2006). Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil quality in Midwestern Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**: 249-255.
- Ryckeboer, J. (2001). Biowaste and waste composts: microbiological and hygienic aspects-suppressiveness to plant diseases. Ph.D., Applied Biological Sciences, KUL, Leuven, 247p.
- Saison C., Degrange V., Olivier R., Millard P., Commeaux C., Montagne D., Le Roux X. (2006). Alteration and resilience of the soil microbial community following compost amendment: effects of compost level and compost-borne microbial community. *Environ. Microbiol.* **8** (2): 247-257.
- Salpéteur, L. (2005). Etude de l'impact de l'apport de compost d'origine urbaine sur les caractéristiques physiques et chimiques de la matière organique dissoute et colloïdale du sol. TFE, FSAGx, Gembloux, p 70.
- Sanchez P. A., Miller R. H. (1986). Organic matter and soil fertility management on acid soils of tropics. In *Transaction of the 13th Congress of the International Society of Soil Science*, Hamburg, Volume 6. pp. 609-625.
- Sawadogo, H. (2006). Fertilisation organique et phosphate en système de culture *Zai* en milieu soudano-sahélien du Burkina Faso. Thèse de doctorat, FUSAGx, Gembloux, Belgique, p 219.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R. (1995). *Methods in Soils Biology*. Springer-Verlog Berling Heidelberg, Allemagne, 418p.
- Schvartz, C., Muller, J.-C. (2003). Indicator for evaluating soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **98**:255-262
- Schvartz, C., Muller, J.C., Decroux, J. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée. Grandes cultures et prairies. Paris, Ed. France Agricole, 414p.
- SENASSEM (2008); Catalogue varietal des cultures vivrières. Céréales (maïs, riz), Légumineuses (haricot, soja, niébé), Plantes à tubercules (manioc, patate douce, pomme de terre), Bananier. Appui du projet CTB/MINAGRI, Kinshasa, p153.
- Shaw L.J., Burns R.G. (2006). Enzymes activity profiles and soil quality. In Bloem J., Hopkins D.W., Benedetti A. (Eds.). *Microbiological methods for assessing soil quality*. CABI Publishing, Wallingford, UK. p. 158-182.
- Smith, J.L., Papendicck, R.L., Bezdicek, DK., Lynch, J.M. (1993). Soil organic matter dynamics and crop residue management. In: Metting, B. (ed), *Soil microbiology ecology, Applications in agricultural and environmental management*. New York: Marcel Dekker, Inc, 65-94 pp.
- Smicikes, K.D., Walker, P.M. and Kelly, T.R. (2008). Evaluation of compost for use as a soil amendment in corn and soybean production. *Compost Science & Utilisation*, Vol. **16** n°2, 183-191.
- Smith L.J., Paul E.A. (1990). The significance of soil biomass estimations. In Bollag J.M., Stotzky G. (Eds.). *Soil Biochemistry*. Vol. 6. Marcel Dekker, New York, USA. pp. 357-396.

- Soclo, H.H., Aguewe, M., Adjahossou, Houngue, Th. (1999). Recherche de compost type et toxicité résiduelle au Bénin. *TSM n°9*, Septembre 1999, 94^{ème} année, 9p.
- Soil Survey Staff (2006). Keys to Soil Taxonomy, 10th edition. Soil Conservation Service, USDA. Washington D.C.
- Soils Survey Staff (1975). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook N° 436. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Solaiman, Z. (2007). Measurement of microbial biomass and activity in soil. *In Advanced Techniques in Soil Microbiology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 415p.
- Sparling G.P. (1997). Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. *In Pankhurst C.E., Doubé B.M., Gupta V.V.S.R. (Eds.). Biological indicators of soil health.* CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 97-119.
- Splaring G.P. (1995). The substrat-induced respiration method. *In Alef K. and Nannipieri (eds) Méthods in applied soil microbiology and biochemistry.* London : academic press, pp 397-404.
- SPW (2010). Etude de la composition des ordures ménagères en Région Wallone en 2009-2010. Rapport final, RDC-Environnement, 97p. http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/dechets_menagers/compdm2009_2010.pdf, le 09/02/2011.
- Sullivan, D.M., Fransen, S.C., Bary, A.L., Cogger, C.G. (1998). Fertilizer nitrogen replacement value of food residuals composted with yard trimmings, paper, or wood wastes. *Compost Science and Utilization*, **6 (1)**: 6-18.
- Suzuki, M., Kamekawa, K., Sekiya, S., Shiga, H. (1990). Effect of continuous application of organic and inorganic fertilizer for six years on soil fertility and rice yield in Paddy Field. *Transaction of the 14th International Congress of Soil Science, Volume IV, Kyoto, Japon, 14-19 pp.*
- Syers, J.K., Johnson, A.E., Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. Rome: FAO, Fertilizer and plant nutrition, Bulletin, 18, 109 p.
- Sys, C. (1983). The ferralsols of Zaïre. *Proceeding of the fourth International soil classification worksop.* Agricultural Edition 4, Part I:76-110.
- Sys, C., Van Wambeke, A., Frankart, J. (1961). La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes. Publi. INEAC, Série Scient. n° 66.
- Taylor, H.M., Roberson G.M. et Parker, J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci.*, **96**: 153-156.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J.L., Hernandez, M.T. (2006b). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biology properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**, 1413-1421.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J.L., Hernandez, M.T. (2006a). Organic amendment based on fresh and compsted beet vinasse: influence on soil properties and wheat yield. *Sc. Soc. Am. J.*, **70**, 900-908.

- Tejada, M., Garcia-Martinez, A.M., Parrado, J. (2009a). Effects of vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* **77**, 238-247.
- Tejada, M., Hernandez, M.T., Garcia C. (2009b). Soil restoration composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil & Tillage Research*, **102**, 109-117.
- Tejada, M., Gonzalez J.L. (2006). Crushed cotton gin compost on soil biological properties and rice yield. *Eur. J. Agron.*, **25 (1)**: p 22-29.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L. (2003). Effects of application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland condition. *Europ. J. Agronomy* **19**, 357-368.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., Garcia-Martinez, A.M., Parrado, J. (2008b). Application of green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: effect on soil properties. *Bioresource Technology* **99**, 4949-4957.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., Garcia-Martinez, A.M., Parrado, J. (2008a). Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. *Bioresource Technology* **99**, 1758-1767.
- Teklay T., Nordgren A., Malmer A. (2006). Soil respiration characteristics of tropical soils from agricultural and forestry land-use at Wondo Genet (Ethiopia) in response to C, N and P amendments. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 125-133.
- Theodoro, H.S., Leonardos, O.H. (2006). The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **78 (4)**: 721-730.
- Tollens, E. (2004). Les défis: Sécurité alimentaire et cultures de rente pour l'exportation. Principales orientations et avantages comparatifs de l'agriculture en R.D.Congo. Table ronde sur l'agriculture en RDC, 19-20 mars, Annexe 7. Vers une stratégie de développement agricole, base solide du développement économique. Alliance Belgo-Congolaise, Ambassade de Belgique à Kinshasa, 13p.
- Traoré, O. (1998). Etude de la valeur fertilisante phosphatée des composts. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich, Suisse.
- Troeh, F.R., Thompson, L.M. (2005). Soils and soils fertility. 6th edition. Blackwell publishing, Oxford, UK, 489 p.
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A. Itävaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresour. Technol.* **72 (2)**: 169-183.
- Uzêda, M.C, Espindola, C.R., Cardoso, E. (1996). Effet d'une culture intensive sur le carbone organique et microbien du sol et ses conséquences dans la structure d'un oxisol du Brésil. Scientific registration n°2292, Symposium n°11, Poster, 6p.
- Van de Werf, H. (1990). A respiration simulation method for estimating active soil microbial biomass. Thesis in Environmental Sanitation, University of Gent, Gent, Belgium, 242p.
- Van Ranst, E., Verloo, M., Demeyer, A., Pauwels, J.M. (1999). Manual for soil chemistry and fertility laboratory. Analytical methods for soils and plants, equipments, and management of consumables, NUGI 835, Belgium, 243 pp.
- Van Wambeke, A. (1985). Sols des tropiques. Propriétés et appréciations. Wageningen, CTA, 256p.

- Vandenput, R., Van Den Abeele, M. (1956). Les principales cultures du Congo Belge. Publication des de la Direction de l'Agriculture, des Forêts et de l'Elevage, Bruxelles.
- Voundi, J.C. (1998). Utilisation des déchets de l'industrie du bois en vue de l'amélioration de la fertilité chimique de sols acides tropicaux. Thèse de doctorat, Faculteit Landbouwkundige en Toepegaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent, p 194.
- Walkley, A., Black, C.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Sci.* **63**: 261-263.
- Wass, E., Bidaux, A., Dériaz, G., Laurent, F., Touré, C., Guene, O., Adjademe, N., Diop, O., Schertenleib, R., Meyer, W., Pfammatter, R. (1996). Valorisation des déchets organiques dans les quartiers populaires des villes africaines. Centre de Coopération Suisse pour la Technologie et le Management, Vadianstrasse 42, 900 à St. Gallen, Suisse, p 126.
- Weber, J., Karczewska, A., Drozd, J., Liczinar, Jamroz, E., Kocowicz, A. (2006). Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal solid waste composts. *Soil Biol. And Biochem.*, **39 (6)**: 1294-1302.
- Willet I.R. (1994). Physical and chemical constraints to sustainable soil use under rainfed conditions in the humid tropics of Southeast Asia. In Syers J.K., Rimmer D.L. (Eds.). *Soil science and sustainable land management in the tropics*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 234-247.
- Willson T.C., Paul E.A., Harwood R.R. (2001). Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Appl. Soil Ecol.* **16**: 63-76.
- Wolf, B. (2000). The fertile triangle: The interrelationship of Air, Water and Nutrient in Maximizing soil production, Food Product Press, New York.
- Wong M.T.F., Akyeampong E., Nortcliff S., Rao M. R., Swift R. S. (1995). Initial response of maize and beans to decreased concentrations of monomeric inorganic aluminium with application of manure or tree prunings to an Oxisol in Burundi. *Plant Soil* **171**: 275-282.
- Wong M.T.F., Swift R.S. (2003). Role of organic matter in alleviating soil acidity. In Rengel Z. (Eds.). *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker Inc., New York, USA. pp. 337-358.
- WRB (2006). World reference base for soil resources, 2nd ed. World Soil Resources Report N° 103. FAO, Rome.

ANNEXES

10. Annexes

Annexe 1. Description des profils des sites étudiés

1.1 Site de Balume

Numéro du profil: KIN01

Date et description: 28/12/06

Auteur: Mulaji et Kasulu

Localisation: ± 15 Km de la nationale 2 à Bitá; village Balume, Plateau des Batéké; feuille de Kinshasa, Commune de Maluku, Kinshasa, RD Congo

Longitude: 15°52' 54,1"E ; latitude 04°06'19,0" S ; altitude : 655,9 m

Géomorphologie : physiographie du paysage (large plateau des Batéké)

Position topographique du profil: plateau

Micro relief: régulier

Pente: < 1%

Utilisation du sol et végétation: agriculture annuelle (manioc, arachide, maïs, patate douce, etc.), parfois laissé en jachère. Savane peu arbustive et couverture des herbes > 80%.

Roche mère: sable de la série des sables ocre de Kalahari

Caractéristiques de surface: cailloux et affleurement de surface néant et érosion: pas évident

Climat (Köppen) : tropical chaud et humide, type AW₄

Profondeur de la nappe: profond

Drainage: bien drainé

État hydrique durant la description: frais.

Description des profils

- 0- 75 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 YR3/2 (dark brown) à l'état frais. Structure granulaire; sol friable; présence des pores tubulaires, très fines et fines; et des racines moyennes, fines et très fines; transition distinctes.
- 75 – 100 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 YR 7/6 (redish yellow) à l'état frais. Structure granulaire; sol friable; présence des pores tubulaires, fines et très fines; pas de racines.

1.2 Site de Kimwenza

Numéro du profil: KN 02

Date de description: 05/02/07

Auteurs: Mulaji, Koy

Localisation: 3-4 Km au Sud de la mission catholique de Kimwenza, feuille de Kinshasa, Commune de Mont Ngafula, Kinshasa, R.D Congo.

Longitude: 15°17'09,5" E ; latitude : 04°27'41,9" S ; altitude: 374,2 m.

Géomorphologie: Vallée

Position topographique du profil: presque plat

Micro relief: régulier

Pente: < 1%

Utilisation du sol et végétation: agriculture annuel (manioc, arachide, soja, patate douce et légume, etc.), parfois laissé en jachère. Végétation : herbes associé au palmier, avocatier. Couverture des herbes: 15-40%.

Roche mère: sable de la série d'ocre de Kalahari

Caractéristiques de surface: cailloux et affleurement de surface néant et érosion pas évident

Climat (Köppen) : tropical chaud et humide, type AW₄

Profondeur de la nappe: profond

Drainage: bien drainé (normal)

État hydrique durant la description: frais.

Description des profils :

- 0-12/22 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 10 YR4/6 dark yellow à état frais. Structure granulaire, nombreuse racines très fins et fins, sols à consistance friable et présence des pores tubulaires, très fins et fins. Limite distincte irrégulière.
- 22-40 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5YR5/6 (strong brun) à l'état frais. Structure granulaire; sol friable, très peu de racines fins. Présence des pores tubulaires, très fins et fins et transition nette.
- 40 – 60 cm. Texture sablonneuse, sable fin de fins 7,5 YR7/6 (redish yellow) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable et présence des pores tubulaires, fins et très fins. Peu de racines et limite nette.
- 60- 70 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 YR6/6 (redish yellow) à l'état frais. Structure granulaire, présence des pores tubulaire, très fins et fins, sol friable et transition nette.
- 72 – 100 cm. Texture sablonneuse, sable fin de 7,5 YR 5/6 (strong brown) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable, présence des pores et de très peu de racines, transition nette.

1.3 Site de Mont-Amba

Numéro du profil: KIN 03

Date de description: 07/02/07

Auteur(s): Mulaji K.

Localisation: Jardin expérimental, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, Commune de Lemba, Kinshasa, R.D. Congo.

Longitude: 15°18'29,0" S; *Latitude* 04°25'01,16" EO, altitude : 450 m

Géomorphologie:

Utilisation du sol : utilisation pour agriculture expérimentale annuelle (légume & manioc)

Végétation:

Climat (Köppen): AW₄

Profondeur de nappe phréatique: très profond

Drainage: normal

Etat hydrique durant la description: frais

Description du profil :

- 0-20 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 YR 4/4 (brown strong) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable; présence de pores tubulaires, fines et très fines; et peu de racines; transition nette.
- 20-30 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 YR 5/6 (brown strong) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable; présence des pores fines et très fines; absence de racines; transition nette.
- 30-45 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 3/4 (brown strong) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable; présence des pores fines et très fines; absence de racines; transition nette.

- 45-53 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 5/8 (strong brown) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable; présence de pores fines; pas de racines; transition nette.
- 53-80 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 3/2 (dark brown) à l'état frais.
- 80-103 cm. Texture sablonneuse, sable fin de couleur 7,5 5/6 (strong brown) à l'état frais. Structure granulaire, sol friable; présence de pores fines; pas de racines; transition nette.

Annexe 2.

Relevés pluviométriques au cours des campagnes d'expérimentation de la Province de Kinshasa (Station de Kinshasa Binza)

Mois	2007	2008	2009
	P (mm)		
Janvier	140,8	138	245,5
Février	237,2	147	95,4
Mars	163,1	184	120,2
Avril	221	219	168
Mai	144,2	144	238
Juin	0,8	4,7	44
Juillet	0	2,8	5,6
Août	32,6	3,7	6,6
Septembre	35,1	39,8	56
Octobre	144,5	133	55
Novembre	262,9	156	350,6
Décembre	236,6	156	292

Annexe 3.

Normes d'interprétation des analyses chimiques des sols (ORSTOM) d'après Sawodogo (2006).

Ech (à 2 mm)	Très pauvre	Pauvre	Moyen	Riche	Très riche
P _{ass} (%)	< 0,03	0,03 à 0,05	0,05 à 0,1	0,1 à 0,2	> 0,2
P _{tot} (%)	< 0,5	0,5 à 1,0	1,0 à 1,5	1,5 à 3,0	> 3,0
N _{tot} (%)	< 0,5	0,5 à 1,0	1,0 à 1,5	1,5 à 2,5	> 2,5
Matière organique	< 10	10 à 20	20 à 30	30 à 50	> 50
Ca ⁺² méq/100g MS	< 1,0	1,0 à 2,3	2,3 à 3,5	3,5 à 7,0	> 7,0
Mg ⁺² méq/100g MS	< 0,4	0,4 à 1,0	1,0 à 1,5	1,5 à 3,0	> 3,0
K ⁺ méq/100g MS	< 0,1	0,1 à 0,2	0,2 à 0,4	0,4 à 0,8	> 0,8
Na ⁺ méq/100g MS	< 0,1	0,1 à 0,3	0,3 à 0,7	0,7 à 2,0	> 2,0
SBE méq/100g MS	< 2	2 à 5	5 à 10	10 à 15	> 15
CEC méq/100g MS	< 5	5 à 10	10 à 25	25 à 40	> 40
TS (%)	< 15	15 à 40	40 à 60	60 à 90	> 90
C/N	Très bas < 8	Bas 8 à 10	Moyen 10 à 15	Elevé 15 à 25	Très élevé > 25
K/CEC	Carence en K < 1	Besoin élevé en K 1 à 2	Besoin faible en K 2 à 5	Pas besoin immédiat	
Mg/K	Carence en Mg < 2	Bon 2 à 20	Carence en K > 20		
N/P	Carence en P > 2	Carence en N < 2	Carence en K		

P_{ass} : phosphore assimilable, *P_{tot}* : phosphore total, *N_{tot}*: azote total, *SBE*: somme des bases échangeables, *CEC* : capacité d'échange cationique, *TS* : taux de saturation.

Annexes 4. Données statistiques relatives aux paramètres chimiques, microbiologiques et le rendement à la fin des essais à Kimwenza, Mont Amba et Balume

4.1 ANOVA à un facteur pour le pH-H₂O à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1,2884	0,2577	11,82	0,000
Error	12	0,2615	0,0218		
Total	17	1,5500			

4.2 ANOVA à un facteur pour le pH-H₂O à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2,91540	0,58308	65,88	0,000
Error	12	0,10620	0,00885		
Total	17	3,02160			

4.3 ANOVA à un facteur pour le pH-H₂O à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,83496	0,76699	160,72	0,000
Error	12	0,05727	0,00477		
Total	17	3,89223			

4.4 ANOVA à un facteur pour le COT à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,72647	0,74529	143,94	0,000
Error	12	0,06213	0,00518		
Total	17	3,78860			

4.5 ANOVA à un facteur pour le COT à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	4,40665	0,88133	110,63	0,000
Error	12	0,09560	0,00797		
Total	17	4,50225			

2.6 ANOVA à un facteur pour le COT à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	13,7317	2,7463	52,91	0,000
Error	12	0,6229	0,0519		
Total	17	14,3546			

4.7 ANOVA à un facteur pour le N_{tot} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,013780	0,002756	10,12	0,001
Error	12	0,003267	0,000272		
Total	17	0,017048			

4.8 ANOVA à un facteur pour le N_{tot} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,016361	0,003272	12,80	0,000
Error	12	0,003067	0,000256		
Total	17	0,019428			

4.9 ANOVA à un facteur pour le N_{tot} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,023111	0,004622	9,79	0,001
Error	12	0,005667	0,000472		
Total	17	0,028778			

4.10 ANOVA à un facteur pour le N_{org} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1447994	289599	328,80	0,000
Error	12	10569	881		
Total	17	1458563			

4.11 ANOVA à un facteur pour le N_{org} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1626358	325272	244,84	0,000
Error	12	15942	1329		
Total	17	1642300			

4.12 ANOVA à un facteur pour le N_{org} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2192074	438415	118,47	0,000
Error	12	44407	3701		
Total	17	2236481			

4.13 ANOVA à un facteur pour le N_{min} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2094,12	418,82	74,63	0,000
Error	12	67,35	5,61		
Total	17	2161,47			

4.14 ANOVA à un facteur pour le N_{min} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	839,90	167,98	28,51	0,000
Error	12	70,69	5,89		
Total	17	910,59			

4.15 ANOVA à un facteur pour le N_{min} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2834,27	566,85	187,94	0,000
Error	12	36,19	3,02		
Total	17	2870,47			

4.16 ANOVA à un facteur pour le P_{tot} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	118145	23629	226,13	0,000
Error	12	1254	104		
Total	17	119399			

4.17 ANOVA à un facteur pour le P_{tot} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	183369	36674	157,36	0,000
Error	12	2797	233		
Total	17	186166			

4.18 ANOVA à un facteur pour le P_{tot} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	177443	35489	81,37	0,000
Error	12	5234	436		
Total	17	182676			

4.19 ANOVA à un facteur pour le P_{org} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	69234	13847	73,11	0,000
Error	12	2273	189		
Total	17	71507			

4.20 ANOVA à un facteur pour le P_{org} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	134219	26844	59,59	0,000
Error	12	5405	450		
Total	17	139625			

4.21 ANOVA à un facteur pour le P_{org} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	200359	40072	164,97	0,000
Error	12	2915	243		
Total	17	203273			

4.22 ANOVA à un facteur pour le P_{ass} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	488,73	97,75	20,07	0,000
Error	12	58,45	4,87		
Total	17	547,18			

4.23 ANOVA à un facteur pour le P_{ass} à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2174,86	434,97	172,42	0,000
Error	12	30,27	2,52		
Total	17	2205,13			

4.24 ANOVA à un facteur pour le P_{ass} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1732,97	346,59	117,18	0,000
Error	12	35,49	2,96		
Total	17	1768,46			

4.25 ANOVA à un facteur pour la CEC à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	48,6034	9,7207	422,84	0,000
Error	12	0,2759	0,0230		
Total	17	48,8793			

4.26 ANOVA à un facteur pour la CEC à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	60,5816	12,1163	495,11	0,000
Error	12	0,2937	0,0245		
Total	17	60,8753			

4.27 ANOVA à un facteur pour la CEC à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	152,140	30,428	52,05	0,000
Error	12	7,015	0,585		
Total	17	159,155			

4.28 ANOVA à un facteur pour la TSB_{eff} (%) à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	6989,3	1397,9	138,45	0,000
Error	12	121,2	10,1		
Total	17	7110,4			

4.29 ANOVA à un facteur pour la TSB_{eff} (%) à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	6815,79	1363,16	206,24	0,000
Error	12	79,31	6,61		
Total	17	6895,10			

4.30 ANOVA à un facteur pour la TS_{eff} (%) à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	10394,57	2078,91	241,07	0,000
Error	12	103,48	8,62		
Total	17	10498,05			

4.31 ANOVA à un facteur pour la $TS_{\text{eff}} \text{ Al}$ (%) à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	15893,4	3178,7	313,25	0,000
Error	12	121,8	10,1		
Total	17	16015,1			

4.32 ANOVA à un facteur pour la $TS_{\text{eff}} \text{ Al}$ (%) à la quatrième saison au Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	16745,04	3349,01	344,29	0,000
Error	12	116,73	9,73		
Total	17	16861,77			

4.33 ANOVA à un facteur pour la $TS_{\text{eff}} \text{ Al}$ (%) à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	17797,09	3559,42	869,65	0,000
Error	12	49,12	4,09		
Total	17	17846,21			

4.34 ANOVA à un facteur pour le C_{mic} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	8682,6	1736,5	32,70	0,000
Error	12	637,3	53,1		
Total	17	9319,9			

4.35 ANOVA à un facteur pour le C_{mic} à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	8107,3	1621,5	29,47	0,000
Error	12	660,3	55,0		
Total	17	8767,7			

4.36 ANOVA à un facteur pour le C_{mic} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	15501,9	3100,4	48,01	0,000
Error	12	775,0	64,6		
Total	17	16276,9			

4.37 ANOVA à un facteur pour le N_{mic} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	210,802	42,160	107,81	0,000
Error	12	4,693	0,391		
Total	17	215,495			

4.38 ANOVA à un facteur pour le N_{mic} à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	602,426	120,485	239,78	0,000
Error	12	6,030	0,502		
Total	17	608,455			

4.39 ANOVA à un facteur pour le N_{mic} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1232,66	246,53	62,08	0,000
Error	12	47,66	3,97		
Total	17	1280,32			

4.40 ANOVA à un facteur pour la RB à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,4349	0,0870	6,90	0,003
Error	12	0,1513	0,0126		
Total	17	0,5862			

4.41 ANOVA à un facteur pour la RB à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1,27176	0,25435	95,78	0,000
Error	12	0,03187	0,00266		
Total	17	1,30363			

4.42 ANOVA à un facteur pour la RB à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,10905	0,62181	137,16	0,000
Error	12	0,05440	0,00453		
Total	17	3,16345			

4.43 ANOVA à un facteur pour la RIS à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	71,1675	14,2335	421,39	0,000
Error	12	0,4053	0,0338		
Total	17	71,5729			

4.44 ANOVA à un facteur pour la RIS à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	70,692	14,138	32,66	0,000
Error	12	5,194	0,433		
Total	17	75,886			

4.45 ANOVA à un facteur pour la RIS à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1042,54	208,51	136,38	0,000
Error	12	18,35	1,53		
Total	17	1060,88			

4.46 ANOVA à un facteur pour le C_{fm} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	235482	47096	83,26	0,000
Error	12	6787	566		
Total	17	242270			

4.47 ANOVA à un facteur pour le C_{fm} à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	360090	72018	142,03	0,000
Error	12	6085	507		
Total	17	366175			

4.48 ANOVA à un facteur pour le C_{fm} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	701220	140244	76,72	0,000
Error	12	21936	1828		
Total	17	723156			

4.49 ANOVA à un facteur pour l'APA à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,14967	0,02993	19,38	0,000
Error	12	0,01853	0,00154		
Total	17	0,16820			

4.50 ANOVA à un facteur pour l'APA à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	0,12820	0,02564	18,53	0,000
Error	12	0,01660	0,00138		
Total	17	0,14480			

4.51 ANOVA à un facteur pour l'APA à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitements	5	0,24864	0,04973	17,55	0,000
Error	12	0,03400	0,00283		
Total	17	0,28264			

4.52 ANOVA à un facteur pour l'AU_{nt} à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1186,47	237,29	159,80	0,000
Error	12	17,82	1,48		
Total	17	1204,28			

4.53 ANOVA à un facteur pour l'AU_{nt} à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1373,20	274,64	139,15	0,000
Error	12	23,68	1,97		
Total	17	1396,89			

4.54 ANOVA à un facteur pour l'AU_{nt} à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1468,47	293,69	183,87	0,000
Error	12	19,17	1,60		
Total	17	1487,64			

4.55 ANOVA à un facteur pour l'AU_t à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3129,18	625,84	72,09	0,000
Error	12	104,18	8,68		
Total	17	3233,36			

4.56 ANOVA à un facteur pour l'AU_t à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	4383,76	876,75	184,27	0,000
Error	12	57,09	4,76		
Total	17	4440,86			

4.57 ANOVA à un facteur pour l'AU_t à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	4577,89	915,58	261,94	0,000
Error	12	41,94	3,50		
Total	17	4619,83			

4.58 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'oseille à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1,57000	0,31400	41,23	0,000
Error	12	0,09140	0,00762		
Total	17	1,66140			

4.59 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'oseille à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,94216	0,18843	52,75	0,000
Error	12	0,04287	0,00357		
Total	17	0,98503			

4.60 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'oseille à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	0,83432	0,16686	50,91	0,000
Error	12	0,03933	0,00328		
Total	17	0,87365			

4.61 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'arachide à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	1,83743	0,36749	105,33	0,000
Error	12	0,04187	0,00349		
Total	17	1,87929			

4.62 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'arachide à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,04192	0,60838	122,22	0,000
Error	12	0,05973	0,00498		
Total	17	3,10165			

2.63 ANOVA à un facteur pour le Rdt d'arachide à la quatrième saison Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2,8253	0,5651	10,54	0,000
Error	12	0,6432	0,0536		
Total	17	3,4685			

4.64 ANOVA à un facteur pour le Rdt de soja à la quatrième saison à Kimwenza

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	2,76820	0,55364	100,97	0,000
Error	12	0,06580	0,00548		
Total	17	2,83400			

4.65 ANOVA à un facteur pour le Rdt soja à la quatrième saison à Mont Amba

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,29318	0,65864	129,85	0,000
Error	12	0,06087	0,00507		
Total	17	3,35404			

4.66 ANOVA à un facteur pour le Rdt de soja à la quatrième saison à Balume

Source	DF	SS	MS	F	P
Traitement	5	3,80280	0,76056	152,62	0,000
Error	12	0,05980	0,00498		
Total	17	3,86260			

4.67 Matrice de corrélation (Pearson) entre quelques paramètres choisis à la dernière saison à Kimwenza.

Seuil de signification $\alpha = 0,05$

	pH	COT	Ntot	Ptot	CEC	TS _{eff} Al	TS B _{eff}	RB	Cmic	Unt	APA	Rdt Os	Rdt Ar	Rdt So
pH	1,000													
COT	0,856	1,000												
Ntot	0,810	0,816	1,000											
Ptot	0,861	0,983	0,822	1,000										
CEC	0,843	0,947	0,811	0,982	1,000									
TS _{eff} Al	-0,810	-0,911	-0,840	-0,954	-0,984	1,000								
TS B _{eff}	0,853	0,919	0,825	0,961	0,981	-0,984	1,00							
RB	0,607	0,759	0,526	0,764	0,797	-0,751	0,738	1,000						
Cmic	0,824	0,888	0,799	0,923	0,953	-0,953	0,947	0,751	1,000					
Unt	0,846	0,975	0,823	0,964	0,936	-0,896	0,887	0,783	0,851	1,000				
APA	0,924	0,959	0,751	0,948	0,92	-0,871	0,903	0,734	0,89	0,922	1,000			
Rdt Os	0,880	0,865	0,856	0,844	0,765	-0,739	0,783	0,502	0,727	0,85	0,848	1,000		
Rdt Ar	0,904	0,883	0,836	0,872	0,794	-0,774	0,81	0,494	0,756	0,847	0,884	0,961	1,000	
Rdt SO	0,886	0,849	0,825	0,825	0,735	-0,708	0,769	0,451	0,691	0,804	0,846	0,977	0,976	1,000

Seuil de signification $\alpha = 0,05$

4.68 Matrice de corrélation (Pearson) entre quelques paramètres choisis à la dernière saison au Mont Amba

	pH	COT	Ntot	Ptot	CEC	TS _{eff} Al	TS B _{eff}	RB	Cmic	Unt	APA	Rdt Os	Rdt Ar	Rdt So
pH	1,000													
COT	0,933	1,000												
Ntot	0,942	0,879	1,000											
Ptot	0,946	0,982	0,878	1,000										
CEC	0,843	0,978	0,869	0,966	1,000									
TS _{eff} Al	-0,907	-0,963	-0,823	-0,972	-0,966	1,000								
TS B _{eff}	0,939	0,963	0,847	0,981	0,962	-0,983	1,000							
RB	0,996	0,924	0,911	0,939	0,959	-0,923	0,738	1,000						
Cmic	0,952	0,907	0,847	0,935	0,948	-0,926	0,933	0,944	1,000					
Unt	0,969	0,918	0,920	0,942	0,895	-0,868	0,912	0,925	0,913	1,000				
APA	0,951	0,894	0,875	0,894	0,915	-0,850	0,882	0,937	0,874	0,906	1,000			
Rdt Os	0,958	0,925	0,854	0,938	0,927	-0,872	0,917	0,946	0,930	0,962	0,920	1,000		
Rdt Ar	0,953	0,888	0,899	0,910	0,888	-0,826	0,871	0,924	0,920	0,974	0,920	0,955	1,000	
Rdt SO	0,831	0,821	0,870	0,868	0,805	-0,768	0,831	0,855	0,884	0,970	0,859	0,921	0,963	1,000

4.69 Matrice de corrélation (Pearson) entre quelques paramètres choisis à la dernière saison à Balume.

	pH	COT	Ntot	Ptot	CEC	TS _{eff} Al	TS _{B_{eff}}	RB	Cmic	Unt	APA	Rdt Os	Rdt Ar	Rdt So
pH	1,000													
COT	0,973	1,000												
Ntot	0,902	0,831	1,000											
Ptot	0,993	0,955	0,937	1,000										
CEC	0,954	0,944	0,911	0,959	1,000									
TS _{eff} Al	-0,934	-0,939	-0,817	-0,915	-0,909	1,000								
TS _{B_{eff}}	0,950	0,951	0,848	0,935	0,925	-0,988	1,00							
RB	0,972	0,937	0,868	0,969	0,950	-0,932	0,940	1,000						
Cmic	0,943	0,925	0,796	0,929	0,895	-0,934	0,945	0,975	1,000					
Unt	0,989	0,943	0,909	0,988	0,928	-0,933	0,950	0,971	0,949	1,000				
APA	0,952	0,915	0,936	0,967	0,929	-0,869	0,919	0,912	0,873	0,950	1,000			
Rdt Os	0,920	0,850	0,879	0,925	0,855	-0,820	0,856	0,904	0,857	0,943	0,909	1,000		
Rdt Ar	0,783	0,694	0,671	0,778	0,690	-0,623	0,646	0,801	0,758	0,787	0,719	0,850	1,000	
Rdt SO	0,919	0,849	0,890	0,921	0,838	-0,840	0,866	0,895	0,876	0,945	0,882	0,971	0,822	1,000

Seuil de signification $\alpha = 0,05$

Annexe 5

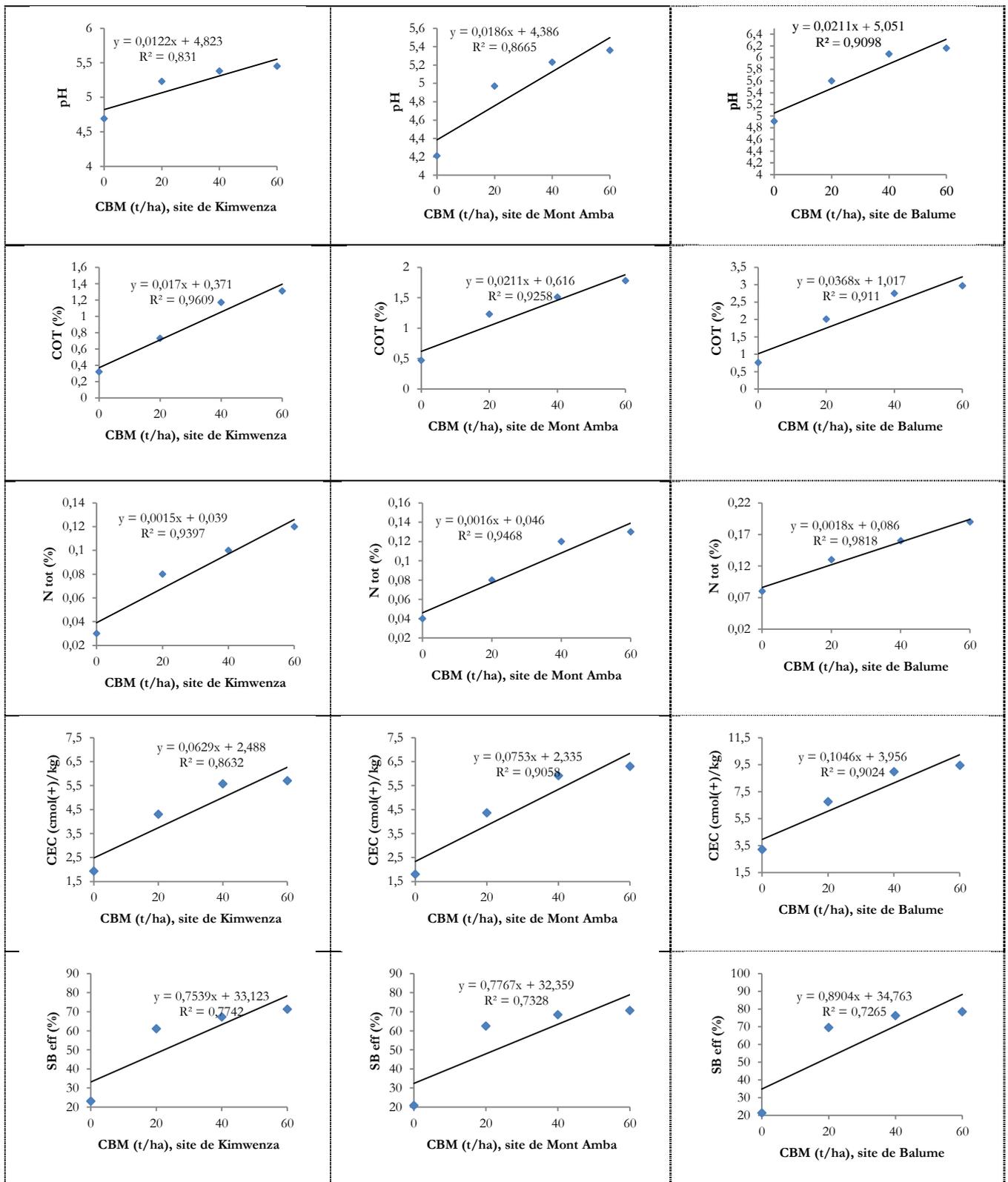


Figure a. Relation entre la dose de compost apportée par saison des biodéchets ménagers (CBM) et quelques propriétés physico-chimiques des sols à la fin de l'expérimentation, dans les 3 sites. Relations significatives au niveau 1% (**) et 5% (*) selon le test de corrélation Pearson ; ns : non significative.

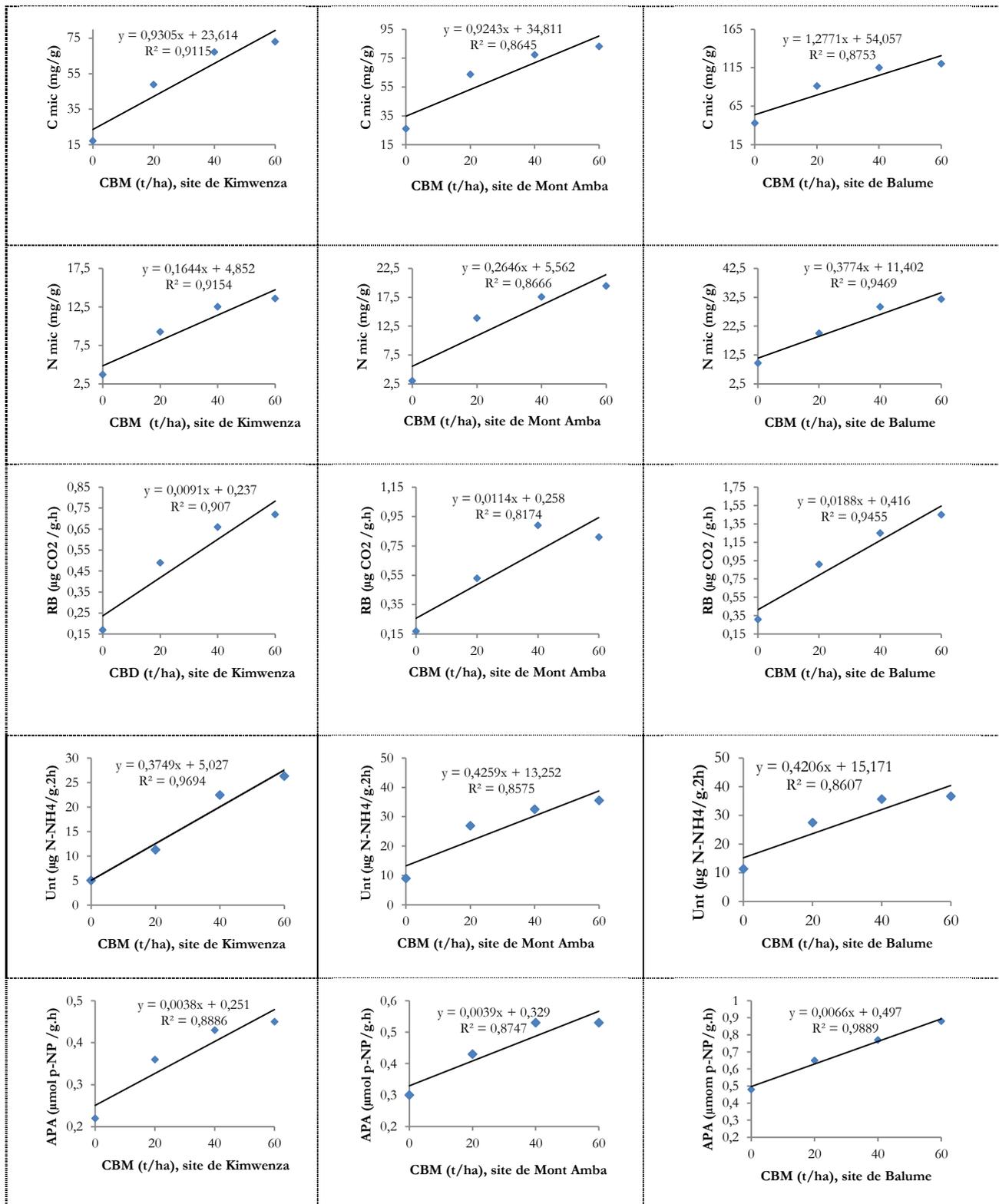


Figure b. Relation entre la dose de compost apportée par saison des biodéchets ménagers (CBM) et quelques propriétés biologiques des sols à la fin de l'expérimentation, dans les 3 sites. Relation significatives au niveau de 1% (**) et 5% (*) selon le test de corrélation de Pearson ; ns : non significative.

Annexe 6.

6.1 Rendements de différentes cultures utilisées par saison culturales en fonction des amendements appliqués sur les sites de Kimwenza, Mont Amba et Balume. Seule la partie récoltée est prise en compte.

Tr	Kimwenza											
	Oseille				Arachide				Soja			
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4
	Rdt (t.ha ⁻¹ MS)				Rdt (t.ha ⁻¹ MS)				Rdt (t.ha ⁻¹ MS)			
T0	0,45 (0,04)	0,39 (0,05)	0,34 (0,03)	0,28 (0,01)	0,20 (0,02)	0,21 (0,02)	0,23 (0,03)	0,14 (0,02)	0,25 (0,02)	0,19 (0,04)	0,23 (0,05)	0,20 (0,02)
T1	0,51 (0,05)	0,68 (0,07)	0,72 (0,07)	0,77 (0,04)	0,48 (0,04)	0,59 (0,03)	0,66 (0,04)	0,79 (0,08)	0,38 (0,06)	0,54 (0,04)	0,82 (0,09)	0,95 (0,03)
T2	0,72 (0,06)	0,85 (0,12)	0,94 (0,04)	1,01 (0,11)	0,53 (0,03)	0,75 (0,04)	0,89 (0,03)	1,03 (0,06)	0,79 (0,03)	1,04 (0,06)	1,11 (0,09)	1,21 (0,11)
T3	0,87 (0,06)	1,06 (0,07)	1,11 (0,06)	1,21 (0,10)	0,55 (0,04)	0,82 (0,03)	1,00 (0,04)	1,14 (0,05)	0,99 (0,05)	1,09 (0,07)	1,28 (0,07)	1,42 (0,03)
T4	0,41 (0,01)	0,56 (0,02)	0,65 (0,04)	0,70 (0,04)	0,39 (0,04)	0,53 (0,03)	0,61 (0,02)	0,69 (0,04)	0,46 (0,05)	0,60 (0,03)	0,70 (0,05)	0,85 (0,06)
T5	0,51 (0,07)	0,72 (0,07)	0,78 (0,05)	0,82 (0,07)	0,40 (0,03)	0,60 (0,01)	0,67 (0,03)	0,77 (0,06)	0,63 (0,02)	0,79 (0,08)	0,90 (0,05)	1,09 (0,06)
CV (%)	28,17	29,77	31,29	35,94	50,43	33,30	35,91	41,87	43,02	43,55	39,55	40,18
	Mont Amba											
T0	0,67 (0,02)	0,65 (0,08)	0,57 (0,06)	0,53 (0,06)	0,29 (0,05)	0,21 (0,04)	0,19 (0,03)	0,17 (0,07)	0,30 (0,04)	0,26 (0,03)	0,23 (0,04)	0,22 (0,01)
T1	0,68 (0,04)	0,79 (0,05)	0,86 (0,04)	0,92 (0,03)	0,68 (0,07)	0,61 (0,03)	0,81 (0,07)	0,87 (0,03)	0,72 (0,10)	0,91 (0,13)	0,98 (0,05)	1,19 (0,07)
T2	0,89 (0,11)	0,90 (0,02)	1,02 (0,05)	1,12 (0,07)	0,81 (0,04)	0,85 (0,04)	1,00 (0,07)	1,28 (0,07)	0,80 (0,08)	1,00 (0,09)	1,23 (0,08)	1,38 (0,03)
T3	0,84 (0,07)	0,95 (0,04)	1,11 (0,09)	1,20 (0,06)	1,04 (0,05)	1,20 (0,06)	1,35 (0,08)	1,42 (0,09)	1,25 (0,04)	1,32 (0,07)	1,41 (0,04)	1,58 (0,03)
T4	0,58 (0,03)	0,63 (0,03)	0,70 (0,03)	0,73 (0,04)	0,42 (0,03)	0,52 (0,03)	0,58 (0,07)	0,65 (0,03)	0,48 (0,03)	0,57 (0,07)	0,76 (0,04)	0,97 (0,05)
T5	0,64 (0,04)	0,69 (0,03)	0,75 (0,02)	0,81 (0,02)	0,72 (0,03)	0,63 (0,02)	0,75 (0,07)	0,83 (0,03)	0,78 (0,02)	0,95 (0,08)	1,00 (0,07)	1,05 (0,04)
CV (%)	15,43	15,95	22,20	25,74	37,39	45,30	45,72	47,17	40,98	40,38	40,17	40,27
	Balume											
T0	0,72 (0,05)	0,70 (0,01)	0,63 (0,05)	0,60 (0,06)	0,40 (0,05)	0,36 (0,04)	0,33 (0,02)	0,36 (0,04)	0,33 (0,02)	0,31 (0,05)	0,25 (0,03)	0,26 (0,03)
T1	0,76 (0,04)	0,85 (0,04)	0,93 (0,09)	1,02 (0,03)	0,54 (0,04)	0,78 (0,07)	0,85 (0,06)	1,07 (0,02)	0,43 (0,04)	0,62 (0,06)	0,87 (0,06)	1,23 (0,03)
T2	0,81 (0,05)	0,93 (0,04)	1,02 (0,10)	1,17 (0,03)	0,62 (0,04)	0,82 (0,06)	1,11 (0,09)	1,35 (0,02)	0,83 (0,07)	0,97 (0,06)	1,26 (0,05)	1,45 (0,07)
T3	0,86 (0,05)	0,95 (0,04)	1,10 (0,07)	1,28 (0,07)	0,73 (0,08)	0,87 (0,02)	1,29 (0,06)	1,55 (0,07)	0,87 (0,04)	1,08 (0,06)	1,38 (0,04)	1,70 (0,07)
T4	0,74 (0,02)	0,77 (0,05)	0,81 (0,09)	0,85 (0,05)	0,49 (0,03)	0,67 (0,02)	0,70 (0,04)	0,75 (0,06)	0,40 (0,01)	0,51 (0,03)	0,67 (0,05)	0,85 (0,06)
T5	0,76 (0,03)	0,81 (0,04)	0,94 (0,06)	0,95 (0,05)	0,52 (0,02)	0,70 (0,04)	0,78 (0,06)	1,06 (0,04)	0,58 (0,05)	0,69 (0,03)	0,97 (0,06)	1,10 (0,07)
CV (%)	6,04	10,43	16,76	22,47	18,84	23,78	36,18	37,90	36,57	37,61	41,60	41,85

T0 : témoin; T1 : 20 t.ha⁻¹ M; T2 : 40 t.ha⁻¹ MB; T3 : 60 t.ha⁻¹ MB; T4 : 100 kg.ha⁻¹ (NPK); T5 : 200 kg.ha⁻¹ (NPK); SC (1,2,3,4) : saison culturale; chiffre () : écart-type.

6.2 Efficience agronomique des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) pour la culture de l'oseille par saison culturale en fonction des amendements sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.

Kimwenza												
Tr	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4
	kg MS/kg N				kg MS/kg P ₂ O ₅				Kg MS/kg K ₂ O			
T1	0,20 (0,30)	0,59 (0,17)	0,87 (0,17)	1,15 (0,17)	0,97 (1,45)	0,48 (0,72)	3,96 (0,77)	5,04 (0,76)	0,81 (1,21)	2,39 (0,69)	3,43 (0,67)	4,43 (0,66)
T2	0,44 (0,16)	0,60 (0,13)	0,78 (0,10)	0,95 (0,13)	2,12 (0,76)	2,92 (0,64)	3,55 (0,46)	4,17 (0,58)	1,80 (0,65)	2,48 (0,55)	3,10 (0,40)	3,70 (0,51)
T3	0,47 (0,11)	0,61 (0,07)	0,73 (0,01)	0,86 (0,04)	2,26 (0,53)	2,94 (0,32)	3,33 (0,04)	3,77 (0,17)	1,88 (0,44)	2,45 (0,27)	2,87 (0,04)	3,31 (0,15)
T4	-	5,42 (0,34)	12,31 (0,13)	18,40 (0,87)	-	8,12 (0,51)	18,47 (0,20)	27,60 (1,31)	-	3,61 (0,23)	8,21 (0,09)	12,27 (0,58)
T5	-	8,19 (0,55)	11,62 (0,17)	14,55 (0,69)	-	12,29 (0,82)	17,43 (0,26)	21,82 (1,04)	1,67 (0,82)	5,46 (0,36)	7,75 (1,25)	9,70 (0,51)
Mont Amba												
T1	0,03 (0,22)	0,26 (0,07)	0,52 (0,01)	0,76 (0,01)	0,16 (1,05)	1,24 (0,32)	2,37 (0,04)	3,35 (0,07)	0,14 (0,88)	1,04 (0,27)	2,05 (0,04)	2,94 (0,06)
T2	0,37 (0,23)	0,40 (0,07)	0,54 (0,03)	0,69 (0,02)	1,77 (1,22)	1,91 (0,33)	2,46 (0,14)	3,04 (0,08)	1,51 (0,95)	1,62 (0,28)	2,15 (0,12)	2,69 (0,07)
T3	0,20 (0,10)	0,27 (0,03)	0,40 (0,02)	0,52 (0,04)	0,95 (0,47)	1,28 (0,15)	1,82 (0,08)	2,77 (0,17)	0,79 (0,39)	1,07 (0,13)	1,57 (0,07)	1,99 (0,15)
T4	-	-	-	4,58 (3,85)	-	-	-	6,87 (5,78)	-	-	-	3,06 (2,57)
T5	-	-	-	4,86 (2,17)	-	-	-	7,29 (3,25)	-	-	-	3,24 (1,41)
Balume												
T1	0,29 (0,02)	0,31 (0,05)	0,57 (0,14)	0,82 (0,06)	1,40 (0,08)	1,51 (0,23)	2,58 (0,62)	3,62 (0,28)	1,17 (0,06)	1,26 (0,19)	2,23 (0,54)	3,18 (0,24)
T2	0,14 (0,01)	0,28 (0,04)	0,42 (0,01)	0,59 (0,02)	0,70 (0,04)	1,33 (0,22)	1,93 (0,03)	2,59 (0,08)	0,59 (0,03)	1,13 (0,18)	1,68 (0,03)	2,29 (0,07)
T3	0,14 (0,01)	0,21 (0,03)	0,333 (0,02)	0,47 (0,01)	0,70 (0,04)	1,03 (0,13)	1,52 (0,08)	2,05 (0,05)	0,58 (0,04)	0,86 (0,11)	1,31 (0,07)	1,80 (0,04)
T4	-	3,61 (0,52)	7,41 (1,39)	10,69 (3,67)	-	5,42 (0,78)	11,11 (2,08)	16,04 (5,50)	-	2,41 (0,35)	4,94 (0,92)	7,13 (2,44)
T5	-	3,13 (1,00)	6,14 (0,60)	8,40 (0,50)	-	4,90 (1,54)	9,65 (0,84)	12,66 (0,80)	1,20 (0,57)	2,18 (0,13)	4,29 (0,37)	5,63 (0,35)

T1 : 20 t.ha⁻¹ M; T2 : 40 t.ha⁻¹ MB; T3 : 60 t.ha⁻¹ MB; T4 : 100 kg.ha⁻¹ (NPK); T5 : 200 kg.ha⁻¹ (NPK);
SC(1,2,3,4) : saison culturale; chiffre () : écart-type.

6.3 Efficience agronomique des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) pour la culture de l'arachide par saison culturale en fonction des amendements sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.

Tr	Kimwenza											
	SC1 SC2 SC3 SC4				SC1 SC2 SC3 SC4				SC1 SC2 SC3 SC4			
	kg MS/kg N				kg MS/kg P ₂ O ₅				Kg MS/kg K ₂ O			
T1	0,94 (0,12)	1,10 (0,05)	1,29 (0,09)	1,99 (0,03)	4,52 (0,57)	5,30 (0,23)	8,76 (0,59)	6,99 (0,13)	3,78 (0,48)	4,44 (0,19)	5,05 (0,34)	6,15 (0,12)
T2	0,55 (0,03)	0,53 (0,05)	0,90 (0,05)	1,11 (0,03)	2,63 (0,14)	4,10 (0,22)	4,09 (0,21)	4,87 (0,13)	2,24 (0,12)	2,19 (0,20)	3,58 (0,19)	4,32 (0,12)
T3	0,16 (0,08)	0,53 (0,02)	0,68 (0,02)	0,83 (0,02)	0,75 (0,38)	3,09 (0,07)	3,08 (0,07)	3,66 (0,08)	0,63 (0,32)	2,14 (0,09)	2,67 (0,06)	3,22 (0,07)
T4	15,83 (0)	21,11 (3,82)	24,84 (2,32)	30,07 (2,02)	23,75 (0)	31,57 (5,74)	37,22 (3,47)	45,10 (3,02)	10,56 (3,64)	14,07 (2,55)	16,54 (1,54)	20,05 (1,34)
T5	8,47 (1,08)	12,36 (1,00)	14,40 (0,76)	17,33 (0,57)	12,71 (2,52)	18,54 (1,50)	21,60 (1,13)	25,99 (0,85)	5,65 (1,12)	8,24 (0,66)	9,60 (0,50)	11,55 (0,38)
Mont Amba												
T1	1,32 (0,07)	1,49 (0,16)	1,67 (0,14)	1,94 (0,20)	6,34 (0,33)	7,18 (0,76)	7,58 (0,63)	8,51 (0,90)	5,32 (0,28)	6,01 (0,64)	6,56 (0,55)	7,48 (0,79)
T2	0,87 (0,15)	1,05 (0,06)	1,16 (0,11)	1,41 (0,03)	4,22 (0,70)	5,07 (0,28)	5,29 (0,52)	6,20 (0,12)	3,58 (0,60)	4,30 (0,24)	4,62 (0,45)	5,49 (0,11)
T3	0,84 (0,01)	1,02 (0,00)	1,15 (0,05)	1,25 (0,01)	4,05 (0,03)	4,94 (0,01)	5,20 (0,23)	5,57 (0,04)	3,38 (0,02)	4,12 (0,01)	4,48 (0,20)	4,89 (0,04)
T4	10,56 (6,47)	22,36 (0,22)	22,87 (3,19)	27,08 (1,03)	15,83 (9,70)	33,54 (0,78)	34,31 (4,78)	40,63 (1,55)	7,64 (4,31)	14,91 (0,35)	15,25 (2,12)	18,05 (0,69)
T5	17,78 (4,93)	19,65 (1,21)	19,49 (2,39)	21,49 (0,69)	26,67 (7,40)	29,48 (1,81)	29,24 (3,58)	32,24 (1,09)	11,85 (3,29)	13,10 (0,80)	12,99 (1,53)	14,33 (0,46)
Balume												
T1	0,47 (0,33)	0,93 (0,35)	1,28 (0,20)	1,64 (0,18)	2,26 (1,58)	4,49 (1,68)	5,79 (0,91)	7,20 (0,78)	1,89 (1,32)	3,76 (1,41)	8,31 (0,90)	6,34 (0,69)
T2	0,37 (0,15)	0,56 (0,16)	0,86 (0,07)	1,12 (0,06)	1,77 (0,72)	2,73 (0,77)	3,92 (0,33)	4,93 (0,28)	1,51 (0,62)	2,32 (0,66)	3,42 (0,28)	4,37 (0,24)
T3	0,36 (0,15)	0,47 (0,08)	0,57 (0,06)	0,91 (0,02)	1,46 (0,12)	2,25 (0,41)	2,57 (0,26)	4,01 (0,11)	1,45 (0,59)	1,88 (0,34)	2,22 (0,23)	3,51 (0,09)
T4	7,22 (1,71)	17,50 (2,12)	21,85 (2,93)	24,51 (4,20)	10,83 (2,57)	26,25 (3,19)	32,78 (4,39)	36,77 (6,30)	4,81 (1,14)	11,67 (1,42)	14,57 (1,95)	16,34 (2,80)
T5	5,00 (3,05)	9,58 (3,01)	12,64 (3,05)	16,77 (2,28)	7,50 (4,59)	14,38 (4,51)	18,96 (4,57)	25,16 (3,43)	3,33 (2,04)	6,39 (2,01)	8,43 (2,03)	11,20 (1,52)

T1 : 20 t.ba⁻¹ M; T2 : 40 t.ba⁻¹ MB; T3 : 60 t.ba⁻¹ MB; T4 : 100 kg.ba⁻¹ (NPK); T5 : 200 kg.ba⁻¹ (NPK); SC(1,2,3,4): saison culturale ; chiffre () : écart-type.

6.4 Efficience agronomique des éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O) pour la culture de soja par saison culturale en fonction des amendements sur les sites de Kimwenza, du Mont Amba et de Balume.

Kimwenza												
Tr	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4
	kg MS/kg N				kg MS/kg P ₂ O ₅				Kg MS/kg K ₂ O			
T1	0,42 (0,12)	0,81 (0,06)	1,27 (0,18)	1,68 (0,13)	2,04 (0,59)	3,90 (0,27)	5,77 (0,82)	7,35 (0,57)	1,71 (0,50)	3,27 (0,22)	4,83 (0,68)	6,16 (0,48)
T2	0,90 (0,10)	1,17 (0,14)	1,35 (0,18)	1,52 (0,10)	4,35 (0,46)	5,63 (0,66)	6,11 (0,80)	6,69 (0,43)	3,27 (0,39)	4,78 (0,56)	5,19 (0,68)	5,68 (0,36)
T3	0,83 (0,08)	0,91 (0,03)	1,07 (0,07)	1,21 (0,06)	4,00 (0,37)	4,42 (0,17)	4,84 (0,33)	5,31 (0,23)	3,33 (0,31)	3,86 (0,34)	4,04 (0,27)	4,43 (0,21)
T4	17,50 (2,04)	25,97 (0,52)	30,37 (0,35)	36,39 (1,19)	26,25 (3,06)	38,96 (0,78)	45,56 (0,52)	54,38 (1,79)	11,67 (1,36)	17,31 (0,35)	20,25 (0,23)	24,26 (0,80)
T5	15,83 (0,00)	20,42 (0,08)	22,92 (0,99)	26,15 (0,23)	23,75 (0,00)	30,63 (1,02)	34,38 (1,48)	39,22 (0,34)	10,56 (0,00)	13,61 (0,45)	15,28 (0,66)	17,43 (0,15)
Mont Amba												
T1	1,42 (0,19)	1,80 (0,27)	2,17 (0,08)	2,57 (0,11)	6,83 (0,90)	8,68 (1,28)	14,78 (0,55)	11,29 (0,50)	5,72 (0,75)	7,27 (1,07)	8,53 (0,32)	9,93 (0,44)
T2	0,84 (0,16)	1,04 (0,14)	1,33 (0,17)	1,56 (0,13)	4,06 (0,76)	5,04 (0,68)	6,05 (0,79)	6,87 (0,55)	3,45 (0,64)	4,28 (0,58)	5,28 (0,69)	8,00 (0,64)
T3	1,05 (0,01)	1,12 (0,07)	1,26 (0,05)	1,39 (0,01)	5,09 (0,03)	5,39 (0,32)	5,72 (0,21)	6,11 (0,04)	4,25 (0,02)	4,49 (0,27)	4,93 (0,18)	5,36 (0,04)
T4	15,00 (0,68)	20,42 (4,60)	28,33 (1,07)	36,81 (3,57)	22,50 (1,02)	30,63 (6,90)	42,50 (4,60)	55,21 (5,36)	10,00 (0,45)	13,61 (3,07)	18,89 (2,05)	24,54 (2,28)
T5	19,72 (1,04)	24,31 (0,52)	26,94 (1,31)	28,82 (0,69)	29,58 (1,56)	36,46 (0,78)	40,42 (1,96)	43,23 (1,04)	13,15 (0,69)	16,20 (0,35)	17,96 (0,87)	19,21 (0,46)
Balume												
T1	0,35 (0,07)	0,70 (0,15)	1,24 (0,07)	1,85 (0,03)	1,67 (0,33)	3,39 (0,71)	5,63 (0,32)	10,84 (0,15)	1,40 (0,28)	2,84 (0,60)	4,87 (0,27)	7,15 (0,10)
T2	0,83 (0,15)	0,97 (0,07)	1,29 (0,10)	1,54 (0,03)	4,03 (0,72)	4,69 (0,35)	5,85 (0,44)	6,79 (0,12)	3,42 (0,62)	3,98 (0,29)	5,11 (0,38)	6,01 (0,10)
T3	0,61 (0,07)	0,73 (0,10)	0,97 (0,10)	1,19 (0,05)	2,94 (0,35)	3,55 (0,47)	4,39 (0,48)	5,23 (0,23)	2,45 (0,29)	2,96 (0,39)	3,79 (0,41)	4,59 (0,20)
T4	5,83 (0,68)	11,53 (3,94)	19,35 (1,96)	26,85 (0,49)	8,75 (1,02)	17,29 (5,91)	29,03 (2,03)	40,21 (0,74)	3,89 (0,45)	7,69 (2,63)	12,90 (1,30)	17,87 (0,33)
T5	10,42 (1,23)	13,13 (1,35)	18,80 (0,35)	22,95 (0,81)	15,63 (1,84)	19,69 (0,52)	28,19 (0,52)	34,93 (1,21)	6,94 (0,82)	8,75 (0,90)	12,53 (0,23)	15,30 (0,54)

T0 : témoin; T1 : 20 t.ha⁻¹ M; T2 : 40 t.ha⁻¹ MB; T3 : 60 t.ha⁻¹ MB; T4 : 100 kg.ha⁻¹ (NPK); T5 : 200 kg.ha⁻¹ (NPK); SC (1,2,3,4): saison culturale; Chiffre () : écart-type.

Annexe 7.

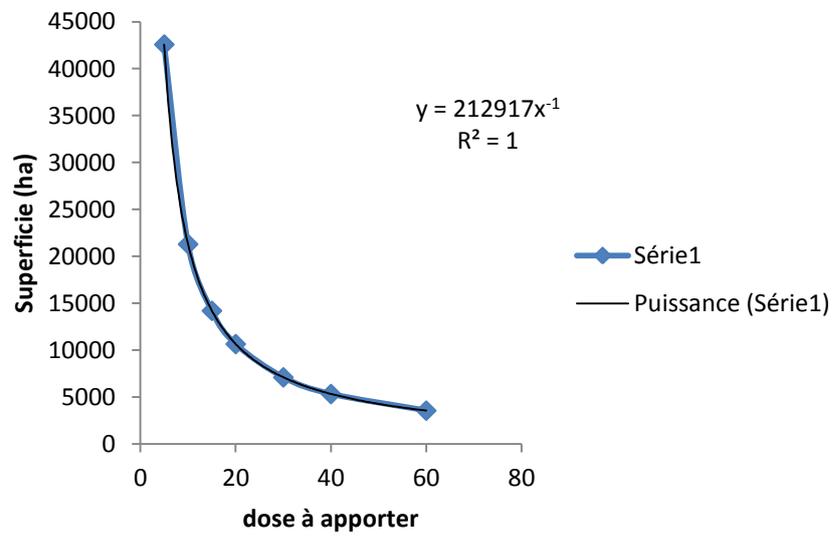


Figure 3. Courbe d'estimation de la superficie arable pouvant recevoir la quantité de compost produit à différentes doses à Kinshasa.

