



Earth and Life Institute

Environmental Sciences

**Influence du travail et de la couverture du sol sur
les propriétés physiques du sol et le système
racinaire du bananier de hautes altitudes de la
Région des Grands Lacs d'Afrique
(Sud-Kivu en RD Congo, Rwanda et Burundi)**

Thèse présentée par Tony Muliele Muku
en vue de l'obtention du grade de
Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs	Prof. Charles Bielders (UCL, Belgique)
	Prof. Bruno Delvaux (UCL, Belgique)

Louvain-la-Neuve, novembre 2014

Membres du Jury

Président

Prof. Marnick Vanclooster (UCL, Belgique)

Lecteurs

Prof. Mathieu Javaux (UCL, Belgique)

Prof. Philippe Baret (UCL, Belgique)

Dr. Ir. Piet van Asten (IITA, Ouganda)

Prof. Paul Mafuka Mbe-Mpie (INERA/UNIKIN, RD Congo)

Dédicace

Au Pasteur Jacques MULIELE LUMBU

A Dieu-merci MULIELE LUMBU

Remerciements

Soli Deo Gloria en Qui, nous avons le mouvement, la vie et l'être. Amen.

Une fois dans un Antonov (échappant à la rébellion), une fois en péril de naufrage au large du lac Kivu, une nuitée en pleine route- dans un véhicule embourbé après une pluie battante sur la route de Walungu. Yavhé, Ta grâce m'a suffi tout au long de ma formation doctorale.

Je tiens à remercier très sincèrement le Professeur Charles Bielders, mon promoteur, qui a accepté de diriger ce travail et l'a fait avec amour. Les travaux de terrain, les discussions fructueuses, les périples de recherche au Sud-Kivu et au Rwanda se sont déroulés dans un climat de convivialité et de fraternité. Une bonne leçon de relation maître-disciple !

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Delvaux Bruno, co-promoteur de cette thèse, et au Dr. Piet van Asten. C'est auprès de vous que j'ai appris les premières notions de description simultanée du profil pédologique et racinaire sous bananier. Les travaux de terrain dans les territoires de Walungu et Kabare (Sud-Kivu en RD Congo), au Rwanda et au Burundi ont été une bonne école de Science du sol.

J'exprime ma reconnaissance aux autorités de l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques (INERA) qui m'ont accordé l'opportunité de poursuivre cette formation doctorale. Puisse le Professeur Paul MAFUKA, alors Directeur Général ai de l'INERA, trouver ici l'expression

de ma profonde gratitude. Je remercie le personnel du Centre de Recherche INERA Mulungu, mon site de travail.

Merci au Professeur Marnick Vanclooster d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Merci aux Professeurs Mathieu Javaux, Philippe Baret, Piet van Asten et Paul Mafuku d'avoir accepté d'être membres du jury de ma thèse. Merci pour vos remarques, orientations et suggestions.

Cette thèse a été financée par la DGDC Belgique à travers Consortium for Improving Agriculture-based Livelihoods in Central Africa (CIALCA). Merci à tout le personnel de CIALCA de la RD Congo, du Rwanda et du Burundi. Sans ton concours, je n'aurai pas conduit avec succès mes travaux de terrain. Merci à Dr. Charles Murekezi, à Godfrey Taulya et Beatrice Sakwah (IITA Ouganda) pour votre assistance et les facilités administratives.

Merci aux membres d'Elie-GERU (UCL), ma famille au quotidien pendant mon séjour en Belgique. Merci à Antoine Mfumu et Issoufou Ouedraogo avec qui nous avons partagé le bureau.

Je remercie Françoise Hauwen et Carine De Meyer pour l'accueil en Belgique et toutes les facilités d'intégration. Merci à Anne Iserantant, Claudine Givron et Hugues Titeux de l'Unité Science du sol (UCL) pour les analyses chimiques et le concours dans l'interprétation des résultats.

Merci à Adolphe Ombeni, Isaac Balume, Jean-Marie Chaminani, Leonard Maruba, Papy Kimwani, Milinganyo Kyanga et Maurice Mogera qui m'ont accompagné dans la collecte des données et à tous les fermiers du Sud-

Kivu, du Rwanda et du Burundi pour les mesures effectuées dans leurs bananeraies.

Merci aux amis avec qui nous avons cheminé ensemble au sein du projet CIALCA : Syldie Bizimana, Anaclet Nibasumba, Julie Van damme, Séverine Delstanche, Sveta Gaidashova, Agnes Mukandinda. Merci à Alice Burton et Christophe Neyrinck qui ont collecté une partie des données de cette étude.

Merci à ma famille pour tant d’amour, d’encouragement et de patience. En proie à la solitude à 1.800 km de ma famille, ma femme, Cécile Diaka et nos fils ont enduré de mon absence tout au long de ma formation doctorale. Notre fille aînée, Gloyce Ngwemi M’Pezo, ne cessa de se demander : Papa est où ? Sans vos prières de soutien et votre réconfort moral, j’aurais dû abandonner ! Merci à Dieu-merci Muliele Lumbu. Ta naissance, un sujet d’allégresse, au cours de la dernière phase de rédaction de ma thèse !

Merci à mes parents : Pasteur Jacques Muliele Lumbu et Emily Ngwemi. Vous avez su tout donner pour mon instruction. Non seulement des parents, pour mes frères et moi-même, vous étiez également des bergers et amis !

Merci à mes frères et sœurs, cousins et cousines, oncles et tantes et amis pour les encouragements. Merci à la famille M’Pezo et aux frères et sœurs de l’Eglise Protestante Baptiste de Louvain-la-Neuve (EPB/LLN) pour la fraternité et le soutien spirituel.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>ix</i>
<i>Résumé</i>	<i>1</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>3</i>
Contexte général	3
Objectifs	8
 <i>Chapitre 1. Introduction</i>	 <i>12</i>
1.1 Cadre d'étude	12
1.2 Le bananier	21
1.2.1 Origine et classification	21
1.2.2 Morphologie et développement du bananier	22
1.2.3 Système racinaire du bananier	26
1.2.4 Contraintes au développement racinaire du bananier	34
1.3 Systèmes de culture bananière dans la Région des Grands Lacs d'Afrique	41
1.4 Pratiques culturelles, propriétés du sol et enracinement du bananier 50	
1.5 Connaissances acquises sur les contraintes à la production bananière dans la Région de Grands d'Afrique	53
 <i>Chapitre 2. Impact du contexte pédologique sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique</i>	 <i>60</i>
Résumé	60
2.1. Introduction	61
2.2. Matériel et méthodes	66
2.2.1. Sites d'études	66
2.2.2. Dispositif expérimental et conduite des essais	67

2.2.3. Paramètres observés _____	71
2.2.4. Analyse statistique _____	74
2.3 Résultats _____	76
2.3.1 Caractéristiques physiques du sol _____	76
2.3.2 Caractéristiques physico-chimiques et chimiques des sols _____	86
2.3.3 Distribution racinaire _____	95
2.3.4 Relations entre les propriétés des sols et l'enracinement du bananier _____	97
2.4. Discussion _____	104
2.5 Conclusions _____	121

Chapitre 3. Le potentiel d'une agriculture de conservation pour l'amélioration des propriétés physiques du sol et de l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique
..... 124

Résumé	124
3.1 Introduction _____	126
3.2 Matériels et méthodes _____	130
3.2.1 Sites d'études, dispositif expérimental et conduite des essais _____	130
3.2.2 Paramètres observés _____	130
3.2.3 Analyse statistique _____	132
3.3 Résultats _____	133
3.3.1 Propriétés physiques des horizons de surface _____	133
3.3.2 Distribution racinaire du bananier _____	141
3.4 Discussion _____	150
3.5 Conclusions _____	157

Chapitre 4. Effet à court terme du travail du sol sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes d'Afrique de l'Est: Dynamique racinaire

après le travail du sol et impact des outils de travail primaire du sol
..... 160

Résumé160

4.1 Introduction	162
4.2 Matériel et méthodes	166
4.2.1 Sites d'étude	166
4.2.2 Dispositif expérimental et conduite des essais	168
4.2.3 Méthode de description du système racinaire et paramètres observés	170
4.2.4 Analyse statistique	172
4.3 Résultats	173
4.3.1 Dynamique racinaire du bananier après le travail du sol : Essai en station (Mulungu)	173
4.3.2 Dynamique racinaire du bananier après le travail du sol : essai en milieu paysan (Kabamba)	178
4.3.3 Impact du type d'outils de travail primaire du sol sur l'enracinement du bananier (Essai en station, Walungu)	185
4.4 Discussion	186
4.5 Conclusions	193

Chapitre 5. Impact du travail du sol et du paillage sur la conservation du sol des systèmes de culture bananière de l'Afrique de l'Est..... 195

Résumé195

5.1 Introduction	197
5.2 Matériel et méthodes	200
5.2.1 Stabilité structurale du sol	200
5.2.2 Mesures d'infiltration	204
5.2.4 Ruissellement et érosion	208
5.2.5 Analyse statistique	210
5.3 Résultats	210

5.3.1 Mesures d'hydrophobicité	210
5.3.2 Stabilité structurale du sol	213
5.3.3 Mesures d'infiltration	222
5.3.4 Ruissellement et érosion	228
5.4 Discussion	237
5.4.1 Hydrophobicité	237
5.4.2 Stabilité structurale	243
5.4.3 Infiltrométrie	248
5.4.4 Erosion et ruissellement	252
5.5 Conclusions	260
<i>Chapitre 6. Discussion générale et perspectives</i>	262
<i>Annexes</i>	275
<i>Références</i>	300

Liste des abréviations

ANOVA: Analyse de la variance

BAA : Bureau of African Affairs

CEC: Capacité d'échange cationique

CIALCA : Consortium for improving Agriculture-based Livelihoods in Central Africa

CWC: critical water content

ECEC : Capacité d'échange cationique effective

Eq.: Equation

FAOSTAT : FAO (Food and Agriculture Organization) Statistics

GLBD : Growth-Limiting bulk density

INERA : Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques

Kg : kilogramme

LANO: Laboratoire de la Normandie

MF : Matière fraîche

MS: Matière sèche

MWD : Mean Weight Diameter

RADA : Rwanda Agricultural Development Authority

RD Congo : République Démocratique du Congo

RGLA: Région des Grands Lacs d'Afrique

SB : Somme des bases échangeables

t : Tonne

t/ha: Tonne par hectare

UCL : Université catholique de Louvain

UNIKIN : Université de Kinshasa

WDPT: Water drop penetration time

Résumé

Le bananier est une des principales cultures de subsistance au Sud-Kivu (Kivu montagneux) en RD Congo, au Rwanda et au Burundi. Il y est couramment cultivé en association avec une ou plusieurs cultures annuelles, majoritairement le haricot. Un travail du sol manuel avec exportation des résidus de récolte est pratiqué deux fois par an afin de préparer le lit de semence pour les cultures annuelles sous bananier. Ce travail du sol détruit les racines superficielles du bananier et pourrait dès lors affecter négativement sa productivité. Par ailleurs, le travail du sol et l'exportation des résidus de culture est susceptible d'accélérer la dégradation des sols. Des techniques culturales alternatives basées sur les principes de l'agriculture de conservation, à savoir le non-labour avec paillage, pourraient constituer une alternative plus durable aux pratiques culturales conventionnelles. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence, à court et moyen termes, des pratiques culturales (labour et exportation de résidus vs. non labour avec paillage) sur les propriétés physiques du sol et le système racinaire du bananier au sein d'une association bananier-haricot.

Nous avons premièrement mis en évidence l'influence prépondérante des propriétés du sol sur la distribution racinaire du bananier. Les contraintes physiques semblent limiter la colonisation des racines en profondeur tandis que la densité racinaire maximale du bananier semble être principalement liée à la fertilité intrinsèque des sols. Après environ 3 ans, les pratiques culturales se différenciaient assez peu en termes d'impacts sur les propriétés physiques et sur l'enracinement. Les impacts se limitaient essentiellement aux dix premiers cm du sol. Sur cette profondeur, le travail

du sol manuel a permis de réduire la résistance mécanique du sol par rapport aux pratiques culturales sans labour avec paillage, mais n'a pas amélioré la densité apparente. Malgré cette baisse de la résistance mécanique, la densité racinaire était généralement plus faible dans les parcelles labourées comparé aux parcelles en non labour avec paillage.

Immédiatement après le travail du sol, le poids frais et la longueur des racines primaires (0-10 cm de profondeur) des parcelles labourées non paillées ont été réduits de 74% (anciennes plantations) à 95% (jeunes plantations) par rapport à ceux des parcelles en non labour avec paillis. La régénération racinaire consécutive au travail du sol manuel requiert plusieurs mois. Particulièrement sur les jeunes plantations, le poids frais et la longueur des racines primaires n'atteignaient cependant jamais les niveaux observés dans les parcelles en non labour. Le labour avec exportation de résidus a affecté négativement la croissance des bananiers des jeunes plantations, mais l'arrêt du labour dans des plantations âgées n'a pas stimulé la croissance sur le court terme.

Les pratiques culturales sans labour avec paillage ont amélioré la stabilité structurale du sol par rapport au travail du sol manuel avec exportation de résidus de bananier. Elles ont également réduit le taux d'érosion et la concentration en sédiment dans l'eau de ruissellement. Toutefois, en raison de leur degré d'hydrophobicité plus élevé en saison sèche, ces pratiques culturales n'ont cependant pas amélioré la conductivité hydraulique à saturation sur deux des trois sites d'étude. La culture sans labour avec paillage apparaît donc comme une alternative adéquate pour une association culturale bananier-haricot, mais son impact sur la productivité globale du système nécessite d'être vérifiée.

Introduction générale

Contexte général

Le bananier est l'une des principales cultures de la Région des Grands Lacs d'Afrique (RGLA), région de l'Afrique Centrale et de l'Est qui couvre le Rwanda, le Burundi, la région australe de l'Ouganda, l'Est de la République Démocratique du Congo (RD Congo), le Sud-ouest du Kenya et le Nord de la Tanzanie ([Delstanche, 2011](#)). La région est dominée en production et en superficie par les bananes de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est ([Eledu et al., 2004](#); [Karamura et al., 1998](#)). Tant pour la RGLA en général que pour notre zone d'étude (Sud-Kivu à l'Est de RD Congo, Rwanda et Burundi) en particulier, la banane (banane à jus, à dessert, à cuire et plantain) et ses sous-produits jouent un rôle important comme source de nourriture et de revenus pour les fermiers, les transporteurs et les commerçants de bananes ([Dowiya et al., 2009](#) ; [Jagwe et al., 2008](#) ; [Eledu et al., 2004](#)). Au Rwanda, le bananier occupe 23% des terres arables et contribue à plus de 50% en poids frais dans la production annuelle des cultures ([RADA, 2007](#)). Le Rwanda et le Burundi figurent parmi les 20 premiers producteurs mondiaux de la banane ([FAOSTAT, 2008](#)). En RD Congo, cette culture occupe la deuxième position après celle du manioc en termes de quantité produite et de revenus générés ([BAA, 2008](#)). La province du Sud-Kivu en RD Congo contribue entre 20 et 30% à la production nationale de bananes évaluée à 1,5 millions de tonnes ([Spilsbury et al., 2004](#)).

Au Sud-Kivu (Kivu montagneux), au Rwanda et au Burundi, l'agriculture est caractérisée, entre autres, par des exploitations de petites tailles (entre 0,4 et 1,0 ha) ([van Damme et al., 2013](#) ; [Bouwmeester et al., 2009](#) ; [Okech et al., 2005](#)). Deux systèmes de cultures peuvent être distingués dans les bananeraies de subsistance : la monoculture pérenne de bananier en culture pure et l'association du bananier avec une ou plusieurs cultures annuelles, majoritairement le haricot. Comparé à la monoculture pérenne de bananier, l'association de cultures offre l'avantage de diversifier les récoltes des petites exploitations agricoles pour assurer la sécurité alimentaire et minimiser le risque lié à une mauvaise récolte, d'économiser la main d'œuvre et accroître les revenus, et de contrôler les maladies et ravageurs ([Jassogne et al., 2013](#) ; [Ouma, 2009](#)).

En monoculture, les bananeraies ne sont pas labourées. Les résidus de récolte de bananes (feuilles et pseudo-troncs) sont laissés au champ et constituent une source importante de matière organique pour le sol. En fonction de la densité de plantation, une bananeraie produit autour de 150 à 200 t de matière fraîche (MF)/ha/an, ce qui correspond à 10 à 15 t de matière sèche (MS)/ha/an ([Godefroy, 1974](#)) pouvant servir d'auto-paillage. Les effets bénéfiques du paillage, notamment l'amélioration des propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol ([Rishirimuhirwa, 1997](#) ; [McIntyre et al., 2000](#) ; [Araya et De Waele, 2005](#) ; [Dorel et al., 2010](#)), favorisent la croissance et accroissent le rendement du bananier ([McIntyre et al., 2000](#) ; [Araya, 2005](#)). Le paillage présente d'autres effets bénéfiques notamment la réduction de l'érosion ([Cattan et al., 2006](#) ; [Lufafa et al., 2003](#) ; [Rishirimuhirwa, 1997](#)) et de la perte d'éléments nutritifs. Le paillage régule la température au sol ([Robinson et al., 1989](#)), réduit le taux d'évaporation

et accroît le taux d'infiltration du sol, ce qui permet de maintenir l'humidité du sol à un niveau plus élevé (Araya, 2005 ; Salau et al., 1992).

Contrairement à la monoculture, le travail du sol est fréquent dans l'association de cultures bananier-cultures annuelles telle que pratiquée dans notre zone d'étude (Sud-Kivu, Rwanda et Burundi), afin de préparer le lit de semence pour les cultures annuelles (p. ex. haricot) sous bananier. Le travail du sol manuel au moyen d'une houe ou d'un trident affecte une profondeur d'environ 25 cm (Dowiya et al., 2009) et peut être pratiqué tout près des bananiers (jusqu'à 15 cm du pseudo-tronc) entraînant ainsi la coupe de racines du bananier sur la profondeur du sol labourée. Dans le cas du haricot, cette opération est répétée deux fois par an car il y a deux cycles de haricot par an.

Le travail du sol en présence d'une culture pérenne pose des questions spécifiques non encore étudiées en détail pour l'association bananier-cultures annuelles (haricot). En effet, le travail du sol permet d'ameublir le sol (Blomme, 2000) et de limiter la compétition des adventices (Lepecki et Barbec, 1997), ce qui pourrait favoriser la levée, la croissance et le développement du haricot, et par conséquent accroître son rendement. Toutefois, le travail du sol entraîne la coupe des racines du bananier sur la couche du sol labourée, généralement plus humifère et plus fertile. Ceci pourrait réduire la capacité d'absorption racinaire et perturber la croissance (Lassoudière, 1989), voire favoriser les attaques d'agents pathogènes, et par conséquent, réduire le rendement du bananier. A ce titre, les bananiers sont particulièrement exposés car le système racinaire du bananier est de type fasciculé et superficiel avec 70 à 90% de la masse des racines localisées dans les 40 premiers cm (Draye et al., 2005).

En général, le travail du sol est précédé de l'exportation des résidus de récolte du bananier. Les résidus exportés servent de paillis pour le caféier (Rwanda et Burundi) ou pour des cultures annuelles, notamment le manioc (Sud-Kivu) (CIALCA, 2007a; Kirkby et Ngendahayo, 1985), alors qu'en Afrique de l'Est les résidus de cultures constituent la principale source de la fertilité des sols (Delvaux, 1995). En plus d'être une source d'éléments minéraux pour les plantes, la matière organique des sols fortement altérés de la RGLA contribue pour 60 à 90% de la capacité d'échange cationique (CEC) du sol des horizons de surface et pour 20 à 50% en profondeur du sol (Delstanche, 2011). Les cultures sont souvent installées sur des terrains à pentes moyennes ou fortes (23 à 55%, Roose et Ndayizigiye, 1997) et sont fortement dépendantes de la matière organique comme source de fertilité (Bouwmeester et al., 2009) ; dès lors, le travail du sol et l'exportation de résidus post-récolte pourrait engendrer une dégradation de la qualité du sol, en particulier à cause de la désagrégation du sol (Zhou et al., 2007; Carter, 2002), de la diminution de la teneur en matière organique (Franzluebbers, 2002; Balesdent et al., 2000) et de la perte de terres par érosion (Rishirimuhirwa, 1997 ; Cattan et al., 2006). Des études récentes ont montré que la baisse de rendement du bananier de hautes altitudes est principalement liée aux contraintes abiotiques, notamment la baisse de la fertilité et le stress hydrique (Wairegi, 2010 ; Delstanche, 2011; van Asten, 2011). En Chine, Zhong et al. (2014) ont rapporté que l'exportation ou l'incinération de résidus de bananiers entraînait une perte de 16 kg N/ha et affectait négativement le rendement du bananier.

Pour remédier concomitamment à la dégradation des sols et à la baisse de rendement, la culture sans labour avec paillis (semis direct) basée sur les

principes de « l'agriculture de conservation » visant à maintenir voire restaurer la fertilité naturelle du sol ([Mrabet et al., 2004](#); [Horwath et al., 2008](#)), pourrait être une alternative adéquate pour les associations bananier-cultures annuelles. Des telles pratiques s'observent déjà actuellement. Au Cameroun et au Nigéria, les associations de cultures bananier-cultures annuelles (manioc, le maïs, le soja, le haricot, taro, l'arachide et le sorgho) sont très fréquentes et sont conduites en non labour, avec ou sans fertilisation minérale et à différentes densité de plantation ([Norgrove et Hauser, 2014](#) ; [Kainga, 2013](#) ; [Akyampong, 1998](#)). De même, dans certains pays de la RGLA (par exemple Ouganda, Kenya), les associations bananier-cultures annuelles sont conduites en non labour ([Wairegi et al., 2014](#)). Pour le bananier plantain, en particulier, les résultats des essais expérimentaux conduits de 1976 à 2013 ont montré que, hormis le manioc (probablement à cause d'une forte compétition pour le potassium), l'association des cultures avait un impact positif ou n'affectait pas le rendement du plantain ([Norgrove et Hauser, 2014](#)). Pour les associations bananier-plantes annuelles dans notre zone d'étude, par contre, peu de connaissances existent sur l'impact du non labour avec paillage sur les propriétés du sol, la croissance et le rendement du bananier.

Pour évaluer l'impact du mode de gestion du sol dans une bananeraie établie, nous avons choisi une approche méthodologique comparative. Les propriétés édaphiques (propriétés physiques et chimiques), les caractéristiques du système racinaire, les paramètres de croissance et de rendement des plantes de parcelles labourées et non paillées ont été comparés à ceux des parcelles sans labour et paillées. Les effets de la culture sans labour sur la croissance et le rendement des cultures pouvant varier suivant les sites (types de sols, microclimat) et les types de paillage

(Araya, 2005), il est nécessaire de comprendre la relation sol-plante (système racinaire, croissance et rendement). La présente thèse porte essentiellement sur les propriétés physiques et le système racinaire du bananier (Figure 1). Une caractérisation sommaire des propriétés chimiques a cependant été faite. L'impact des pratiques culturales sur les propriétés chimiques des sols ainsi que sur la croissance et le rendement des cultures (bananier, haricot) est étudié en détail dans une autre thèse de doctorat (Bizimana Sylodie ; Figure 1).

Objectifs

Cette étude a été conduite dans le cadre d'essais associant bananier et haricot en milieu paysan et en milieu contrôlé installés dans différentes zones pédoclimatiques en province du Sud-Kivu, au Rwanda et au Burundi (Figure 2).

L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'impact du travail et de la couverture du sol sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du bananier au sein d'associations bananier-haricot de la RGLA. Les objectifs spécifiques sont : (i) identifier les contraintes édaphiques au sein des systèmes bananiers dans les différentes zones pédoclimatiques de la RGLA (Sud-Kivu, Rwanda et Burundi), (ii) quantifier l'impact des pratiques culturales (travail du sol, paillage) sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du bananier, et enfin (iii) évaluer l'impact des pratiques culturales (travail du sol, paillage) sur la conservation du sol (stabilité structurale du sol, contrôle de l'érosion, infiltration).

Les hypothèses de cette étude sont :

1. La distribution racinaire du bananier de hautes altitudes de la RGLA est fortement dépendante des propriétés pédologiques qui, elles-mêmes, sont étroitement liées aux types de sols,
2. En conditions de non labour, le paillage peut améliorer la qualité physique du sol : i) réduction de la densité apparente et de la résistance mécanique du sol, ii) accroissement de la stabilité structurale et du taux d'infiltration, iii) réduction du ruissellement et du taux d'érosion,
3. Le travail du sol peut affecter négativement le système racinaire du bananier.

Subdivision de la thèse

Cette thèse est subdivisée en 6 chapitres. Le premier chapitre présente une revue bibliographique concernant le milieu d'étude, le bananier, les systèmes de culture bananière et les connaissances acquises sur les contraintes à la production bananière dans la RGLA. Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques pédologiques en relation avec la distribution racinaire du bananier. Le troisième chapitre porte sur le potentiel d'une agriculture de conservation pour l'amélioration des propriétés physiques du sol et de l'enracinement du bananier des horizons de surface. Le quatrième chapitre traite de la relation entre le travail du sol et l'enracinement du bananier, notamment l'évaluation de la régénération racinaire après le

travail du sol et l'impact des outils de travail primaire du sol. Le cinquième chapitre se consacre à l'évaluation de l'impact du travail du sol et du paillage sur la conservation du sol des systèmes de culture bananière. Le sixième chapitre présente la discussion générale et les perspectives. Enfin, les annexes et les références bibliographiques sont présentées.

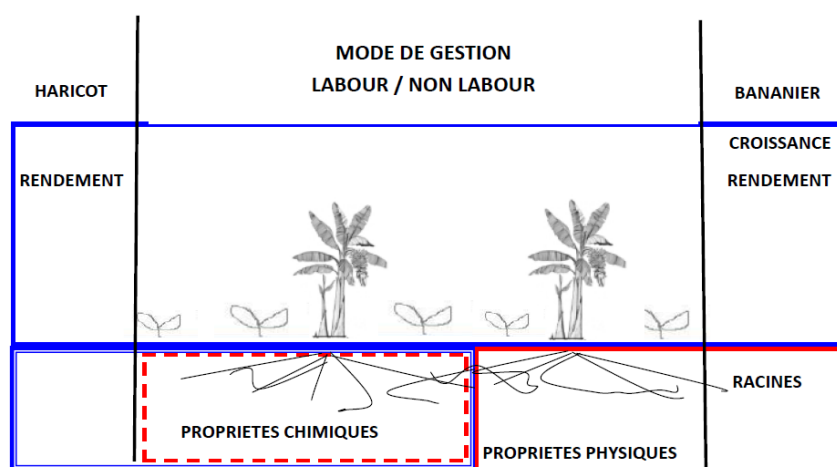


Figure 1. Représentation schématique d'une association culturale bananier-haricot montrant au moyen des traits continus et discontinus rouges les aspects de recherche abordés dans cette thèse et en trait continu bleu ceux étudiés par Bizimana Syldie.

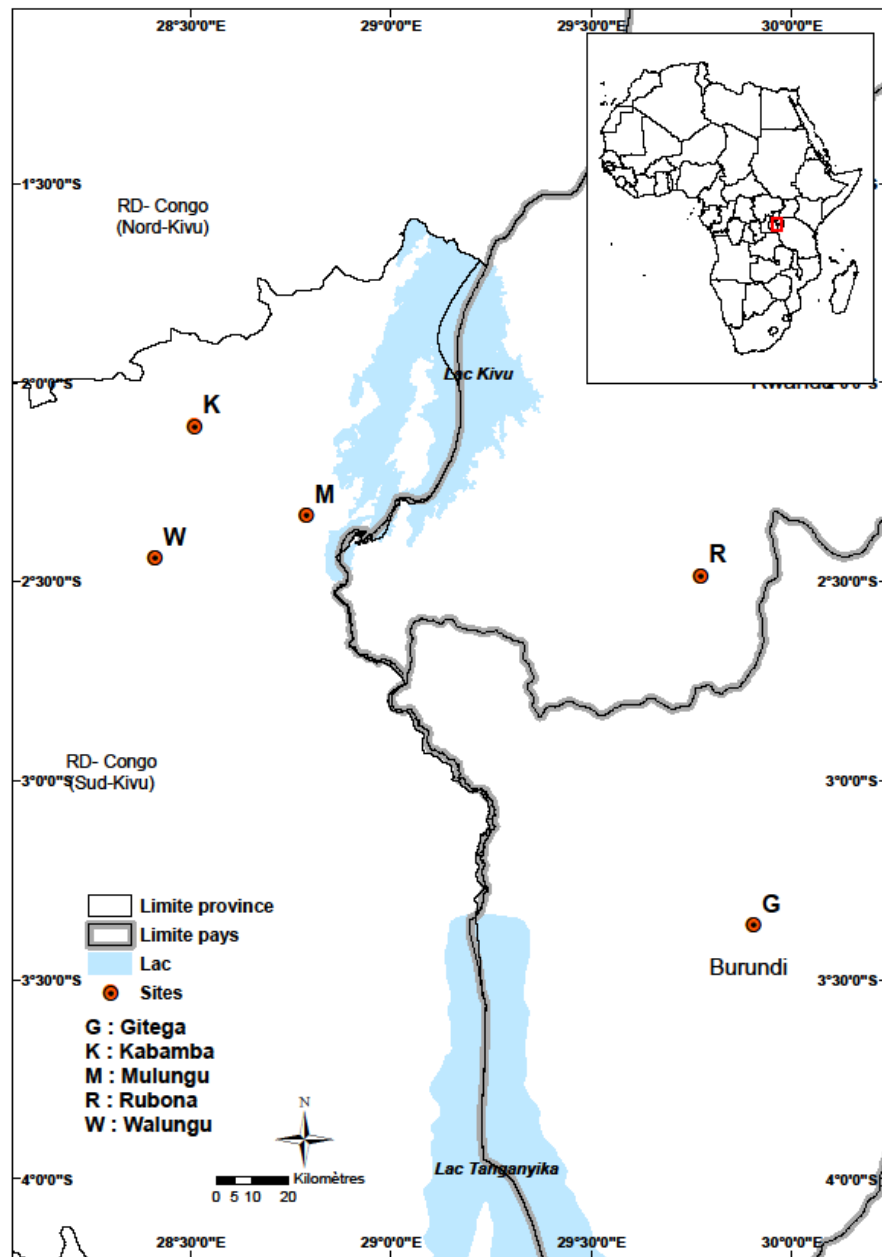


Figure 2. Situation géographique de la zone et des sites d'étude

Chapitre 1. Introduction

Ce chapitre présente la revue bibliographique sur la zone d'étude, le bananier, les systèmes de culture bananière et les connaissances acquises sur les contraintes à la production bananière dans la RGLA.

1.1 Cadre d'étude

Cette étude a été conduite dans cinq sites répartis dans trois pays de la RGLA : le site de Rubona au Rwanda, le site de Gitega au Burundi et les sites de Mulungu, Walungu et Kabamba en RD Congo (Figure 2). Pour ce dernier pays, la zone d'étude réfère à la province du Sud-Kivu, notamment les territoires de Kabare et Walungu qui présentent des caractéristiques physiques (géologie, topographie, climat, sol) similaires à celles du Rwanda et du Burundi ([Rishirimuhirwa, 1997](#); [Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)). Ces deux territoires du Sud-Kivu sont désignés par certains auteurs sous le nom de Kivu montagneux ([Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)).

1.1.1 Topographie et climat

Du point de vue topographique, la RGLA est caractérisée par des plateaux, des montagnes, des vallées à fonds larges ou étroites et des collines. L'altitude s'étend généralement de 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer dans les plateaux centraux à plus de 3000 mètres d'altitude dans les

montagnes du rift occidental (Delstanche, 2011 ; Bouwmeester et al., 2009). Comme illustré à la figure 1.1, l'altitude des sites d'étude se situe dans l'intervalle 1400-1900 mètres. Le climat de la RGLA est très diversifié, et varie en fonction de l'altitude, du régime des vents et de la pluviosité. Dans la zone d'étude, le climat est de type tropical à l'Ouest du Burundi dans la plaine de l'Imbo près du lac Tanganyika et tropical tempéré en altitude au Rwanda et au Sud-Kivu (Kivu montagneux). La pluviosité est bimodale, avec des précipitations annuelles variant entre 700 et 2200 mm/an suivant les régions. Le tableau 1.1 relatif à la distribution des précipitations annuelles moyennes enregistrées au cours de la période de 1951 à 2005 dans la zone d'étude montre que les sites du Sud-Kivu reçoivent plus de précipitations que Rubona et Gitega. Les températures annuelles moyennes se situent autour de 20°C (Bouwmeester et al., 2009 ; FAO, 2005 ; Ngongo et Lunze, 2000). Vanlauwe et al. (2012) ont rapporté une grande variabilité climatique au cours des dernières années, notamment en ce qui concerne le début de la saison des pluies, et un accroissement de la fréquence des épisodes de la mi- saison sèche.

Tableau 1.1. Précipitations annuelles (mm) moyennes, maximales et minimales enregistrées aux cours de la période de 1951 à 2005.

Pays	Région	Site d'étude	moyenne	Maximum	Minimum
RD Congo	Sud-Kivu	Mulungu Walungu Kabamba	1566	2543	1175
Rwanda	Gitarama	Rubona	1260	1683	808
Burundi	Gitega	Gitega	1190	1796	729

Source : Hijmans et al., 2005 (cité par Bouwmeester et al., 2009).

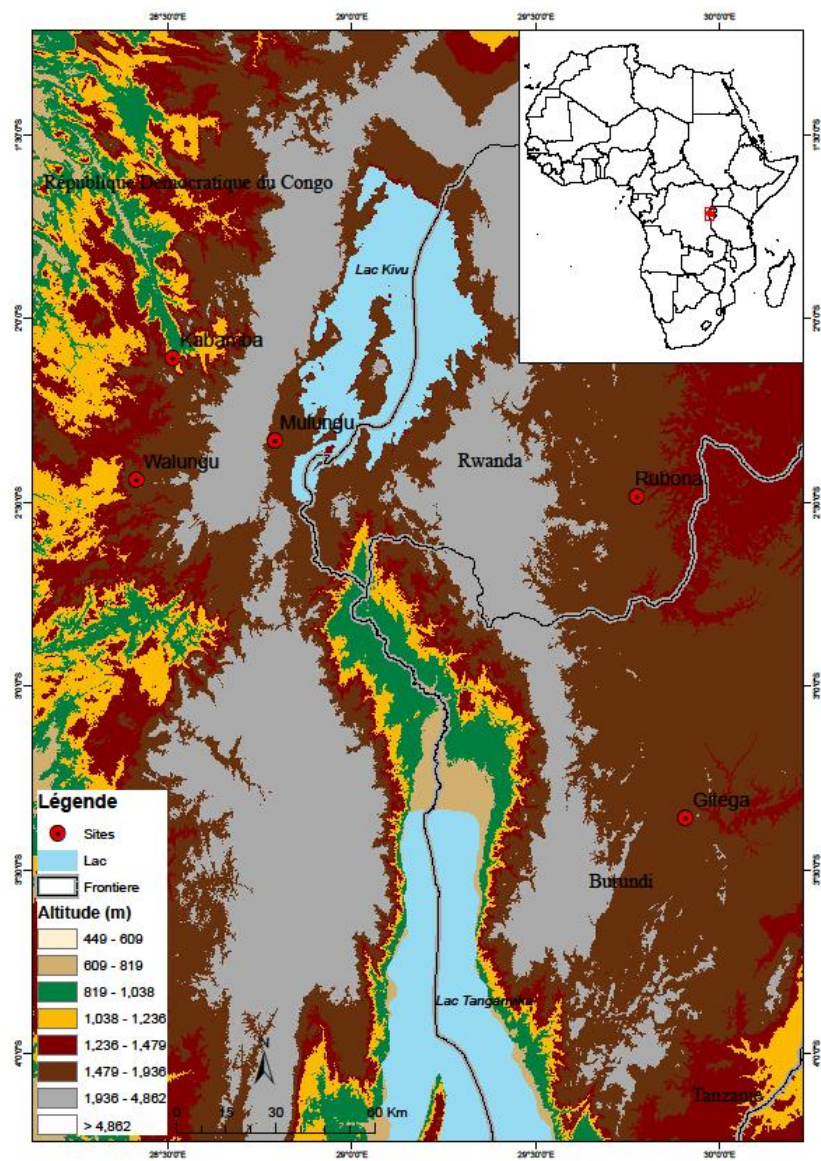


Figure 1.1. Distribution de l'altitude dans la zone d'étude (SOTERCAF, version 1.0)

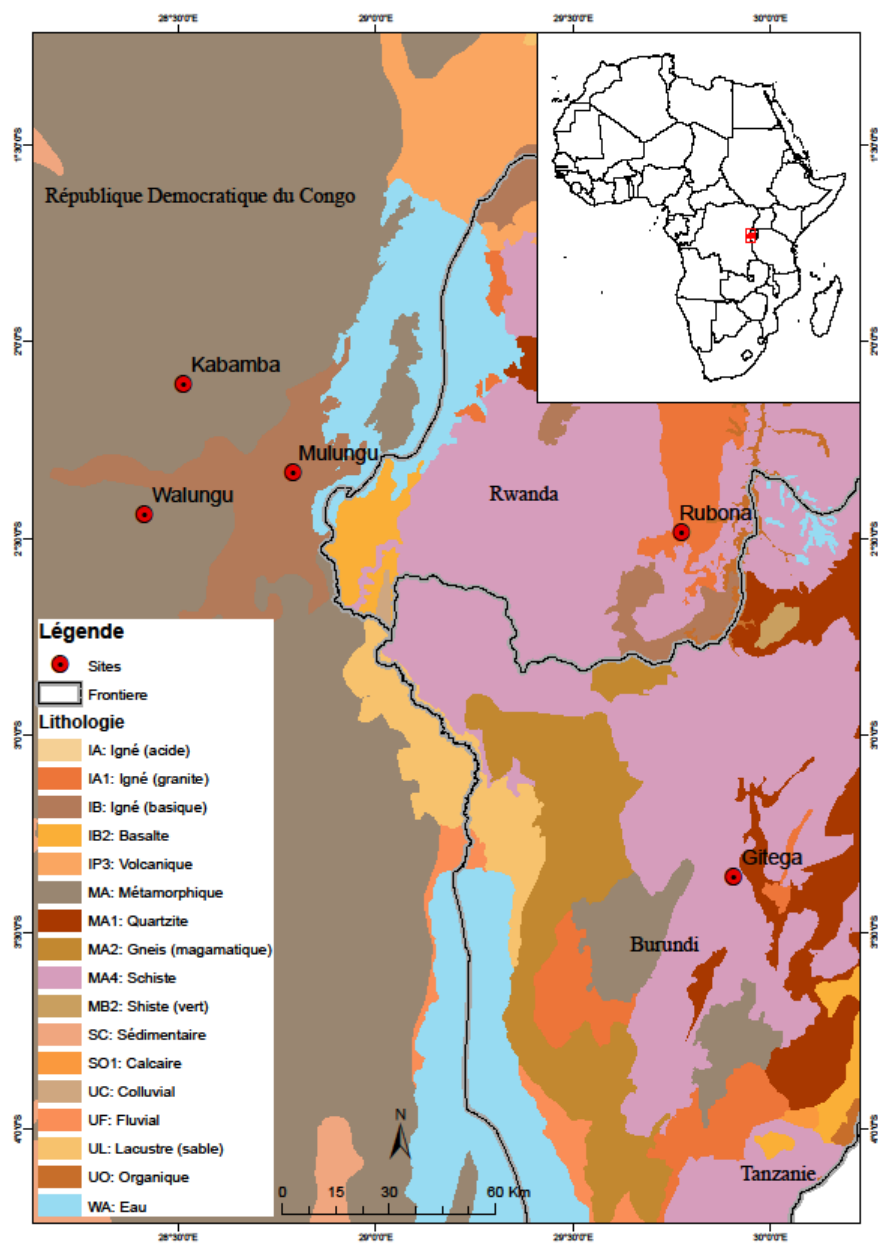


Figure 1.2. Principaux types de matériau parental dans la zone d'étude (SOTERCAF, version 1.0).

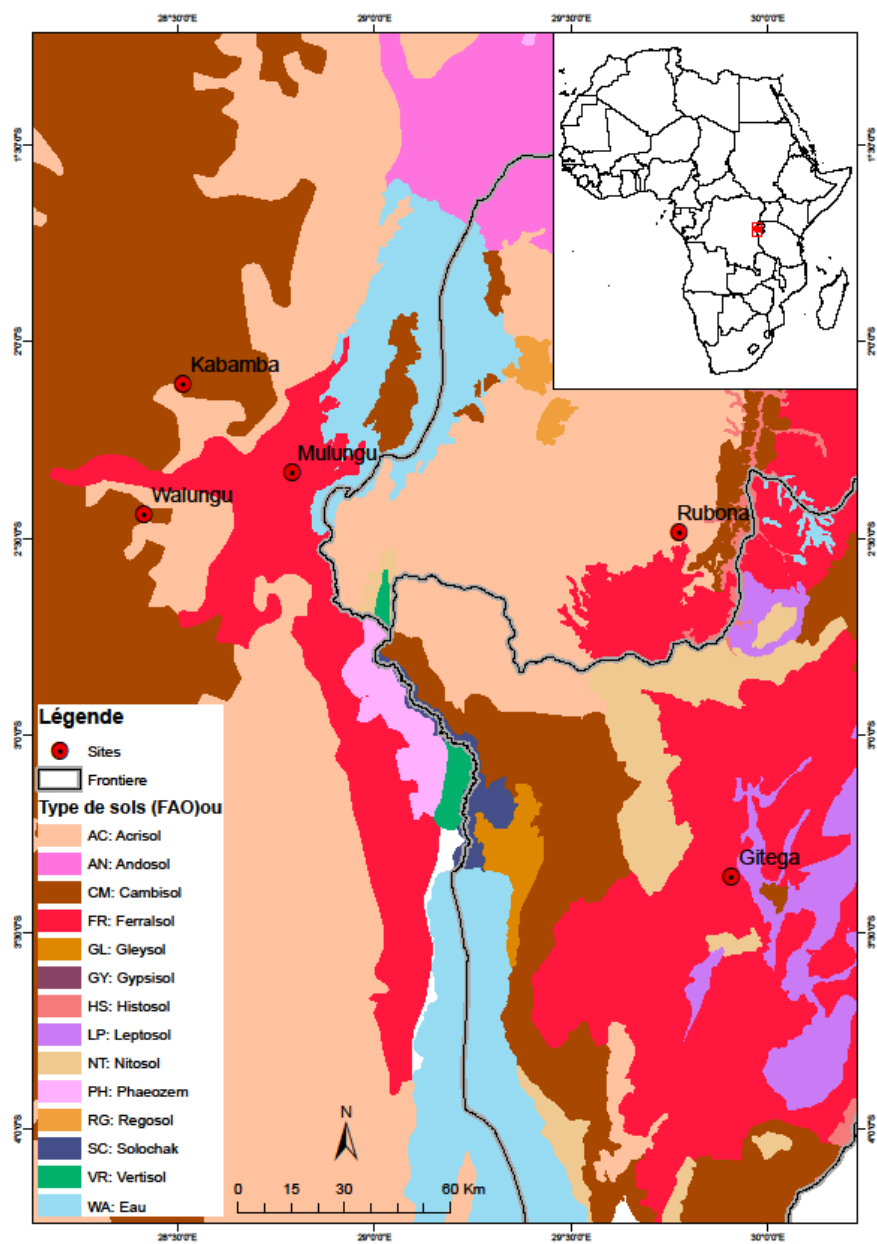


Figure 1.3. Principaux types de sols suivant la classification FAO dans la zone d'étude (SOTERCAF, version 1.0).

1.1.2 Sols

Il est important d'indiquer que peu d'informations détaillées existent sur les sols de la RGLA. Les cartes de sols publiées par la FAO sur la RD Congo, le Rwanda et le Burundi sont disponibles mais donnent moins de détails pour la RD Congo compte tenu de sa taille par rapport aux 2 autres pays ([Bouwmeester et al., 2009](#)). Hormis les sols développés sur alluvions ou matériaux volcaniques cénozoïques (Figure 1.2) liées aux activités du Rift (qui s'étendent dans l'ouest de l'Ouganda et du Rwanda et dans la partie Est de la RD Congo), les sols de la RGLA sont très anciens et fortement altérés. Les principaux groupes de sols sur lesquels au moins 80% des principales zones de production bananière (PBPA) de la RGLA sont rencontrées appartiennent notamment aux groupes des Ferralsols, des Acrisols et des Nitisols de la classification FAO ([Delstanche, 2011](#); [Eledu et al., 2004](#)). Les sols des sites d'étude appartiennent à ces trois groupes de sols (Tableau 1.2 ; Figure 1.3).

Tableau 1.2 Principaux groupes de sols (FAO) des principales zones de production bananière (PBPA).

Sols	Région	BU	TZ	RW	KEN	UG
Ferralsols	27%	71%	6%	43%	26%	60%
Nitisols	18%	20%	13%	45%	24%	11%
Luvisols	13%		23%		16%	
Acrisols	8%		9%			
Cambisols	7%		12%			14%
Arenosols	5%		21%		16%	
Gleysols	5%		5%			

Planesols	-		7			
Regosols	-		6			
Autres	17%	3%	18%	12%	19%	15%
No.						
d'unités des sols	6	3	5	5	8	5

Source: Eledu et al. (2004). BU: Burundi, TZ: Tanzanie, RW: Rwanda, KEN: Kenya, UG: Ouganda.

1.1.3 Importance du bananier dans la RGLA

Les bananiers et bananiers plantains sont cultivés dans plus de 100 pays dans les régions tropicales et sub-tropicales du monde entier. Ils fournissent l'un des principaux aliments de base à des millions de personnes et jouent un rôle important dans la structure sociale de nombreuses communautés rurales. La diversité des zones agro-écologiques qui se prêtent à cette culture et le fait que les bananiers produisent des fruits tout au long de l'année en font une denrée alimentaire essentielle dans beaucoup de pays, notamment en Afrique ([Frison et Sharrock, 1998](#); [Lassoudière, 2007](#)). En termes de production mondiale, la banane est le quatrième produit agricole après le riz, le blé et le maïs. Comparé aux autres cultures, notamment la patate douce, le riz, le maïs et l'igname, le coût de production d'un kilogramme de banane et de banane plantain (sans prise en compte du coût de contrôle de la cercosporiose noire – black Sigatoka) est plus faible ([Chandler, 1995](#) ; [Moens, 2004](#)).

Suivant l'utilisation de leurs fruits, on distingue quatre groupes de cultivars de bananiers ([Wairegi et al., 2014](#); [Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)) :

- (i) les bananiers "à bière" (à jus) dont le jus de fruits est transformé en boisson fermentée,
- (ii) les bananiers à cuire dont les fruits sont consommés à l'instar de la patate douce et de la pomme de terre,
- (iii) les bananiers à fruits à dessert qu'on mange crus,
- (iv) et les bananiers plantains dont les fruits sont consommés de différentes manières suivant le degré de maturation commerciale des fruits (pâtes à partir de la farine des pulpes de fruits non mûrs séchées ou des pulpes de fruits légèrement ou moyennement mûrs, frites de pulpes de fruits légèrement ou moyennement mûrs).

A l'état cru et cuit, la pulpe de la banane à cuire est douce tandis que celle de la banane "à bière" est amère. En enlevant la pelure du fruit à l'état vert, on constate que la banane "à bière" exsude à sa surface des gouttelettes de couleur légèrement brunâtre en séries régulières dans le sens de la longueur du fruit. Ces deux catégories appartiennent au sous-groupe des bananiers au triple génome de *Musa acuminata* (AAA) ([Champion, 1970](#); [Shepherd, 1957](#)). Ces bananiers se trouvent uniquement dans la région montagneuse Est-Africaine ([Swennen, 2003](#); [De Langhe, 1983](#) cité par [Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)). Leur développement est optimal entre 1000 et 2000 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer, d'où le nom de Bananiers des Hautes Terres d'Afrique de l'Est ([Karamura et al., 1998](#); [Eledu et al., 2004](#)). [Champion \(1970\)](#) suppose qu'un type introduit anciennement en Afrique orientale aurait donné naissance à cet ensemble de variétés de bananiers différenciées par des mutations subies sur les hauts plateaux.

En Afrique de l'Est, la banane constitue un aliment de base pour près de 20 millions d'habitants. Cette région produit environ 15 millions de tonnes de

bananes par an et constitue la région où le bananier joue le rôle le plus important comme culture vivrière dans le monde. L'Ouganda est le pays où la consommation annuelle de banane par individu est la plus élevée au monde (Tableau 1.3). Outre l'usage alimentaire, le bananier et le bananier plantain sont également utilisés à d'autres fins : production de fibres (*Musa textilis*), d'alcool et de produits pharmaceutiques. Les pseudo-troncs et les feuilles constituent un aliment pour bétail (Stover et Simmonds, 1987). Les bananes constituent une source importante de revenus pour les fermiers. Par exemple, en Ouganda, les bananes représentent 68% des revenus relatifs aux cultures (Bagamba et al., 1998). La banane à cuire est produite pour l'autoconsommation et le marché urbain tandis que les bananes à dessert et les bananes plantains sont commercialisées principalement en milieu urbain (Jagwe et al., 2008).

Tableau 1.3 Principaux pays consommateurs de bananes

Pays	Consommation (kg/individu/an)	Pays	Consommation (kg/individu/an)
Ouganda	243	Equateur	88
Rwanda	197	Martinique	86
Gabon	161	Côte d'Ivoire	86
Cameroun	128	Comores	86
Burundi	89	Colombie	80
Sao Tomé et Principe	93	St. Lucia	73
Ghana	92	Rép. Dominicaine	70

Source : FAOSTAT (2002).

Au Rwanda, le bananier occupe en moyenne environ 23% des terres cultivées et contribue à plus de 50% de la production annuelle vivrière

exprimée en poids frais. Une « ferme type » comprend 50% de tubercules, 30% de bananes et 20% de céréales et légumes (Mpyisi et al., 2003; RADA, 2007). Le Rwanda et le Burundi figurent parmi les principaux producteurs de banane en Afrique Sub-saharienne. Le bananier occupe environ 49,9% des terres arables au Burundi (Bizimana et al., 2012). En RD Congo, la production de bananes vient en deuxième position après le manioc. La production annuelle totale du pays est estimée 1,52 millions de tonnes dont 20 à 30% sont produits dans la seule province du Sud-Kivu (Jagwe et al., 2008).

1.2 Le bananier

1.2.1 Origine et classification

Le bananier est une plante herbacée originaire d'Asie du Sud-Est. Il s'est diversifié ensuite dans le monde à travers les îles du Pacifique, l'Indonésie, l'Inde et l'Afrique de l'Est (Champion, 1967; Simmonds, 1976; Khamsouk, 2001).

Du point de vue de la systématique, le bananier est une "herbe" géante monocotylédone appartenant à la famille des *Musacées*, ordre des *Zingibérales*. Il existe plus de 300 clones dont près de 150 résultent de mutations. Parmi les *Musacées*, on distingue le genre *Musa*, caractérisé par des fruits à chair abondante et dépourvu de graines. Il compte différentes espèces tels le *Musa textilis*, originaire des Philippines où il est cultivé pour sa fibre, le *Musa acuminata* et le *Musa balbisiana*, espèces comestibles se différenciant par leur génome, à savoir respectivement A pour *Musa*

acuminata et B pour *Musa balbisiana*. Les bananiers cultivés ou cultivars dérivent de la combinaison (hybridation, polyploïdie et parthénocarpie) des génomes A et B des deux espèces *Musa* comestibles ([Champion, 1967](#); [Simmonds, 1976](#); [Khamsouk, 2001](#); [Lassoudière, 2007](#)).

1.2.2 Morphologie et développement du bananier

La figure 1.4 présente le schéma général d'un bananier et les différentes parties des appareils végétatif et reproducteur ([Champion, 1963](#)). La tige souterraine (bulbe ou rhizome) est le centre vital du bananier, du lieu de formation des racines, des feuilles et de l'inflorescence. C'est à ce niveau que se différencient les rejets assurant la pérennité de l'espèce. Le système racinaire est de type fasciculé (sans pivot). Le pseudo-tronc n'est pas une vraie tige ; il résulte de l'imbrication des gaines foliaires les unes dans les autres. Lisse et rigide, le pseudo-tronc peut atteindre 1,5 à 8 mètres suivant les variétés. Le système foliaire est très développé et sa structure présente des particularités liées aux contraintes d'alimentation hydrique. Dans un cycle, le bananier produit une trentaine de feuilles fonctionnelles au rythme d'une feuille tous les 6 à 15 jours suivant la température, l'ensoleillement et le taux d'humidité du sol. A la fin de l'émission foliaire, la vraie tige croît dans le pseudo-tronc et l'inflorescence apparaît au sommet du pseudo-tronc, puis se recourbe vers le sol. L'inflorescence, assez complexe, se compose d'un axe ou hampe (vraie tige) à partir duquel se différencient un bourgeon apical (toujours en activité) et successivement des glomérules de fleurs femelles (futurs mains du régime ou fruits), puis mâles (fleurs staminées). Chez la plupart des bananiers comestibles, les ovaires des fleurs femelles se développent en doigt ou fruit sans fécondation. Les mains se découvrent successivement à mesure que les bractées (ou spathes) qui les

recouvrent, de couleur rouge violacée et cireuses, tombent; puis, elles vont se redresser et grossir pendant près de 3 mois. L'ensemble des mains enroulées en hélice autour de la hampe forme le régime. Après la récolte, le pseudo-tronc du pied-mère est généralement coupé pour permettre la repousse de rejets ou jeunes plants issus de ramifications latérales à partir du rhizome ([Lassoudière et Maubert, 1971](#); [Lassoudière, 2007](#)).

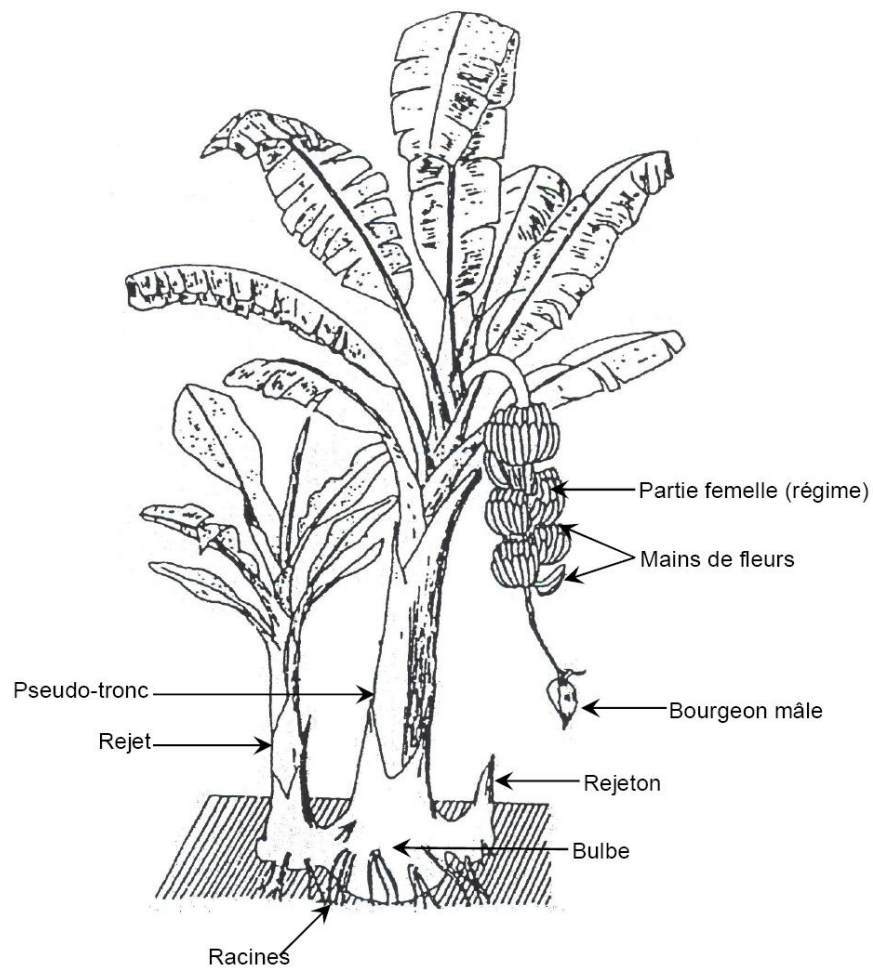


Figure 1.4 Vue schématique d'un bananier à la fructification et de ses rejets
(Source : Champion, 1963).

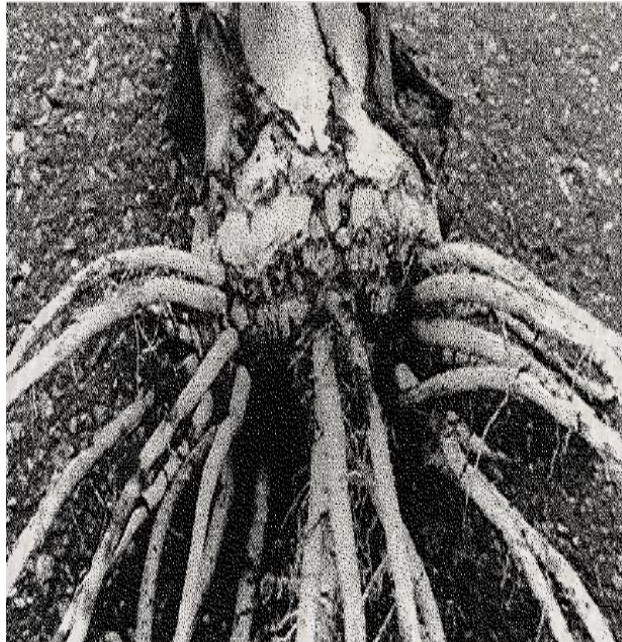


Figure 1.5A. Système racinaire du bananier. A : Système racinaire du bananier (Blomme et al., 2000).

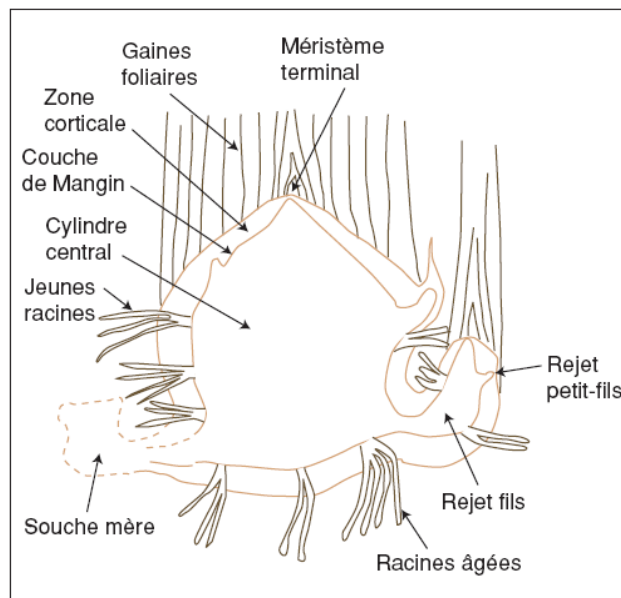


Figure 1.5B. Système racinaire du bananier. Coupe schématique dans une souche de bananier (adaptée de J. Champion, 1963).



Figure 1.5C. Système racinaire du bananier, vue de dessus de la coupe transversale du pseudo-tronc au niveau du collet (Source : Dreisseidler, 2011).

1.2.3 Système racinaire du bananier

Fonctions

Comme pour toutes les plantes terrestres, le système racinaire du bananier a deux fonctions principales : (i) l'ancrage de la plante dans le sol, et (ii) le prélèvement de l'eau et des éléments minéraux nécessaires à la croissance.

Il joue d'autres fonctions qui peuvent être considérées comme secondaires, notamment la synthèse de régulateurs de croissance ou le stockage de réserves ([Barber, 1992](#); [Itai et Birnbaum, 1996](#); [Dorel, 2001](#)).

Structure, croissance et durée de vie

Comme pour la plupart des monocotylédones, le système racinaire du bananier est de type fasciculé (Figure 1.5A, C), c'est-à-dire constitué de racines adventives ([Price, 1995](#); [Lassoudière, 2007](#)). [Beugnon et Champion \(1966\)](#) distinguent : les racines primaires et les racines secondaires. Formées dans la zone à l'interface du cortex et du cylindre central, appelée zone de Mangin (Figure 1.5B), les racines primaires émergent du rhizome individuellement ou par groupe de deux, trois ou quatre racines. Les racines primaires ont une croissance indéterminée par opposition aux racines secondaires, déterminées, car elles ne dépassent pas 15 à 20 cm de longueur, et sont produites en continu tout au long de la phase végétative ([Beugnon et Champion, 1966](#) ; [Lassoudière, 1978](#) ; [Lavigne, 1987](#)). Le nombre de racines primaires varie largement en fonction de l'état sanitaire de la plante. [Robin et Champion \(1962\)](#) et [Beugnon et Champion \(1966\)](#) ont observé qu'un rhizome en bon état sanitaire peut porter 200 à 300 racines primaires ayant une longueur totale de 230 m. Sur base de plants de bananier de soixante semaines, [Blomme \(2000\)](#) a dénombré 491 et 465,5 racines primaires pour les cultivars 'Calcutta 4' et 'Mbi Egome', respectivement. Sur les racines primaires se développent les racines secondaires de premier ordre à partir desquelles sont formées les racines secondaires de deuxième ordre. D'un ordre au suivant, le diamètre et la longueur des racines décroissent progressivement ([Araya, 2005](#)). En ce qui concerne le diamètre, en particulier, les valeurs varient entre environ 4 à 10 mm pour les racines primaires, 0,5 à 4 mm pour les racines secondaires de

premier ordre et 1 mm ou moins pour les racines secondaires latérales de deuxième ordre. Les racines secondaires de troisième ordre sont rares et ont un diamètre inférieur à 200 μm (Draye et al., 2005). Les racines secondaires de premier et deuxième ordres proviennent du protoxylème proche de l'apex des racines primaires et secondaires de premier ordre respectivement, et sont continuellement émises au fur et à mesure que les racines parentes s'étendent dans le sol (Robinson, 1996; Araya, 2005). Les poils absorbants se développent sur les racines primaires et secondaires (Belalcázar et al., 2005 ; Blomme, 2000). Ils ont généralement quelques millimètres de longueur et ont comme fonction principale l'absorption de l'eau et des éléments minéraux (Blomme, 2000).

La durée de vie fonctionnelle d'une racine dépend de plusieurs facteurs : cultivars, présence d'insectes ravageurs ou de nématodes, climat, propriétés physiques et chimiques des sols (Belalcázar et al., 2005). Les racines primaires du bananier sont fonctionnelles pendant 4 à 6 mois tandis que les racines secondaires de premier et de deuxième ordre sont fonctionnelles pendant 8 et 5 semaines respectivement (Robinson, 1988). Certains auteurs ont rapporté que la plupart des racines primaires du bananier restent fonctionnelles pendant 5 à 8 mois. Toutefois, des racines primaires probablement fonctionnelles ont été observées à la récolte de régimes, soit 18 mois après la plantation et 11 mois après la fin du processus de différenciation racinaire (Belalcázar et al., 2005). Lassoudière (1980) a observé que le rhizome d'une plante récoltée ('pied-mère') peut rester vivant (et probablement fonctionnel) pendant la croissance et jusqu'à la récolte du 'rejet-fils'. Dans certaines conditions de sol, le nombre de rhizomes vivants peut même être identique aux nombre de cycles antérieurs au cycle de récolte actuel (Delvaux et Guyot, 1989).

Le taux d'élongation racinaire du bananier dépend de plusieurs facteurs, notamment le diamètre et la longueur de la racine, des variations diurnes ou saisonnières du taux d'émergence foliaire et les facteurs environnementaux. En particulier, un accroissement de la résistance mécanique du sol, un pH acide, une nappe phréatique superficielle, une baisse de température du sol et un déficit en oxygène affectent négativement le taux d'élongation racinaire du bananier ([Draye et al., 2005](#)). Des taux d'élongation racinaire de l'ordre 1,2 à 4 cm/jour et 0,33 cm/jour ont été observés pour les racines primaires et les racines secondaires de premier ordre respectivement ([Lavigne, 1987](#); [Lassoudière, 1978](#) ; [Draye et al., 2005](#)).

Distribution verticale et horizontales des racines

Les racines du bananier sont généralement confinées dans les horizons de surface (25-35 cm) et atteignent difficilement les horizons profonds du sol sauf sur sols à porosité élevée ([Delvaux, 1995](#)). Plusieurs études antérieures concordent sur la distribution verticale et horizontale des racines du bananier (Figure 1.6) : 70 à 90% de la masse des racines du bananier sont localisées dans les 40 premiers centimètres de profondeur et 90 % des racines s'étendent sur un mètre autour du pseudo-tronc ([Lassoudière, 1978](#); [Robinson, 1985](#); [Delvaux et Guyot, 1989](#); [Sebuwufu et al., 2004](#); [Araya, 2005](#); [Belalcázar et al., 2005](#); [Blomme et al., 2008](#)).

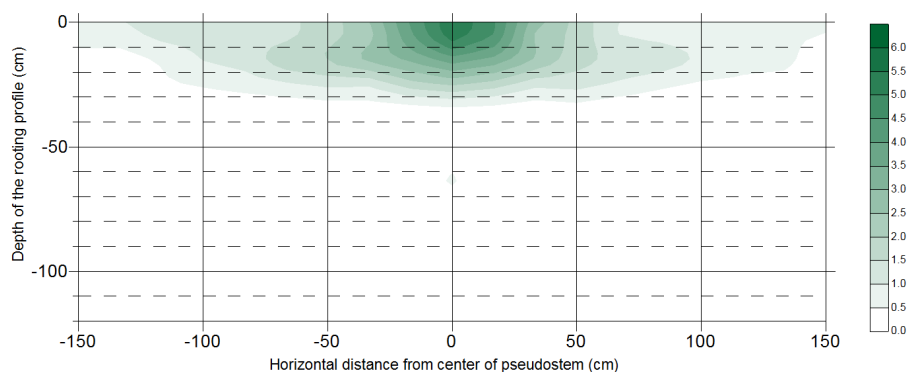


Figure 1.6A. Distribution spatiale du système racinaire du bananier. La légende indique le nombre de racines. Source : van Asten (2009).

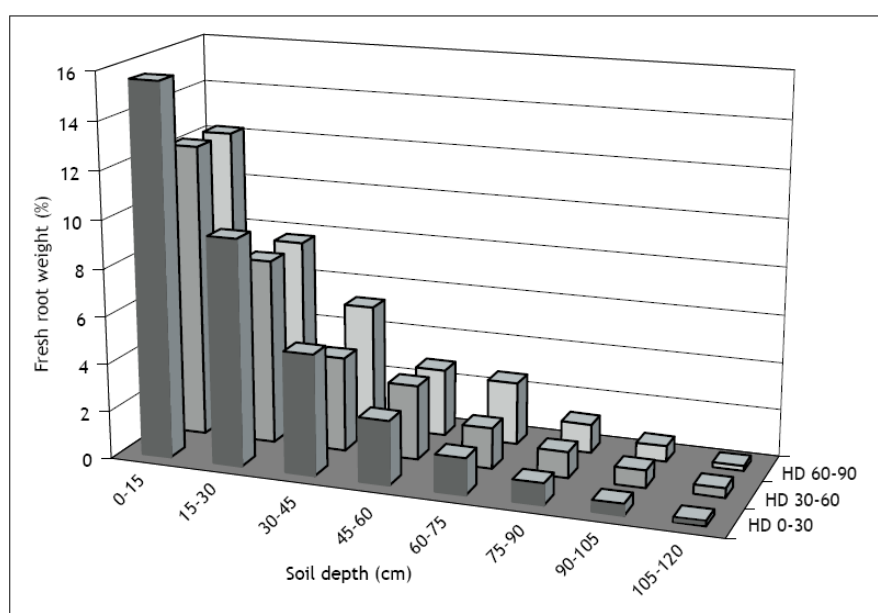


Figure 1.6B. Distribution spatiale du système racinaire du bananier exprimée en pourcentage de poids frais de racines (*Musa* var. AAA cv-valery, n = 10). HD : distance horizontale par rapport au pseudo-tronc. Source : Araya (2005).

Dans une étude basée sur la comparaison entre le système racinaire des bananiers de hautes altitudes de la RGLA et les autres groupes de *Musa*, [Sebuwufu et al. \(2004\)](#) ont observé que la profondeur du sol et le génotype des bananiers avaient affecté de manière significative le poids sec et la longueur des racines primaires des bananiers au stade de préfloraison. Quel que soit le génotype, la majorité des racines a été trouvée dans les 45 premiers centimètres du sol. En ce qui concerne les différentes caractéristiques des racines (poids frais, longueur), il n'y avait pas d'interaction significative entre la distance horizontale par rapport au pseudo-tronc et le génotype du bananier, indiquant une distribution similaire des racines autour du pseudo-tronc quel que soit le génotype.

Relation entre le système racinaire et la partie aérienne chez le bananier

Pour les plantes, plusieurs auteurs (Brouwer, 1983; Brouwer et Dewit, 1969; Kramer et Kozlowski, 1979 cités par [Ferree, 1994](#)) ont rapporté l'existence d'un équilibre fonctionnel tel que lorsqu'une partie du système racinaire ou l'appareil végétatif est supprimée, la partie restante croît rapidement et rétablit le ratio appareil végétatif / système racinaire. De même, [Noordwijk et al. \(2004\)](#) ont rapporté qu'une plante forme un équilibre fonctionnel entre ses parties souterraines et aériennes. En effet, en cas de stress hydrique ou de déficits d'éléments minéraux, l'équilibre fonctionnel bascule en faveur du système racinaire, ce qui permet à la plante d'accroître la taille du système racinaire afin d'explorer un volume plus important du sol et satisfaire les besoins en nutriments de la partie aérienne. Par contre, en cas de déficit de lumière, l'équilibre bascule vers la formation des feuilles. Un grand nombre de feuilles pour capter les radiations solaires et une faible demande des racines en hydrates de carbone assurent le fonctionnement normal de la plante. Dans l'un ou

l'autre cas, un déséquilibre fonctionnel peut affecter négativement le rendement de la plante, notamment lorsque : i) l'équilibre fonctionnel de la plante bascule de manière inadéquate (par exemple si le système racinaire requiert plus d'hydrates de carbones en conditions de stress hydrique), ii) très souvent, les conditions défavorables de culture réduisent à la fois la croissance du système racinaire et de l'appareil aérien de la plante ([Dreisseidler, 2011](#)).

Pour le bananier, l'existence d'un tel équilibre fonctionnel, proposé par [Swennen \(1984\)](#) cité par [Dreisseidler \(2011\)](#), pourrait se confirmer compte tenu de fortes corrélations entre l'appareil végétatif et le système racinaire. Dans une étude portant sur la variété 'Poyo' en Côte d'Ivoire, [Beugnon et Champion \(1966\)](#) ont trouvé une corrélation positive entre la circonférence du pseudo-tronc (à 30 cm du collet), la taille du régime (nombre de mains et de doigts) et le nombre de racines primaires émises. En Ouganda, [McIntyre et al. \(2000\)](#) ont également trouvé une corrélation positive (R^2 : 0,91) entre la masse totale des racines et le rendement du bananier. Pour ce même pays, des résultats similaires ont été rapportés par [Sebuwufu et al. \(2004\)](#). Dans une étude conduite à Onne au Nigeria, [Blomme et al. \(2001\)](#) ont mis au point des équations de régression attribuant au moins 90% de la variation de la croissance racinaire à la variation du développement des parties aériennes. Au Costa Rica, [Serrano et Marin \(1998\)](#) cités par [Serrano \(2005b\)](#) ont évalué le rendement du bananier de 1987 à 1997 et ont trouvé une corrélation positive (R^2 : 0,85) entre le poids frais des racines fonctionnelles et le rendement annuel des bananiers. Toutefois, ces corrélations peuvent varier suivant le site et la date d'observation.

Régénération racinaire et lien sol-racine

Le système racinaire est une population de racines de différents types et âges qui évoluent continuellement par suite de formation, croissance et sénescence des racines (Draye et al., 2005). A ce titre, la formation de nouvelles racines en remplacement des anciennes racines est un processus physiologique normal régi par les phytohormones et qui concourt au maintien de l'équilibre fonctionnel appareil aérien/système racinaire de la plante. Chez les bananiers, les racines primaires sont produites en continu tout au long de la phase végétative (Araya, 2005 ; Draye, 2005), et à la floraison, la plante atteint la taille maximale du système racinaire qui lui permettra de supporter le régime (Blomme, 2000). De même, les racines secondaires sont formées au fur et à mesure que les racines primaires parentes croissent. Lorsque l'apex d'une racine primaire est endommagé, des suites de facteurs biotiques ou abiotiques, plusieurs racines secondaires de premier ordre peuvent se développer en racines primaires supplémentaires (racines secondaires de premier ordre à croissance indéterminée), les plus longues se trouvant alors proches de l'ancien apex (Lassoudière, 1978; Kobenan et al., 1997 ; Draye et al., 2005).

Comme mentionné précédemment, les racines primaires du bananier sont formées dans la zone à l'interface du cortex et du cylindre central, appelée zone de Mangin (Figure 1.5B), et émergent du rhizome individuellement ou par groupe de deux, trois ou quatre racines. Au-delà de la zone de Mangin, elles se retrouvent dans le substrat (sol), leur croissance dépendra non seulement de leur potentiel génétique mais également des conditions édaphiques dont certaines peuvent devenir des contraintes (voir section *contraintes au développement racinaire du bananier*).

Certaines études ont montré que la coupe des racines des plantes induisait un processus de régénération racinaire. Une telle régénération racinaire, bien que régie par les phytohormones, serait en plus induite par une cause exogène. Contrairement à la régénération naturelle des racines qui est un processus normal, la régénération racinaire consécutive à la coupe racinaire pourrait induire une forte cyclicité, avec de risques plus élevés de stress physiologique pour la plante. Les racines primaires du bananier représentent 2 à 20 % de la longueur totale des racines (Swennen, 1986 ; Blomme, 2000), mais elles portent toutes les racines secondaires et les poils absorbants. Ainsi, même une faible variation du nombre ou de la longueur de racines primaires pourrait fortement affecter la longueur totale ou l'architecture racinaire (Draye et al., 1999). La régénération racinaire consécutive à la coupe de racines a été étudiée en détail pour certaines plantes, notamment le pommier (*Malus domestica*) et la vigne (*Vitis vinifera*) (Schupp et Ferree, 1990 ; Ferree, 1994 ; Pickering et al., 2005). Chez le bananier, par contre, peu ou pas du tout est connu sur la régénération racinaire de suite de la coupe des racines.

1.2.4 Contraintes au développement racinaire du bananier

Les racines du bananier sont fragiles, ont un faible pouvoir de pénétration et un grand besoin en oxygène (Martin-Prével, 1987). Au champ, le système racinaire du bananier est généralement soumis à des contraintes physiques et biotiques dont l'intensité résulte des interactions entre le sol, le climat et l'itinéraire technique (Delvaux et Guyot, 1989).

Contraintes physiques

La texture, la résistance mécanique et le drainage sont les principales caractéristiques physiques du sol qui influencent la croissance et le développement racinaire du bananier. Ces caractéristiques affectent la profondeur effective du sol et la balance air-eau dans la rhizosphère (Vaquero, 2005).

La texture du sol affecte à la fois la densité apparente et la résistance mécanique du sol (Daddow et Warrington, 1983 ; Vaquero, 2005). La résistance mécanique du sol est le résultat de la cohésion et de la compaction des horizons du sol. La compaction du sol résulte d'une pression exercée sur le sol et se traduit par une augmentation de la fraction du volume de sol occupé par la phase solide, au détriment des phases gazeuse et liquide du sol (Vaquero, 2005). Contrairement à la densité apparente (sauf pour les sols gonflants), la résistance mécanique du sol est très sensible à la teneur en eau du sol. En général, la résistance mécanique du sol décroît lorsque la teneur en eau du sol augmente, mais augmente avec la densité apparente du sol (Kumar et al., 2012 ; Vaz et al. 2001). Stenafou et Papazafeiriou (2013) ont observé des relations positives entre la résistance mécanique du sol et la teneur en oxydes (Fe/Al), en Fe cristallin et en argile du sol. La résistance mécanique du sol varie largement tant entre les différents types de sols qu'au sein d'un même type de sol lorsque certaines conditions édaphiques changent (par exemple l'humidité du sol ou la tension de l'eau du sol). L'accroissement de la résistance mécanique d'un sol peut être liée à plusieurs facteurs : changement des conditions édaphiques (par exemple teneur en eau du sol), pratiques culturales (fréquent passages machines lourdes et travail du sol à des mauvaises conditions d'humidité), processus naturels (migration des

argiles, cycles d'humectation/dessiccation, pression due au développement racinaire des plantes), texture ([Stenafou et Papazafeiriou, 2013](#)).

[Unger et Kaspar \(1994\)](#) ont observé que lorsque la résistance mécanique du sol atteints 20 kg/cm^2 , la croissance racinaire de la plupart des plantes est sensiblement réduite ou limitée. Des effets similaires sont également observés lorsque la tension de l'eau du sol augmente ([Stenafou et Papazafeiriou, 2013](#)), ce qui corrobore la relation négative entre la résistance mécanique et la teneur en eau du sol. Toutefois, d'autres auteurs ([Ehlers et al., 1983](#)) ont observé que, pour une même plante, la valeur seuil de résistance mécanique du sol peut être variable suivant les types de sol et les pratiques culturales (notamment, le labour/non labour). Par exemple, comparant la croissance racinaire du cotonnier des parcelles labourées et non labourées, [Ehlers et al. \(1983\)](#) ont observé une valeur seuil de résistance mécanique du sol plus faible sur la couche du sol labourée (3,6 MPa) que les couches sous-jacentes des parcelles labourées non affectée par le travail du sol et les parcelles non labourées (4,6-5,1 MPa). De même, évaluant l'effet de plantation de bananiers sans travail du sol sur un paillis de résidus de culture sur la qualité du sol et le fonctionnement de la culture bananière, [Dorel et al. \(2010\)](#) ont observé que le système racinaire des parcelles non labourées et paillées caractérisées par des valeurs supérieures de résistance mécanique du sol était plus profond que celui des parcelles labourées sur les 40 premiers cm au moyen d'un tracteur. La colonisation racinaire des horizons à valeurs de résistance mécanique très élevées peut s'expliquer de cette manière :

- En non labour, les pores d'origine biologique (voies des racines des anciennes récoltes et galeries de la faune du sol) constituent des voies privilégiées (préférentielles) de croissance des racines des cultures en place,

lesquelles racines peuvent être observées dans les horizons compacts du sol.

- En agriculture mécanisée, il se forme une semelle de labour caractérisée une discontinuité verticale dans le sol, ce qui entrave la colonisation du sol en dessous du fond de labour et limite la profondeur maximale de l'enracinement.

En ce qui concerne la densité apparente, il importe de signaler que, dans l'étude de la relation entre la densité apparente du sol et la croissance des plantes, la notion la plus importante est celle de la densité apparente limitante pour la croissance ('Growth-Limiting Bulk Density', GLBD) (Daddow et Warrington, 1983) plutôt que celle de la valeur absolue de densité apparente mesurée. La GLBD correspond à la valeur seuil de densité apparente du sol à laquelle la résistance à la pénétration des racines devient très importante et entraîne une réduction sensible de la croissance de la plante (O'Connell, 1975). Celle-ci dépend de la texture du sol (Figure 1.7). Un sol à texture grossière a généralement une valeur de GLBD supérieure à celle d'un sol à texture fine (Daddow et Warrington, 1983). Dans une étude sur l'évaluation de la croissance racinaire du tournesol (*Helianthus annuus*) sur des sols de texture différente, Veihmeyer et Hendrickson (1948) ont observé un arrêt de la croissance racinaire de tournesol (*Helianthus annuus*) à une valeur de GLBD plus élevée ($1,75 \text{ g/cm}^3$) sur sol sableux que sur sol argileux ($1,46$ à $1,63 \text{ g/cm}^3$). Pour le bananier, Delvaux et Guyot (1989) ont également observé des 'seuils critiques' de densité apparente du sol en fonction du type de sols (par exemple, $1,05$ à $1,20 \text{ g/cm}^3$ sur sols brun rouille à halloysite, $1,20$ à $1,40 \text{ g/cm}^3$ sur Ferrisols, $0,90$ à $1,00 \text{ g/cm}^3$ sur sols peu évolués, andiques sur cendres et ponces, $0,80$ à $0,90 \text{ g/cm}^3$ sur Andosols sur cendres et ponces).

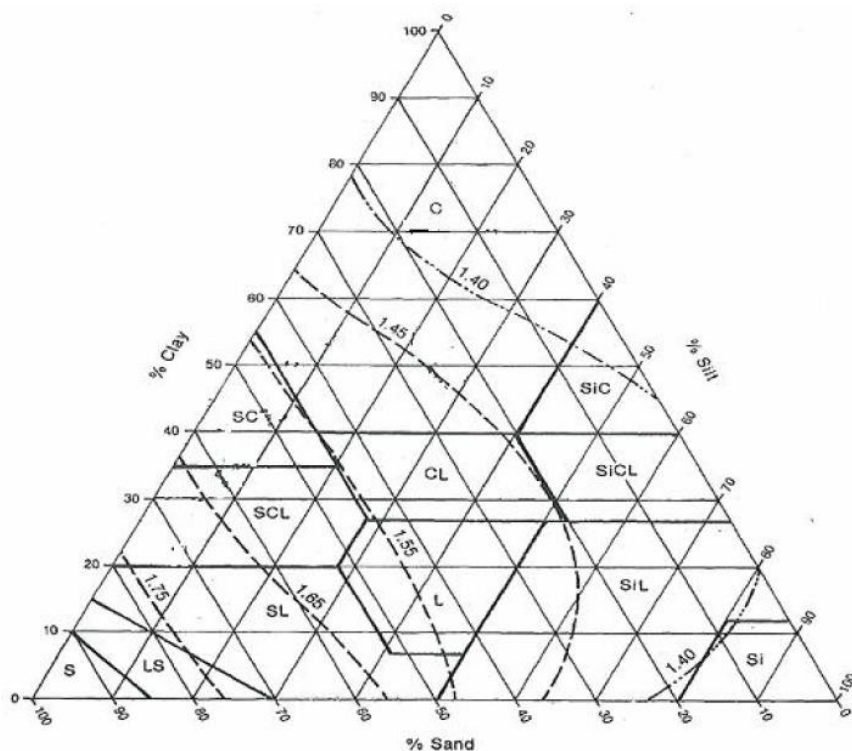


Figure 1.7. Diagramme textural de densité apparente limitante pour la croissance racinaire (Daddow et Warrington, 1983). Les lignes discontinues représentent les compositions granulométriques d'égale densité apparente limitante pour la croissance racinaire.

Des études antérieures ont démontré que les sols compacts, la présence d'un horizon imperméable, un pourcentage élevé en argile (> 60%) ou en sable, un sol saturé en eau limitent ou réduisent la croissance racinaire du bananier (Stover et Simmonds, 1987; Vaquero, 2005). En Martinique, Delvaux et Guyot (1989) ont observé que la densité apparente et la résistance mécanique limitaient l'exploration racinaire du bananier sur les sols les plus argileux et compacts. L'accroissement de la densité apparente du sol au-delà de $0,95 \text{ g/cm}^3$ a réduit de manière significative la densité

racinaire. Dans une étude sur l'impact de la compaction du sol sur l'enracinement du bananier (*Musa* AAA cv. 'Williams') conduite en Australie, [Pattison et al. \(2005\)](#) ont rapporté une réduction du poids frais de racines, du nombre de racines primaires de diamètre >2 mm et du poids frais du rejet avec l'accroissement des valeurs de densité apparente du sol. La compaction du sol réduit l'aération et affecte le drainage, ce qui peut entraîner la mort de racines par asphyxie racinaire ([Delvaux et Guyot, 1989](#); [Dorel, 2001](#) ; [Vaquero, 2005](#)).

La température du sol affecte également la croissance racinaire du bananier. [Robinson et Alberts \(1989\)](#) ont observé un taux d'élongation racinaire du bananier (*Musa* AAA Cavendish, variété 'Williams') d'environ 3 cm/jour à 25°C, inférieure à 0,5 cm/jour à 15°C et nul à 11,5°C. A des températures voisines de 43°C dans la zone racinaire, [Ramcharan et al. \(1995\)](#) ont observé une réduction du poids sec des racines des vitro-plants du bananier ('Grande Naine') et un changement de la morphologie des racines (racines brunes et dépourvues d'apex racinaire) ([Ramcharan et al., 1995](#) ; [Blomme, 2000](#)).

La disponibilité en eau dans le sol affecte l'élongation racinaire et l'absorption d'éléments minéraux (notamment le P et K) ([Blomme, 2000](#)). Avec un système racinaire superficiel et une canopée verte toute l'année, le bananier est une plante exigeante en eau et très sensible au stress hydrique. [Lu et al. \(2002\)](#) évaluent à 9 à 10 litres d'eau/plant/jour la consommation d'un bananier (*Musa* AAA var. 'Williams') en champ. En cas stress hydrique, les racines envoient un signal qui déclenche la fermeture des stomates. La plante reste hydratée mais réduit l'assimilation carbonique, et par conséquent le rendement ([van Asten et al., 2011](#)).

Contraintes chimiques

Des déficiences en éléments minéraux et des déséquilibres nutritionnels peuvent causer la détérioration des racines (Gauggel et al., 2005). Par exemple, sur sol pauvre en calcium, Benett (1993), cité par Blomme (2000), a observé une réduction sensible de la croissance des racines, conduisant à des racines courtes et ramifiées. Une déficience en potassium réduit la masse, la longueur et le nombre de racines latérales. Par contre, une forte teneur en aluminium échangeable entraîne une réduction du nombre et diamètre des racines, de la matière sèche des racines secondaires et de l'absorption totale d'eau et d'éléments minéraux (Rufyikiri et al., 2000, 2001). A un taux de saturation de l'aluminium échangeable de 30% du complexe d'échange, Gauggel et al. (2005) ont observé des rhizomes superficiels portant des racines ramifiées, courtes et de faible diamètre sur des sols ayant des propriétés physiques différentes mais les mêmes teneurs en Al, Fe et Mn.

Contraintes biologiques

Les nématodes, les champignons et les insectes affectent également le développement du système racinaire du bananier (Gauggel et al., 2005). Les nématodes parasites des plantes constituent une contrainte majeure à la production bananière dans de nombreuses régions du monde (Hartman et al., 2010 ; Gowen et Quénehervé, 1990). Chez le bananier, les nématodes endoparasites migrants (par exemple *Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*, *Pratylenchus goodeyi*, *Helicotylenchus multicinctus*) sont les plus nocifs et communes. L'infection par les nématodes entraîne des nécroses racinaires et réduit la taille du système racinaire (Speijer et De Waele, 1997). Elle peut interférer avec l'absorption et le transport des nutriments

et de l'eau, ce qui résulte en une croissance ralentie, un faible remplissage des fruits et une sensibilité à la verse ([Batlle-Viera et Pérez-Vicente, 2002](#)). Les interactions racinaires entre les nématodes (par exemple *R. similis*) et les espèces fongiques du genre *Cylindrocladium*, *Acremonium*, *Zythia*, *Cylindrorcorpon*, *Fusarium* contribuent à augmenter les dommages causées par les nématodes ([Booth et Stover, 1971](#); [Loridat, 1989](#); [Batlle-Viera et Pérez-Vicente, 2002](#)).

Dans la RGLA (notamment Ouganda, Rwanda, Burundi et Sud-Kivu), *Helicotylenchus multicinctus*, *Radopholus similis* et *Pratylenchus goodeyi* ont été identifiées comme les espèces de nématodes les plus communes dans les bananeraies de hautes altitudes ([Speijer et De Waele, 2001](#) ; [Gaidashova, 2009](#)).

1.3 Systèmes de culture bananière dans la Région des Grands Lacs d'Afrique

Dans les régions tropicales, subtropicales et méditerranéennes, les bananiers et bananiers plantains sont cultivés sous différents types de systèmes de culture, dont les rendements varient généralement entre 5 et 70 t/ha/an ([Delvaux, 1998](#)). A l'échelle mondiale, la diversité des systèmes de culture de bananier est énorme. Cette diversité englobe la monoculture de bananier et les systèmes de cultures associées impliquant des bananiers, des plantes fruitières, l'agroforesterie et des cultures vivrières comme les céréales, les légumineuses et les tubercules ([Delvaux, 1998](#); [Akyampong et al., 1995](#)). Ces systèmes peuvent répondre adéquatement à la définition de [Norman et al. \(1995\)](#) suivante : «les systèmes de cultures vivrières sont des

communautés de plantes qui concourent à l'obtention de la nourriture, à la satisfaction des profits ou plus couramment, à la combinaison de ces buts». Sous les tropiques, [Norman et al. \(1995\)](#) listent cinq groupes de systèmes de cultures vivrières : systèmes de culture itinérante, systèmes semi-intensifs de cultures pluviales, les systèmes intensifs de cultures pluviales, les systèmes irrigués et inondés, et les systèmes mixtes combinant plantes annuelles et pérennes. Il est plutôt évident que les bananiers et bananiers plantains sont cultivés dans tous ces différents systèmes. Dans les systèmes de cultures associées, le bananier peut ne pas toujours être la culture principale ([Delvaux, 1998](#)). La grande diversité des systèmes de culture bananière est due à la large variation de conditions écologiques (sol, climat), de conduite technique et de paramètres socio-économiques dans les régions où le bananier est cultivé ([Delvaux, 1998](#); [Karamura et al., 1998](#)).

En Afrique de l'Est et australe, [Karamura et al. \(1998\)](#) ont distingué trois principaux systèmes de production bananière : les systèmes bananiers de jardin potager, les systèmes bananiers de subsistance et les plantations bananières commerciales :

- Les systèmes bananiers de jardin potager sont rencontrés en régions périurbaines en Ouganda, au Rwanda, au Burundi, au Kenya et en Tanzanie ou dans les régions où les cultures vivrières ont une importance commerciale ou alimentaire supérieure à celle de la banane. La disponibilité de terres est le facteur qui détermine la superficie cultivée en bananier ($\leq 0,25$ ha) de ce système qui utilise une quantité limitée d'intrants. Les cultivateurs accordent peu d'attention aux pratiques culturales (matériels de plantation, contrôle de maladies et ravageurs, irrigation et rendement).

- Les systèmes bananiers de subsistance : ils constituent les systèmes de culture de bananier les plus communs en région tropicale dans le monde et contribue à plus de 87% dans la production globale de la banane (banane et plantain). En Afrique de l'Est et australe, ces systèmes dominent tout particulièrement dans la Région des Grands Lacs. Le bananier y est cultivé principalement pour la consommation locale (~90%) quand bien même une partie de la récolte est vendue dans des marchés locaux de bananes. Une attention technique particulière est généralement accordée à ces systèmes, notamment en ce qui concerne le contrôle des maladies et ravageurs. L'accroissement de la population et son impact sur la disponibilité de terres agricoles entraîne la dégradation de la fertilité naturelle des terres et conséquemment, aggrave l'impact des ravageurs et maladies sur ces systèmes bananiers de subsistance.

- Les plantations bananières commerciales sont moins complexes (par exemple, une seule variété, un seul mode de gestion) et contribue pour 12% dans la production bananière globale à l'échelle mondiale ([Robinson, 1996](#)). Ces systèmes concernent principalement la banane à dessert destinée aux marchés des zones tempérées. Devant satisfaire aux objectifs commerciaux, ces systèmes sont gérés de manière intensive depuis la sélection et le traitement du matériel de plantation, la préparation du terrain et la plantation, la conduite de l'essai (fertilisation, irrigation, lutte contre les maladies et ravageurs) jusqu'au marché et/ou la transformation. Les rendements sont de l'ordre de 40 à 60 t/ha et

le profit est l'objectif ultime de ces systèmes, dont la durée d'exploitation est bien définie (généralement 2 à 5 ans) ([Valmayor et al., 1991](#)).

Egalement rencontrés en zones rurales d'Asie et d'Amérique centrale, les systèmes bananiers de subsistance sont pérennes, utilisent très peu d'intrants (pas d'irrigation, généralement pas de fertilisation minérale et de pesticides) et couvrent de faibles superficies (0,25 à 5 ha) ([Van Damme et al., 2013](#) ; [Karamura et al., 1998](#)). En termes de cultivars plantés, de types de sols et de topographie, de présence de ravageurs et maladies, de mode de gestion et usages de la culture, ces systèmes de culture bananière sont complexes, même au sein d'une même zone agro-écologique. Dans une enquête sur les systèmes bananiers en Ouganda, [Karamura et al. \(1998\)](#) ont trouvé en moyenne 12 cultivars différents de bananier en cultures intercalées ou associées par exploitation paysanne (ferme). Parmi les raisons pour lesquelles les paysans pratiquent les cultures intercalaires ou associées figurent l'accès limité à la terre, l'économie de main d'œuvre et le besoin de diversifier les récoltes ([Jassogne et al., 2013](#) ; [Van Damme et al., 2013](#) ; [Ouma, 2009](#); [Bagamba et al., 1998](#)).

Plusieurs plantes, annuelles ou pérennes, sont cultivées en association avec le bananier qui possède des caractéristiques « quasi pérennes » grâce au rejetonage, et dont la durée d'exploitation peut dépasser plus de 50 ans en agriculture de subsistance dans la Région des Grands Lacs d'Afrique ([Ouma, 2009](#) ; [CIALCA, 2007b](#)). Diverses variantes d'associations peuvent être distinguées :

- A la mise en place de la bananeraie, les cultures telles que le haricot, le caféier, le maïs et la patate douce sont cultivées en association avec les jeunes plants de bananiers. Douze mois après la mise en place de la bananeraie (soit après deux saisons de cultures annuelles), les feuilles de bananiers assurant une couverture importante au sol, les planteurs suppriment les cultures annuelles associées et commencent le paillage sous bananier. Quelques plantes fruitières (papayer, jacquier, figuier) sont plantées délibérément par les paysans pour servir de brise-vent ([Ouma, 2009](#)). En Tanzanie, en Ouganda, Rwanda et l'Est de la RD Congo, le bananier est souvent cultivé en association avec le caféier. Comparé à la culture pure de caféier, l'association caféier-bananier offre l'avantage d'être une source de revenu supplémentaire pour les paysans qui ont des surfaces de terres limitées ([Jassogne et al., 2013](#) ; [Ouma, 2009](#); [Bagamba et al., 1998](#)). Au Kenya, le bananier est parfois planté en association avec le cocotier de 8 à 25 ans ([Ouma, 2009](#)).

- Dans les zones à forte densité de population, des plantes annuelles sont fréquemment cultivées dans des bananeraies établies. En Ouganda, l'association bananier-ananas constitue une source supplémentaire de revenus dans la mesure où l'ananas est destiné à l'exportation ([Jodha, 1979](#); [Grossman et Quarles, 1993](#)). En Afrique de l'Est, l'association bananier-haricot couvre 15% de la surface totale des terres de production de haricot tandis que l'association haricot-maïs et haricot en culture pure couvrent respectivement 43 et 22% de la surface totale de terres de production de haricot. Dans les pratiques paysannes des pays de la

RGLA, le haricot est couramment associé au bananier (Wortmann et al., 1992). En effet, la banane et le haricot constituent deux des aliments de base (Akyampong et al., 1995) et les deux cultures sont assez compatibles en association de cultures. Excepté la compétition pour le potassium, le haricot est moins compétitif tant pour l'eau que pour les autres éléments minéraux et supporte mieux de faibles intensités de lumière que d'autres cultures (Wortmann et al., 1992; Bekunda et al., 2003).

- Au Burundi, Akyempong et al. (1999, 1995) ont évalué en milieu paysan, l'adaptabilité et la performance de la culture bananière en agroforesterie (associations arbustes/bananier/haricot). Neuf espèces arbustives aux écartements de 4 x 8 m (312 plants/ha) ont été associées avec le bananier planté aux écartements de 4 x 4 m (625 plants/ha) et le haricot (80.000 plants/ha). Les résultats ont montré qu'aucune espèce arbustive n'a affecté de manière significative le rendement des bananiers. Jusqu'à la septième récolte, soit 3 ans après intégration des espèces arbustives, le rendement de haricot n'a pas été affecté. Les analyses économiques ont montré qu'à l'exception de *Leucaena* et de *Markhamia*, toutes les espèces arbustives plantées ont donné des bénéfices nets supérieurs au traitement témoin (bananier/haricot). *Cedrela serrata* a été identifiée comme l'espèce arbustive la plus performante en association bananier/haricot.

Dans la zone d'étude, les systèmes cultureux sont dominés par les cultures de case dans lesquels le bananier est généralement dominant (Rishirimuhirwa, 1997). A l'échelle d'une ferme (exploitation paysanne),

l'auteur a distingué 5 zones successives dans les systèmes culturaux. La première se situe dans le voisinage immédiat des habitations ; le bananier y est très dense et est associé surtout à la colocase. Quand on s'éloigne de la case, la densité de bananier diminue et le nombre de cultures qui lui sont associées augmente (colocase, haricot, maïs, manioc, etc). La troisième zone est généralement occupée par des cultures moins exigeantes qui ne sont pas fertilisées (par exemple manioc et la patate douce). Cette zone est peu fertile et laisse le pas à la zone des pâturages. En aval, la propriété se termine généralement par une zone de cultures de marais.

Au Cameroun et au Nigéria, les associations de bananiers (bananier et plantain) avec des cultures annuelles (par exemple manioc, le maïs, le soja, le haricot, taro, l'arachide et le sorgho) sont également très fréquentes mais sont conduites en non labour, avec ou sans fertilisation minérale et à différentes densité de plantation ([Norgrove et Hauser, 2014](#) ; [Kainga, 2013](#) ; [Akyampong, 1998](#)). Pour le bananier plantain, en particulier, les résultats des essais expérimentaux conduits de 1976 à 2013 ont montré que, hormis le manioc (probablement à cause d'une forte compétition pour le potassium), l'association de cultures avait un impact positif ou n'affectait pas le rendement du bananier plantain ([Norgrove et Hauser, 2014](#)).

Contrairement aux autres pays de la Région des Grands Lacs d'Afrique (par exemple Ouganda, Kenya), le travail du sol est couramment pratiqué dans les associations bananier-cultures annuelles (haricot) au Sud-Kivu, au Rwanda et au Burundi. A chaque cycle cultural de haricot, le sol sous bananier est labouré manuellement à l'aide d'une houe ou d'un trident dans le but de préparer le lit de semis (Figure 1.8). Le travail du sol affecte environ les 25 premiers cm ([Dowiya et al., 2009](#)), et peut être fait jusqu'à 15

cm du pseudo-tronc du bananier. Deux saisons culturales peuvent être distinguées dans la zone d'étude : la 'saison A' allant de mi-septembre à mi-janvier et la 'saison B' qui couvre la période de mi-février à mi-juin. Ces deux saisons correspondent à un rythme pluviométrique bimodal séparé par deux périodes sèches : la petite saison sèche de mi-janvier à mi-février et la grande saison sèche de mi-juin à mi-septembre. Cette dernière est souvent désignée 'Saison C' lorsque les agriculteurs installent les cultures dans les bas-fonds et les marais drainés (Pypers et al., 2011 ; Ngongo et Lunze, 2000). Par ailleurs, il importe d'indiquer que la périodicité des saisons culturales décrites ci-haut peut varier d'un site à un autre et d'une année à l'autre suivant la date du début de la saison pluvieuse. Le travail du sol en vue de préparer le lit de semence de cultures annuelles est effectué dans les périodes sèches (Figure 1.9). D'une manière générale, le travail du sol dans les bananeraies est précédé de l'exportation des résidus de bananiers. Les résidus exportés servent de paillis pour le caféier (Rwanda et Burundi) ou pour les cultures annuelles, notamment le manioc (Sud-Kivu en RD Congo) (CIALCA, 2007a; Kirkby et Ngendahayo, 1985). Le semis de haricot se fait après les premières pluies et la période entre le labour et le semis de haricot varie largement entre les sites et les planteurs (quelques jours à quelques semaines).



Figure 1.8 A. Sol sous bananier travaillé en vue de préparer le lit de semence de cultures annuelles.



Figure 1.8B. Association culturale bananier-haricot (Photo par T. Muliele).

Pratiques culturales	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Labour												
Semis haricot												
Saison culturale												

Figure 1.9. Calendrier de travail du sol et de semis de haricot en fonction des saisons culturales dans la zone d'étude (établi à partir des données de littérature et les observations faites sur le terrain de 2007-2011).

1.4 Pratiques culturales, propriétés du sol et enracinement du bananier

Travail du sol

Les pratiques culturales pratiquées dans une bananeraie pouvant varier fortement suivant les systèmes de cultures, nous nous limiterons dans le cadre de notre étude aux effets de quelques pratiques qui concernent le travail du sol, notamment le labour, le remodelage, le sillonnage et le buttage.

En culture bananière, les connaissances actuelles sur l'effet du labour concernent essentiellement le labour avant la mise en place de la plantation. Le labour réduit la résistance mécanique et la densité apparente du sol (Russell, 1977). Par exemple, sur un même précédent cultural et 3 mois après le labour, Blomme (2000) a rapporté une réduction de la densité apparente du sol de 26 % (de $1,64 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$ à $1,21 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$) à 5 cm, et de 27 % (de $1,62 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ à $1,18 \pm 0,12 \text{ g/cm}^3$) à 20 cm de profondeur du sol sur les parcelles labourées sur 30 cm au moyen d'un tracteur. La réduction de la densité apparente du sol a augmenté de manière

significative le développement racinaire et la croissance du bananier au cours des premiers mois de culture. Dans les bananeraies martiniquaises, [Delvaux et Guyot \(1989\)](#) ont rapporté une incidence positive du labour sur la distribution latérale des racines, même dans des sols de texture grossière, notamment les sols peu évolués sur cendres et ponces. Pour les bananiers à fruits à dessert, [Robinson \(1996\)](#) a montré que des sols qui avaient été labourés à plus de 50 cm produisaient plus de racines en meilleur état sanitaire. Aux Antilles françaises, [Dorel et al. \(2010\)](#) ont cependant observé que l'accroissement de la porosité du sol consécutif au labour est temporaire et n'a pas permis un enracinement profond 8 mois plus tard. Aux Antilles françaises, [Dorel et al. \(2010\)](#) ont même observé que le sol des bananeraies pérennes d'altitude qui n'est jamais travaillé présentait de meilleures propriétés physiques et biologiques que des bananeraies conduites de manière conventionnelle (replantation tous les 5 ans précédée d'un labour).

Contrairement au labour avant la plantation des bananiers, [Delvaux et Guyot \(1989\)](#) ont observé que le remodelage (décapage des horizons de surface humifères) et le sillonnage avaient une incidence négative sur la distribution racinaire du bananier. La plantation du matériel végétal dans le fond du sillon conduisait à un enracinement mal reparti, la grande majorité de racines étant localisée dans le sillon. Dans ces conditions et suite aux écoulements préférentiels de l'eau dans le sillon, des racines souffrant d'asphyxie en fond des sillons ont été observées sur sols brun rouille à halloysite et andosols dérivés de cendres et ponces en Martinique ([Delvaux et Guyot, 1989](#)). Le buttage, une pratique visant à améliorer l'ancrage des plants dont le système racinaire est dégradé (nécroses et asphyxie), a favorisé l'émission de nouvelles racines à la base du pseudo-tronc et

augmenté, relativement au sol non butté, la profondeur du profil racinaire (Delvaux et Guyot, 1989).

Dans une bananeraie établie, notamment en monoculture industrielle, le labour n'est généralement pas pratiqué. Dans les systèmes bananiers pérennes de subsistance de la Région des Grands Lacs d'Afrique et particulièrement au Sud-Kivu, au Rwanda et au Burundi, par contre, le travail du sol est couramment pratiqué en vue de préparer le lit de semis des cultures annuelles associées au bananier (CIALCA, 2007a; Kirkby et Ngendahayo, 1985). Dans cette région, aucune étude détaillée n'a été conduite pour évaluer l'impact du travail du sol dans une bananeraie établie. Toutefois, aux îles Hawaï, Higgins (1904) a rapporté que le labour dans une bananeraie établie était sujet à controverse entre les planteurs de bananes. Selon les planteurs de bananes de l'époque, le labour dans une bananeraie établie avait des avantages et des désavantages : (i) comme avantage, la coupe des racines entraîne la formation de nouvelles racines, plus actives et à forte capacité d'absorption, (ii) comme désavantage, le processus de formation de nouvelles racines requiert une mobilisation plus importante des nutriments aux dépens du rhizome. Pratiqué en période critique pour les nutriments (floraison et remplissage des fruits), le labour aurait un impact négatif sur le poids de régime. Ainsi, le labour dans les bananeraies des îles Hawaï ne se pratiquait pas avant la période de grande récolte de bananes (Higgins, 1904).

Paillage

Les effets bénéfiques du paillage consistent en l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Araya et De Waele, 2005). Le paillage accroît la teneur en matière organique et en éléments minéraux du

sol (Rishirumuhirwa, 1993; McIntyre et al., 2000; Araya et De Waele, 2005), favorise le développement racinaire et accroît la masse racinaire dans les horizons de surface (McIntyre et al., 2000; Blomme, 2000). Il améliore l'infiltration d'eau (Rishirumuhirwa, 1993; McIntyre et al., 2000), favorise l'activité biologique du sol et accroît la diversité biologique (Dorel et al., 2010). Robinson et al. (1989) et Bhattacharyya et Madavha (1986) ont observé une réduction et une stabilisation de la température du sol sur les 15 premiers centimètres de profondeur sur parcelles sous paillage. La température du sol affecte la croissance racinaire et la capacité d'absorption racinaire et elle pourrait réduire l'activité et la multiplication des nématodes (*Radophilus similis*) (McMichael et Burke, 1996; Turner et Lahav, 1985; Araya et De Waele, 2005). Des températures élevées sur sol nu accroissent la mort des racines (Speijer et Fogain, 1999). La présence d'une couverture du sol (paillage) et en particulier, l'amélioration des propriétés du sol sous paillage (conservation de l'humidité du sol, réduction et régulation de la température, accroissement de la teneur en éléments minéraux), par contre, réduit sensiblement la détérioration des racines du bananier (Robinson, 1995; Swennen, 1990).

1.5 Connaissances acquises sur les contraintes à la production bananière dans la Région des Grands Lacs d'Afrique

La baisse de rendement du bananier dans la RGLA a été rapportée dans plusieurs études (par exemple Anonyme, 2001 ; Baijukya et Steenhuisen Piters, 1998 ; Woomer et al., 1998 cités par van Asten et al., 2005 ; Ouma, 2009 ; Wairegi, 2010). Depuis et longtemps avant, des études ont été

conduites et le sont encore dans le but d'accroître le rendement du bananier et améliorer les systèmes de culture bananière dans la RGLA. Dans cette section, les acquis de quelques études les plus récentes sont rapportés :

[Wairegi \(2011\)](#) a étudié en détail les facteurs qui affectent le rendement du bananier de hautes altitudes des exploitations de petites tailles dans les différentes zones de production bananière en Ouganda. Cette étude a permis, entre autres, de mettre au point une méthode d'estimation quantitative du poids de régime de bananes applicable pour tous les géotypes de bananiers et les zones de production bananière, d'obtenir les normes de statut nutritionnel des bananiers, d'identifier les principales contraintes à la production bananière, leurs variations spatiale et temporelle ainsi que leurs interactions; d'évaluer la réponse du bananier à la fumure minérale et organique et de démontrer que les technologies disponibles, notamment la fertilisation minérale et paillage permettaient de doubler le rendement actuel du bananier. Contrairement à plusieurs études antérieures sur les contraintes à la production bananière dans la RGLA, l'auteur a montré que les contraintes abiotiques (faible fertilité du sol, déficit hydrique) affectaient le rendement du bananier davantage que les contraintes biotiques (mauvaises herbes, nématodes et charançons).

De même sur une aire géographique plus grande (Ouganda, Rwanda et Burundi), [Delstanche \(2011\)](#) a observé que la baisse de la fertilité du sol est un problème régional pour les sols de la RGLA fortement altérés. Comme rapporté par [Wairegi \(2010\)](#) et [Okumu et al. \(2011\)](#), les contraintes à la production bananière varient largement tant entre les différentes zones de production bananière qu'au sein d'une même zone de production et à

l'échelle d'une exploitation agricole (ferme). La différence entre le rendement actuel et le rendement réalisable peut atteindre 76 à 90%, ce qui concorde bien avec le travail de [Wairegi \(2010\)](#) qui a, entre autres, démontré que les pratiques culturales comme la fertilisation et le paillage permettaient de doubler le rendement actuel du bananier. [Delstanche \(2011\)](#) a montré que la matière organique du sol contribue pour 60 à 90% (horizons de surface) et 20 à 50% (horizons profonds) dans la capacité d'échange cationique (CEC) du sol. L'auteur a également mis au point des valeurs critiques et établi les normes des nutriments devant servir à interpréter les analyses foliaires. Les résultats de [Wairegi \(2010\)](#) et [Delstanche \(2011\)](#) concordent bien avec ceux de [Ndabamenye \(2013\)](#) qui a évalué l'impact de la gestion de la densité de plantation du bananier de hautes altitudes dans les zones agro-écologiques contrastées au Rwanda. Bien plus, [Ndabamenye \(2013\)](#) a observé que la densité de plantation pratiquée par les agriculteurs est positivement corrélée avec les apports d'eau, plus de 1500 plants/ha pour les zones à pluviosité >1500 mm/an et 1000-1400 plants/ha pour des zones à faible pluviosité (1000-1200 mm). La densité de plantation optimale pour le bananier de hautes altitudes varie suivant la pluviosité (disponibilité en eau), la fertilité du sol et le cultivar. Le poids de régime le plus élevé est obtenu dans les plantations à faible densité et sur les sols les plus fertiles dont les analyses foliaires ont révélées moins de déficiences (Andosols > Nitisols > Acrisols). Bien plus, [Ndabamenye \(2013\)](#) a montré que i) le rendement du bananier en fonction de la densité de plantation est spécifique au génotype du bananier. Par exemple, le rendement du cultivar à bière augmentait avec la densité de plantation alors que celui du cultivar à cuire diminuait à forte densité ; ii) l'accroissement de la densité de plantation entraîne une augmentation de l'indice de la surface foliaire (LAI, 'Leaf Area Index') et une interception de

rayonnement photosynthétiquement actif pouvant atteindre 96%. Dans ces conditions, le rendement des cultures en association avec le bananier pourrait être négativement affecté ; iii) dans une bananeraie pérenne, le prélèvement sélectif d'éléments minéraux entraîne un déséquilibre nutritionnel qui doit être corrigé par la fertilisation minérale pour maintenir la production bananière.

Par ailleurs, il importe d'indiquer que l'impact du déficit hydrique sur le rendement du bananier de hautes altitudes a été rapporté dans les études antérieures (Gold et al., 1999 ; Bagamba et al., 2007 cités par [van Asten et al., 2011](#) ; [Bouwmeester et al., 2009](#)), et étudié en détail par [van Asten et al. \(2011\)](#). A cause de son système racinaire superficiel et une canopée verte durant toute l'année, le bananier est très sensible au déficit hydrique, ce qui affecte sa croissance et son rendement. En Afrique de l'Est, la culture bananière est pluviale et la pluviosité présente une grande variabilité spatiale et temporelle (600-2700 mm/an, [Bouwmeester et al. 2009](#)). [Van Asten et al. \(2011\)](#) ont rapporté que : i) la pluviosité moyenne annuelle optimale pour les bananiers de hautes altitudes doit être supérieure à 1200-1300 mm/an ; ii) la perte de rendement du bananier liée au déficit hydrique dans les zones de production bananière de l'Afrique de l'Est à pluviosité <1100 mm pourrait atteindre 20-65%.

Dans une autre étude, [Taulya \(2013\)](#) a observé que le stress hydrique affectait négativement le bananier de hautes altitudes qu'en cas de déficience en potassium. La production de la matière sèche et du rendement du bananier de hautes altitudes est déterminée par l'interaction entre le potassium et la pluviosité cumulée. En douze mois, l'apport de potassium (250-600 kg/ha/an) a augmenté le rendement de 8 à 15 t/ha/an indépendamment de l'occurrence des conditions sèches (pluviosité

cumulée <1100 mm) ou humides (pluviosité $\geq$ 1100 mm). De même, [Ndabamenye \(2013\)](#) a rapporté que l'impact négatif du stress hydrique sur le rendement du bananier de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est était plus marqué sur les sols pauvres comparés aux sols fertiles.

Pour lutter contre le stress hydrique, l'irrigation est pratiquée dans la majorité de plantations bananières commerciales. Pour les petits producteurs de banane de hautes altitudes qui disposent des ressources limitées, par contre, l'irrigation n'est pas une solution applicable à court et moyen termes ([van Asten et al., 2011](#)). Pour [van Asten et al. \(2011\)](#), l'impact négatif du stress hydrique pourrait être atténué par l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau des pluies : combinaison de la fertilisation minérale et du paillage avec l'utilisation de l'eau des pluies captée dans des bassins de rétention aménagés au bas des terrains en pentes, utilisation de géotypes résistants à la sécheresse et la sélection des rejets de façon à éviter que les stades de floraison et de remplissage des doigts (bananes) coïncident avec les périodes sèches. De même, la création des cultivars ayant un système racinaire plus efficace serait une approche durable pour les producteurs aux ressources limitées ([Draye et al., 1999](#)). Il serait également important d'étudier les facteurs qui affectent l'efficacité du système racinaire, notamment les propriétés édaphiques, les parasites (nématodes) et les mycorhizes.

Évaluant l'effet des nématodes parasites des bananiers (en particulier *Pratylenchus goodeyi*) et des champignons mycorhiziens arbusculaires sur le bananier de hautes altitudes de la RGLA (Rwanda, Burundi et Sud-Kivu), [Gaidashova \(2009\)](#) a montré que *Pratylenchus goodeyi* était l'espèce de nématodes la plus commune et la seule qui causait de manière significative

($P < 0,001$) les nécroses racinaires. Toutefois, son impact négatif sur le rendement du bananier serait probablement masqué dans la mesure où la vigueur des plantes les plus infestées par les nématodes augmentait avec la population de nématodes, la densité de plantation du bananier et la profondeur de paillage. Les valeurs de nécroses ≤ 50 % étaient associées à une amélioration de la performance des bananiers tandis que des valeurs supérieures de nécroses ($> 50\%$) n'affectaient pas la croissance des bananiers. Cette étude et d'autres ([Gaidashova et al., 2013](#) ; [Jefwa et al., 2013](#)) ont montré que la colonisation des racines du bananier par les champignons mycorhiziens arbusculaires a un impact positif sur la performance du bananier, notamment sur les sols pauvres et pour les cultivars à faiblement développement racinaire. Les mycorhizes ont d'autres effets positifs pour le bananier : ils favorisent la reprise après plantation, accroissent la résistance à la sécheresse et contrôlent les nématodes ([Araya, 2005](#)). Pour les producteurs de bananes aux ressources limitées, la symbiose racines du bananier-champignons mycorhiziens arbusculaires peut être une alternative adéquate pour améliorer la production bananière sur les sols pauvres.

En conclusion, la baisse de rendement du bananier de hautes altitudes de la RGLA est due principalement aux facteurs abiotiques (faible fertilité, stress hydrique) plutôt qu'aux facteurs biotiques (nématodes, charançons et mauvaises herbes). L'ampleur de ces contraintes varie suivant les différentes zones de production bananière. Des pratiques culturales comme la fertilisation minérale pour corriger le déséquilibre nutritionnel et le paillage permettent de doubler le rendement actuel du bananier. Dans les zones à faible pluviosité, le contrôle de la densité de plantation est nécessaire pour une bonne production bananière. La symbiose système

racinaire du bananier-champignons mycorhiziens arbusculaires accroît l'efficacité du système racinaire et peut être une alternative adéquate pour la production bananière sur les sols pauvres. Une autre approche pour accroître l'efficacité du système racinaire serait l'identification et le contrôle des facteurs édaphiques qui affectent le développement racinaire. Ceci nécessite la caractérisation simultanée des profils pédologique et racinaire. En Afrique de l'Est, peu d'informations concernent cet aspect de recherche.

Chapitre 2. Impact du contexte pédologique sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique

Résumé

Au champ, le système racinaire du bananier est généralement soumis à des contraintes biotiques et abiotiques. Des essais ont été installés sur 4 sites (Mulungu et Walungu au Sud-Kivu en RD Congo, Rubona au Rwanda et Gitega au Burundi) en vue d'évaluer l'influence des conditions pédologiques sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes. Trente mois après plantation, seize profils (2 m de large x 1 m de profondeur) par site ont été ouverts à 40 cm du pseudo-tronc des bananiers au stade pré-floraison ou bien avant ce stade (Gitega). De 0-100 cm de profondeur, tous les 10 cm, la densité racinaire (racines/dm²) et le profil pédologique (propriétés physiques et chimiques) ont été caractérisés simultanément. Les propriétés physiques et chimiques de sols ont affecté de manière significative ($P < 0,001$) la distribution et la densité racinaire du bananier. Les principales contraintes au développement racinaire du bananier sont les valeurs élevées de résistance mécanique du sol dès 20 cm, les faibles teneurs en K et P et une toxicité manganique (30-50 cm) à Walungu ; une faible teneur en carbone organique, une déficience en Ca, Mg, K et en P assimilable et un pourcentage élevé en sable (57 à 71%) à Rubona ; des valeurs de pH très acides ($\text{pH} \leq 5,1$), un taux de saturation en Al échangeable élevé (21 à 29%),

un ratio Al/bases échangeables élevé (52 à 88%), une déficience en Ca, Mg, K, P assimilable et Mn à Gitega. Le site de Mulungu, par contre, ne présente pas de stress abiotiques liés au sol. La densité racinaire maximale (10-30 cm) est fortement liée au niveau de fertilité du sol, Mulungu, le plus fertile (Nitisols sur cendres volcaniques), venant en première position (entre 3 et 4 racines/dm²) suivis de Walungu (Ferralsols humic, moins altéré, entre 2 et 3 racines/dm²) et Rubona (Acrisols sur granite, entre 1 et 2 racines/dm²). Le site de Gitega (Ferralsols rhodic) a une densité racinaire maximale très faible, <0,5 racine/dm². L'amélioration de la croissance et du développement racinaire du bananier de hautes altitudes nécessite l'amélioration de la fertilité du sol (correction du pH et apport des éléments minéraux) à Gitega, les apports de carbone organique et des éléments minéraux à Rubona (Ca, Mg, K et P) et Walungu (K et P). A Mulungu, des mesures de conservation du sol (paillage) seraient nécessaires pour maintenir ses propriétés édaphiques optimales pour la croissance et le développement racinaire du bananier.

Mots clés : Contexte pédologique, enracinement, bananier, hautes altitudes.

2.1. Introduction

Dans les zones de culture de la banane sur les hauts plateaux d'Afrique de l'Est (Ouganda, Rwanda, Burundi, Est de la RD Congo, Nord-Ouest de la Tanzanie et Ouest du Kenya), les bananiers occupent jusqu'à 30% des terres cultivées ([van Asten et al., 2005](#)). La banane (banane à jus, à dessert, à cuire et plantain) joue un rôle important comme source de nourriture et de revenu pour les fermiers, les transporteurs et les commerçants de bananes

et ses sous-produits ([Jagwe et al., 2008](#) ; [van Asten et al., 2005](#) ; [Eledu et al., 2004](#) ; [Karamura et Karamura, 1994](#)).

Dans la RGLA, la production bananière est faible en raison de nombreuses contraintes biotiques et abiotiques ([Gaidashova, 2009](#) ; [Ouma, 2009](#); [van Asten et al., 2005](#); [Speijer et Fogain, 1999](#)). De plus, il existe une grande variabilité spatiale des rendements du bananier, que ce soit à l'échelle des différentes zones agro-écologiques ou au niveau des exploitations paysannes (fermes) ([Okumu et al. 2011](#), [Wairegi, 2010](#)). Pour [van Asten et al. \(2005\)](#), la variabilité des rendements en banane est liée, entre autres, à la durée du cycle végétatif (qui dépend du cultivar, de la nutrition de la plante et du climat), aux modes de gestion de la bananeraie (bananier en culture pure ou en association avec d'autres cultures) et à l'absence d'une période unique de récolte chez le bananier. Cette variabilité des rendements pourrait également s'expliquer par la variabilité spatiale des contraintes biotiques et abiotiques ([Ndabamenye, 2013](#) ; [Delstanche, 2011](#)).

Les contraintes biotiques à la production bananière comprennent les attaques de nématodes, de charançons et diverses maladies (par exemple. cercosporiose, flétrissement bactérien, mosaïque en tirets du bananier (Banana Streak virus) ([Nzaweze et al., 2010](#) ; [Kalyebara et al., 2006](#) ; [Speijer et Fogain, 1999](#); [Tushemereirwe et Bagabe, 1999](#)). La baisse de la fertilité du sol ([Wairegi, 2010](#) ; [Delstanche, 2011](#)) résultant de l'utilisation intensive du sol ([Okech et al., 1996](#); [Godefroy et al., 1991](#)), ou de la réduction des intrants agricoles (comme le paillage) ([Rubaihayo et al., 1994](#)), une faible profondeur du sol ([Taulya, 2004](#)), le stress hydrique ([van Asten et al., 2011](#)), et la compaction du sol ([Dorel, 1993](#) ; [Pattison et al., 2005](#)) comptent parmi

les principales contraintes abiotiques affectant le développement du bananier. En Guadeloupe, [Dorel \(1993, 2001\)](#) a observé que les contraintes liées à la compaction du sol étaient plus marquées sur andosol par rapport au nitisol. Sur andosol, comparé aux plantes de traitement « ameublissement » (décompactage mécanique + bêchage manuel sur 60 cm), le compactage du sol (10 passages de tracteur sur sol humide, humidité pondérale initiale 95%) a retardé de 3 mois la date de floraison, réduit de 17% le nombre de fruits sur le régime et de 9% la circonférence du pseudo-tronc à 1 m du collet. Pour d'autres propriétés du sol, notamment la teneur en éléments minéraux et la résistance mécanique du sol, le tableau 2.3 présente quelques valeurs seuils tirées de la littérature à partir desquelles la croissance du bananier est négativement affectée.

Certaines contraintes à la production bananière affectent directement le système racinaire du bananier. Les nématodes (par exemple *Radophilus similis* et *Pratylenchus goodeyi*) et les charançons (*Cosmopolites sordidus*) attaquent les racines et le rhizome du bananier. Ceci peut entraîner une perturbation de la nutrition (réduction de la capacité d'absorption d'eau et des éléments minéraux), un accroissement de la verse des plantes suite à la destruction du système racinaire ou du rhizome, une floraison tardive et une baisse du poids des régimes ([Gaidashova, 2009](#) ; [Mukasa et al., 2006](#) ; [van Asten et al., 2005](#) ; [Speijer et Fogain, 1999](#)). Les contraintes abiotiques (physiques et chimiques) affectent également le développement racinaire du bananier. Des techniques de fertilisation inadéquates peuvent causer des déficiences nutritionnelles et des déséquilibres susceptibles de causer la détérioration des racines ([Gauggel et al., 2005](#)). Sur sol pauvre en calcium, [Benett \(1993\)](#), cité par [Blomme \(2000\)](#), a observé une réduction sensible de la croissance des racines, conduisant à des racines courtes et

ramifiées. Une déficience en potassium réduit la masse, la longueur et le nombre de racines latérales. Par contre, une forte teneur en aluminium échangeable entraîne une réduction du nombre et diamètre des racines, de la matière sèche des racines secondaires et de l'absorption totale d'eau et d'éléments minéraux (Rufyikiri et al., 2000, 2001).

En ce qui concerne les contraintes physiques du sol, Stover et Simmonds (1987) ont indiqué que la distribution racinaire est déterminée par les types de sols et les conditions de drainage. En Amérique latine, Gauggel et al. (2005) ont par exemple observé une rapide détérioration du système racinaire du bananier sur les sols présentant une texture extrême (plus de 60% d'éléments grossiers, forte teneur en sable ou en argile). Au Costa Rica, Vaquero (2005) a mis en évidence une nette différence de densité racinaire entre des sols de différentes textures : 173 contre 148 racines/plant dans les 25 premiers centimètres des sols à texture limoneuse et argilo-limoneuse, respectivement. L'effet négatif d'une teneur élevée en argile sur le développement racinaire du bananier a également été rapporté par Stover et Simmonds (1987). Ces auteurs et d'autres (Pattison et al., 2005 ; Dorel, 2001) ont aussi observé que la présence d'un horizon compact limite sensiblement la croissance et la densité racinaire du bananier. Plus précisément, Delvaux et Guyot (1989) ont observé une forte réduction de la densité racinaire ('impacts racinaires') de 7 à 1 racines par dm^2 lorsque la densité apparente du sol croît de 0,6 à 1,2 g/cm^3 pour des sols de Martinique. L'excès ou le déficit d'eau, lié aux facteurs climatiques (pluviosité), à la topographie du terrain et au drainage interne du sol (Gauggel et al., 2005; Vaquero, 2005), affectent également le développement racinaire et la performance des plantes. Le déficit d'eau réduit le nombre de racines, la taille du système racinaire et la productivité

du bananier. En effet, la teneur en eau du sol affecte le taux d'élongation racinaire, la capacité d'absorption d'eau et des nutriments par les racines. En particulier, l'excès d'eau peut entraîner la nécrose des racines par asphyxie ou toxicité d'éléments tels que le Fe ou le Mn (Vaquero, 2005; Serrano, 2005b). Globalement, Gauggel et al. (2005) estiment que les sols dont la profondeur effective est limitée à moins de 30 cm de profondeur par un horizon compact ou une nappe phréatique permanente et peu profonde conduisent à une forte détérioration du système racinaire du bananier.

Chez le bananier, plusieurs études ont établi l'existence de fortes corrélations entre l'appareil végétatif et le système racinaire. Dans une étude portant sur la variété 'Poyo' en Côte d'Ivoire, Beugnon et Champion (1966) ont mis en évidence une corrélation positive entre la circonférence du pseudo-tronc (à 30 cm du collet) et le nombre de racines primaires émises. En Ouganda, McIntyre et al. (2000) ont également relevé une corrélation positive (R^2 : 0,91) entre la masse totale des racines et le rendement du bananier. Dans une étude conduite à Onne au Nigeria, Blomme et al. (2001) ont mis au point des équations de régression attribuant au moins 90% de la variation de la croissance racinaire à la variation du développement des parties aériennes. Au Costa Rica, Serrano et Marin (1998), cités par Serrano (2005b), ont évalué le rendement du bananier de 1987 à 1997 et ont trouvé une corrélation positive (R^2 : 0,85) entre le poids frais des racines fonctionnelles et le rendement annuel des bananiers. Compte tenu de ces corrélations positives entre l'enracinement du bananier, son appareil végétatif et son rendement, il s'avère nécessaire de s'intéresser aux facteurs édaphiques qui affectent le développement racinaire du bananier dans les différentes régions pédo-climatiques de la

RGLA. Cet aspect de recherche revêt une importance particulière au regard de l'absence totale de connaissances sur l'influence des conditions pédo-climatiques sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la RGLA. L'objectif de cette étude est dès lors d'évaluer l'influence des conditions pédologiques sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la RGLA. L'hypothèse suivante a été vérifiée : la distribution racinaire du bananier de hautes altitudes de la RGLA est fortement dépendante des propriétés pédologiques des sites qui, elles-mêmes, sont étroitement liées aux types de sols. Afin de limiter les facteurs de variabilité de l'enracinement, l'étude a été réalisée dans le cadre d'essais agronomiques menés dans 4 sites dans des conditions de gestion identiques.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Sites d'études

Cette étude a été conduite dans le cadre d'essais réalisés sur 4 sites, à savoir Mulungu et Walungu au Sud-Kivu en RD Congo, Rubona au Rwanda et Gitega au Burundi. Le tableau 2.1 présente les types de sols et autres caractéristiques des sites. Le climat est de type Aw3 de la classification de Köppen dans tous les sites. Il s'agit d'un climat sub-tropical humide caractérisé par une avec une saison sèche de 3 mois. La pluviosité est bimodale permettant deux saisons culturales successives : la 'saison A' de septembre à janvier (mi-septembre à mi-janvier) et la 'saison B' qui couvre la période de février à juin (mi-février à mi-juin). La saison sèche intervient entre juin et septembre. Toutefois, une petite saison sèche a lieu entre janvier et février ([Rishirumuhirwa, 1993](#); [Ngongo et Lunze, 2000](#); [Gaidashova, 2009](#)).

Tableau 2.1 Types de sols et conditions climatiques des sites d'étude

Pays	Site ¹	Alt. (m)	Pluv (mm/an)	Temp (°C)	Sols	
					Roche mère	Classification (FAO)
					Cendres	
RD Congo	M	1699	1700	19,1	volcaniques	Nitisols
RD Congo	W	1638	1650	19,0	Basalte	Ferralsols
Rwanda	R	1630	1170	19,2	Granite	Acrisols
Burundi	G	1646	1200	19,0	Granite	Ferralsols

Source : Rishirumuhirwa (1993), Ngongo et Lunze (2000), Gaidashova (2009). 1. Site (M : Mulungu, W : Walungu, R : Rubona, G : Gitega) Alt : altitude, Plu : pluviométrie, Temp : température.

2.2.2. Dispositif expérimental et conduite des essais

Les essais en milieu contrôlé ont été installés entre mars et mai 2008 en vue d'évaluer l'effet de quatre modes de gestion sur les performances agronomiques d'une association bananier-haricot et sur les propriétés du sol. Le dispositif expérimental était le bloc complet randomisé à quatre traitements et quatre répétitions (Tableau 2.2). Le système local courant (labour et exportation des résidus de cultures) a été comparé à trois traitements alternatifs. Il est important d'indiquer que les traitements décrits au tableau 2.2 ne constituent pas un dispositif 'full factoriel' parce qu'il comporte des traitements paillés et sans labour ou non paillés et labourés. Il a cependant été appliqué dans le but de comparer les systèmes de culture, des systèmes culturels tels que non labour avec exportation de résidus de bananiers ou le paillage sur les parcelles préalablement labourées ne se pratiquent généralement pas dans la zone d'étude. Tous les traitements étaient soumis à une association bananier-haricot afin

d'évaluer la performance de haricot en non labour avec paillage sous bananier et comparer les traitements alternatifs au traitement T0, labour et exportation de résidus de bananier en vue de semer le haricot.

La variété locale de bananes à jus ('bière') de hautes altitudes (appelée 'Ndundu' au Sud-Kivu en RD Congo et 'Igishiri' au Burundi) a été plantée dans les essais en station du Sud-Kivu et du Burundi. Au Rwanda, une variété locale de banane à cuire de hautes altitudes ('Injangi') a été plantée à Rubona. En effet, la politique agricole actuelle du Rwanda ne promeut pas la culture des variétés de bananes à jus ('bière').

Tableau 2.2. Traitements des essais

Traitement	Pailles importées	Pailles exportées	Labour	Haricot
T0	Non	Oui	Oui	Oui
T1	Non	Non ¹	Non	Oui
T2	Oui ³	Non ²	Non	Oui
T3	Oui ⁴	Non ²	Non	Oui

1. auto-paillage, 2. auto-paillage + importation de pailles, 3. paillage graminéen (*Hyparrhenia diplandra*) ou chaumes de riz (*Oryza sativa*), 4. paillage graminéen (*Tripsacum laxum*).

A défaut d'avoir pu utiliser la même variété de banane sur l'ensemble des sites, nous avons veillé à utiliser le même type de matériel de plantation, qui influe également sur le développement du système racinaire et la croissance du bananier (Eckseiten et Ribison, 1995 ; Drew et Smith, 1990 cités par [Blomme, 2000](#)). Les rejets 'baïonnettes' (rejet à feuilles lancéolées) sélectionnés sur pieds dans les plantations paysannes ont été utilisés comme matériel de plantation. Après dessouchage, les rejets ont subi un

parage (nettoyage du rhizome au moyen d'une machette qui consiste à éliminer les lésions sur le rhizome) très soigneux puis désinfectés à l'eau bouillante (30 secondes) dans le but de détruire les parasites du rhizome (Hauser, 2007).

Le précédent cultural a varié en fonction des sites : culture de patate douce à Mulungu, cultures annuelles (association de cultures vivrières : sorgho, taro, patate douce, haricot) à Walungu et Rubona et jachère à *Hyparrhenia diplandra* à Gitega. A Gitega, les travaux d'ouverture du terrain ont consisté en un fauchage suivi d'un labour manuel à la houe de toute la parcelle expérimentale. Sur les 3 autres sites, le terrain ayant été précédemment soumis au travail du sol, un nouveau labour de toute la parcelle expérimentale n'a pas été pratiqué. Les rejets de bananier ont été plantés aux écartements de 2 m x 2 m (2.500 plants/ha) dans des trous de plantation de 50 x 50 x 50 cm, remplis avec le sol des horizons de surface. Aucun engrais minéral ou fumure organique de fond n'a été appliqué. Aucun pesticide n'a également été appliqué.

Trois types de pailles externes ont été appliqués (chaumes de riz, feuilles de *Hyparrhenia diplandra* ou de *Tripsacum laxum*). Le choix des pailles externes a tenu compte de leur disponibilité en milieu paysan (Tableau 2.2). Les feuilles de *Hyparrhenia diplandra* et de *Tripsacum laxum* ont été appliquées sur les traitements T2 et T3, respectivement, dans tous les sites sauf à Rubona où *Hyparrhenia diplandra* a été remplacé par des chaumes de riz (*Oryza sativa*). Toutes les pailles ont été appliquées à la dose de 25 t MS/ha la première année et 12,5 t MS/ha à partir de la deuxième année (12 mois plus tard). A l'installation des essais, une dose unique de résidus de bananiers a été appliquée. La dose a été déterminée en fonction des

rendements potentiels des sites (22 t MS/ha à Mulungu, 18 t MS/ha à Walungu, 10,2 t MS/ha à Rubona et 11 t MS/ha à Gitega).

Dans les parcelles du traitement témoin (T0), le sol entre les bananiers a été labouré à chaque saison culturale de haricot (septembre et février). Le travail du sol était manuel au moyen d'une houe ayant une lame de 20 cm de longueur. Les résidus de récoltes (feuilles et pseudo-tronc de bananier et fanes de haricot) étaient préalablement évacués de la parcelle élémentaire pour faciliter le travail du sol. Ce mode de préparation du sol dans les associations bananier-haricot constitue la pratique paysanne la plus commune dans la zone d'étude. Le haricot de type nain (variété 'Kirundo'/Nguakunguaku) a été semé dans tous les traitements aux écartements de 40 cm x 20 cm, à raison de deux graines par poquet (environ 250.000 plants/ha). Le haricot était cultivé deux fois par an (saison A et Saison B), 7 à 10 jours après le travail du sol manuel. Aucun engrais ni pesticide n'a été appliqué. Dans les autres traitements (T1, T2 et T3), les résidus de récolte et les feuilles de bananier non fonctionnelles (surface du limbe moins de 50% verte) coupées mensuellement étaient laissés en place (auto-paillage). L'œilletonnage a été pratiqué mensuellement pour éliminer les rejets en surnombre, un plant de chaque cycle étant conservé par souche de bananiers. Le sarclage était pratiqué en fonction du développement des adventices. Dans les parcelles labourées (T0), vu l'importance des mauvaises herbes, le sarclage a été fait à la houe. Les parcelles paillées (T1, T2 et T3) étaient généralement désherbées par arrachage. Les feuilles non fonctionnelles étaient élaguées une fois par mois dans tous les traitements. En fonction de la taille du bananier, le tuteurage était appliqué pour lutter contre la verse et aider la plante à supporter le

poids du régime. Le bourgeon mâle était éliminé après ouverture complète des fleurs femelles.

2.2.3. Paramètres observés

Les paramètres observés décrits dans ce chapitre concernent la description du système racinaire du bananier et du profil pédologique sous différents types de sols. Pour ce faire, la distribution racinaire et le profil pédologique ont été caractérisés simultanément. Ces mesures ont été faites en saison pluvieuse (8-10 semaines après le début de la saison des pluies) et 30 mois après l'installation des essais. Dans chaque site, 16 profils ont été décrits, soit quatre répétitions pour chacun des quatre traitements appliqués. En vue de ressortir uniquement la variabilité intersite, les traitements ne pouvant pas affecter la distribution racinaire dans les horizons profonds, pour chaque paramètre mesuré, les valeurs utilisées dans ce chapitre correspondent à la moyenne des 16 profils.

La caractérisation du profil pédologique a porté sur les propriétés physiques et chimiques des sols. La résistance mécanique du sol a été mesurée horizontalement dans le profil tous les dix centimètres (0-100 cm de profondeur) à l'aide d'un pénétromètre manuel (type IB, n° réf. 06.06, Eijkelkamp, taille du cône: 0,5 cm² (surface à la base), 30°), à raison de 5 mesures par tranche de 10 cm. Dans le profil, par tranche de 10 cm (0-100 cm), trois échantillons de sol non perturbé ont été prélevés au moyen de cylindres de Kopecki (100 cm³) pour la détermination de la densité apparente par la méthode gravimétrique.

Des échantillons composites de sol ont été prélevés pour la détermination de la composition granulométrique et des analyses chimiques. De 0 à 100 cm de profondeur, par tranche de 10 cm, les prélèvements ont été combinés pour faire un échantillon composite par site et par profondeur, soit 10 échantillons composites par site. Ces échantillons composites ont été séchés à l'air libre et tamisés sur maille de 2 mm de diamètre avant les analyses. Les analyses chimiques ont été faites au laboratoire des Sciences du Sol à l'Université catholique de Louvain (UCL). Toutes les analyses ont été faites sur échantillon frais mais les résultats analytiques ont été exprimés sur la base d'un poids équivalent séché à 105°C pendant 48 heures.

Le pH (H₂O) a été mesuré dans une suspension sol/eau suivant le rapport 1:5, une heure après la mise en suspension. L'acidité d'échange ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) a été déterminée suivant la méthode décrite par [McLean \(1965\)](#) : percolation sur 10 g de sol avec 100 ml de KCl 1M (4x25 ml) et dosage par titrage avec NaOH (acidité totale) et HCl (aluminium échangeable). La quantité de H⁺ a été obtenue par différence entre l'acidité totale et la quantité d'aluminium échangeable. Le carbone organique du sol a été dosé suivant la méthode de [Walkley et Black \(1934\)](#). Les cations échangeables ont été extraits de deux manières : (i) extraction avec la solution de Mehlich-3 sur l'ensemble du profil (0-100, tous les 10 cm ; [Mehlich \(1984\)](#)), (ii) extraction par percolation avec la solution d'acétate d'ammonium 1M pH 7 (6x25 ml) sur quatre profondeurs de mesure (0-10, 30-40, 60-70 et 80-90 cm) en vue du dosage des cations basiques et de la détermination de la capacité d'échange cationique (CEC). Pour les deux méthodes d'extraction, le dosage des cations a été fait par spectrophotométrie d'émission atomique (ICP AES) sur l'ICAP 6500 de Thermo Scientific. La CEC à pH 7 a été déterminée sur les

quatre profondeurs de mesures susmentionnées suivant la méthode de Metson. La quantité d'ammonium retenue par le sol après le lavage du sol (6 x 50 ml) avec l'éthanol dénaturé a été considérée comme l'équivalent de la CEC du sol à pH 7. Le cation ammonium saturant a été désorbé avec une solution de KCl 10% pH 3 (6 x 25 ml). La concentration en ammonium dans le percolât a été déterminée par distillation. Le phosphore assimilable et le manganèse soluble ont été extraits du sol au moyen de la solution Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosés par spectrophotométrie d'émission atomique (ICP AES) sur l'ICAP 6500 de Thermo Scientific. Le fer, l'aluminium et le silicium amorphes (Fe_{ox} , Al_{ox} , Si_{ox}) ont été extraits avec la solution d'oxalate pH = 3 (extraction sélective pour un rapport sol : solution 1 : 50 pendant 4 heures à température ambiante et dans le noir (Blakemore et al., 1987) et dosés par spectrophotométrie d'émission atomique. Le fer libre (Fe_{dcb}) a été extrait avec la solution de dithionite et citrate de sodium tamponnés par le bicarbonate de sodium (Mehra et Jackson, 1960) et dosé par spectrophotométrie d'émission atomique.

La composition granulométrique a été déterminée par la méthode combinant l'utilisation d'ultrasons et de résines sodiques (Feller et al., 1991) sans destruction préalable de la matière organique. Les sables ($\geq 50\mu\text{m}$) ont été tamisés après dispersion aux ultrasons (plusieurs cycles de 15 minutes à 50 W). La séparation des limons et argiles a été réalisée par sédimentation après dispersion aux résines saturées avec l'ion Na^+ (agitation douce avec 150 ml de résine sodique pendant une nuit).

La caractérisation de l'exploration racinaire a porté sur la densité et la distribution racinaire. Dans chaque parcelle élémentaire (répétition d'un traitement), un plant de bananier ayant une circonférence au collet égale

ou proche de la moyenne de l'ensemble des bananiers de la parcelle élémentaire a été sélectionné. Un profil (2 m de large x 1 m de profondeur) a été ouvert à 40 cm du pseudo-tronc du bananier sélectionné. Le profil racinaire a été observé après dégagement soigneux de la terre sur une épaisseur horizontale de 10 cm pour exposer les racines et superposition d'un maillage de 10 cm x 10 cm. La distribution racinaire a été évaluée en dénombrant le nombre de racines dans chaque maille (Manichon, 1982 cité par [Delvaux et Guyot, 1989](#)). Pour chaque tranche de 10 cm entre 0 et 100 cm de profondeur, la densité racinaire moyenne (nombre de racines/dm²) a été calculée. Par ailleurs, il est important d'indiquer que la description racinaire par cette méthode (méthode cartographique) prend en compte toutes les racines présentes dans chaque maille sans distinguer les différents types de racines (racines primaires et racines secondaires).

2.2.4. Analyse statistique

Du fait de la forte variabilité des propriétés du sol en fonction de la profondeur, l'analyse statistique a été conduite pour chaque profondeur de mesure séparément. L'analyse de la variance a été appliquée pour tester l'effet site sur les paramètres des profils racinaires et pédologiques (densité racinaire, résistance mécanique et densité apparente). Le test de Student-Newman-Keuls a été appliqué pour séparer les moyennes des sites significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$. Les données des profondeurs de mesure qui ne satisfaisaient pas les hypothèses d'analyse de la variance classique ont été soumises à l'analyse non paramétrique de la variance. Le test de Kruskal-Wallis a été appliqué à cet effet. La corrélation (rangs de Spearman) entre la densité racinaire et les propriétés des sols a également été évaluée. Les analyses statistiques ont été faites au moyen de Logiciel

SAS 9.2 Enterprise Guide 4.2. Les propriétés chimiques de sols n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques mais ont été comparées aux valeurs critiques établies par différents auteurs (Tableau 2.3). En effet, pour chaque profondeur de mesure, les analyses chimiques ont été faites à partir d'un échantillon composite de l'ensemble de la parcelle expérimentale. Le statut aluminique des sols a été calculé sur base des équations de Mohr (valeur M de Mohr, Equation 2.1) et de Kamprath (valeur r de Kamprath, Equation 2.2) (Boyer, 1976).

$$M = \frac{Al}{CEC_{pH7}} \times 100 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$r = \frac{Al}{SB + Al} \times 100 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

avec SB : Somme des bases échangeables.

Tableau 2.3 Valeurs critiques de teneurs en éléments minéraux des sols et de résistance mécanique applicables au bananier pour l'interprétation des propriétés des sols

	Valeurs critiques	Auteurs
Ca (cmol+/kg)	>6	Godefroy et al., 1991
Mg (cmol+/kg)	>2,5	Idem
K (cmol+/kg)	>1,5	Idem
P. assimilable OLSEN-DABIN (ppm)	>75	Idem
pH	5,2-7	Mukasa et al., 2006
M.O (%)	>3,0	Odeke et al., 1999
Na (cmol+/kg)	<1,0	Idem

Mn (ppm)	>200 (toxicité) 140-200 (élevé) 60-140 (moyen) 10-60 (faible) <10 (déficient)	Sys, 1979
Résistance mécanique (kg/cm ²)	<20	Unger et Kaspar, 1994

2.3 Résultats

2.3.1 Caractéristiques physiques du sol

Pour chaque paramètre mesuré (résistance mécanique, densité apparente, texture), les résultats de tous les sites sont présentés ensemble. Les résultats de chaque site séparément sont présentés dans les annexes 3.

Résistance mécanique à la pénétration

La distribution des valeurs de résistance mécanique en fonction de la profondeur, illustrée à la figure 2.1, met en évidence de grandes différences entre les sites. Quel que soit le site, on observe un accroissement de la résistance mécanique du sol avec la profondeur sur au minimum les 40 premiers centimètres.

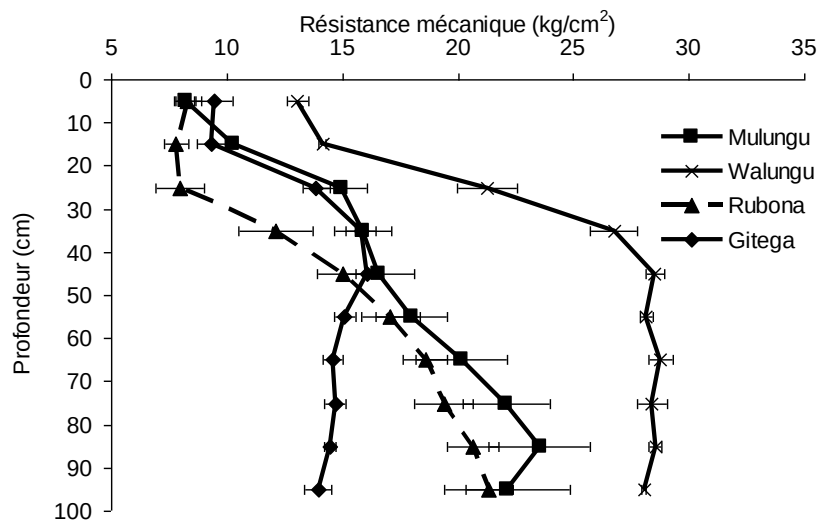


Figure 2.1. Résistance mécanique moyenne à la pénétration en fonction de la profondeur et du site (moyenne de 16 profils). Mesures faites 30 mois après plantation. Barre d'erreur = erreur standard.

A Mulungu, la résistance mécanique moyenne augmente avec la profondeur sur les 90 premiers centimètres, avec des valeurs supérieures à la valeur seuil de 20 kg/cm² à partir de 70 cm de profondeur. A Walungu, on observe une augmentation notable de résistance mécanique jusqu'à 40 cm de profondeur, après quoi les valeurs se stabilisent à des valeurs très élevées avoisinant 30 kg/cm². Pour ce site, il importe de signaler que certaines mesures faites entre 40 et 100 cm de profondeur ont été limitées à 30 kg/cm² car c'est la limite supérieure de mesure du pénétromètre. A Rubona, la résistance mécanique moyenne reste faible et assez constante sur les 30 premiers centimètres puis croît de façon graduelle en fonction de la profondeur pour atteindre des valeurs avoisinant 20 kg/cm² entre 80-100 cm de profondeur. Au site de Gitega, sur les 20 premiers centimètres, la résistance mécanique moyenne est faible et se situe autour d'une moyenne

commune (10 kg/cm^2). Un accroissement de résistance mécanique moyenne est observé entre 20 et 40 cm. De 60 à 100 cm, une légère réduction de résistance mécanique est observée avec des erreurs standards relativement faibles. Quelle que soit la profondeur de mesure, la valeur moyenne de la résistance mécanique à la pénétration reste inférieure à 20 kg/cm^2 sur ce site. A Gitega et Walungu, la variabilité des mesures est globalement faible. Elle est maximale pour les couches profondes à Mulungu.

L'analyse de la variance montre un effet « site » significatif ($0,001 < P < 0,05$ selon la profondeur) sur la résistance mécanique moyenne du sol quelle que soit la profondeur de mesure. A toutes les profondeurs de mesure, la valeur moyenne de la résistance mécanique est significativement supérieure au site de Walungu. Entre 10 et 40 cm de profondeur, les valeurs moyennes de résistance mécanique à Mulungu et Gitega sont significativement supérieures à celles mesurées à Rubona. Entre 40 et 60 cm, les valeurs de résistance mécanique du sol des sites de Mulungu, Rubona et Gitega ne diffèrent pas de manière significative. A partir de 60 cm de profondeur, les valeurs de résistance mécanique des sites de Mulungu et Rubona ne diffèrent pas de manière significative mais sont significativement supérieures à celles de Gitega.

Densité apparente

Comme pour la résistance mécanique, la figure 2.2 met en évidence d'importantes différences entre les sites en termes de densité apparente. A Mulungu, on observe des valeurs faibles ($< 0,90 \text{ g/cm}^3$) de densité apparente sur les 20 premiers centimètres puis un accroissement progressif avec la profondeur. Entre 40 et 100 cm de profondeur, les erreurs

standards sont plus grandes qu'en surface, traduisant une plus forte hétérogénéité du sol. Toutefois, quelle que soit la profondeur, la densité apparente maximale moyenne reste inférieure à $1,10 \text{ g/cm}^3$. A Walungu, on observe également que la densité apparente reste constante sur les 20 premiers centimètres. La densité apparente moyenne croît ensuite entre 20 et 40 centimètres pour ensuite se stabiliser entre $1,14$ et $1,16 \text{ g/cm}^3$.

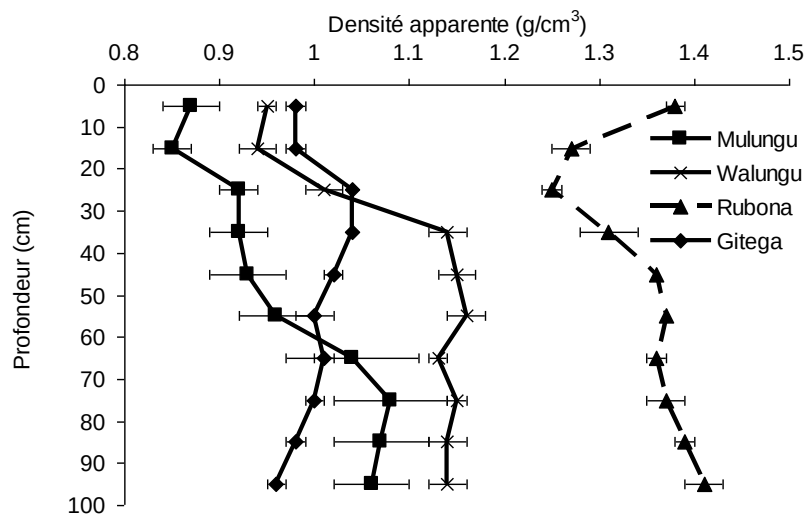


Figure 2.2. Densité apparente moyenne du sol en fonction de la profondeur et du site (moyenne sur 16 profils). Mesures faites 30 mois après plantation. Barre d'erreur = erreur standard.

A Rubona, la densité apparente moyenne est élevée à la profondeur 0-10 cm et décroît entre 10 et 30 cm. Un accroissement notable de densité apparente est observé entre 30 et 50 cm, après quoi les valeurs de densité apparente des différentes couches successives continuent à augmenter, bien que plus faiblement. A toutes les profondeurs mesurées, les valeurs moyennes de densité apparente sont supérieures à $1,20 \text{ g/cm}^3$ et nettement plus élevée que sur les 3 autres sites. Tout comme à Walungu et

Mulungu, la densité apparente moyenne à Gitega est faible sur les deux premières couches (0-20 cm). Elle augmente ensuite entre 20 et 30 cm, après quoi on observe une légère réduction de densité apparente avec la profondeur. Quelle que soit la profondeur de mesure, la densité apparente à Gitega est caractérisée par des valeurs inférieures à $1,05 \text{ g/cm}^3$ et des erreurs standards très faibles sur tout le profil.

L'analyse de la variance montre un effet « site » significatif ($0,001 < P < 0,01$ selon la profondeur) sur la densité apparente mesurée à toutes les profondeurs de mesure. Comparé aux autres sites, Rubona se caractérise par des valeurs de densité apparente significativement supérieures à toutes les profondeurs de mesure (0-100 cm). Sur les 20 premiers centimètres de profondeur, la densité apparente est significativement plus faible à Mulungu par rapport à Gitega. Avec des valeurs de densité apparente intermédiaires, le site de Walungu ne se différencie pas de manière significative des sites de Mulungu et de Gitega. A la profondeur 20-30 cm, les sites de Walungu et de Gitega ont des valeurs de densité apparente significativement supérieures à celles du site de Mulungu. Entre 30 et 50 cm de profondeur, les moyennes de tous les sites sont significativement différentes les uns des autres. De 50 à 80 cm de profondeur, les valeurs des sites de Mulungu et Gitega d'une part, et des sites de Mulungu et Walungu d'autre part ne diffèrent pas de manière significative. Entre 80 et 100 cm, les valeurs des sites de Mulungu et Walungu ne diffèrent pas de manière significative et sont significativement supérieures à celles de Gitega.

La projection des données de composition granulométrique des sols sur le triangle textural de densité apparente limitante pour la croissance (GLBD, [Daddow et Warrington, 1983](#)) montre que la valeur de GLBD est atteinte à

des faibles valeurs pour les sols plus argileux (Mulungu et Walungu) par rapport aux sols contenant un pourcentage élevé en sable (Rubona et Gitega) (Figure 2.3). Ceci concorde bien avec les observations de [Daddow et Warrington \(1983\)](#). La valeur GLBD serait $<1,40 \text{ g/cm}^3$ à Walungu et se situerait, selon la profondeur, autour de $1,40$ à $1,45 \text{ g/cm}^3$, $1,60$ à $1,70 \text{ g/cm}^3$, et $1,45$ à $1,65 \text{ g/cm}^3$ à Mulungu, Rubona et Gitega, respectivement. Le tableau 2.4 compare les valeurs de densité apparente mesurées avec les valeurs critiques estimées sur base de la figure 2.3. On observe que c'est dans les horizons de surface que la valeur de densité apparente est systématiquement la plus éloignée de la valeur critique. D'autre part, c'est au site de Gitega que les valeurs observées sont les plus éloignées de la valeur critique, suivi par le site de Mulungu, et enfin Walungu et Rubona. Une valeur de densité mesurée très éloignée indiquerait que la densité apparente n'affecte pas grandement la croissance racinaire.

Tableau 2.4 : Comparaison des valeurs de densité apparente (ρ_a) mesurée et critiques (GLBD) pour les 4 sites d'étude et deux profondeurs type.

Sites	0-20 cm			60-80 cm		
	ρ_a mesurée [1]	ρ_a critique ¹ [2]	[2] – [1]	ρ_a mesurée [3]	ρ_a critique [4]	[4] – [3]
	g.cm^{-3}	g. cm^{-3}	g.cm^{-3}	g. cm^{-3}	g. cm^{-3}	g. cm^{-3}
Mulungu	0,86	1,45	0,59	1,06	1,36	0,30
Walungu	0,95	1,38	0,43	1,14	1,31	0,17
Rubona	1,33	1,69	0,36	1,37	1,62	0,25
Gitega	0,98	1,62	0,64	1,01	1,55	0,54

1 Valeurs estimées par interpolation à partir de la Figure 2.3.

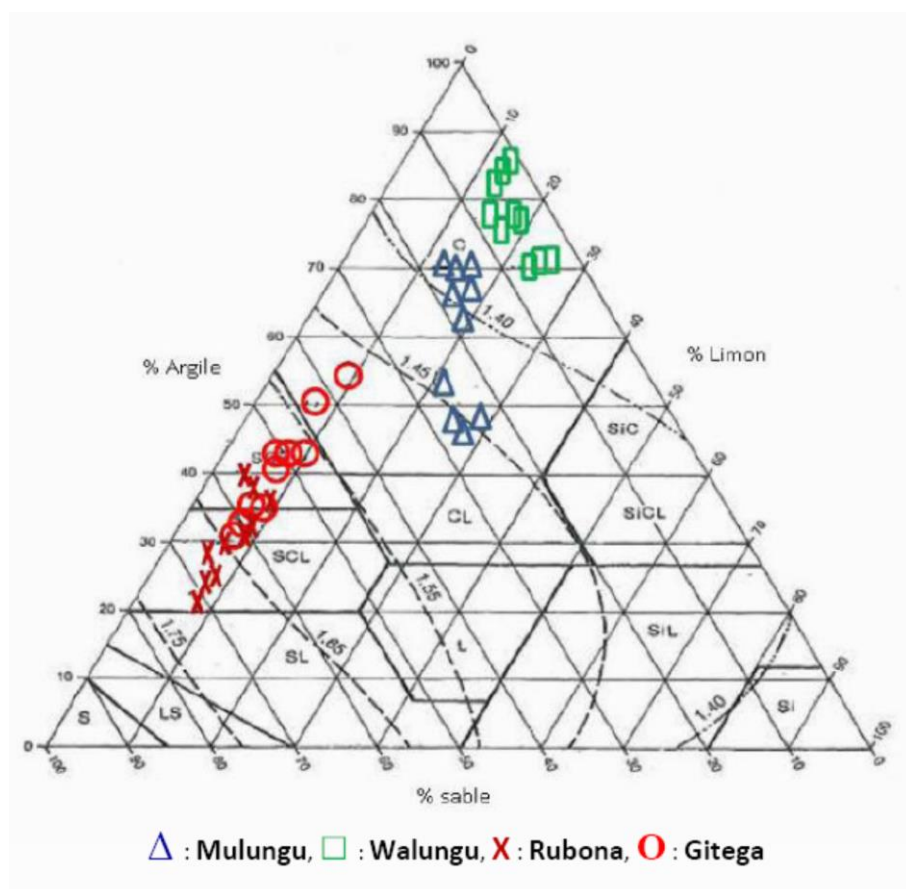


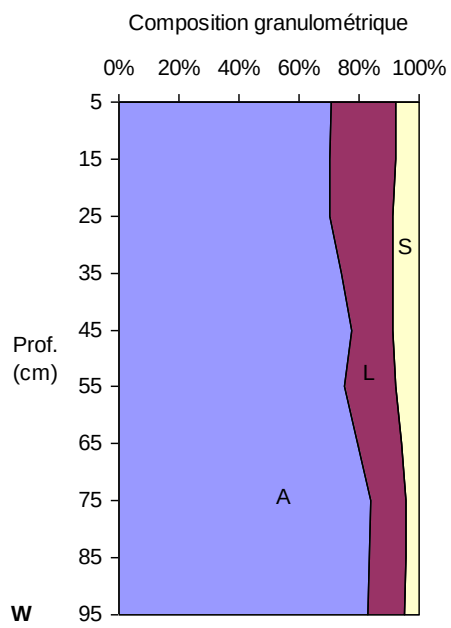
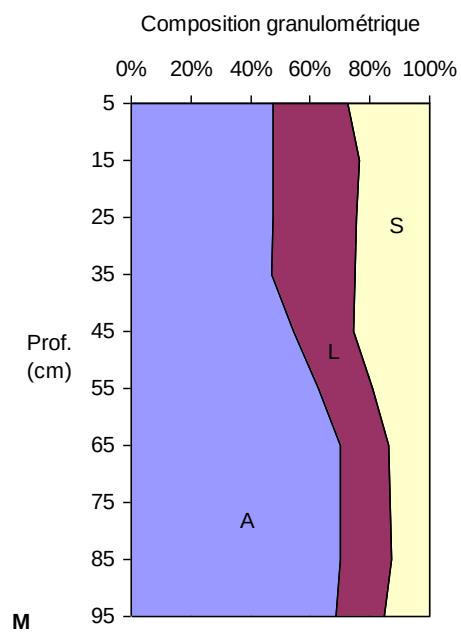
Figure 2.3. Positionnement des échantillons des sols de différents sites dans le diagramme textural de densité apparente limitante pour la croissance (Daddow et Warrington, 1983). Chaque point correspond à un échantillon composite pour une tranche de 10 cm de profondeur. Les lignes discontinues représentent les compositions granulométriques d'égale densité apparente limitante pour la croissance.

Composition granulométrique

La figure 2.4 présente les caractéristiques texturales des différents sites. A Mulungu (Figure 2.4M), l'argile est dominante (48 à 70% suivant la profondeur), sa teneur croît avec la profondeur, notamment entre 40 et 70

cm de profondeur. Les teneurs en sable et en limon varient entre 15 et 27% et décroissent en profondeur. On observe une augmentation assez brusque de la teneur en argile entre 35 et 65 cm de profondeur. Le sol de Walungu (Figure 2.3W) se caractérise par une teneur très élevée en argile (70-83%). La teneur en limon varie entre 12 et 22%, et décroît avec la profondeur du sol. La teneur en sable est très faible, notamment dans les horizons profonds qui présentent des teneurs autour de 4%. Contrairement aux deux sites précédents, la fraction sableuse domine à Rubona, où elle représente 57 à 71% suivant la profondeur. La teneur en argile varie entre 22 et 38%, celle de limon est plus faible et varie entre 5 et 8%. Le sable et l'argile sont les principaux constituants minéraux du sol de Gitega. La teneur en argile croît de 34% à 0-10 cm à 54% à 90-100 cm tandis que, pour les mêmes profondeurs, la teneur en sable décroît de 60 à 36%. La teneur en limon varie peu en fonction de la profondeur et est comprise entre 6 et 10%. On observe une augmentation assez forte de la teneur en argile entre 35 et 45 cm de profondeur. Les sites de Walungu et Rubona ne présentent pas de discontinuités texturales fortes.

Suivant le classement des sols dans le triangle textural de l'USDA ([Soil Survey Staff, 1999](#); Figure 2.3), le sol est de texture argileuse (0-50 cm) à argileuse lourde (60-100 cm) à Mulungu, argileuse lourde (0-40 cm) à argileuse très lourde (50-100 cm) à Walungu, limon argilo-sableuse (0-80 cm) à argilo-sableuse (90-100 cm) à Rubona, et limon argilo-sableuse (0-10 cm), argilo-sableuse (20-80 cm) et argileuse (90-100 cm) à Gitega.



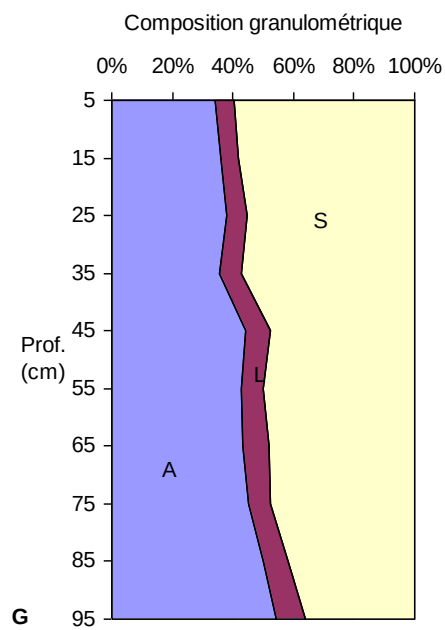
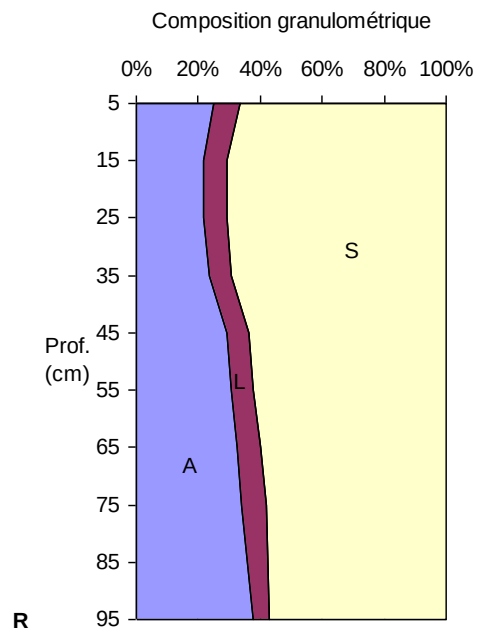


Figure 2.4 Composition granulométrique en pourcentage des constituants minéraux du sol (A : argile, L : limon et S : sable) en fonction du site et de la

profondeur de mesure, par tranche de 10 cm de profondeur. Lettres en gras : M : Mulungu, W : Walungu, R : Rubona et G : Gitega.

2.3.2 Caractéristiques physico-chimiques et chimiques des sols

Le tableau 2.5 relatif aux propriétés physico-chimiques et chimiques des sols présente une grande variabilité en fonction des sites et des profondeurs de mesure. De 0 à 100 cm de profondeur, les valeurs de pH varient de 6,0 à 6,8 (Mulungu), de 5,6 à 6,1 à Walungu, de 5,2 à 5,9 (Rubona) et de 4,6 à 5,1 (Gitega). Contrairement au site de Mulungu pour lequel le pH augmente en profondeur, les sols de Walungu, Rubona et Gitega sont relativement plus acides en profondeur.

La teneur en carbone organique est la plus élevée sur les trente ou quarante premiers centimètres, suivant le site, puis diminue avec la profondeur. A la profondeur 0-10 cm, la teneur en carbone organique est la plus élevée à Mulungu (4,90%), suivis de Walungu (3,04%), Gitega (1,74%) et de Rubona (1,02%). Entre 40 et 50 cm de profondeur du sol, la réduction de la teneur en carbone organique est plus marquée à Mulungu et Walungu. Par contre, la décroissance de la teneur en carbone organique est plus progressive à Gitega et Rubona. Ce dernier site présente d'ailleurs des valeurs faibles dès les horizons de surface.

Quelle que soit la profondeur de mesure, les teneurs en phosphore assimilable sont les plus élevées à Mulungu, suivi de Rubona. Les sols de Walungu et Gitega ont des valeurs très faibles dès les horizons de surface.

Suivant la profondeur de mesure, la teneur en calcium échangeable varie entre 14,6 et 21,4 cmol+/kg à Mulungu, 5,6 et 11,5 cmol+/kg à Walungu, 1,2 et 2,5 cmol+/kg à Rubona et 0,1 et 0,5 cmol+/kg à Gitega. D'une manière générale, la teneur en calcium échangeable tend à décroître avec la profondeur pour les 4 sites. Sur les 20 premiers centimètres, la teneur maximale de magnésium échangeable est observée à Walungu, suivi de Mulungu. Les sites de Rubona et Gitega ont des teneurs faibles en magnésium quelle que soit la profondeur de mesure, soit entre 0,06 et 0,4 cmol+/kg et 0,3 et 0,6 cmol+/kg, respectivement. A toutes les profondeurs de mesure, la teneur en potassium échangeable est nettement supérieure à Mulungu comparé aux 3 autres sites. Elle y est environ 5, 7 et 9 fois plus élevée à la profondeur 0-10 cm que sur les sites de Walungu, Rubona et Gitega, respectivement. La teneur en potassium a tendance à décroître avec la profondeur à Walungu, Rubona et Gitega. Pour ce dernier site, les valeurs sont particulièrement faibles à partir de 30 cm de profondeur. La teneur en sodium échangeable est négligeable sur tous les sites. L'acidité échangeable est plus élevée à Gitega et Rubona quelle que soit la profondeur de mesure (Tableau 2.5). A 0-10 cm, l'acidité échangeable des sols de Rubona et Gitega est environ 3 à 12 fois supérieure à celles des sols de Mulungu et Walungu où les valeurs sont très faibles sur l'ensemble du profil. A toutes les profondeurs de mesure, les valeurs maximales de Al échangeable sont observées à Gitega suivi de Rubona. Walungu présente des teneurs très faibles en aluminium échangeable (0,06-0,13 cmol+/kg), observées uniquement dans les horizons profonds du sol (60-70 et 80-90 cm). Les horizons de surfaces (0-10 et 30-40 cm) à Walungu et toutes les profondeurs de mesure à Mulungu se caractérisent par l'absence d'aluminium échangeable. Le taux de saturation (M de Morh) en Al est nul à Mulungu à toutes les profondeurs de mesures et à Walungu pour les

profondeurs 0-10 et 30-40 cm, et reste très faible à Walungu au-delà de 60 cm de profondeur (0,3 à 0,8 %). Il s'accroît à Rubona (2,4 à 16,6%) et est le plus élevé à Gitega (20,9 à 29,1 %).

La capacité d'échange cationique (CEC NH_4OAc pH 7) est la plus élevée à Mulungu (28 à 46 cmol^+/kg suivant la profondeur) suivi de Walungu (17 et 27 cmol^+/kg suivant la profondeur) (Tableau 2.5). Les valeurs de CEC des sites de Rubona et Gitega varient entre 5 et 7 cmol^+/kg et sont similaires quelle que soit la profondeur de mesure. En ce qui concerne la capacité d'échange cationique effective (ECEC), estimée par la somme des bases (extraites avec la solution de NH_4OAc à pH 7) plus l'acidité échangeable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$), quelle que soit la profondeur de mesure, les valeurs de ECEC décroissent suivant cet ordre : Mulungu > Walungu > Rubona > Gitega. Comme pour la CEC, les valeurs d'ECEC des sites de Rubona et Gitega sont similaires. Comparés à Gitega et Rubona, les valeurs d'ECEC (0-10 cm) sont 7 à 9 fois supérieures à Mulungu et 5 à 7 fois supérieures à Walungu. D'une manière générale, l'ECEC est plus faible que la CEC quels que soient le site et la profondeur de mesure. Toutefois, l'importance de cette différence est très variable. A Gitega, l'écart entre la CEC et l'ECEC est particulièrement important, soit des valeurs d'ECEC 2 à 3 fois plus faibles que la CEC.

La teneur en manganèse est plus élevée à Walungu suivis de Rubona (0-70 cm) et Mulungu (Tableau 2.5). Gitega présente des valeurs nettement plus faibles, variant entre 1,3 et 3,2 ppm suivant la profondeur. A Walungu, la teneur en manganèse s'accroît de 0 à 30 cm où elle atteint sa teneur maximale (227 ppm) puis décroît avec la profondeur. Excepté un accroissement des valeurs entre 50-70 cm, la teneur en manganèse soluble décroît avec la profondeur à Rubona.

Les teneurs en Al, Fe et Si extraits à l'oxalate pH=3 (Al_{ox} , Fe_{ox} et Si_{ox}), ainsi que l'Al (Al_{dcb}) et le Fe (Fe_{dcb}) extractibles au dithionite et citrate de sodium tamponnés au bicarbonate de sodium les plus élevées sont observées à Mulungu et Walungu (Tableau 2.6). Les sols de Rubona et Gitega présentent des valeurs plus faibles et assez similaires. Les teneurs en Al_{ox} et Fe_{ox} varient entre 0,9-2,5% à Mulungu et sont inférieures à 1% aux 3 autres sites. La teneur en Si_{ox} est la plus élevée à Mulungu (0,24-0,72%), très faible à Walungu (0,08-0,1%) et négligeable sur les sols de Rubona et Gitega (0,01-0,02%). La teneur en Fe_{dcb} est la plus importante à Walungu (10,5-11,1%), suivis de Mulungu (6,6-7,6%), Gitega (4,8-5,7%) et Rubona (1,5-1,8%). Ceci indique des teneurs plus élevées en fer libre à Walungu et Mulungu.

Tableau 2.5 Caractéristiques physico-chimiques et chimiques des sols échantillonnés 30 mois après l'installation des essais aux sites de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega. Un échantillon composite par site et par tranche de 10 cm de profondeur. Certaines mesures n'ont pas été réalisées pour toutes les profondeurs.

MULUNGU

Prof. (cm)	pH _{H2O}	Corg	Cations échangeables					Al ³⁺	CEC ¹	ECEC ⁴	M	R	P ²	Mn
			Ca	Mg	K	Na	Al+H							
		%	-----cmol+/kg-----								%		----ppm----	
0-10	6,0	4,90	19,3	4,65	1,98	0,22	0,14	0	44	27	0	0	143,3	44,8
10-20	6,1	4,54	19,88	4,50	1,33	0,20							133,2	44,6
20-30	6,3	4,59	21,43	4,99	2,05	0,18							144,3	34,1
30-40	6,4	4,00	20,60	5,10	2,16	0,16	0,14	0	46	21	0	0	156,4	30,8
40-50	6,5	2,87	19,84	5,41	2,30	0,14							199,4	29,5
50-60	6,6	2,11	18,5	5,55	2,05	0,11							172,2	47,7
60-70	6,6	1,82	15,71	5,12	1,53	0,09	0,14	0	31	18	0	0	169,9	89,2
70-80	6,6	1,16	14,79	5,04	1,57	0,07							204,8	93,2
80-90	6,8	1,02	14,57	5,09	1,96	0,05	0,11	0	28	17	0	0	204,6	84,9

90-100	6,7	0,94	14,61	5,24	2,12	0,03		239,0	98,0
--------	-----	------	-------	------	------	------	--	-------	------

1. CEC NH_4OAc . pH7 ; 2. P assimilable Mehlich - 3. L'absence de chiffre indique que l'analyse n'a pas été faite pour la profondeur considérée. 4 ECEC = sommes des bases + Al échangeable. M : valeur M de Mohr et R : valeur r de Kamprath.

WALUNGU

Prof. (cm)	pH _{H2O}	Corg	Cations échangeables				Al+H	Al ³⁺	CEC ¹	ECEC ⁴	M	R	P ²	Mn
			Ca	Mg	K	Na								
			-----cmol+/kg-----										----ppm----	
		%									%			
0-10	6,1	3,04	11,54	5,29	0,41	0,03	0,14	0	27	19	0	0	2,4	144,5
10-20	5,8	3,01	11,26	5,04	0,20	0,03							2,0	115,8
20-30	5,9	2,49	10,05	4,52	0,13	0,02							1,4	171,2
30-40	6,1	1,56	8,8	4,3	0,10	0,02	0,15	0	21	14	0	0	0,9	227,1
40-50	5,9	0,91	6,39	3,17	0,10	0,02							1,2	223,4
50-60	6,1	0,78	6,82	3,13	0,08	0,02							1,3	177,6
60-70	5,8	0,74	5,99	2,66	0,11	0,02	0,47	0,06	18	10	0,3	0,6	1,4	145,9
70-80	5,7	0,74	6,68	2,73	0,08	0,02							1,4	128,3
80-90	5,6	0,65	6,59	2,43	0,07	0,02	0,48	0,13	17	10	0,8	1,4	1,8	125,9
90-100	5,7	0,50	5,59	2,15	0,05	0,01							1,5	105,2

1. CEC NH₄OAc. pH7 ; 2. P assimilable Mehlich - 3. L'absence de chiffre indique que l'analyse n'a pas été faite pour la profondeur considérée. 4 ECEC = sommes des bases + Al échangeable. M : valeur M de Mohr et R : valeur r de Kamprath.

RUBONA

Prof. (cm)	pH _{H2O}	Corg	Cations échangeables				Al+H	Al ³⁺	CEC ¹	ECEC ⁴	M	R	P ²	Mn
			Ca	Mg	K	Na								
		%	-----cmol+/kg-----							%	----ppm----			
0-10	5,9	1,12	2,37	0,63	0,29	0,04	0,38	0,15	6	4	2,4	3,6	17,3	111,1
10-20	5,9	1,04	2,53	0,57	0,16	0,03							13,1	100,6
20-30	5,7	1,05	2,35	0,53	0,12	0,03							11,5	87,7
30-40	5,4	0,87	1,87	0,48	0,11	0,03	0,76	0,5	5	4	9,3	14,9	8,7	98,2
40-50	5,4	0,75	1,30	0,39	0,09	0,02							5,7	88,2
50-60	5,4	0,66	1,21	0,38	0,08	0,02							3,8	97,2
60-70	5,4	0,53	1,5	0,41	0,08	0,02	1,14	0,81	5	3	16	29,4	3,5	98,0
70-80	5,4	0,52	1,48	0,39	0,07	0,01							3,0	76,8
80-90	5,3	0,52	1,47	0,36	0,06	0,01	1,13	0,75	5	3	16,6	26,9	2,7	68,9
90-100	5,2	0,56	2,22	0,34	0,06	0,01							2,5	45,7

1. CEC NH₄OAc. pH7 ; 2. P assimilable Mehlich- 3. L'absence de chiffre indique que l'analyse n'a pas été faite pour la profondeur considérée. 4 ECEC = sommes des bases + Al échangeable. M : valeur M de Mohr et R : valeur r de Kamprath.

GITEGA

Prof. (cm)	pH _{H2O}	Corg	Cations échangeables					Al ³⁺	CEC ¹	ECEC ⁴	M	R	P ²	Mn
			Ca	Mg	K	Na	Al+H							
		%	-----cmol+/kg-----								%		----ppm----	
0-10	5,0	1,74	0,52	0,36	0,21	0,01	1,65	1,32	6	3	20,9	51,9	4,1	3,2
10-20	5,1	1,69	0,44	0,31	0,13	-							3,0	2,6
20-30	4,9	1,45	0,30	0,18	0,09	-							2,1	1,9
30-40	5,1	1,30	0,19	0,10	0,06	0	1,76	1,56	6	2	27,4	84,4	1,3	1,6
40-50	4,9	1,21	0,18	0,08	0,05	-							1,1	1,4
50-60	4,9	1,20	0,12	0,06	0,04	-							0,9	1,3
60-70	4,9	1,07	0,17	0,06	0,04	0,01	2,31	1,9	5	3	29,1	88,2	0,8	1,4
70-80	4,7	1,02	0,34	0,07	0,04	-							0,8	1,5
80-90	4,6	0,86	0,19	0,11	0,03	0	1,41	1,02	5	2	20,8	81,8	1,1	1,6
90-100	4,6	0,71	0,14	0,13	0,03	-							0,9	1,8

1. CEC NH₄OAc. pH7 ; 2. P assimilable Mehlich- 3. L'absence de chiffre indique que l'analyse n'a pas été faite pour la profondeur considérée. 4 ECEC = sommes des bases + Al échangeable. M : valeur M de Mohr et R : valeur r de Kamprath.

Tableau 2.6. Teneurs en éléments d'extractions sélectives (Al_{ox} , Fe_{ox} , Si_{ox} , Al_{dcb} , Fe_{dcb}) mesurées sur quatre profondeurs pour les sols de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega

Site	Prof. (cm)	Al_{ox}^1	Fe_{ox}	Si_{ox}	Al_{dcb}^2	Fe_{dcb}
g/kg						
Mulungu	0-10	21,8	19,6	5,6	15,0	71,5
	30-40	24,9	19,7	7,2	13,8	66,2
	60-70	11,4	20,2	3,1	9,9	76,0
	80-90	9,2	20,9	2,4	9,1	76,2
Walungu	0-10	4,3	8,9	0,8	8,7	104,6
	30-40	3,5	8,7	1,0	8,8	108,4
	60-70	3,2	8,5	0,9	9,4	105,1
	80-90	3,0	8,5	0,8	10,3	111,3
Rubona	0-10	1,2	1,8	0,1	2,7	15,6
	30-40	1,2	1,8	0,1	2,5	14,7
	60-70	1,2	1,6	0,2	3,1	17,7
	80-90	1,1	1,6	0,1	3,2	18,4
Gitega	0-10	2,8	1,7	0,1	8,4	47,9
	30-40	3,0	1,7	0,1	9,6	52,5
	60-70	3,1	1,5	0,2	10,7	56,6
	80-90	3,5	1,7	0,2	10,6	56,1

1 : extraction à l'oxalate ; 2 : extraction au dithionite-citrate-bicarbonate.

2.3.3 Distribution racinaire

La figure 2.5 relative à la distribution racinaire moyenne en fonction de la profondeur de mesure et des sites présente plusieurs tendances. Quel que soit le site, la densité racinaire est plus faible à la profondeur 0-10 cm que 10-20 cm, la densité racinaire étant au moins deux fois plus élevée dans cette deuxième couche que dans la première. A Mulungu, on observe une réduction notable de la densité racinaire moyenne entre 20 et 40 cm puis

une réduction graduelle entre 50 et 100 cm de profondeur. La densité racinaire maximale est observée à la profondeur 10-20 cm et varie entre 3 et 4 racines/dm². On y observe des racines jusqu'à 1m de profondeur. A Walungu, la densité racinaire moyenne passe du simple au triple sur les deux premières couches, décroît quelque peu à la profondeur 20-30 cm puis chute brutalement à partir de 30 cm. Aucune racine n'est observée à plus de 60 cm de profondeur. La densité racinaire maximale est observée à la profondeur 10-20 cm et varie entre 2 et 3 racines/dm². A Rubona, on observe un accroissement progressif de la densité racinaire sur les 40 premiers centimètres de profondeur. Au-delà de 40 cm de profondeur, la densité racinaire décroît progressivement avec la profondeur. La densité racinaire maximale est observée à la profondeur 30-40 cm et se situe entre 1 et 2 racines/dm². Gitega présente une densité racinaire moyenne particulièrement faible sur l'ensemble du profil. Une absence quasi-totale de racines est observée entre 30 et 70 cm de profondeur. Entre 80 et 100 cm de profondeur, une très faible densité racinaire (<0,1 racinaire/dm²) est observée.

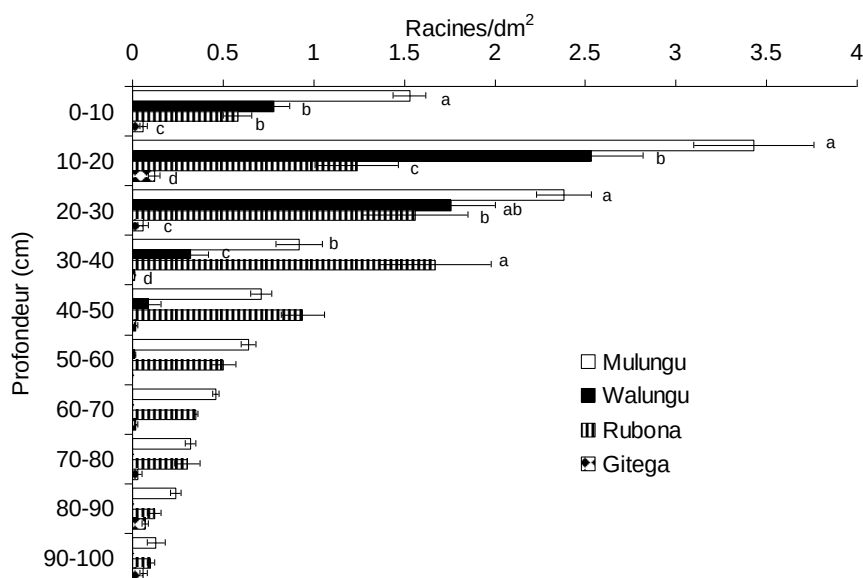


Figure 2.5. Densité racinaire moyenne en fonction de la profondeur et du site. Mesures faites 30 mois après plantation. Barre d'erreur = erreur standard. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

De 0 à 100 cm de profondeur, l'analyse de la variance a montré un effet « site » significatif ($0,001 < P < 0,01$ selon la profondeur) sur la densité racinaire moyenne. Sur les 40 premiers centimètres de profondeurs où sont localisées 56 à 99% des racines du profil suivant le site, la densité racinaire moyenne est significativement plus faible à Gitega comparé aux 3 autres sites. A la profondeur 0-10 cm, Mulungu a une densité racinaire moyenne significativement supérieure à tous les autres sites. Par contre, la densité racinaire moyenne des sites de Walungu et Rubona se situe autour d'une moyenne commune et ne diffère pas de manière significative. A la profondeur 10-20 cm, les moyennes de tous les sites sont significativement différentes. A la profondeur 20-30 cm, aucune différence significative n'est observée entre Mulungu et Walungu d'une part, et entre Rubona et Walungu d'autre part. A la profondeur 30-40 cm, la densité racinaire moyenne de tous les sites diffère de manière significative et décroît suivant cet ordre : Rubona > Mulungu > Walungu > Gitega.

2.3.4 Relations entre les propriétés des sols et l'enracinement du bananier

Le tableau 2.7 présente le résumé de l'analyse de corrélation entre les différentes propriétés des sols et le système racinaire du bananier pour tous les sites confondus (Tableau 2.7a) et pour chaque séparément (Tableau 2.7b-e). Ce tableau montre :

- une relation positive entre la densité apparente et la résistance mécanique du sol ($r = 0,54-0,94$) d'une part et de l'autre, entre les cations basiques,
- une relation négative entre la teneur en Corg. et la densité apparente et la résistance du sol indiquant une réduction du sol de la densité apparente ou la résistance mécanique du sol lorsque la Corg. augmente,
- tous sites confondus, les faibles les faibles valeurs de densité apparente seraient liées à la teneur en argile et en limon tandis que la résistance serait principalement affectée par la teneur en sable,
- les propriétés du sol négativement corrélées avec la densité racinaire varient suivant les sites : densité apparente, résistance mécanique et teneur en argile (Mulungu, Walungu), densité apparente, la résistance mécanique et la teneur en sable (Rubona) et densité apparente, résistance mécanique, pH et teneur en limon (Gitega).

Tableau 2.7a. Coefficients de corrélation entre les propriétés des sols et la densité racinaire (TOUS LES SITES CONFONDUS)

	ρa	Rés.	rac./dm ²	pH	Corg	Ca	Mg	K	P	Mn	Argile	Limon	Sable
ρa	1	0,339	-0,188	-0,138	-0,772	-0,296	-0,263	-0,350	-0,056	0,435	-0,300	-0,579	0,324
Rés.	*	1	-0,459	0,286	-0,450	0,230	0,261	-0,126	-0,145	0,475	0,647	0,211	-0,631
rac./dm ²		**	1	0,477	0,510	0,534	0,508	0,649	0,607	0,167	-0,286	0,341	0,228
pH			**	1	0,388	0,930	0,948	0,835	0,682	0,513	0,416	0,722	-0,465
Corg	**	**	**	*	1	0,465	0,424	0,643	0,296	-0,210	0,076	0,544	-0,124
Ca			**	**	**	1	0,952	0,824	0,643	0,451	0,477	0,798	-0,538
Mg			**	**	**	**	1	0,836	0,635	0,535	0,519	0,778	-0,562
K	*		**	**	**	**	**	1	0,832	0,239	0,107	0,549	-0,158
P			**	**		**	**	**	1	0,073	-0,197	0,230	0,149
Mn	**	**		**		**	**			1	0,438	0,286	-0,445
Argile		**	-	**		**	**			**	1	0,665	-0,985
Limon	**		*	**	**	**	**	**			**	1	-0,720
Sable	*	**		_*	-	**	**			**	**	**	1

ρa : densité apparente, Rés. : résistance mécanique du sol, rac./dm² : racines / dm². * = significatif $P < 0,05$; ** = $P < 0,001$.

L'absence de symbole * indique que la corrélation n'est pas significative au seuil $P = 0,05$.

Tableau 2.7 b. Coefficients de corrélation entre les propriétés des sols et la densité racinaire à Mulungu

	ρa	Rés.	rac./dm ²	pH	Corg	Ca	Mg	K	P	Mn	Argile	Limon	Sable
ρa	1	0,948	-0,930	0,911	-0,906	-0,827	0,450	-0,052	0,912	0,717	0,861	-0,859	-0,853
Rés.	**	1	-0,952	0,988	-0,976	-0,842	0,515	-0,012	0,903	0,685	0,833	-0,844	-0,850
rac./dm ²	**	**	1	-0,939	0,952	0,903	-0,552	-0,067	-0,927	-0,758	-0,833	0,924	0,743
pH	**	**	**	1	-0,963	-0,828	0,595	0,031	0,877	0,656	0,806	-0,836	-0,817
Corg		**	**	**	1	0,855	-0,527	0,030	-0,903	-0,733	-0,833	0,850	0,820
Ca	**	**	**	**	**	1	-0,297	0,255	-0,758	-0,842	-0,914	0,869	0,752
Mg							1	0,571	0,600	0,103	0,327	-0,538	-0,153
K								1	0,267	-0,438	-0,399	0,077	0,475
P	**	**	**	**	**	*			1	0,588	0,710	-0,795	-0,642
Mn	*	*	*	*	*	**				1	0,784	-0,807	-0,777
Argile	**	**	**	**	**	**			*		1	-0,879	-0,844
Limon	**	**	**	**	*	**			**	**	**	1	0,704
Sable	**	**	**	**	*	*			*	**	**		1

ρa : densité apparente, Rés. : résistance mécanique du sol, rac./dm² : racines / dm². * = significatif $P < 0,05$; ** = $P < 0,001$.

L'absence de symbole * indique que la corrélation n'est pas significative au seuil $P = 0,05$.

Tableau 2.7 b. Coefficients de corrélation entre les propriétés des sols et la densité racinaire à Walungu

	pa	Rés.	rac./dm ²	pH	Corg	Ca	Mg	K	P	Mn	Argile	Limon	Sable
pa	1	0,566	-0,575	-0,013	-0,553	-0,511	-0,523	-0,731	-0,660	0,357	0,613	-0,640	-0,158
Rés.		1	-0,800	-0,483	-0,754	-0,806	-0,770	-0,561	0,362	0,091	0,774	-0,753	-0,393
rac./dm ²		**	1	0,591	0,945	0,832	0,932	0,783	0,114	0,244	-0,956	0,892	0,752
pH				1	0,696	0,551	0,681	0,517	-0,376	0,734	-0,657	0,697	0,761
Corg		*	*	*	1	0,888	0,997	0,896	0,129	0,334	-0,893	0,923	0,694
Ca		**	**		**	1	0,903	0,720	0,228	0,139	-0,787	0,846	0,436
Mg		**	**	*	**	**	1	0,872	0,129	0,321	-0,872	0,901	0,673
K	*		**		**	*	**	1	0,259	0,207	-0,798	0,876	0,533
P	*			*					1	-0,82	-0,099	0,213	-0,454
Mn									**	1	-0,293	0,235	0,742
Argile		*	**		**	**	**	**			1	-0,947	-0,771
Limon	*	*	**	*	**	**	**	**			**	1	0,622
Sable			*	*	*	*	*			*			1

pa : densité apparente, Rés. : résistance mécanique du sol, rac./dm² : racines / dm². * = significatif $P < 0,05$; ** = $P < 0,001$.

L'absence de symbole * indique que la corrélation n'est pas significative au seuil $P = 0,05$.

Tableau 2.7 b. Coefficients de corrélation entre les propriétés des sols et la densité racinaire à Rubona

	ρa	Rés.	rac./dm ²	pH	Corg	Ca	Mg	K	P	Mn	Argile	Limon	Sable
ρa	1	0,774	-0,854	-0,607	-0,492	-0,287	-0,630	-0,626	-0,616	-0,439	0,839	-0,181	-0,856
Rés.	**	1	-0,891	-0,915	-0,875	-0,552	-0,888	-0,957	-0,964	-0,745	0,964	-0,378	-0,964
rac./dm ²	**	**	1	0,681	0,766	0,333	0,736	0,823	0,830	0,636	0,907	0,159	-0,913
pH		**	*	1	0,781	0,584	0,937	0,933	0,934	0,778*	-0,786	0,500	0,775
Corg		**	**	**	1	0,632	0,784	0,920	0,912	0,657	-0,914	0,294	0,924
Ca					*	1	0,687	0,604	0,552	0,406	-0,530	-0,161	0,588
Mg		**	*	**	**	*	1	0,942	0,924	0,821	-0,845	0,468	0,828
K		**	**	**	**		**	1	0,994	0,835	-0,618	0,468	0,592
P		**	**	**	**		**	**	1	0,830	-0,841	0,399	0,835
Mn		*	*	**	*		**	**	**	1	-0,730	0,69*	0,667
Argile	**	**	**	**	**		**		**	*	1	-0,386	-0,991
Limon										*		1	0,226
Sable	**	**	**	**	**		**		**	*	**		1

ρa : densité apparente, Rés. : résistance mécanique du sol, rac./dm² : racines / dm². * = significatif $P < 0,05$; ** = $P < 0,001$.

L'absence de symbole * indique que la corrélation n'est pas significative au seuil $P = 0,05$.

Tableau 2.7 b. Coefficients de corrélation entre les propriétés des sols et la densité racinaire à Gitega

	pa	Rés.	rac./dm ²	pH	Corg	Ca	Mg	K	P	Mn	Argile	Limon	Sable
pa	1	0,543	-0,583	0,356	0,296	-0,071	-0,368	0,228	-0,012	-0,357	-0,344	0,000	0,238
Rés.		1	-0,831	-0,107	-0,333	-0,553	-0,784	-0,357	-0,520	-0,835	0,249	0,560	-0,325
rac./dm ²		**	1	-0,141	0,092	0,574	0,769	0,131	0,460	0,762	0,083	-0,423	0,019
pH				1	0,875*	0,417	0,271	0,856	0,626	0,291	-0,928	-0,527	0,095
Corg				**	1	0,620	0,523	0,985	0,820	0,500	-0,924	-0,749	0,951
Ca						1	0,671	0,694	0,641	0,728	-0,524	0,895	0,622
Mg		**	**			*	1	0,556	0,847	0,969	-0,378	-0,516	0,449
K				**	**	*		1	0,795	0,544	-0,901	0,787	0,935
P					**	*	**		1	0,772	-0,699	-0,588	0,743
Mn		**	**			*	**	**		1	-0,419	-0,563	0,475
Argile				**	**			*			1	0,633	-0,966
Limon					*	**				*	*	1	-0,758
Sable					**					**	**	*	1

pa : densité apparente, Rés. : résistance mécanique du sol, rac./dm² : racines / dm². * = significatif $P < 0,05$; ** = $P < 0,001$.

L'absence de symbole * indique que la corrélation n'est pas significative au seuil $P = 0,05$.

2.4. Discussion

Caractéristiques physiques des sols

Les figures 2.1 (résistance mécanique du sol), 2.2 (densité apparente du sol) et 2.4 (composition granulométrique) ainsi que le tableau 2.5 relatif aux caractéristiques physico-chimiques des sols des sites d'étude mettent en évidence de fortes différences dans la nature des sols des 4 sites d'étude.

Pour cette étude, toutes les mesures ont été effectuées en saison pluvieuse et le mode de gestion des sols (traitements, espèce végétale) a été identique dans tous les sites. Le mode de gestion des sols ne devrait donc pas influencer sur la variabilité observée des valeurs de résistance mécanique et de densité apparente du sol entre les sites. La teneur en carbone organique (Tableau 2.5), en oxydes de Fe et d'Al (Tableau 2.6) et la composition granulométrique des sols (Figure 2.4), par contre, varient grandement en fonction des sites et par conséquent pourraient expliquer, en partie, la variabilité inter-site des valeurs de densité apparente et de résistance mécanique du sol.

Le tableau 2.7 montre une corrélation positive entre la densité apparente et la résistance mécanique du sol, antérieurement rapportée par plusieurs auteurs ([Kumar et al. 2012](#) ; [Vaz et al., 2001](#)). Tous sites confondus (Tableau 2.7a), la densité apparente est négativement corrélée avec le carbone organique et l'argile. Ces résultats sont en accord avec ceux de [Sakin \(2012\)](#) et [Jeffrey \(1970\)](#) qui ont observé des relations négatives et significatives entre la matière organique et la densité apparente, et ceux de [Bernoux et al. \(1998\)](#) qui ont trouvé des relations négatives et significatives entre la teneur en argile et la densité apparente du sol. Toutefois, pour chaque site

séparément (Tableau 2.7b-e), la densité apparente est positivement corrélée avec l'argile (sauf pour Gitega, Tableau 2.7e). L'absence d'une relation négative entre la densité apparente et la teneur en argile serait liée au fait que nos observations ont été faites sur une profondeur de 1 m, les horizons profonds du sol ont des teneurs élevées en argile et sont plus denses. Tant pour tous les sites confondus que pour chaque site séparément, la résistance mécanique du sol s'accroît avec la teneur en argile mais varie en sens inverse avec la teneur en sable ($r = -0,32$ à $-0,96$, Tableaux 2.7a-e). Ainsi, il serait logique que les plus faibles valeurs de résistance mécanique soient observées sur les sols moins argileux.

Les valeurs significativement supérieures de densité apparente du sol (entre $1,25$ et $1,41 \text{ g/cm}^3$) à Rubona comparé aux autres sites (Figure 2.2) s'expliquent par son pourcentage élevé en sable (57 à 70%, en lien avec l'origine granitique de la roche mère) ainsi que les faibles teneurs en carbone organique (Tableau 2.5) et en oxydes de Fe et d'Al (Tableau 2.6) vraisemblablement à l'origine d'un développement de la structure plus faible que sur les autres sites.

Pour le sol de Walungu, caractérisé par des teneurs en carbone organique 2,8 fois supérieures à celle de Rubona sur les dix premiers centimètres, une teneur très élevée en argile, et des teneurs en oxydes (Fe et Al) cinq fois plus élevées qu'à Rubona, les faibles valeurs de densité apparente du sol (Figure 2.2), tout au moins en surface, pourraient être dues à une structure micro-agrégée du sol résultant de l'assemblage des particules minérales par la matière organique et les oxydes (Fe et Al). Dans les Ferralsols, la structure micro-agrégée (« micro-agrégats » ou « pseudo-sables ») est en effet bien connue ([Tavares-Fihlo et Tessier, 1998](#)) et se caractérise par la présence

importante de micropores au sein d'agrégats de petite taille en plus de la macroporosité entre les agrégats du sol. Cette micro-structuration pourrait aussi expliquer les faibles valeurs de densité apparente observées en surface à Gitega malgré la texture nettement plus sableuse de ce profil et les teneurs plus faibles en oxydes de fer et en Corg qu'à Walungu. La plus forte proportion de sable à Gitega comparé à Walungu peut être mise en relation avec la roche-mère, granitique à Gitega mais basaltique à Walungu.

Les valeurs les plus faibles de densité apparente sont observées dans les 40 premiers centimètres à Mulungu. Ceci s'explique vraisemblablement par les teneurs élevées en argile, bien que moins élevées qu'à Walungu (Figure 2.4), les teneurs très élevées en Corg (entre 4 et 5% entre 0 et 40 cm de profondeur ; Tableau 2.5) et en oxydes de Fe et Al (Tableau 2.6) ainsi que par la nature du sol, dérivé de cendres volcaniques. La formation de micro-agrégats stables dans des nitisols dérivés de cendres volcaniques a en effet été liée à la présence d'halloysite et d'oxydes de fer, par exemple en Guadeloupe (Dorel, 2001) et dans les îles Tonga (Pochet et al., 2007). Par ailleurs, il est important d'indiquer que l'analyse texturale du sol qui consiste à séparer les différents constituants minéralogiques du sol (sable, limon et argile) ne permet pas de ressortir la structure micro-agrégée d'un sol. En effet, la structure micro-agrégée du sol est détruite et les constituants minéralogiques dispersés lors de l'analyse texturale.

A Mulungu, Walungu et Rubona, l'accroissement des valeurs de densité apparente (Figure 2.2) en profondeur peut s'expliquer par la réduction de la teneur en matière organique avec la profondeur, ce qui peut conduire à un moindre développement de la structure du sol. La compaction des horizons profonds suite au poids des horizons supérieurs (pression de surcharge)

peut également expliquer l'augmentation de la densité (Arshad et al., 1996). A Gitega, on observe au contraire une diminution des valeurs de densité apparente en profondeur (entre 50 et 100 cm) qui ne semble pas pouvoir s'expliquer par une forte micro-structuration, les teneurs en argile, en oxydes de Fe et en Corg étant nettement plus faibles qu'à Walungu. Les faibles densités pourraient être liées à la présence de nombreux macropores de dimensions millimétriques d'origine biologique observés sur les profils lors des mesures.

Du fait d'une forte corrélation positive (Tableau 2.7), les profils de résistance mécanique sont globalement similaires aux profils de densité apparente : augmentation graduelle de la résistance mécanique à Mulungu sur toute la profondeur du profil, forte augmentation de la résistance mécanique sur les 40 premiers centimètres à Walungu suivi d'une stabilisation à des valeurs très élevées, baisse de la résistance mécanique sur les 20-30 premiers centimètres à Rubona suivi d'une augmentation graduelle, et augmentation de la résistance mécanique jusqu'à environ 40 cm de profondeur à Gitega, suivi d'une diminution graduelle. Rappelons que les mesures ont été effectuées au milieu de la saison des pluies et qu'on ne s'attend donc pas à ce qu'il y ait des gradients de teneur en eau importants dans le profil suite à la présence d'un front d'humectation ou de dessiccation.

A l'exclusion du sol de Gitega ($r = 0,24$, Tableau 2.7e) qui présente des valeurs relativement faibles en profondeur, la résistance mécanique tend à croître avec la teneur en argile du profil ($r = 0,77$ à $0,96$ sur les 3 autres sites, Tableaux 2.7b-d), traduisant un accroissement des contraintes physiques tel que rapportés par Delvaux et Guyot (1989), par exemple. Les

valeurs de résistance mécanique significativement plus élevées au site de Walungu (Figure 2.1) pourraient ainsi s'expliquer par sa composition granulométrique constituée principalement d'argile. De 0 à 100 cm, le sol est en effet de texture argileuse (argileuse lourde à très lourde). Les valeurs de résistance mécanique plus faibles en surface sont vraisemblablement attribuables à la diminution de la densité apparente et à la texture un peu moins argileuse. Malgré des valeurs de densité apparente nettement plus élevées que sur les autres sites, les faibles valeurs de résistance mécanique observées en surface à Rubona seraient liées à sa teneur élevée en sable (57 à 70%), tout au moins en surface. En profondeur, la résistance atteint en effet des niveaux comparables à ceux observés à Mulungu sur un matériau nettement plus argileux. En surface, la faible cohésion entre les grains de sable entraînerait une faible résistance à la pénétration du cône du pénétromètre, alors qu'en profondeur l'augmentation de la densité, de la teneur en argile et de la pression de surcharge due aux horizons sous-jacents renforceraient progressivement la cohésion. A Mulungu, l'augmentation progressive de la résistance mécanique semble s'expliquer principalement par l'augmentation de la densité apparente et de la pression de surcharge en surface (0-40 cm), et par l'augmentation conjointe de la densité, de la teneur en argile et de la pression de surcharge en profondeur (> 40 cm). A Gitega, au-delà de l'augmentation de résistance observée dans les 40-50 premiers cm et attribuables à l'augmentation de la densité apparente et de la pression de surcharge et à une texture progressivement plus fine, la diminution de la résistance en-deçà de 50 cm de profondeur semble s'expliquer principalement par la diminution de la densité apparente. Curieusement, ni la pression de surcharge, ni la texture de plus en plus fine en profondeur, ne semblent contrecarrer l'effet dominant de la densité apparente. Il semble que l'importante

macroporosité observée en profondeur sur ce site soit à l'origine de cette faible résistance mécanique.

Si l'on tient compte de la valeur seuil de 20 kg/cm^2 (Unger et Kaspar, 1994) à partir de laquelle la croissance des racines de la plupart des plantes diminue sensiblement ou s'arrête, les racines de plantes seraient soumises à des fortes contraintes mécaniques à Walungu dès 20 cm de profondeur, à Mulungu entre 70 et 100 cm et à Rubona entre 90 et 100 cm. Avec des valeurs $<20 \text{ kg/cm}^2$ entre 0 et 100 cm, le sol de Gitega, par contre, ne présente pas de contraintes liées à la résistance mécanique du sol. En ce qui concerne la densité apparente, la valeur de densité apparente limitante pour la croissance ('Growth-Limiting Bulk Density', GLBD) décroît avec l'accroissement de la teneur en argile (Figure 2.3). Classés par ordre croissant de teneur en argile, les sites se présentent de la manière suivante : Rubona < Gitega < Mulungu < Walungu. La valeur GLBD, par contre, se présente en ordre opposé de la teneur en argile : Rubona > Gitega > Mulungu > Walungu (Figure 2.3). Ce résultat est en accord avec celui de Daddow et Warrington (1983). De même, dans une étude sur l'évaluation de la croissance racinaire du tournesol (*Helianthus annuus*) sur des sols de texture différente, Veihmeyer et Hendrickson (1948) ont observé un arrêt de la croissance racinaire de tournesol (*Helianthus annuus*) à une valeur de GLBD plus élevée ($1,75 \text{ g/cm}^3$) sur sol sableux que sur sol argileux ($1,46$ à $1,63 \text{ g/cm}^3$). Pour ce qui est de la culture bananière, en Martinique, travaillant sur différents types de sols avec une large gamme de densités apparentes ($0,65$ à $1,40 \text{ g/cm}^3$), Delvaux et Guyot (1989) ont observé des 'seuils critiques' de densité apparente variables en fonction du type de sols (par exemple, $1,05$ à $1,20 \text{ g/cm}^3$ sur sols brun rouille à halloysite, $1,20$ à $1,40 \text{ g/cm}^3$ sur Ferrisols, $0,90$ à $1,00 \text{ g/cm}^3$ sur sols peu

évolués, andiques sur cendres et ponces, 0,80 à 0,90 g/cm³ sur Andosols sur cendres et ponces).

La comparaison des valeurs de densité apparente mesurées avec les valeurs critiques estimées sur base du diagramme textural GLBD (Figure 2.3, Tableau 2.4) montre que la valeur de densité apparente mesurée des horizons de surface est systématiquement la plus éloignée de la valeur critique. D'autre part, c'est à Gitega que les valeurs observées sont les plus éloignées de la valeur critique, suivi de Mulungu, et enfin Walungu et Rubona. Toutefois, il importe de signaler que les lignes d'iso-densités décrites par [Daddow et Warrington \(1983\)](#) ne doivent pas être de stricte application pour cette étude. En effet, le triangle textural de GLBD a été établi à partir d'échantillons de sols ayant une teneur en matière organique inférieure à 3,0% et moins de 10% de refus (= particules > 2 mm). Par ailleurs, les lignes d'iso-densités sont basées sur l'hypothèse d'une densité réelle de 2,65 g/cm³. Dans cette étude, la teneur en matière organique du sol (0-100 cm) a varié entre 0,86 et 9,4%. De même, la composition minéralogique pourrait être fort variable vu les fortes différences dans la nature des sols. Ceci est susceptible d'affecter directement la valeur de densité apparente ([Biielders et al., 1990](#)). Les racines du bananier sont fragiles et un faible pouvoir de pénétration ([Martin-Prével, 1987](#)). Ainsi, pour cette étude, la croissance racinaire du bananier serait affectée à une valeur GLBD inférieure à celle de GLBD critique (Tableau 2.4). Néanmoins, le triangle GLBD permet de discriminer les sites en fonction de leur composition granulométrique. Cette notion de GLBD pourrait ainsi expliquer la présence de racines à des valeurs de densité apparente de l'ordre de 1,20 à 1,40 g/cm³ à Rubona malgré que ces valeurs soient très

élevées en comparaison avec Mulungu, Walungu et Gitega (Figure 2.2) pour la même profondeur (20 à 40 cm).

Sur base de ce qui précède, les sites de Mulungu et Gitega présentent donc les propriétés physiques les plus favorables parmi les 4 sites, avec des faibles valeurs de densité apparente, très éloignées de la valeur critique, et des valeurs faibles de résistance mécanique. Au-delà de 60 cm de profondeur, les propriétés physiques sont plus favorables à Gitega qu'à Mulungu. Rubona présente également une faible résistance à la pénétration, surtout en surface, mais les valeurs de densité apparente sont quelque peu moins favorables en comparaison avec les valeurs critiques. Du point de vue de la densité apparente, Walungu est comparable à Rubona (Tableau 2.4) mais la résistance mécanique y est la plus élevée de tous les sites et y présente des valeurs extrêmes au-delà de 20-30 cm de profondeur.

Caractéristiques chimiques des sols

Comme pour la résistance mécanique et la densité apparente, les propriétés physico-chimiques et chimiques des sols varient fortement en fonction des sites (Tableau 2.5).

Les fortes teneurs en carbone organique (Tableau 2.5) sont observées à Mulungu et Walungu comparés à Rubona et Gitega, et seraient liées à leurs fortes teneurs en Si, Al et Fe extraits à l'oxalate d'ammonium et au dithionite et citrate de sodium tamponnés par le bicarbonate de sodium (Tableau 2.6). En effet, la formation préférentielle des complexes minéraux-humus (complexes argile-humus, Al/Fe-humus rendent la matière organique inaccessible à la décomposition microbienne) conduit à

l'accumulation de quantités considérables de matière organique. Ce phénomène est particulièrement important dans les horizons de surface des sols d'origine volcanique (Garrido et Matus, 2012). Comparée à la valeur critique de teneur en matière organique (>3,0% de MO) observée sous bananier en Ouganda (Odeke et al., 1999), Rubona (1,9% = Corg x 1,72) présente des teneurs en matière organique inférieures à la valeur critique. Les sols de Gitega (3,0%), de Mulungu (8,4%) et de Walungu (5,2%), par contre, ont des teneurs en matière organique adéquates pour une bonne production bananière.

Sur base des valeurs analytiques reprises au tableau 2.3, le sol de Mulungu présente de bonnes propriétés chimiques pour la production bananière. Les teneurs en phosphore assimilable et en cations basiques (Ca, Mg, K) sont supérieures aux valeurs critiques. Walungu présente des déficiences en P et en K. Les sols de Rubona et Gitega présentent des teneurs en Ca, Mg et K inférieures aux valeurs critiques. Néanmoins, les déficiences sont plus marquées à Gitega. Quels que soient le site et la profondeur de mesure, la teneur en sodium échangeable est inférieure à la valeur critique, soit <1,0 cmolc/kg (Odeke et al., 1999), et donc ne représente nullement une contrainte pour la culture bananière. Gitega présente des valeurs de pH (pH ≤5,1) moins propices à la culture bananière sur toute sa profondeur. Les sols de Mulungu, Walungu et Rubona ont des valeurs de pH satisfaisantes pour la culture du bananier, les conditions les plus favorables étant observées à Mulungu.

Des valeurs élevées d'acidité d'échange et d'aluminium échangeable à Gitega peuvent s'expliquer par les faibles valeurs de pH (4,6 à 5,1). Parallèlement, l'absence (Mulungu) ou les teneurs faibles (Walungu et

Rubona) en aluminium échangeable seraient liées à des valeurs de pH moins acides. En effet, suivant les types de sols, l'aluminium échangeable apparaît à des valeurs de pH (H₂O) comprises entre 5 et 6 et n'atteint des teneurs importantes qu'à des valeurs de pH <5,0 (Serrano, 2005a; Gauggel et al., 2005).

L'aluminium échangeable sature à hauteur de 21 (0-10 cm) à 29% (60-70 cm) le complexe argilo-humique à Gitega, caractérisé par de très faibles teneurs en cations basiques (Tableau 2.5). Si l'on considère le statut de l'aluminium des sols exprimé suivant la valeur M de Mohr (Eq. 2.1) et la valeur r de Kamprath (Eq. 2.2) (Boyer, 1976), Gitega se caractérise par des valeurs nettement supérieures à celles des autres sites (Tableau 2.5). Le niveau de toxicité (valeur M de Mohr) du bananier n'est pas connu tandis que celui du haricot, planté en association avec le bananier dans cette étude, s'élève à 20 (Sys, 1979). Des valeurs M de Mohr supérieures à 20 dès 0-10 cm de profondeur à Gitega traduisent une toxicité aluminique pour la culture de haricot. Le sol de ce site serait donc sujet à la toxicité aluminique. Les sols de Mulungu, Walungu et Rubona ne présentent aucun risque de toxicité aluminique. A 0-10 cm de profondeur, les valeurs r de Kamprath sont nulles à Mulungu et Walungu, et 14 fois supérieures à Gitega comparé à Rubona. A des valeurs r de Kamprath de 30%, il n'y a plus de développement de *Rhizobium* (Boyer, 1976). Ce résultat indique que le sol de Gitega est moins propice à la culture de haricot cultivé en association avec le bananier, comme c'était le cas dans cette étude.

Les teneurs en manganèse sont faibles à moyennes à Mulungu et Rubona. La même tendance est observée au site de Walungu, sauf entre 30-50 cm où les teneurs en Mn atteignent des teneurs toxiques (>200 ppm). Le sol de

Gitega, par contre, présente des teneurs déficientes en Mn (<10 ppm de 0-100 cm de profondeur).

La distribution des valeurs de CEC et d'ECEC en fonction des sites traduisent un gradient de fertilité entre les sites. Par ordre décroissant de capacité de rétention et de libération des éléments minéraux, les sites se présentent de la manière suivante : Mulungu > Walungu > Rubona > Gitega. Des valeurs de CEC plus élevées aux sites de Mulungu et Walungu peuvent être liées aux teneurs élevées en carbone organique et en argile des sols (Tableau 2.5 et Figure 2.4). Ce résultat concorde avec celui de [Delstanche \(2011\)](#) qui, travaillant dans la même région (RGLA), a observé que la matière organique du sol contribue pour 60 à 98% de la CEC des horizons de surface contre 40 à 2% pour l'argile (constituée principalement de phyllosilicates de type 1:1). Les valeurs de l'ECEC suivent la même tendance de distribution observée pour la CEC, mais elles sont globalement plus faibles. Les valeurs les plus faibles de ECEC sont observées à Gitega (2 cmol+/kg). Le taux de saturation en bases (somme des bases échangeables / CEC) y est nettement plus faible que sur les autres sites quelle que soit la profondeur de mesure, soit 19% en surface (0-10 cm) et seulement 4 à 5 % en profondeur.

Relation entre le profil racinaire et les propriétés des sols

Tous sites confondus (Tableau 2.7a), la distribution racinaire du bananier serait principalement liée aux contraintes physiques, notamment la densité apparente, la résistance mécanique du sol et la teneur en argile. Une relation positive entre les propriétés chimiques du sol indique un accroissement de la densité racinaire sur sol fertile (riche en éléments minéraux et carbone organique). Pour chaque séparément (Tableau 2.7b-e), hormis la densité apparente et la résistance mécanique qui affecteraient

la distribution racinaire sur les 4 sites d'étude, la teneur en argile (Mulungu et Walungu), en sable (Rubona) et en limon et le pH (Gitega) affecteraient en plus négativement la distribution racinaire du bananier. Une relation négative entre la densité racinaire et la teneur en Mg, K, P, Mn et le pH à Mulungu ne serait pas liée à une déficience en éléments minéraux et un pH moins propice pour le bananier (Tableau 2.3), mais plutôt à un « effet profondeur de mesure », les valeurs les plus élevées de ces propriétés du sol étant observées dans les horizons profonds à faible densité racinaire.

Sur les quarante premiers centimètres où sont localisées 56 à 99% des racines, la densité racinaire varie de manière significative suivant les sites. D'une manière générale, la densité racinaire est faible à la profondeur 0-10 cm, augmente de 10 à 20 cm (Mulungu et Walungu) voire de 10 à 40 cm (Rubona), puis décroît avec la profondeur. Les différences de densité racinaire (Figure 2.5) entre les sites et le taux de réduction de la densité racinaire observée à partir de 30 cm (Mulungu et Walungu) ou 50 cm (Rubona) de profondeur seraient dues aux propriétés physiques et physico-chimiques des sols (types de sols) et à l'hétérogénéité verticale.

La plus faible densité racinaire à la profondeur 0-10 cm par rapport à la profondeur 10-20 cm serait due, entre autres, à la direction que suit une racine au cours de sa croissance. En effet, la plupart des racines primaires du bananier émergent du rhizome avec un faible angle par rapport au plan horizontal et tendent à s'incliner du plan horizontal avec l'âge (Lecompte et al., 2003 cités par [Draye et al., 2005](#)). Ceci peut résulter en une densité racinaire supérieure à la profondeur 10-20 cm étant donné que les observations ont été faites à 40 cm du pseudo-tronc. Il importe de signaler

que la faible densité racinaire à la profondeur 0-10 cm n'est pas liée au labour manuel appliqué dans les parcelles témoins (T0) dans la mesure où 12 des 16 parcelles expérimentales ont été conduites en non labour (T1, T2 et T3) et la distribution racinaire de ces parcelles était similaire à celles des parcelles T0.

La profondeur du pic de densité racinaire est observée entre 10 et 20 cm à Mulungu, Walungu et Gitega, et pourrait s'expliquer d'une part par le fait que les racines sont émises à partir du rhizome et donc à faible profondeur, et d'autre part par les conditions chimiques et physiques des horizons superficiels plus favorables du sol au développement racinaire, notamment des teneurs plus élevées en éléments minéraux, en matière organique et des valeurs plus faibles de densité apparente et de résistance mécanique du sol. On note également que pour ces trois sites, la densité apparente et/ou la résistance mécanique croît dès 20 à 30 cm de profondeur, ce qui aurait pour effet de restreindre la colonisation racinaire ([Delvaux et Guyot, 1989](#)). A Rubona, le pic de densité racinaire s'observe plus bas, à 30-40 cm. Ceci pourrait être lié à la faible résistance mécanique observée jusqu'à 30 cm de profondeur et à la densité apparente décroissante sur cette même profondeur. Bien qu'appartenant tous au groupe des bananiers de hautes altitudes de la RGLA (*Musa* AAA-EA), l'utilisation d'un cultivar différent de celui planté dans les 3 autres sites pourrait également influencer la distribution racinaire à Rubona. En effet, pour les bananiers de hautes altitudes de la RGLA (*Musa* AAA-EA), [Sebuwufu et al. \(2004\)](#) ont rapporté des différences significatives entre les caractéristiques des racines et des parties aériennes de différents cultivars.

La densité racinaire moyenne maximale est de 3,4 racines/dm² à Mulungu, suivi de Walungu (2,5 racines/dm²), Rubona (1,6 racines/dm²) et de Gitega (0,12 racine/dm²). Cet ordre décroissant de densité racinaire maximale présente un lien très étroit avec le niveau de fertilité des sols des sites (Tableau 2.5). En d'autres termes, la densité racinaire maximale décroît depuis le sol de Mulungu, plus fertile et donc plus propice pour le développement racinaire du bananier, jusqu'au sol de Gitega qui présente les propriétés chimiques les plus défavorables. Contrairement à la densité racinaire maximale qui présente un lien étroit avec le niveau de fertilité des sols, la profondeur maximale de l'enracinement et le taux de réduction de la densité racinaire en fonction de la profondeur semblent essentiellement dépendantes des propriétés physiques (densité apparente, résistance mécanique et texture ; Figures 2.1, 2.2 et 2.4). En effet, tant pour tous les sites confondus que pour chaque site séparément, la corrélation entre la densité apparente, la résistance mécanique et la densité racinaire est négative (Tableau 2.7a-e). En ce qui concerne la texture, une teneur très élevée en argile (Mulungu et Walungu) et en sable (Rubona) auraient un impact négatif sur la densité racinaire du bananier. Pour le bananier, des résultats similaires ont été également rapportés par [Vaquero \(2005\)](#). La présence de racines sur toute la profondeur de mesures (0 à 100 cm) à Mulungu, Rubona et Gitega pourrait s'expliquer par des valeurs de résistance mécanique inférieures ou seulement légèrement supérieures à la valeur seuil de 20 kg/cm². A Walungu, la profondeur maximale de l'enracinement se situe à 60 cm de profondeur. L'accroissement brutal des valeurs de densité apparente et de résistance mécanique du sol dès 20-30 cm et les valeurs extrêmes de résistance mécanique (~30 kg/cm²) observées dès 30-40 cm supposent la présence d'un horizon compact vers 30 cm de profondeur et qui persiste jusqu'à 1 m de profondeur. Ceci peut expliquer

la chute brutale de la densité racinaire observée dès 30-40 cm et l'absence totale de racines à plus de 60 cm de profondeur. Notons toutefois que les teneurs en manganèse soluble qui atteignent des niveaux toxiques entre 30 et 50 cm de profondeur pourraient aussi expliquer le faible développement racinaire en profondeur à Walungu.

L'allure des courbes de distribution de densité racinaire des sites de Mulungu et de Rubona sont similaires à celles rapportées par plusieurs auteurs ([Araya, 2005](#); [Delvaux et Guyot, 1989](#); [Lassoudière, 1978](#); [Beugnon et Champion, 1966](#)) et se caractérise par une réduction de la densité racinaire dans les horizons profonds des sols caractérisés par l'accroissement des valeurs de densité apparente et de résistance mécanique. A Gitega, par contre, la densité racinaire est nettement plus faible quelles que soient les valeurs de résistance mécanique et de densité apparente. Sur le sol de ce site, des études antérieures ont montré une perméabilité *in situ* de l'ordre de 17,7 cm/h sur sol nu ([Nyabuhwanya, 1993](#)). Avec une texture moyenne et en l'absence d'une nappe d'eau superficielle, le sol de ce site ne présente pas de risque de pourriture racinaire des plantes due à des conditions d'hydromorphie. La faible densité racinaire observée sur ce site, qui pourtant présente de bonnes propriétés physiques (densité apparente et résistance mécanique, Figures 2.1 et 2.2), serait dès lors principalement due à des contraintes d'ordre chimique du sol. Ces contraintes sont, entre autres, des valeurs de pH très acides, un taux de saturation en aluminium échangeable très élevé et des teneurs plus faibles en cations basiques échangeables et en phosphore (Tableau 2.5). De 0-100 cm, les teneurs en Ca, Mg, K et P sont déficientes sur ce site. Des faibles valeurs de CEC et ECEC indiquent la faible capacité du sol de ce site à retenir et à libérer les cations échangeables. En

profondeur, des valeurs de ECEC de l'ordre de 2 cmol+/kg (80-90 cm) et des valeurs de TRB (Réserve totale en bases) variant entre 10,5 et 13,0 cmol+/kg de sol (Annexe 1a) montrent que le sol de Gitega est très altéré et fortement lessivé. Dans une étude en milieu acide (78 μ M Al), [Rufyikiri et al. \(2000, 2001\)](#) ont observé une réduction du poids sec total de la plante, du nombre et du diamètre de racines, de la teneur en calcium et magnésium ainsi qu'une réduction de l'absorption totale d'eau et d'éléments minéraux chez le bananier 'Grand nain'. L'aluminium n'est pas un nutriment pour le bananier, parce qu'il n'est pas un élément essentiel pour le cycle végétatif de la plante ([Serrano, 2005a](#)). A une valeur r (Kamprath, Tableau 2.5) supérieure à 30%, l'aluminium échangeable entraîne une toxicité aluminique qui est souvent associée à des fortes concentrations en manganèse et en fer, et à des faibles teneurs en cations basiques, en phosphore, en zinc et bore ([Gauggel et al., 2005](#)). Dans ces conditions, les racines sont courtes et ont un faible diamètre avec des lésions brun-noires et noires sur l'épiderme. Les rendements de bananiers sont généralement faibles ([Gauggel et al., 2005](#)). Les propriétés chimiques défavorables au développement racinaire peuvent expliquer la faible densité racinaire observée à Gitega où les bananiers étaient d'ailleurs en pleine disparition au moment des observations (Annexe 1b). Les quelques rares racines observées en profondeur (70-100 cm) seraient des racines de pied-mères dont les pseudo-troncs étaient morts mais les rhizomes encore fonctionnels au moment des observations. En effet, [Lassoudière \(1980\)](#) a observé que les racines du pied-mère peuvent encore être vivantes (et probablement fonctionnelles) pendant la croissance et à la récolte du pied-fils chez le bananier.

Dans cette étude, l'influence des facteurs biotiques, notamment les nématodes, sur la distribution racinaire du bananier n'a pas été prise en compte du fait d'un faible taux d'infestation observé lors des observations. Des études antérieures ([CIALCA, 2007b](#) ; [Bouwmeester et al., 2009](#); [Gaidashova, 2009](#); [Wairegi, 2010](#); [Delstanche, 2011](#)) ont montré que les nématodes ne constituaient pas une contrainte majeure à la production bananière dans la zone d'étude. En Martinique, [Delvaux et Guyot \(1989\)](#) ont observé une dégradation de l'état sanitaire des racines avec l'accroissement de l'âge de la bananeraie. Dans le cas présent, les observations ayant été faites 30 mois après la plantation, le jeune âge des plantations peut également expliquer la faible incidence des nématodes.

D'une manière générale, les résultats de cette étude montrent que les propriétés physiques et chimiques des sols de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega varient de façon considérable. Suivant les sites, certaines propriétés constituent des contraintes au développement racinaire du bananier, dont les principales sont reprises au tableau 2.8. Sur base de ces contraintes, l'amélioration de la croissance et du développement racinaire du bananier requiert l'amélioration de la fertilité du sol (correction du pH et apport en éléments minéraux), les apports en carbone organique et en éléments minéraux à Rubona et Walungu. Le travail du sol avant la plantation du bananier serait également nécessaire sur le sol de Walungu qui présente des valeurs très élevées de résistance mécanique du sol dès les horizons de surface. A Mulungu, des mesures de conservation du sol (paillage) seraient nécessaires pour maintenir ses propriétés édaphiques optimales pour la croissance et le développement racinaire du bananier.

Tableau 2.8. Tableau récapitulatif des principales contraintes abiotiques liées au sol pour le développement racinaire du bananier à Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega.

Sites	Contraintes
Mulungu	- Absence de stress abiotiques liés au sol
Walungu	- Valeurs élevées de résistance mécanique dès 30 cm - Faibles teneurs en K et P - Toxicité Mn à 30 cm
Rubona	- Faible teneur en carbone organique - Déficiency en Ca, Mg, K et en P assimilable - Pourcentage élevé en sable (57-71%), structure particulière (texture grossière)
Gitega	- pH $\leq 5,1$ - Taux de saturation en Al échangeable élevé (21 à 29%) - Ratio Al/bases échangeables élevé (52 à 88%) - Déficiency en Ca, Mg, K, P assimilable et Mn

2.5 Conclusions

Les résultats de cette étude montrent que les bananiers de hautes altitudes de la RGLA croissent sur une large gamme de sols qui ont des caractéristiques physiques et physico-chimiques contrastées et appartiennent à des classes de sols différentes. Dans cette étude, sur base des caractéristiques du sol, le gradient décroissant de fertilité se présente de la manière suivante: Mulungu > Walungu > Rubona > Gitega. Quel que soit le site, la densité et la distribution racinaire apparaissent étroitement liées aux propriétés physiques et chimiques et à l'hétérogénéité verticale

du sol. La densité racinaire maximale est fortement liée au niveau de fertilité du sol, le site de Mulungu, le plus fertile (Nitisols sur cendres volcaniques), venant en première position (entre 3 et 4 racines/dm²), suivis de Walungu (Ferralsols humic, moins altéré, entre 2 et 3 racines/dm²) et Rubona (Acrisols sur granite, entre 1 et 2 racines/dm²). Gitega (Ferralsols rhodic, très altéré, lessivé et très acide) a une densité racinaire maximale très faible, <0,5 racine/dm². La profondeur maximale d'enracinement semble quant à elle principalement régie par les propriétés physiques, particulièrement à Walungu où on observe des valeurs de résistance mécanique extrême dès 30 cm de profondeur. La toxicité Mn peut cependant également constituer une contrainte à l'exploration du profil en profondeur sur ce site. Pour favoriser la croissance racinaire du bananier de hautes altitudes, il faudrait améliorer la fertilité du sol (correction du pH et apport en éléments minéraux) à Gitega, accroître la teneur en carbone organique et en éléments minéraux à Rubona et Walungu. Le travail du sol avant la plantation du bananier serait également nécessaire sur le sol de Walungu qui présente des valeurs très élevées de résistance mécanique du sol dès les horizons de surface. A Mulungu, des mesures de conservation du sol (paillage) seraient nécessaires pour maintenir ses propriétés édaphiques optimales pour la croissance et le développement racinaire du bananier.

Dans la RGLA, les propriétés pédologiques influencent donc fortement la distribution racinaire du bananier et, compte tenu de la corrélation entre le système racinaire du bananier et son appareil végétatif, celles-ci pourraient expliquer la variabilité régionale des rendements du bananier. L'augmentation des performances des bananiers dans cette région passera donc nécessairement par la mise en œuvre de pratiques ciblées, répondant

aux contraintes spécifiques de chaque site établies par un diagnostic préalable.

Chapitre 3. Le potentiel d'une agriculture de conservation pour l'amélioration des propriétés physiques du sol et de l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique

Résumé

Au Sud-Kivu (RD Congo), au Rwanda et au Burundi, le bananier est généralement cultivé en association avec les cultures annuelles, notamment le haricot. Au début de la saison culturale des plantes annuelles, les résidus de bananier (feuilles et pseudo-troncs) sont exportés et le sol sous bananier est labouré manuellement en vue de préparer le lit de semis. Ce mode de gestion pourrait affecter négativement la qualité du sol (désagrégation du sol, accélération de la minéralisation du carbone organique du sol et moindres restitutions) et endommager les racines du bananier dans la couche de sol labourée. Il semble donc pertinent de rechercher des modes de gestion alternatifs à la pratique actuelle. Sur quatre sites d'essai (Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega), le mode de gestion local des bananeraies (labour et exportation de résidus de bananiers, T0) a été comparé à trois traitements en non labour et paillés de résidus de bananiers uniquement (T1), de résidus de bananiers et d'un

paillage supplémentaire de *Hyparrhenia diplandra* ou chaume de riz (*Oryza sativa*) selon le site (T2) ou de résidus de bananiers avec un paillage de *Tripsacum laxum* (T3). Tous les traitements ont été soumis à l'association bananier-haricot. Trente mois après plantation et 2 mois après le dernier labour manuel sur les parcelles de T0, quatre profils (2 m de large x 1 m de profondeur) par traitement ont été ouverts à 40 cm du pseudo-tronc. De 0-40 cm de profondeur, tous les 10 cm, la densité racinaire (racines/dm²) et les propriétés physiques (résistance mécanique et densité apparente) ont été caractérisés simultanément. Le traitement T0 a réduit significativement ($0,001 < P < 0,05$) la résistance mécanique du sol à la profondeur 0-10 cm sur 3 des sites d'étude, mais n'a pas amélioré la densité apparente du sol et la densité racinaire. Sur deux des sites d'étude, l'absence de labour avec exportation de résidus de bananier (T1, T2 et T3) a favorisé le maintien d'une densité racinaire significativement ($0,01 < P < 0,05$) plus élevée sur les dix premiers centimètres du sol comparé au T0. Au-delà de 10 cm de profondeur, les différents modes de gestion ont eu un effet faible, voire nul, sur la densité racinaire, et cette dernière semble essentiellement dépendante des propriétés intrinsèques des sols. L'apport de paille externe (T2 et T3) n'a pas permis d'améliorer la structure du sol ni favorisé le développement racinaire par rapport au paillage avec les résidus de bananiers uniquement (T1). Le non labour avec paillage apparaît donc comme une alternative adéquate du point de vue conservation du sol et enracinement du bananier, mais son impact sur la productivité globale de l'association bananier-cultures annuelles nécessite d'être vérifié.

Mots clés : non labour, propriétés physiques, enracinement, bananier, hautes altitudes.

3.1 Introduction

Pour satisfaire à leurs besoins en diverses denrées alimentaires et énergétiques, la population densément peuplée (200 ou plus habitants/km²) et essentiellement rurale du Sud-Kivu (Kivu montagneux) en RD Congo, au Rwanda et au Burundi (85-90%, [Bouwmeester et al., 2009](#); [RADA, 2007](#)) recourt à l'association des cultures ([Akyampong et al., 1995](#)). En Afrique de l'Est, plusieurs cultures (annuelles ou pérennes) sont cultivées en association avec le bananier qui possède des caractéristiques pérennes (rejetonnage) et dont la durée d'exploitation peut dépasser plus de 50 ans ([Ouma, 2009](#)). Depuis plusieurs décennies, [Kirkby et Ngendahayo \(1985\)](#) ont rapporté l'existence de plusieurs associations bananier-cultures annuelles courantes à côté des bananeraies en culture pure au Sud-Kivu, au Rwanda et au Burundi : banane-colocase, banane-haricot, banane-haricot-colocase, banane-manioc-haricot, banane-patate-sorgho.

Dans les associations de cultures bananier-cultures annuelles telles que pratiquées dans la zone d'étude, le travail du sol (labour à la houe manuelle ou au moyen d'un trident) est couramment effectué au début de chaque saison culturale des cultures annuelles pour préparer le lit de semis. Cette opération est répétée deux fois par an car il y a deux cycles de cultures annuelles par an. En général, le travail du sol manuel dans les bananeraies est précédé de l'exportation des résidus de récolte de bananiers (feuilles et pseudo-troncs), les résidus exportés servant de paillis pour le caféier (Rwanda et Burundi) ou pour les cultures annuelles (notamment le manioc à Kabamba au Sud-Kivu) ([CIALCA, 2007a](#) ; [Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)). Le travail du sol permet de contrôler les adventices ([Lepecki et Barbec, 1997](#)) et d'ameublir le sol en surface ([Blomme, 2000](#)), ce qui permet de limiter la

compétition des adventices, d'accroître à court terme la porosité et l'infiltration ([Dorel et al., 2010](#)), de maintenir une bonne aération du sol, de faciliter la croissance des racines et de favoriser une reprise régulière et le développement des cultures annuelles.

Tout en ameublissant le sol en surface, le travail du sol avec exportation des résidus de bananiers dans une bananeraie établie présente potentiellement les désavantages suivants : (i) couper les racines du bananier sur la profondeur du sol labourée, ce qui pourrait réduire la capacité d'absorption pour l'eau et les éléments minéraux et perturber la nutrition du bananier, (ii) accélérer la vitesse de décomposition de la matière organique avec un impact négatif sur la capacité d'échange cationique et la structure du sol ([Martins et al., 2011](#)), détruire la structure agrégée du sol et accroître la susceptibilité du sol à l'érosion ([Lepecki et Barbec, 1997](#); [Glenn et Welker, 1989](#)). L'exportation des résidus de bananiers dénude le sol et favorise la formation de la croûte de battance sous l'impact des gouttes de pluies ([Araya et De Waele, 2005](#)). Dans la mesure où la restitution au sol de matières organiques diminue, l'exportation des résidus conduit également à la réduction du taux de matière organique du sol qui constitue la principale source de fertilité des sols en Afrique de l'Est ([Delvaux, 1995](#)). Ce mode de gestion traditionnel des systèmes de production paysanne (labour et exportation des résidus de bananier) a été identifié comme une des principales causes de la dégradation des sols par érosion et de baisse de rendement du bananier dans la RGLA ([Kirkby et Ngendahayo, 1985](#)).

Quelques études ont été conduites pour améliorer les systèmes de production traditionnels. [Rishirimuhirwa \(1997\)](#) a montré que dans les zones montagneuses de ces trois pays, les méthodes les plus efficaces

contre l'érosion sont celles qui maintiennent le sol couvert et protégé contre l'impact des gouttes de pluies. Il s'agit surtout du paillis, de l'agroforesterie et de l'utilisation des résidus de récoltes. Trois ans et demi après le paillage complet (10 t MS/ha/an), l'auteur a également observé une amélioration des propriétés physiques (perméabilité) et chimiques du sol par rapport aux parcelles non paillées. Le paillage présente d'autres avantages, tels que la régulation de la température au sol (Robinson et Alberts, 1989) et la conservation de l'humidité du sol (Robinson, 2000). Le paillage aide à contrôler les adventices en les privant de la lumière. L'apport de paille (« mulch ») accroît la teneur en matière organique du sol, favorise l'activité et la diversité biologique du sol (Dorel et al., 2010) et améliore les propriétés physiques et chimiques du sol (Benites, 2008; McIntyre et al., 2000). Chez le bananier plantain, sur des parcelles qui avaient été paillées, Ruhigwa et al. (1995) et Salau et al. (1992) ont observé une stimulation de la ramification racinaire, un accroissement de la vigueur des plantes, un raccourcissement de la durée du cycle et un accroissement du rendement. Pour le cultivar de bananier d'altitude d'Afrique de l'Est 'Mbwazirume' (*Musa* AAA-EA), McIntyre et al. (2000) ont rapporté que les traitements avec paillis étaient plus productifs en termes de biomasse en surface et dans le sol que des traitements en sol nu. Quatre ans et demi après paillage, ces auteurs ont observé une réduction de la densité apparente du sol sur les trente premiers centimètres (1,30 contre 1,47 g/cm³) et un taux d'infiltration plus élevé sur les parcelles paillées par rapport au sol nu. Par ailleurs, il importe de signaler que le paillage présente cependant quelques limitations : (i) l'efficacité du contrôle des adventices est moindre si la couche de paille diminue (Pfammater, 1994), (ii) le paillage nécessite des apports externes de pailles à l'installation de la plantation, ce qui est onéreux et demande beaucoup de temps (Ruger, 1991 cité par Lepecki et

[Barbec, 1997](#)), (iii) pour les agriculteurs de la zone d'étude pratiquant l'association de cultures bananier-cultures annuelles, le recouvrement du sol avec le paillis gêne le semis des cultures annuelles.

Compte tenu des dommages potentiellement subis par les racines du bananier suite au labour et de l'exportation de résidus qui pourrait entraîner une dégradation de la qualité du sol, il convient de s'interroger sur la possibilité de remplacer les pratiques actuelles par des pratiques moins dégradantes. A cet effet, le non labour avec paillage apparaît comme une alternative intéressante, largement prônée par « l'agriculture de conservation » ([Giller et al., 2011](#) ; [Llewellyn et al., 2012](#)). Le non labour évite de perturber le système racinaire de la culture pérenne et la structure du sol, pourrait limiter la vitesse de décomposition de la matière organique et permet de maintenir des taux de matière organique plus élevés à la surface du sol. En non labour, c'est la stimulation de l'activité biologique plutôt que le travail mécanique qui pourrait assurer l'ameublissement du sol en vue d'un bon développement des cultures annuelles. Le contrôle des adventices posant problème dans ce système, l'apport d'un paillis assure cette fonction. L'efficacité de cette approche alternative est cependant susceptible de dépendre de la quantité et de la qualité des apports organiques, du microclimat et de la nature du sol. L'objectif de cette étude consiste donc à évaluer l'impact des pratiques culturales alternatives au labour sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du bananier dans les horizons de surface (0-40 cm de profondeur). Des parcelles labourées avec exportation de résidus sont ainsi comparées sur 4 sites à des parcelles en non labour avec paillage. Trois modalités de paillage sont comparées : paillage par les seuls résidus de bananiers, ou paillage de

résidus de bananiers auquel est ajoutée une source externe de paille de graminées. Deux sources différentes de graminées sont comparées.

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Sites d'études, dispositif expérimental et conduite des essais

Les sites d'étude, le dispositif expérimental et la conduite des essais sont les mêmes que ceux décrits aux sections 2.2.1 et 2.2.2 du chapitre 2. Les caractéristiques physiques et chimiques des sols des sites expérimentaux ont été décrits dans les paragraphes 2.3.1 et 2.3.2.

3.2.2 Paramètres observés

Dans ce chapitre, seules les propriétés relatives aux 40 premiers centimètres du sol sont prises en considération. En effet, l'essentiel de l'enracinement est concentré dans cette tranche de sol. Par ailleurs, il est peu probable que l'impact des modifications de pratiques culturales se marque au-delà de cette profondeur.

Les paramètres observés décrits dans ce chapitre concernent la description du système racinaire du bananier sous différents modes de gestion du sol et différents sites d'essai. Pour ce faire, la distribution racinaire et le profil pédologique ont été caractérisés simultanément. Ces mesures ont été faites trente mois après l'installation des essais. Dans les parcelles de traitement labour (T0), les observations ont été faites après 4 (Rubona et Gitega) et 5 (Mulungu et Walungu) campagnes de labour et 2 mois après le dernier labour.

L'exploration du système racinaire a porté sur la densité et la distribution racinaire. Dans chaque parcelle élémentaire (répétition d'un traitement), un plant de bananier ayant une circonférence à la base (collet) égale ou proche de la moyenne de l'ensemble des bananiers de la parcelle a été sélectionné. Un profil (2 m de large x 1 m de profondeur) a été ouvert à 40 cm du pseudo-tronc du bananier sélectionné. Le profil racinaire a été observé après dégagement soigneux de la terre sur une épaisseur horizontale de 10 cm pour exposer les racines puis superposition d'un maillage de 10 cm x 10 cm. La distribution racinaire a été évaluée en dénombrant le nombre de racines dans chaque maille (Manichon, 1982 cité par [Delvaux et Guyot, 1989](#)), indistinctement de leurs types - racines primaires ou racines secondaires. Sur les vingt premiers centimètres de profondeur du sol, le diamètre des racines (≤ 4 ou > 4 mm) a également été enregistré. En effet, le diamètre des racines peut fournir des indications sur l'âge de la racine (les jeunes racines ont un diamètre inférieur à celui des racines matures), les types de racines (pour le bananier, 4-10 mm pour la racinaire primaire contre 0,5-4 mm pour la racine secondaire de premier ordre ; [Draye et al., 2005](#)) et les conditions édaphiques de croissance racinaire (les racines des horizons compacts sont déformées ([Delvaux et Guyot, 1989](#)) et possèdent un diamètre supérieur à celui des racines des horizons meubles ([Materechera et al., 1992](#))). Pour chaque tranche de 10 cm entre 0 et 40 cm de profondeur, la densité racinaire moyenne (racines/dm²) a été calculée et les paramètres racinaires secondaires (nombre total de racines, pourcentage de racines, nombre total cumulé de racines et pourcentage cumulé de racines) ont été dérivés. Les pourcentages de racines sont calculés par rapport aux racines présentes dans les 40 premiers centimètres du profil.

La caractérisation du profil pédologique a porté sur la résistance mécanique du sol et la densité apparente. La résistance mécanique du sol étant connue pour être sensible à la teneur en eau du sol, les mesures de résistance mécanique du sol ont été effectuées verticalement à l'aide d'un pénétromètre manuel (type IB, n° réf. 06.06, Eijkelkamp, taille du cône: 0,5 cm² (surface à la base), angle de cône : 30°) par tranche de 10 cm entre 0 et 40 cm de profondeur (3 répétitions/profondeur) sur le demi-cercle opposé au profil autour du pied observé et une heure après humectation du sol (1 litre d'eau sur 4 dm²). De 10 à 40 cm de profondeur, chaque mesure est réalisée après avoir préalablement creusé un trou jusqu'à la profondeur souhaitée. L'humectation avait pour but de standardiser les conditions d'humidité. Dans le profil, par tranche de 10 cm (0-40 cm) de profondeur du sol, trois échantillons de sol ont été prélevés au moyen de cylindres de Kopecki (100 cm³) pour la détermination de la densité apparente par la méthode gravimétrique.

3.2.3 Analyse statistique

Les paramètres de distribution racinaire (densité racinaire, pourcentage de racines, nombre total cumulé de racines et pourcentage total cumulé de racines) et de propriétés physiques (résistance mécanique et densité apparente) ont été soumis à l'analyse statistique au moyen de Logiciel SAS 9.2 Enterprise Guide 4.2. L'analyse de la variance (ANOVA) a été conduite pour chaque site et profondeur de mesure séparément. Le test de Student-Newman-Keuls a été appliqué pour séparer les moyennes significativement différentes ($P < 0,05$). Les données n'ayant pas rempli les hypothèses d'analyse de la variance classique (distribution normale, homogénéité de la

variance) ont été soumises à l'analyse non paramétrique de la variance. Le test de Kruskal-Wallis a été appliqué à cet effet.

3.3 Résultats

3.3.1 Propriétés physiques des horizons de surface

Résistance mécanique du sol

A Mulungu (Figure 3.1a), on observe que la résistance mécanique du sol est faible en surface (entre 5 et 8 kg/cm²). Quel que soit le traitement, un accroissement graduel de la résistance mécanique du sol est observé sur les 30 premiers cm de profondeur. Entre 30 et 40 cm, les valeurs de résistance mécanique du sol se situent autour d'une moyenne commune sous traitements T0 et T2 alors qu'un faible accroissement est observé sous traitements T1 et T3. En moyenne, la résistance mécanique du sol est de 15 kg/cm² à 40 cm de profondeur. A la profondeur 0-10 cm, la résistance mécanique du sol sous T0 est significativement plus faible par rapport à celle de T1 et T2. Le traitement T3 a un comportement intermédiaire et ne diffère pas de manière significative des trois autres traitements. Au-delà de 10 cm de profondeur, les traitements n'ont pas affecté la résistance mécanique du sol.

A Walungu (Figure 3.2a), dès la surface (T0) ou dès 20 cm de profondeur (T1, T2, T3), on observe une augmentation graduelle de résistance mécanique du sol avec la profondeur jusqu'à 40 cm de profondeur. A 30 cm de profondeur, l'hétérogénéité du sol est très importante, comme on peut le voir sur base des erreurs standards. Entre 30 et 40 cm de profondeur, les

valeurs moyennes de résistance mécanique du sol se situent entre 20 et 30 kg/cm². La résistance mécanique du sol à la profondeur 0-10 cm est significativement plus faible sous traitement T0 que pour les traitements T1 et T3. A cette profondeur, les valeurs de la résistance mécanique du sol dans les parcelles paillées (T1, T2 et T3) ne diffèrent pas de manière significative entre elles. Au-delà de 10 cm, les traitements appliqués n'ont pas affecté de manière significative la résistance mécanique du sol.

A Rubona (Figure 3.3a), quelle que soit la profondeur de mesure, la résistance mécanique moyenne se situe entre 5 et 10 kg/cm². Sous tous les traitements, la résistance mécanique du sol décroît légèrement à la profondeur 10-20 cm avant de croître graduellement entre 20 et 40 cm. A la profondeur 0-10 cm, sous traitement T0, la résistance mécanique du sol est significativement plus faible que pour les traitements T1 et T2. Au-delà des dix premiers centimètres du sol, les moyennes de tous les traitements ne diffèrent pas de manière significative. Sur les 40 premiers cm de profondeur de mesure, aucun des traitements ne présente des valeurs de résistance mécanique du sol dépassant la valeur seuil de 20 kg/cm².

A Gitega (Figure 3.4a), la résistance mécanique du sol à la pénétration est faible (entre 7 et 8 kg/cm²) à la profondeur 0-10 cm sous tous les traitements. Entre 20 et 40 cm, on observe un léger accroissement de résistance mécanique. A quelques exceptions près, les erreurs standards sont relativement faibles. A toutes les profondeurs de mesure, les valeurs de résistance mécanique du sol à la pénétration ne dépassent pas la valeur seuil de 20 kg/cm². Quelle que soit la profondeur de mesure, les traitements appliqués n'ont pas affecté les valeurs de résistance mécanique du sol.

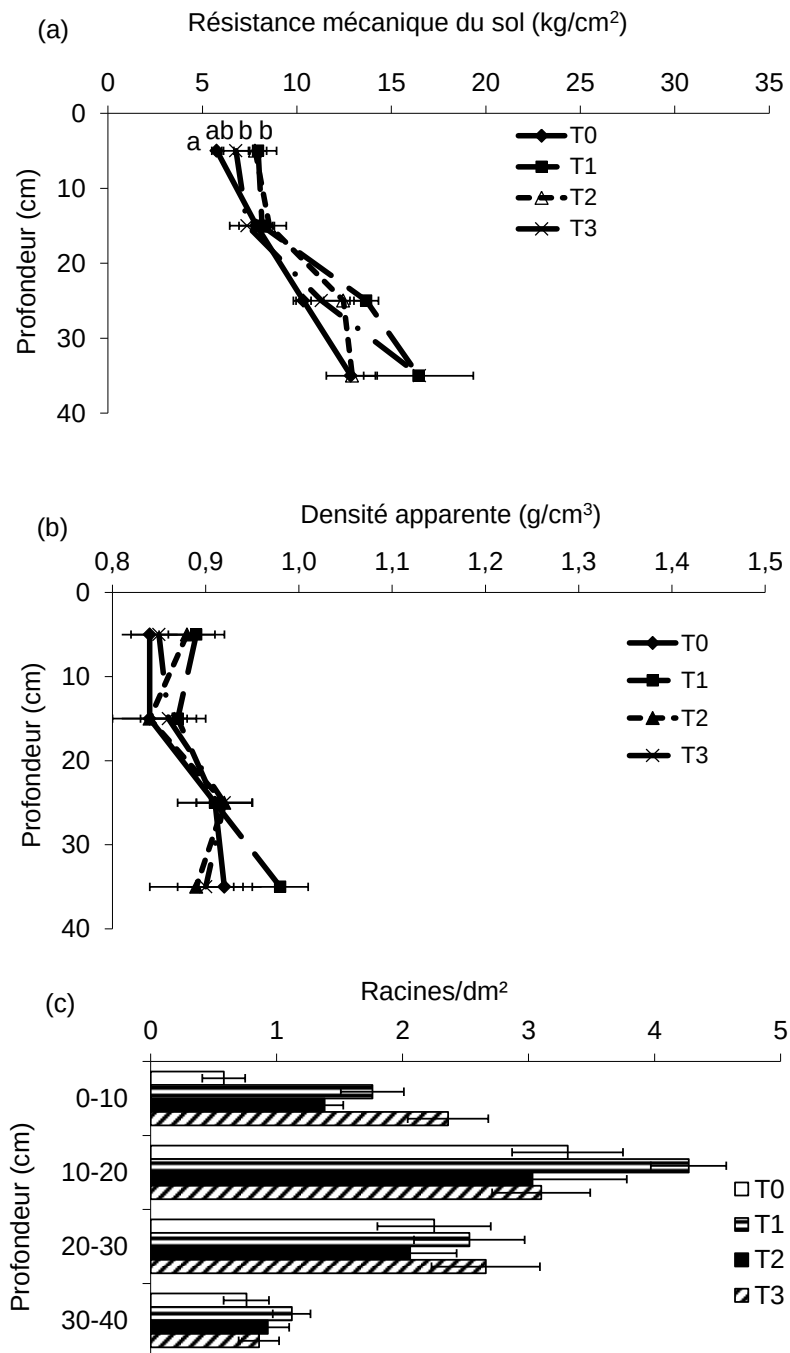
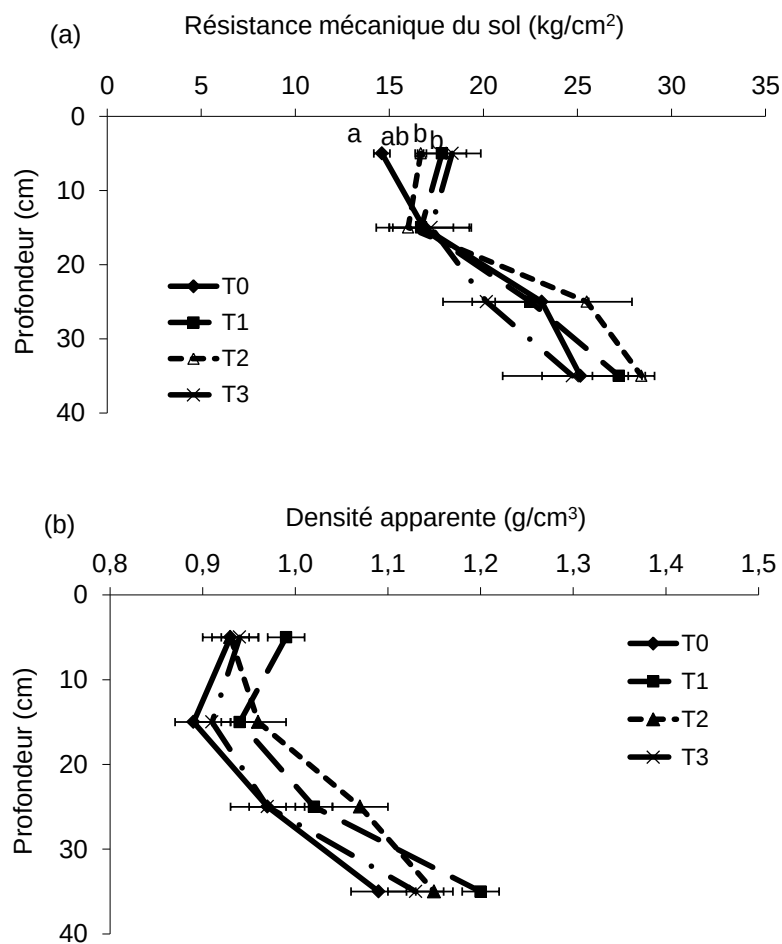


Figure 3.1. Résistance mécanique du sol (a), densité apparente (b) et densité racinaire (c) en fonction des traitements et de la profondeur de mesure au site de Mulungu. Mesures faites 30 après installation de l'essai, et deux mois après le dernier travail du sol (labour manuel) en ce qui concerne le traitement T0. Barre d'erreur = erreur standard. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.



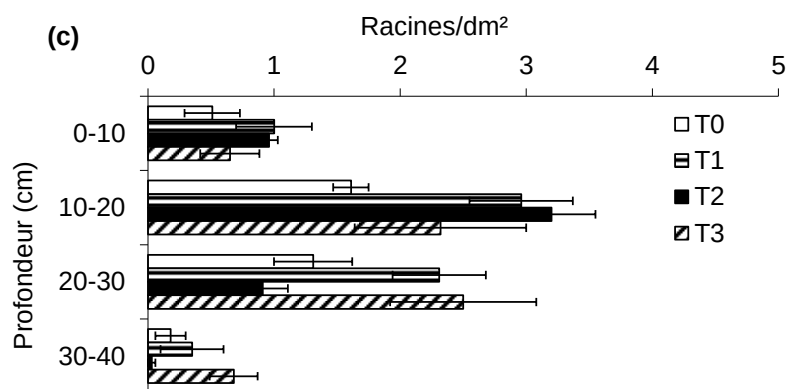
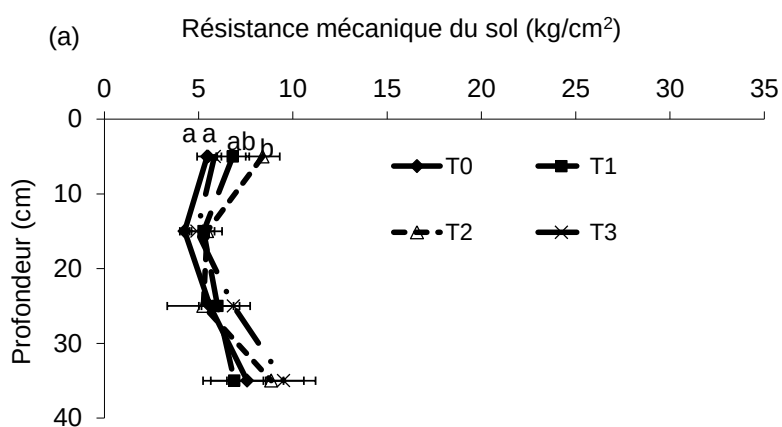


Figure 3.2. Résistance mécanique du sol (a), densité apparente (b) et densité racinaire (c) en fonction des traitements et de la profondeur de mesure au site de Walungu. Mesures faites 30 après installation de l'essai, et deux mois après le dernier travail du sol (labour manuel) en ce qui concerne le traitement T0. Barre d'erreur = erreur standard. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.



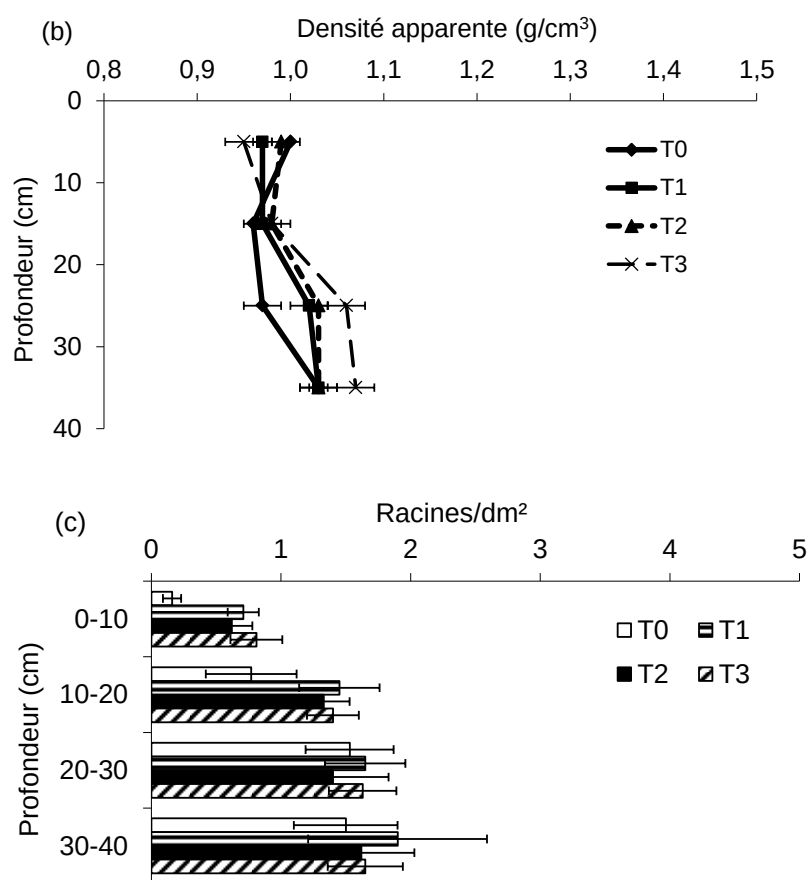


Figure 3.3. Résistance mécanique du sol (a), densité apparente (b) et densité racinaire (c) en fonction des traitements et de la profondeur de mesure au site de Rubona. Mesures faites 30 après installation de l'essai, et deux mois après le dernier travail du sol (labour manuel) en ce qui concerne le traitement T0. Barre d'erreur = erreur standard. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

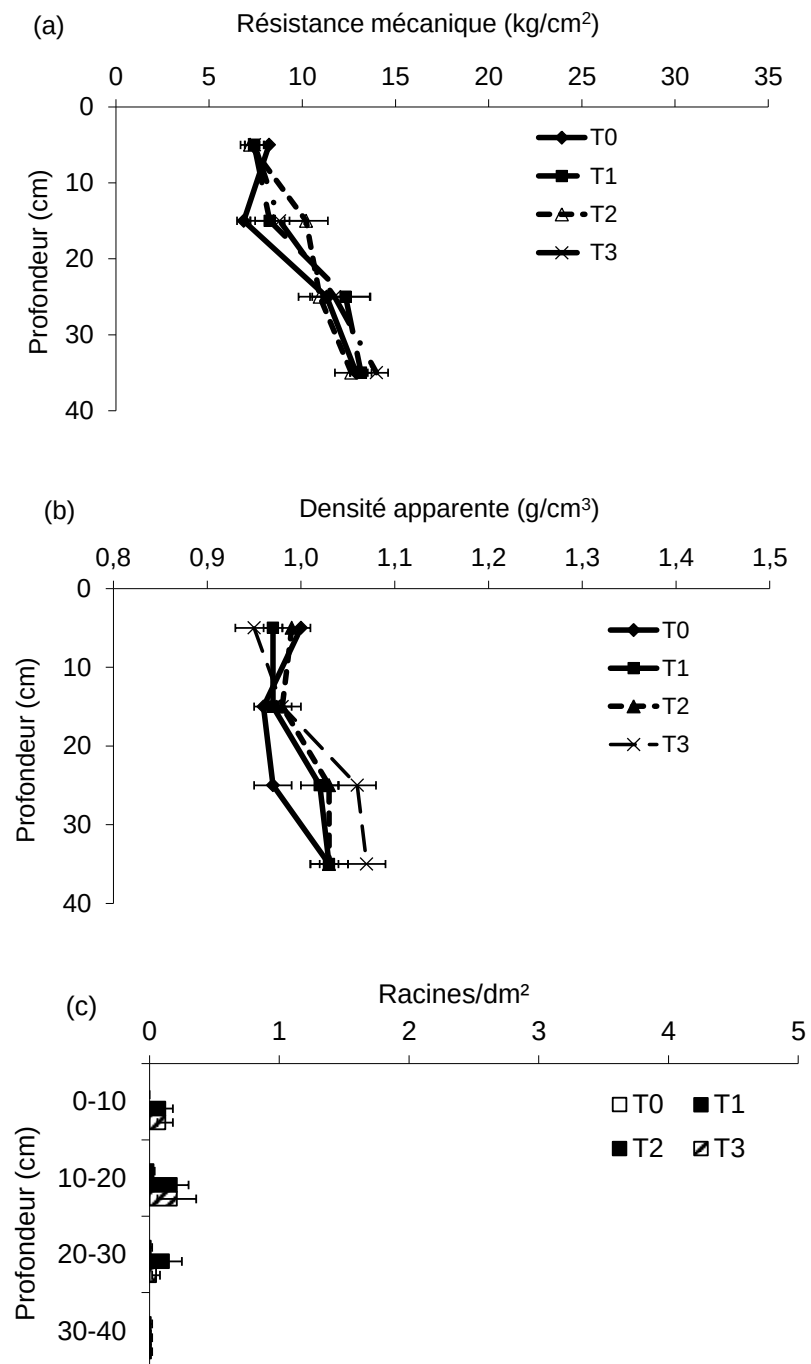


Figure 3.4. Résistance mécanique du sol (a), densité apparente (b) et densité racinaire (c) en fonction des traitements et de la profondeur de mesure au site de Gitega. Mesures faites 30 après installation de l'essai, et deux mois après le dernier travail du sol (labour manuel) en ce qui concerne le traitement T0. Barre d'erreur = erreur standard. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Densité apparente du sol

Au site de Mulungu (Figure 3.1b), la densité apparente est faible et se situe autour d'une moyenne commune de $0,86 \text{ g/cm}^3$ pour tous les traitements sur les deux premières couches (0-20 cm). Entre 20 et 30 cm, un léger accroissement de densité apparente est observé sous tous les traitements. Les mesures faites à la profondeur 30-40 cm montrent une forte variabilité sous traitement T1. A toutes les profondeurs de mesure, aucun effet traitement significatif n'est observé.

Au site de Walungu (Figure 3.2b), on observe une légère réduction de la densité apparente sur les 20 premiers centimètres de profondeur du sol puis un accroissement de la densité apparente avec la profondeur. Des valeurs comprises entre $1,0$ et $1,2 \text{ g/cm}^3$ sont atteintes à partir de 20-30 cm de profondeur. Quelle que soit la profondeur de mesure, les traitements n'ont pas affecté de manière significative la densité apparente du sol.

Au site de Rubona (Figure 3.3b), les valeurs de densité apparente du sol sont plus élevées en surface ($1,37$ à $1,38 \text{ g/cm}^3$ à la profondeur 0-10 cm), décroissent entre 10 et 30 cm de profondeur du sol puis augmentent pour atteindre des valeurs moyennes comprises entre $1,28$ à $1,34 \text{ g/cm}^3$ entre

30-40 cm de profondeur. Toutefois, aucun effet traitement significatif ($P < 0,05$) n'est observé quelles que soient les profondeurs de mesure.

Au site de Gitega (Figure 3.4b), quels que soient le traitement et la profondeur de mesure, la densité apparente du sol est comprise entre 0,94 à 1,07 g/cm³ et varie très faiblement avec la profondeur de mesure. A la profondeur 20-30 cm, un faible accroissement de densité apparente est observé sous tous les traitements. Quelles que soient les profondeurs de mesure, les traitements appliqués n'ont pas affecté de manière significative la densité apparente du sol.

3.3.2 Distribution racinaire du bananier

Il a été jugé utile d'analyser les profils racinaires à la fois en termes de nombre et en termes de pourcentage. L'utilisation des pourcentages permet plus facilement de comparer les traitements et les sites en termes de forme de la distribution racinaire, alors que l'utilisation de valeurs absolues permet de mettre en évidence des différences dans le degré d'exploration du profil par les racines. Nous avons également opté pour une analyse couche par couche et de façon cumulée sur la profondeur. Les valeurs de densité racinaire (racines/dm²) étant fort variables d'un profil à l'autre et l'épaisseur des couches (10 cm) quelque peu arbitraire, les valeurs cumulées permettront éventuellement de faire ressortir des différences entre les traitements qui ne seraient pas détectables sur les couches individuelles. Les figures de distribution spatiale des racines sont présentées dans les annexes 4.

Quel que soit le traitement, l'allure générale de la distribution est similaire pour tous les traitements à Mulungu (Figure 3.1c et Tableau 3.1). La majorité (87-91%) des racines est localisée dans les trente premiers centimètres du sol, avec un pic entre 10 et 20 cm. Sous traitement T0, l'accroissement de densité racinaire entre la première et la deuxième couche est notablement plus important que pour les autres traitements. A partir de 30 cm de profondeur, la densité racinaire décroît graduellement. La densité racinaire moyenne maximale varie entre 3,0 et 4,2 racines/dm² selon les traitements. La densité racinaire moyenne mesurée à la profondeur 0-10 cm est significativement plus faible sous traitement T0 par rapport aux autres traitements (T1, T2 et T3). De même le traitement T2 a une densité racinaire moyenne significativement inférieure à celle de T3. Au-delà de 10 cm de profondeur, les traitements appliqués n'ont pas affecté de façon significative la densité racinaire. La densité racinaire sous traitement T1 ne diffère pas significativement de celle des parcelles qui reçoivent en plus la paille externe (T2 et T3). La même tendance est observée pour le nombre total cumulé de racines (Tableau 3.1). Il est à noter que, pour la profondeur 0-10 cm uniquement, le nombre total cumulé de racines équivaut à la densité racinaire. Sur base du nombre cumulé, il apparaît que le déficit de racines observé dans T0 pour la couche 0-10 cm deux mois après labour ne se traduit pas par un déficit global significatif sur l'ensemble de la profondeur de mesure (0-40 cm). Tout comme pour la densité racinaire, le pourcentage de racine présent dans la première couche diffère significativement selon les traitements (Tableau 3.1). Les trois traitements paillés (T1, T2, T3) ne diffèrent pas entre eux, et tous ont un pourcentage de racines significativement supérieur (18 à 26%) dans les 10 premiers cm par rapport au traitement T0 (9%). La même tendance est observée pour le pourcentage cumulé de racines à la

profondeur 0-10 cm qui, à cette profondeur uniquement, équivaut au pourcentage de racine dans la couche 0-10 cm.

Tableau 3.1. Résumé de l'ANOVA des effets traitement sur la densité racinaire (racines/dm²) par couche, le pourcentage de racines par couche (% de racines), nombre total de racines cumulé et le pourcentage cumulé de racines (% cumulé). Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0 au site de Mulungu.

		Paramètres			
Profondeur (cm)	TR	Densité racinaire	% de racines	Nombre total cumulé	% cumulé
0-10		**	**	**	**
10-20		NS	NS	NS	NS
20-30		NS	NS	NS	NS
30-40		NS	NS	NS	NS
	T0	0,58±0,17a	9,0±2,6a	11,7±3,4a	9,0±0,26a
Profondeur 0-10 cm	T1	1,76±0,25bc	18,3±2,8b	35,3±5,1bc	18,3±2,8b
	T2	1,38±0,15b	19,4±2,4b	27,8±3,1b	19,4±2,4b
	T3	2,36±0,32c	26,2±3,0b	47,3±6,5c	26,2±3,0b

TR : traitements. NS = non significatif, ** = significatif $P < 0,01$. Les traitements ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil $\alpha = 0,05$.

Au site Walungu, la figure 3.2c montre que la densité racinaire est faible à la profondeur 0-10 cm et ne diffère pas de manière significative entre les traitements. La densité racinaire passe du simple au triple sur les deux premières couches, décroît à la profondeur 20-30 cm puis chute brutalement entre 30-40 cm. La majorité des racines (89-99 %) se situe dans les 30 premiers centimètres. La densité moyenne maximale est assez variable selon les traitements, avec des valeurs allant de 1,6 à 3,2

racines/dm². Il ressort de l'ANOVA (Tableau 3.2) que les traitements appliqués n'ont pas affecté de manière significative la densité racinaire à la profondeur 0-10 cm et 10-20 cm. Aux profondeurs 20-30 cm et 30-40 cm, par contre, les traitements T1 et T3 ont une densité racinaire significativement supérieure à celle du traitement T2. La densité racinaire sous T0 présente des valeurs intermédiaires entre T2 d'une part et T1-T3 d'autre part, mais n'est pas différente des 3 autres traitements. En termes de nombre de racines cumulé, aucun des traitements ne se différencie des autres.

A la profondeur 10-20 cm, le pourcentage de racines le plus élevé est observé sous traitement T2 (62,08 %) qui est significativement différent de celui du traitement T3 (38 %). Avec des pourcentages intermédiaires, les traitements T0 (46 %) et T1 (46 %) ne sont pas significativement différents des traitements T2 et T3. A la profondeur 20-30 cm, par contre, le pourcentage de racines sous traitement T2 est environ deux à deux fois et demi, et significativement plus faible par rapport aux 3 autres traitements (T0, T1, T3). Le pourcentage cumulé de racines sous traitement T2 (81 %) est quant à lui hautement significativement plus élevé que celui de 3 autres traitements (T0, T1 et T3, soit 47 à 60 %) à la profondeur 10-20 cm.

Tableau 3.2. Résumé de l'ANOVA des effets traitement sur la densité racinaire par couche, le pourcentage de racines par couche, nombre total de racines cumulé et le pourcentage cumulé de racines. Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0 au site de Walungu.

Paramètres					
Profondeur	TR	Densité	% des racines	nombre	% cumulé

(cm)	racinaire		total cumulé	
0-10	NS	NS	NS	NS
10-20	NS	**	NS	**
20-30	*	**	NS	NS
30-40	*	NS	NS	NS
Profondeur	T0		45,6±4,8ab	52,5±3,5a
	T1		45,5±5,2ab	60,0±5,9a
	T2		62,1±4,5a	81,0±4,5b
	T3		37,7±2,8b	46,6±3,4a
20-30 cm	T0	1,31±0,3ab	35,5±4,8a	
	T1	2,31±0,4b	35,3±3,5a	
	T2	0,91±0,2a	18,2±4,4b	
	T3	2,50±0,6b	42,1±2,6a	
30-40 cm	T0	0,18±0,1ab		
	T1	0,35±0,3b		
	T2	0,04±0,03a		
	T3	0,68±0,19b		

TR : traitements. NS = non significatif, * = significatif $P < 0,05$; ** = significatif $P < 0,01$. Les traitements ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil $\alpha = 0,05$.

Au site de Rubona (Figure 3.3c et Tableau 3.3), on observe un accroissement progressif de la densité racinaire sur les trois premières couches, particulièrement marqué sous traitement T0. Entre 20 et 40 cm de profondeur, la densité racinaire a tendance à se stabiliser pour tous les traitements. Les trente premiers centimètres du sol abritent entre 62-69 % de racines et la densité racinaire moyenne maximale ne dépasse jamais 2 racines/dm². La densité racinaire sous traitement T0 est significativement

plus faible ($P < 0,05$) par rapport aux traitements paillés et non labourés (T1, T2 et T3) sur les dix premiers centimètres de profondeur du sol uniquement. Le pourcentage de racines est significativement plus faible sous traitement T0, soit 4,3 contre 13 à 15 % sous traitements paillés (T1, T2 et T3) à la profondeur 0-10 cm. A la profondeur 20-30 cm, le pourcentage de racines le plus élevé est observé sous T0 (40 % contre 27 à 29 % sous traitements paillés (T1, T2 et T3)). Des différences significatives existent entre le traitement T0 et les 3 traitements paillés. Le pourcentage cumulé des racines des traitements paillés (T1, T2 et T3 ; 40 à 41 %) est significativement supérieur à celui du traitement T0 (21 %) à la profondeur 10-20 cm.

Tableau 3.3 Résumé de l'ANOVA des effets traitement sur la densité racinaire par couche, le pourcentage de racines par couche, nombre total de racines cumulé et le pourcentage cumulé de racines. Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0 au site de Rubona.

Profondeur (cm)	TR	Densité racinaire	% des racines	Nombre total cumulé	% cumulé
0-10		*	*	*	*
10-20		NS	NS	NS	*
20-30		NS	*	NS	NS
30-40		NS	NS	NS	NS
0-10 cm	T0	0,16±0,07a	4,3±1,6a	3,3±1,5a	4,3±1,6a
	T1	0,71±0,12b	14,0±3,3b	14,3±2,6b	14,0±3,3b
	T2	0,62±0,16b	13,0±1,6b	12,5±3,3b	13,0±1,6b
	T3	0,81±0,20b	15,0±3,3b	16,3±4,0b	15,0±3,3b
10-20 cm	T0				21,4±4,0a
	T1				39,4±6,3b

	T2	41,3±3,0b
	T3	40,0±4,9b
20-30 cm	T0	40,3±3,5a
	T1	33,0±6,4b
	T2	26,6±3,4b
	T3	29,2±2,5b

TR : traitements. NS = non significatif, * = significatif $P < 0,05$. Les traitements ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil $\alpha = 0,05$.

Au site de Gitega, la figure 3.4c montre que, quels que soient la profondeur et le traitement, la densité racinaire est particulièrement faible. A la profondeur 0-10 cm aucune racine fonctionnelle n'est observée sous traitement T0 et T1. De 20 à 40 cm de profondeur, la même tendance est observée sous T0 et une absence quasi-totale des racines est observée à la profondeur 30-40 cm sous tous les traitements. La densité racinaire moyenne ne dépasse jamais 1 racine/dm². L'analyse de la variance a révélé un effet traitement significatif ($P < 0,05$) sur la densité racinaire (0-10 cm), le pourcentage de racines (0-10 et 20-30 cm), le nombre total cumulé (0-10, 10-20 et 20-30 cm) et le pourcentage cumulé des racines (0-10 cm) (Tableau 3.4). Toutefois, du fait du nombre limité de racines dans tous les traitements, le test de comparaison des moyennes n'a pas été applicable.

Tableau 3.4 Résumé de l'ANOVA des effets traitement sur la densité racinaire par couche, le pourcentage de racines par couche, nombre total de racines cumulé et le pourcentage cumulé de racines. Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0 au site de Gitega.

Profondeur (cm)	Paramètres			
	Densité racinaire	% des racines	Nombre total cumulé	% cumulé
0-10	*	*	*	*
10-20	NS	NS	*	NS
20-30	NS	NS	*	NS
30-40	NS	NS	NS	NS

NS = non significatif, * = significatif $P < 0,05$.

Distribution des racines en fonction du diamètre

Le tableau 3.5 présente la proportion de racines (%) de diamètre $\leq 4\text{mm}$ sur les deux premières couches de mesure (0-20 cm) à Mulungu, Walungu et Rubona. La très faible densité racinaire sous traitements T2 et T3 et l'absence quasi-totale de racines sous traitements labour T0 et T1 à Gitega n'ont pas permis de dégager une tendance de répartition des racines en fonction du diamètre. Les données de ce site ne sont donc pas présentées. Aux sites de Mulungu et Walungu, l'analyse de la variance a révélé un effet significatif en ce qui concerne le traitement et la profondeur de mesure sur la distribution des racines en fonction de leur diamètre. Toutefois, l'interaction traitement-profondeur n'a pas été significative. Au site de Rubona, les traitements appliqués et la profondeur de mesure n'ont pas affecté de manière significative la répartition des racines en fonction du diamètre.

Tableau 3.5 Répartition du nombre de racines (%) de diamètre $\leq 4\text{mm}$ dans les horizons de surface (0-20 cm) selon le traitement. Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Pourcentage de racines de diamètre ≤ 4 mm					
Site	T0	T1	T2	T3	P-valeur
Mulungu	70 $\pm$ 8a	50 $\pm$ 7b	47 $\pm$ 8b	55 $\pm$ 7ab	**
Walungu	92 $\pm$ 4a	64 $\pm$ 7b	65 $\pm$ 5b	54 $\pm$ 9b	**
Rubona	90 $\pm$ 4a	84 $\pm$ 6a	83 $\pm$ 4a	91 $\pm$ 3a	NS

Comparaison horizontale. NS : non significatif, ** = significatif $P < 0,01$. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Tableau 3.6 Répartition du nombre de racines (%) de diamètre ≤ 4 mm sur les 20 premiers centimètres de profondeur du sol, tous traitements confondus. Mesures faites 30 mois après plantation, et 2 mois après le dernier labour en ce qui concerne le traitement T0. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Proportion de racines de diamètre ≤ 4 mm (%)			
Site	0-10 cm	10-20 cm	P-valeur
Mulungu	69 $\pm$ 4a	42 $\pm$ 2b	***
Walungu	77 $\pm$ 6a	60 $\pm$ 4b	**
Rubona	89 $\pm$ 4a	85 $\pm$ 2a	NS

Comparaison horizontale. NS : non significatif, ** = significatif $P < 0,01$, *** = significatif $P < 0,001$. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Le tableau 3.5 montre que la proportion de racines de diamètre ≤ 4 mm est plus élevée dans le traitement T0 que dans les autres traitements à Mulungu et Walungu. Au site de Mulungu, dans les parcelles labourées (T0), les racines de diamètre ≤ 4 mm contribuent pour 70 % dans le nombre total de racines localisées sur le 20 premiers centimètres, contre 47 à 55 % pour

les parcelles paillées et non labourées (T1, T2 et T3). Une différence significative est observée entre le pourcentage de racines de diamètre $\leq 4\text{mm}$ de T0 et les traitements T1 et T2. Au site de Walungu, sous traitement T0, les racines ont principalement un diamètre $\leq 4\text{mm}$, soit 90 %. Aucune différence significative n'est observée entre les traitements non labourées avec ou sans paille externe (T1, T2 et T3) qui, tous, ont un pourcentage de racines de diamètre $\leq 4\text{mm}$ significativement inférieur à celui du traitement T0. Au site de Rubona, les racines de diamètre $\leq 4\text{mm}$ contribuent pour 83 à 91 % dans le nombre total des racines localisées sur les 20 premiers centimètres de profondeur du sol et aucune différence significative n'est observée entre les traitements.

En ce qui concerne la répartition des racines en fonction de leur taille et de la profondeur (Tableau 3.6), des différences significatives sont observées aux sites de Mulungu et de Walungu caractérisés par un pourcentage plus élevé de racines $\leq 4\text{mm}$ à la profondeur 0-10 cm par rapport à la profondeur 10-20 cm. Au site de Rubona, quelle que soit la profondeur de mesure, les racines ont essentiellement un diamètre $\leq 4\text{mm}$.

3.4 Discussion

Les traitements ont affecté de manière significative la résistance mécanique du sol à la profondeur 0-10 cm aux sites de Mulungu, Walungu et Rubona (Figure 3.1). Pour ces trois sites, la valeur moyenne la plus faible est observée sous traitement T0 et serait due au travail du sol (labour manuel) effectué 2 mois avant les observations. En effet, le travail du sol permet d'ameublir le sol et ainsi, réduit la résistance mécanique. Sur des parcelles préalablement labourées pour des cultures annuelles au Sénégal, [Charreau](#)

et Nicou (1971) et Nicou (1997) ont trouvé des valeurs de densité apparente et résistance mécanique du sol significativement plus faibles par rapport aux parcelles en non labour. Cependant, pour cette étude, les traitements n'ont pas modifié de manière significative la densité apparente du sol (Figure 3.2). Ceci pourrait résulter du caractère éphémère de l'ameublissement généré par le labour, le sol ayant eu 2 mois entre le travail du sol et la prise de mesure pour retourner vers un état plus compact. Aux Antilles françaises, sur les parcelles qui avaient été labourées (deux passages au moyen d'une machine à bêcher –Tortella[®]), Dorel et al. (2010) ont rapporté une dégradation de la structure du sol huit mois après le labour. Au Brésil, sur des sols qui avaient été labourés sur 10 cm de profondeur, Leprun (1994) a observé une dégradation de la structure superficielle des sols après de fortes pluies. Selon ces études, l'effet positif du travail du sol sur la densité apparente s'avère donc temporaire. Il aurait été intéressant de vérifier si une telle dégradation s'observe également sur nos sites d'études en répétant les observations en fin de cycle de la culture annuelle (soit 5 à 6 mois après le travail du sol). Cependant, étant donné que le travail du sol est répété deux fois par an dans le système de culture étudié ici, il se peut que la dégradation de la structure soit compensée par l'ameublissement mécanique répété, ce qui rendrait la détection de la dégradation plus difficile.

Comme discuté au chapitre 2 (Figure 2.5), la densité racinaire maximale décroît depuis le site de Mulungu, plus propice à la croissance du bananier, jusqu'au site de Gitega, très acide et moins fertile (Tableau 2.5). La densité racinaire est particulièrement faible (valeur maximale : 0,5 racine/dm²) au site de Gitega. Une absence quasi-totale de racines fonctionnelles est observée sous T0 et T1 entre 0 et 30 cm, et sous tous les traitements dans

la couche 30-40 cm (Figure 3.4c et Tableau 3.4). La faible densité racinaire sur ce site, qui pourtant présente de bonnes propriétés physiques (résistance mécanique $<20 \text{ kg/cm}^2$, densité apparente faible comprise entre 0,94 et $1,07 \text{ g/cm}^3$, texture moyenne), serait principalement due à des contraintes chimiques, notamment les valeurs de pH très acides, de faibles teneurs en cations basiques (Ca, Mg et K), en Mn et phosphore assimilable, et une saturation très élevée en aluminium échangeable (21 à 29%). (Voir Chapitre 2, Tableau 2.5 Gitega). Au moment des observations (30 mois après la plantation), tous les pieds-mères des parcelles des traitements T0 et T1 étaient déjà morts (Annexe 2). Du fait de l'absence de biomasse sur pied, les parcelles du traitement T1 n'avaient pas de mulch et ressemblaient aux parcelles T0. Dans les parcelles T2 et T3, par contre, quelques racines ont été observées sur les trente premiers centimètres et le processus de disparition des plants était plus lent par rapport aux parcelles des traitements T0 et T1 (Annexe 2). L'apport de la paille externe (T2 et T3), et particulièrement son effet sur les propriétés du sol, pourrait expliquer la présence de quelques racines sous ces 2 traitements en non labour avec paille externe. En conditions de paillis, [Robinson \(1995\)](#) a observé une amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol qui a réduit le taux de détérioration des racines et augmenté le rendement du bananier. Néanmoins, l'amélioration apportée par le paillage à Gitega reste totalement insuffisant pour justifier l'implantation d'une culture de bananiers, et les résultats relatifs à ce site ne seront plus discutés dans la suite de cette section. Rappelons que les effets des traitements sur les propriétés physico-chimiques du sol sont analysés plus en détail dans la thèse de S. Bizimana (en cours).

Quel que soit le site (Figures 3.1c, 3.2c et 3.3c), la densité racinaire à la profondeur 10-20 cm est supérieure à celle observée à la profondeur 0-10 cm. Ce résultat est contraire à ceux trouvés par plusieurs auteurs ([Araya, 2005](#); [Delvaux et Guyot, 1989](#); [Lassoudière, 1978](#); [Beugnon et Champion, 1966](#)) qui, évaluant la distribution racinaire du bananier, ont observé une densité racinaire maximale sur les dix à quinze premiers centimètres du sol et une réduction de la densité racinaire avec la profondeur. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette différence : (i) les différences de cultivars. [Blomme \(2000\)](#), [Blomme et al. \(2003\)](#) et [Sebuwufu et al. \(2004\)](#) ont observé que la distribution racinaire est, entre autres, dépendante du génotype du bananier (par exemple, contrairement au cultivar à dessert, AAB 'Sukali ndizi', le cultivar à cuire, AAA-EA 'Kubizi' et le plantain AAB, 'Gondja' ont montré une distribution racinaire plus proche de celle observée dans cette étude, c'est-à-dire un léger accroissement de la longueur et du poids sec des racines à la profondeur 15-30 cm) ; (ii) mode de plantation des bananiers : les rejets ont été plantés dans un trou de plantation (50 x 50 x 50 cm) rempli au $\frac{3}{4}$ avec le sol des horizons de surface et conséquemment, le rhizome d'où partent les racines était placé légèrement en dessous de la surface du sol ; (iii) l'angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal que suit une racine primaire au cours de sa croissance : avec l'âge, les racines du bananier tendent à s'incliner par rapport à un plan horizontal ([Lecompte et al., 2003](#) cités par [Draye et al., 2005](#)). Ceci peut résulter en une densité racinaire supérieure à la profondeur 10-20 cm étant donné que les observations ont été faites à 40 cm du pseudo-tronc et sur une distance latérale de 1 m de part et d'autre du pseudo-tronc. Par contre, l'augmentation de la densité racinaire sur les deux premières couches (0-10 et 10-20 cm) ne semble pas pouvoir s'expliquer par des propriétés physiques ou chimiques plus favorables à 10-

20 cm comparé à 0-10 cm (voir aussi Chapitre 2), à l'exception du site de Rubona où l'on observe une nette diminution de la densité apparente et de la résistance mécanique entre les 2 premières couches.

Sur les dix premiers centimètres du sol, dont on peut s'attendre à ce qu'ils soient les plus affectés par les pratiques culturales, les traitements en non labour avec ou sans paille externe (T1, T2 et T3) ont une densité racinaire et un pourcentage de racines significativement supérieurs à ceux du traitement T0 (labour et sans paillage) aux sites de Mulungu et Rubona (Figures 3.1c et 3.3c, Tableaux 3.1 et 3.3). Ceci est en contradiction avec le fait que ce sont les parcelles T0 qui présentent systématiquement les valeurs les plus faibles de résistance mécanique (Figures 3.1a et 3.3a), ce qui devrait favoriser le développement racinaire. L'impact négatif du travail du sol sur l'enracinement pourrait résulter de l'effet mécanique du travail du sol qui coupe les racines sur la profondeur du sol labourée. Il conviendrait cependant de vérifier si l'impact négatif du labour sur l'enracinement se maintient ou non sur toute la durée entre deux travaux du sol successifs.

L'analyse statistique ne révèle pas d'effet des pratiques culturales au-delà de 10 cm de profondeur, ce qui peut s'expliquer par le caractère manuel du travail du sol, réalisé à la houe. A Mulungu, aucune différence entre les traitements avec paillage n'est par ailleurs observée au-delà de 10 cm de profondeur, quel que soit le paramètre utilisé pour décrire le système racinaire (Tableau 3.1). Il en est de même à Rubona, à l'exception d'une différence significative entre T0 et les traitements paillés sur le pourcentage cumulé de racines à 10-20 cm et sur le pourcentage de racines à 20-30 cm de profondeur (Tableau 3.3). Le premier effet semble indiquer que, sur ce

site, les effets néfastes du travail du sol s'étendent au-delà de 10 cm de profondeur, peut-être à cause d'un travail du sol légèrement plus profond. Le second effet est quant à lui difficilement explicable. Au-delà de dix centimètres de profondeur, vu l'absence d'effet notable des traitements sur ces deux sites, la densité racinaire semble donc essentiellement dépendante des propriétés intrinsèques des sols. En effet, dans tous les traitements, on observe que l'accroissement des contraintes physiques (résistance mécanique et densité apparente) entraîne une réduction de la densité racinaire au site de Mulungu. A Rubona, au contraire, la densité racinaire relativement constante entre 20 et 40 cm de profondeur pourrait s'expliquer par la diminution de la résistance mécanique et de la densité apparente du sol avec la profondeur (Figure 3.3a-b). L'amélioration des propriétés physiques en profondeur semble donc faciliter le développement racinaire à Rubona et viendrait compenser la tendance naturelle qu'a la densité racinaire à décroître avec la profondeur.

Pour Walungu, quel que soit le traitement, la densité racinaire croît entre la première et la deuxième couche, décroît de la deuxième à la troisième couche plus ou moins fortement selon le traitement, et chute ensuite brutalement à plus de 30 cm. Une telle distribution racinaire met en évidence une hétérogénéité verticale du sol plus marquée que sur les autres sites. La brusque diminution de la densité racinaire entre 30 et 40 cm pourrait s'expliquer par la présence d'un horizon compact dans le profil susceptible de limiter la colonisation des racines en profondeur. Des valeurs de résistance mécanique du sol supérieures à 20 kg/cm² (Figure 3.2a) dès 30 cm de profondeur et une teneur très élevée en argile (70-83%, Figure 2.4W) confirment l'existence d'un tel horizon. Entre 20 et 40 cm de profondeur, les racines des bananiers croissant sur ce site seraient donc

soumises à des contraintes mécaniques fortes. Pour les 3 autres sites, les valeurs moyennes de résistance mécanique du sol sont inférieures à 20 kg/cm² sur les quarante premiers centimètres du sol. La résistance mécanique du sol n'y serait donc pas une contrainte majeure pour le développement racinaire des bananiers.

Pour les traitements en non labour et paillés (T1, T2 et T3), aucune différence significative n'est observée entre le traitement T1, sans paille externe, et les traitements T2 et T3 avec paille externe sur la densité racinaire aux sites de Mulungu, Walungu et Rubona. En d'autres termes, trente mois après la plantation, l'apport des pailles externes (37,5 t MS/ha en deux ans) n'a pas jusque-là favorisé le développement racinaire par rapport à l'auto-paillage. Ceci peut en partie s'expliquer par l'absence d'effets significatifs positifs de ces traitements sur les propriétés physiques des sols (Figures 3.1, 3.2 et 3.3), comme discuté ci-dessus.

La distribution des racines en fonction de leur diamètre sur les 20 premiers centimètres du sol (Tableaux 3.5 et 3.6) montre un écart de 15 à 23 % (site de Mulungu) et de 27 à 38 % (site de Walungu) des racines de diamètre ≤ 4 mm entre les parcelles de T0 et les parcelles en non labour avec ou sans paille externe (T1, T2 et T3). La coupe des racines lors du travail du sol qui déclenche le processus de formation de nouvelles racines en remplacement des racines coupées expliquerait le nombre plus élevé de racines de diamètre ≤ 4 mm dans les parcelles labourées, au détriment des racines plus grosses ([Ferree, 1994](#)). Au site de Rubona où les traitements et la profondeur de mesure n'ont pas affecté de manière significative le diamètre de racines, la distribution racinaire serait plus dépendante des

propriétés du sol, notamment sa texture sableuse plutôt que des traitements appliqués.

A Mulungu et Walungu où la distribution des racines de diamètre ≤ 4 mm a varié de manière significative sur les vingt premiers centimètres du sol, le pourcentage de racines de diamètre ≤ 4 mm est plus élevé de 8% (0-10 cm) et 22% (10-20 cm) à Walungu par rapport à Mulungu (Tableau 3.6). Ces différentes tendances de distribution racinaire pourraient être liées aux propriétés du sol. Le pourcentage de racines de diamètre ≤ 4 mm est relativement plus élevé à Walungu caractérisé par une texture plus fine et des valeurs de densité apparente et surtout de résistance mécanique du sol supérieures à celles de Mulungu. Les propriétés physique et chimique plus favorables à Mulungu favoriseraient ainsi la formation de plus grosses racines.

3.5 Conclusions

Cette étude a montré que les modes de gestion du sol affectent les propriétés physiques du sol et la densité racinaire du bananier des associations bananier-haricot de la RGLA, principalement dans les 10 premiers centimètres du sol. Le travail du sol (labour manuel) avec exportation de résidus de bananier a permis de maintenir des valeurs significativement plus faibles de la résistance mécanique du sol sur les dix premiers centimètres du sol sur 3 des 4 sites étudiés mais n'a pas eu d'effet sur la densité apparente. Le travail du sol a également conduit à une forte diminution de la densité racinaire en surface, ce qui pourrait être liée à l'action de cisaillement des racines par la houe utilisée pour le travail du sol.

Ceci est confirmé par la proportion plus importante de racines fines dans les parcelles labourées. L'apport de paille externe n'a pas permis d'améliorer la structure du sol (densité apparente, résistance mécanique) ni favorisé le développement racinaire par rapport au paillage avec les résidus de bananiers uniquement. L'abandon du travail du sol, même s'il a tendance à induire une résistance mécanique du sol quelque peu plus élevée, n'a pas eu d'impact négatif sur l'enracinement du bananier.

A défaut de mettre en évidence une amélioration notable de la qualité physique du sol, la présente étude montre que les pratiques d'agriculture de conservation testées ici (non labour et paillage) ont un effet bénéfique sur l'enracinement du bananier dans la couche superficielle du sol. Ceci est particulièrement important dans le cas d'une association de culture comme l'association bananier-haricot dont l'une est pérenne. La destruction répétée du système racinaire des bananiers par le travail du sol pourrait générer périodiquement un stress physiologique pour la plante et faciliter l'accès à des parasites du système racinaire. Le cisaillement des racines de bananier suite au travail du sol pourrait cependant favoriser la colonisation de la couche superficielle du sol par les racines de haricot, en y réduisant la compétition inter-spécifique. Cependant, il conviendrait avant tout d'étendre la période d'observation à l'ensemble d'un cycle (entre deux labours successifs) afin de caractériser la dynamique de recolonisation du sol par le système racinaire du bananier suite au travail du sol. Il serait également intéressant d'évaluer l'impact de différents outils de travail primaire du sol (par exemple les mini-houes ou des outils à dents) afin sélectionner les outils les moins dommageables pour les racines du bananier. Ces aspects de recherche font l'objet du chapitre 4.

Chapitre 4. Effet à court terme du travail du sol sur l'enracinement du bananier de hautes altitudes d'Afrique de l'Est: Dynamique racinaire après le travail du sol et impact des outils de travail primaire du sol

Résumé

Dans la RGLA (Sud-Kivu en RD Congo, Rwanda, Burundi), les agriculteurs considèrent que le travail du sol dans les associations bananier-haricot favorise le développement du haricot, mais cela pourrait également fortement endommager les racines du bananier dans la couche du sol labourée. Ceci pourrait perturber la nutrition et l'alimentation hydrique, et favoriser l'infestation des racines du bananier par les nématodes et les champignons. Cette étude avait trois objectifs : (i) évaluer les dommages causés par le labour au système racinaire et suivre la régénération racinaire entre deux labours, (ii) évaluer l'impact du type d'outil du travail primaire du sol (houe et trident) sur le système racinaire du bananier, (iii) évaluer l'impact à court terme du travail du sol sur la croissance du bananier. Pour cela, nous avons mesuré mensuellement les caractéristiques des racines primaires (biomasse, longueur, nécroses racinaires) et la croissance des bananiers pendant 5 (jeunes plantations, essai en milieu contrôlé) et 6 (anciennes plantations, essai en milieu paysan) mois après le travail du sol

(0-20 cm de profondeur). Deuxièmement, nous avons comparé des parcelles labourées au moyen d'une houe à des parcelles labourées avec un trident. Immédiatement après le travail du sol, le poids frais et la longueur des racines primaires (0-10 cm) des parcelles labourées ont été réduits de 74% (anciennes plantations) et 95% (jeunes plantations) par rapport aux parcelles en non labour. La régénération racinaire consécutive au travail du sol requiert plusieurs mois, et se fait plus rapidement en termes de longueur que de biomasse racinaire, et plus rapidement dans les anciennes plantations que dans les jeunes. Le travail du sol n'a pas eu d'impact sur l'infestation des racines par les nématodes. La croissance des bananiers des jeunes plantations était significativement ($P<0,05$) plus faible à partir du quatrième mois après le travail du sol sur les parcelles labourées sans paillage comparé aux traitements en non labour paillés. Le remplacement de la houe (lame de 20 cm de longueur) par un trident (dents de 20 cm de longueur) n'a pas permis de réduire l'impact du travail du sol sur le système racinaire du bananier. Quel que soit l'outil, le travail du sol manuel est donc susceptible de réduire fortement la densité racinaire des racines de bananier dans la couche superficielle (0-10 cm). Dans les bananeraies anciennes, la croissance des plants était identique avec ou sans labour, ce qui semble indiquer que les dommages mécaniques subis par les racines n'affectent pas la croissance des bananiers à court terme. Dans les jeunes plantations, le travail du sol (avec exportation de résidus) doit être évité, sans que l'effet négatif ne puisse être attribué de façon univoque aux dommages mécaniques subis par le système racinaire.

Mots clés : labour, outil du travail primaire, enracinement, bananier, hautes altitudes.

4.1 Introduction

Dans la Région des Grands Lacs d'Afrique (RGLA), et en particulier au Sud-Kivu en RD Congo, au Rwanda et au Burundi, on rencontre deux systèmes de culture de la banane : la monoculture pérenne de bananier en culture pure et l'association du bananier avec une ou plusieurs cultures annuelles, majoritairement le haricot. En monoculture, les bananeraies ne sont pas labourées. Par contre, le travail du sol est courant dans les associations de cultures afin de préparer le lit de semence pour les cultures annuelles sous bananier.

Plusieurs travaux ayant porté sur le travail du sol avant la mise en place des bananiers ont montré que la pratique du labour avant la plantation a des effets positifs sur le système racinaire du bananier au cours des premiers mois qui suivent le labour. [Blomme \(2000\)](#) a rapporté une réduction de la densité apparente du sol dans les parcelles labourées avant plantation à Onne au Nigeria. La réduction de la densité apparente du sol suite au travail du sol a induit un développement racinaire accru au cours des premiers mois de croissance par rapport à un sol non labouré. Pour les bananiers à fruits à dessert, [Robinson \(1996\)](#) a observé que des sols qui avaient été labourés à plus de 50 cm produisaient plus de racines en meilleur état. Dans ces études, le labour est réalisé une seule fois, avant plantation des bananiers, en vue de stimuler le développement de son système racinaire.

Au Sud-Kivu, au Rwanda et au Burundi, le travail du sol (labour) manuel est pratiqué non pas pour stimuler la croissance du bananier, mais pour

permettre le semis d'une culture associée, majoritairement le haricot. Ce travail du sol, réalisé à la houe ou avec un trident, affecte une profondeur d'environ 25 cm ([Dowiya et al., 2009](#)) et peut être pratiqué tout près des bananiers, jusqu'à 15 cm du pseudo-tronc. Cette opération est répétée deux fois par an car il y a deux cycles de haricot par an. Conséquemment, pour un cycle végétatif de 18 mois, un pied de bananier doit reconstituer au moins deux fois la plus grande partie des racines localisées dans les horizons du sol affectés par le travail du sol.

Les racines du bananier sont fragiles, avec un faible pouvoir de pénétration et un grand besoin en oxygène ([Martin-Prével, 1987](#) ; Chapitre 2). Par conséquent, la distribution racinaire du bananier dans un profil pédologique est généralement limitée à 40 cm de profondeur. En Côte-d'Ivoire, [Lassoudière \(1978\)](#) a trouvé (sur base du poids frais des racines) que 70 à 90 % des racines primaires sont localisées dans les 40 premiers cm du sol. En Ouganda, [Blomme et al. \(2008\)](#) ont trouvé jusqu'à 96 % des racines primaires dans les 40 premiers cm. Les racines primaires du bananier peuvent atteindre plusieurs mètres de longueur (5,2 m) à partir du pseudo-tronc et 4 à 10 mm de diamètre. Toutefois, la majeure partie des racines se situe dans un rayon de 60 cm autour du pseudo-tronc. D'autres auteurs ([Beugnon et Champion, 1966](#); [Draye et al., 2005](#)) ont rapporté que 10 à 15 % seulement des racines dépassent un mètre de longueur à partir du pseudo-tronc.

Vu le caractère superficiel et pérenne de l'enracinement du bananier, il apparaît que la pratique répétée du travail du sol en vue de semer une culture associée pourrait conduire à des dommages mécaniques sur une part importante non seulement des racines primaires mais aussi des racines

secondaires. En effet, en règle générale, les racines secondaires sont nombreuses sur les racines primaires qui croissent dans les horizons de surface riches en humus et absentes sur les racines primaires des horizons profonds du sol (Blomme et al., 2000). Suite à la destruction des racines par un travail du sol, un système racinaire réduit pourrait résulter en une plus faible capacité d'absorption racinaire d'eau et d'éléments minéraux, et ainsi affecter négativement la croissance du bananier. Une fixation inadéquate de la plante au sol pourrait faciliter la verse. Enfin, les blessures sur les racines occasionnées par les outils de travail du sol pourraient favoriser l'accès des agents pathogènes, particulièrement la dissémination des nématodes.

Pour certaines cultures pérennes, plusieurs auteurs ont rapporté des effets néfastes du labour sur le système racinaire, la croissance et le rendement. Glenn et Welker (1989) ont observé une réduction de la densité racinaire sur la profondeur du sol affectée par le labour et une plus faible performance de plants de pêcher (*Prunus persica*) des parcelles soumises au labour. En arboriculture fruitière, l'élagage des racines est une pratique dont les effets sur le système racinaire peuvent être assimilés à ceux du labour. Pour les pommiers (*Malus domestics*), Ferree (1994) a évalué pendant 9 ans l'impact d'élagage annuel des racines faites à 25 cm de profondeur du sol et à 80 cm du tronc sur deux côtés des plantes au stade de floraison. Les résultats ont montré que l'effet de l'élagage des racines sur la distribution racinaire était le plus marqué sur les trente premiers centimètres de profondeur, du côté parallèle au plan de l'élagage des racines. Sur cette profondeur, l'élagage des racines a réduit de 20% la densité des racines <1 mm et d'environ 40% la densité des racines >1mm. La croissance de l'appareil végétatif des pommiers a été réduite de 16%,

37% et 44% après le premier, le second et le troisième élagage, respectivement (Schupp et Ferree, 1988). Geisler et Ferree (1984) et Schupp et Ferree (1990) ont observé que l'élagage des racines réduit la croissance de la tige, le nombre et la surface foliaire, le taux d'activité photosynthétique et la transpiration des pommiers. Des expériences, à court-terme, conduites en pots par Schupp et Ferree (1990) et Ghobrial (1983) ont montré une réduction du poids sec des plantes sur lesquelles les racines avaient été élaguées. Pour la vigne (*Vitis vinifera*), Pickering et al. (2005) ont observé que l'élagage des racines permettait de réduire la taille de la canopée et l'incidence de 'Bunch stem necroses' (BSN, un désordre physiologique des baies dû à une accumulation importante de sulfates dans les racines des plantes de vigne très vigoureuses).

Aux îles Hawaïi, Higgins (1904) a rapporté que le labour dans une bananeraie établie était sujet à controverse entre les planteurs de bananes. Selon les planteurs de bananes de l'époque, la régénération du système racinaire suite au labour dans une bananeraie établie avait pour conséquence une mobilisation plus importante de nutriments aux dépens du rhizome. Pratiqué en période critique pour les nutriments (floraison et remplissage des fruits), le labour aurait un impact négatif sur le rendement du bananier. Ainsi, le labour dans les bananeraies des îles Hawaïi ne se pratiquait pas avant la période de grande récolte de bananes (Higgins, 1904).

Le mode de gestion conventionnel des associations bananier-cultures annuelles qui entraîne la coupe des racines à chaque saison culturale des plantes annuelles (haricot) est donc susceptible de nuire à la productivité des bananeraies. Ceci est conforté par les nombreuses corrélations qui ont

été mises en évidence dans la littérature entre l'appareil végétatif et le système racinaire du bananier. Dans une étude portant sur la variété 'Poyo' en Côte d'Ivoire, [Beugnon et Champion \(1966\)](#) ont trouvé une corrélation positive entre la circonférence du pseudo-tronc (à 30 cm du collet) et le nombre de racines primaires émises. Dans une étude conduite à Onne (Nigeria), [Blomme et al. \(2001\)](#) ont établi des équations de régression attribuant au moins 90% de la variation de la croissance racinaire du bananier à la variation du développement des parties aériennes. Les meilleurs indicateurs de la croissance racinaire étaient la surface foliaire, la circonférence du pseudo-tronc et la hauteur du plus grand rejet.

Compte tenu des dégâts pouvant être occasionnés par le travail du sol au niveau du système racinaire du bananier, l'objectif principal de cette étude a été d'évaluer, dans une bananeraie établie, (i) les dommages causés par le labour au système racinaire et la régénération racinaire entre deux labours. Une telle étude ne semble pas avoir été réalisée à ce jour pour le bananier. Deux objectifs secondaires ont été (ii) d'évaluer l'impact du type d'outil de travail primaire du sol (houe et trident) sur le système racinaire du bananier, (iii) et évaluer l'impact à court terme du travail du sol sur la croissance du bananier. Dans ce travail, l'étude est menée sur 3 sites de la RD Congo.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Sites d'étude

Cette étude a été conduite dans 3 sites, à savoir les essais agronomiques de Mulungu et Walungu (cf. Chap. 2) et des parcelles paysannes à Kabamba au Sud-Kivu en RD Congo. Le tableau 4.1 présente les principales caractéristiques des sites. L'altitude et la pluviométrie sont relativement similaires entre les différents sites. Le sol est de texture argileuse (0-40 cm) dans tous les sites (voir aussi Figure 2.4 et Tableau 2.5).

Tableau 4.1 Principales caractéristiques des 3 sites d'étude.

Caractéristiques	Sites		
	Mulungu	Walungu	Kabamba
Latitude	2,335°S	2,441°S	2,11°S
Longitude	28,788°E	28,411°E	28,51°E
Altitude (m)	1699	1638	1570
Pluviométrie (mm/an)	1700	1650	1500
Sol (Classification FAO)	Nitisols	Ferralsols Manioc, haricot,	Nitisols/Ferralsols
Précédent cultural	Patate douce	sorgho	Bananier (>30 ans)
Type d'essai	Station	Station	Milieu paysan

Source (données climatiques et classification des sols): Bouwmeester et al., 2009, Ngongo et Lunze, 2000.

L'évolution de la biomasse racinaire et de l'état sanitaire des racines a été suivie consécutivement à un travail du sol aux sites de Mulungu et de Kabamba. Cette évolution a été comparée avec celle de parcelles non labourées et paillées avec les résidus du bananier. Les mesures réalisées sur l'essai en station à Mulungu ont permis de comparer la dynamique de l'enracinement dans une situation où la durée de mise en place des deux traitements (labour / non labour) était identique. Au contraire, les mesures

réalisées à Kabamba sont effectuées sur des parcelles paysannes dans des bananeraies établies de longue date et cultivées en association avec le haricot. Sur ce site, il a donc été possible d'évaluer l'effet du travail du sol en comparant les parcelles labourées avec des parcelles où cette pratique a été interrompue pour les besoins de l'essai. L'impact des outils de travail primaire du sol sur l'enracinement du bananier a quant à lui été évalué sur l'essai du site de Walungu.

4.2.2 Dispositif expérimental et conduite des essais

Dynamique racinaire suite au travail du sol

L'essai en station de Mulungu a été installé en mars 2008. Le dispositif expérimental était le bloc complet randomisé à quatre traitements et quatre répétitions. Toutes les parcelles étaient soumises à une association bananier-haricot. Une description complète de l'essai est disponible au chapitre 2. Pour la présente étude, seuls deux des quatre traitements ont été étudiés, à savoir le système local dominant T0 (labour et exportation des résidus de bananier) et T1 (non labour et auto-paillage).

A Kabamba, en milieu paysan, les mesures ont été réalisées dans des sous-parcelles de 3 exploitations bananières paysannes, à raison de deux parcelles par ferme cultivées en association bananier-haricot. Ces exploitations paysannes étaient installées depuis plus de 30 ans. La parcelle élémentaire comportait 25 bananiers présentant des écartements variant entre 2 et 3 m. Le système local dominant (labour et exportation des résidus de bananiers, équivalent au T0) a été comparé à un traitement alternatif (non labour et auto-paillage, équivalent au T1). Le traitement sans labour a commencé à être appliqué en février 2009. Avant l'application des

traitements, les paysans pratiquaient le labour manuel 2 fois par an pour préparer le lit de semis des haricots associés au bananier. Comme pour l'essai en station, chaque semis de haricot était précédé d'un labour manuel au moyen d'une houe avec exportation de résidus de bananier. Aucun fertilisant organique ou inorganique n'a été appliqué dans les deux traitements.

Les observations de l'effet du travail du sol sur la dynamique racinaire ont été faites après cinq et trois cycles de haricot pour le site de Mulungu et de Kabamba, respectivement. Quatre (Mulungu) et sept (Kabamba) plants de bananier ne devant pas entrer en stade de floraison 6 mois plus tard ont été suivies dans chaque parcelle élémentaire (répétition), soit un total de 16 bananiers par traitement à Mulungu et 21 bananiers par traitement à Kabamba. Immédiatement avant le démarrage des mesures de suivi de la dynamique racinaire, l'analyse statistique (Test de Student) des paramètres de croissance (circonférence au collet, circonférence à 1m et hauteur) des plantes sélectionnées n'a pas révélé de différences significatives entre les deux traitements. Les observations ont été faites pendant cinq (Mulungu, de septembre 2010 à février 2011) et six mois (Kabamba, de mai à novembre 2010), à intervalle de 30 jours, la première observation étant faite le jour du labour.

Effet du type d'outil de travail du sol primaire

L'impact du type d'outils de travail primaire du sol (houe ou trident) sur l'enracinement du bananier a été étudié sur un essai à Walungu, mis en place en avril 2008. Le dispositif expérimental et le mode de gestion y sont identiques à celui de Mulungu (Chap. 2). Pour cette étude, seules les parcelles du traitement T0 ont été utilisées. Chaque parcelle élémentaire a

été divisée en deux sous-parcelles. Une sous-parcelle a été labourée au moyen de la houe (outil à lame de 20 cm de longueur) et une autre au moyen d'un trident (outil à dent de 20 cm de longueur). La position des sous-parcelles a été alternée suivant les parcelles élémentaires soumises au labour. Quatre plantes ont été mesurées par sous-parcelle élémentaire, soit un total de 16 plants par traitement. Les observations ont été faites immédiatement après labour uniquement, en septembre 2010.

4.2.3 Méthode de description du système racinaire et paramètres observés

Il existe plusieurs méthodes pour la description du système racinaire du bananier. Notre choix s'est porté sur la méthode du prélèvement au moyen d'un cylindre métallique (« core sampling ») qui offre l'avantage d'être simple, demande moins de temps et donne une bonne estimation (80%) du système racinaire de la plante (Blomme, 2000). Le piégeage des racines a été effectué au moyen d'un cylindre métallique de 30 cm de diamètre et 50 cm de hauteur suivant la méthode décrite par Blomme (2000).

Après le travail primaire du sol, les racines coupées lors du travail du sol ont été soigneusement ramassées et évacuées de la parcelle afin de ne pas interférer avec les observations subséquentes. Le sol a ensuite été uniformisé en douceur au moyen d'un râteau. Autour de chaque bananier sélectionné pour les observations, huit angles de mesure (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 degré) ont été définis pour les observations sur la dynamique racinaire après le labour. L'angle 0° a été défini suivant le sens de l'émergence du rejet fils du bananier sélectionné. Les autres angles ont été définis en suivant le sens des aiguilles d'une montre. D'un pied de

bananier à l'autre, un angle différent était choisi aléatoirement à chaque date d'observation sans jamais revenir au même endroit. Le bord du cylindre était placé à 15 cm du bananier sélectionné et enfoncé dans le sol. La première mesure consistait à enfoncer le cylindre jusqu'à 10 cm de profondeur tandis que la deuxième mesure était faite de 10 à 20 cm de profondeur au même point de mesure que la première. Les racines piégées à chaque profondeur de mesure (0-10 et 10-20 cm) étaient soigneusement séparées du sol, lavées et séchées à l'ombre pour éliminer l'excès d'eau de lavage. Après élimination des racines mortes (racines complètement pourries ou séchées), les racines fonctionnelles (présentant au moins une fraction de tissu sain) étaient subdivisées en deux groupes : racines primaires (section de la racine piégée de diamètre ≥ 4 mm ou ayant le plus grand diamètre) et racines secondaires (racines alliées de 1^{er} et 2^{ème} ordres).

Les paramètres observés étaient le poids frais et la longueur des racines primaires fonctionnelles, les nécroses racinaires sur les racines primaires et les paramètres de croissance des bananiers (la circonférence au collet et à 1 m du collet, la hauteur des plantes). Le poids frais des racines primaires a été pesé à l'aide d'une balance de précision (0,01g). La longueur (cm) des racines primaires a été mesurée à l'aide d'une latte graduée. La longueur totale (cm) des racines piégées à une profondeur donnée autour d'un pied de bananier était la somme algébrique des longueurs des racines individuelles piégées à cette profondeur.

Les nécroses racinaires ont été évaluées suivant la méthode décrite par [Speijer et De Waele \(1997\)](#) pour les nématodes endoparasites migrants. Sur chaque pied sélectionné et à chaque profondeur de mesure (0-10 et 10-20 cm), cinq racines primaires fonctionnelles (sauf quand il y en avait

moins) de 10 cm (parfois <10 cm sous T0 au cours de premiers mois après le labour) de longueur ont été choisies de façon aléatoire et coupées longitudinalement pour le contrôle des nécroses racinaires. Après avoir sélectionné aléatoirement une des deux moitiés, on mesure la longueur totale des zones nécrosées sur le cortex racinaire. Le pourcentage de nécrose est donné par le rapport entre la longueur totale des zones nécrosées (cm) et la longueur totale du cortex racinaire d'une de deux moitiés d'une racine (= 20 cm), soit 20 % de nécroses au maximum pour chacune de deux moitiés d'une racine et 100 % pour les cinq moitiés des racines sélectionnées pour l'évaluation des nématodes.

La circonférence au collet et à 1 m du collet et la hauteur des plants de bananier ont été mesurées au moyen d'un ruban gradué.

4.2.4 Analyse statistique

Les tests de comparaison des moyennes ont été appliqués en vue d'évaluer l'effet des traitements sur les paramètres mesurés. Les données des caractéristiques des racines n'étant pas distribuées suivant la loi normale à toutes les dates d'observations, le test non paramétrique de Wilcoxon a été appliqué pour tester l'effet des traitements sur ces caractéristiques. Le test t de Student a été utilisé pour évaluer l'effet des traitements sur la croissance des bananiers. Toutes les analyses ont été faites au moyen du Logiciel SAS 9.2 Enterprise Guide 4.2.

4.3 Résultats

4.3.1 Dynamique racinaire du bananier après le travail du sol : Essai en station (Mulungu)

Dans cette section, nous présentons l'évolution du poids frais et de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement labour, exprimé en pourcentage du poids frais des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour. Les valeurs absolues sont présentées dans les annexes 5.1.

Poids frais des racines primaires

A la profondeur 0-10 cm, immédiatement après le travail du sol, le poids frais des racines primaires est réduit d'environ 95% par rapport au traitement non labour (T1) (Figure 4.1). On observe une augmentation régulière du poids frais des racines primaires jusqu'au troisième mois après le labour, puis une légère diminution du poids frais des racines au quatrième et cinquième mois après le labour. Pendant toute la durée des observations, le poids frais moyen des racines primaires du traitement labour (T0) reste significativement inférieur à celui du traitement non labour (T1) (Tableau 4.2). En fin de cycle, la biomasse des racines primaires dans les parcelles labourées semble se stabiliser autour de 54% de la biomasse présente dans les parcelles en non labour (T1).

A la profondeur 10-20 cm, par contre, le poids frais des racines primaires sous traitement labour présente une tendance générale à l'augmentation tout au long du cycle (Figure 4.1). Toutefois, durant toute la période des observations, la biomasse racinaire sous labour (T0) à cette profondeur

n'était pas significativement différente de la biomasse en non labour
(Tableau 4.2).

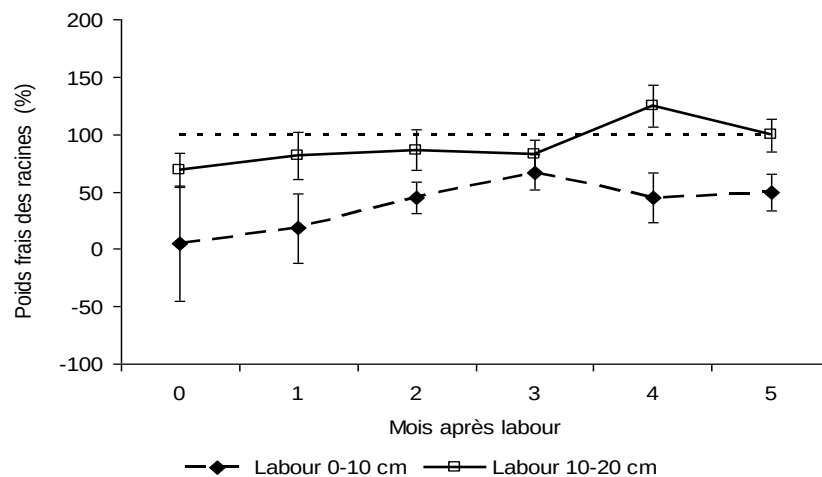


Figure 4.1 Evolution du poids frais des racines primaires fonctionnelles du traitement labour, exprimé en pourcentage du poids frais des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour au site de Mulungu aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm. Valeur = Moyenne et erreur standard.

Tableau 4.2. P-valeurs du test de comparaison des moyennes (test de Wilcoxon) entre les traitements labour et non labour pour le poids frais et la longueur totale des racines primaires aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm à Mulungu.

Profondeur	Durée (mois)					
	0	1	2	3	4	5
<i>Poids frais</i>						
0-10 cm	<0.001	0.001	0.002	0.028	0.010	0.004
10-20 cm	0.337	0.221	0.585	0.318	0.638	0.396
<i>Longueur totale</i>						

0-10 cm	<0.001	0.002	0.073	0.611	0.068	0.023
10-20 cm	0.462	0.376	0.559	0.777	0.158	0.72

Longueur des racines primaires fonctionnelles

Tout comme pour la biomasse racinaire, le travail du sol réduit la longueur totale des racines à la profondeur 0–10 cm (Figure 4.2). Juste après le travail du sol, elle ne représente que 6% de la longueur totale observée sous non labour. La longueur racinaire croît ensuite rapidement jusqu'au 2^e à 3^e mois après labour, pour ensuite se stabiliser à un niveau équivalent à 66% de la longueur racinaire observée en non labour. Pendant les 2 premiers mois ainsi qu'au cinquième mois, la longueur moyenne des racines primaires du traitement labour est significativement inférieure à celle du traitement non labour (Tableau 4.2).

Entre 10 et 20 cm de profondeur, on observe une légère tendance à l'augmentation de la longueur racinaire (Figure 4.2). Cependant, à aucun moment le labour ne se différencie significativement du non labour à cette profondeur (Tableau 4.2).

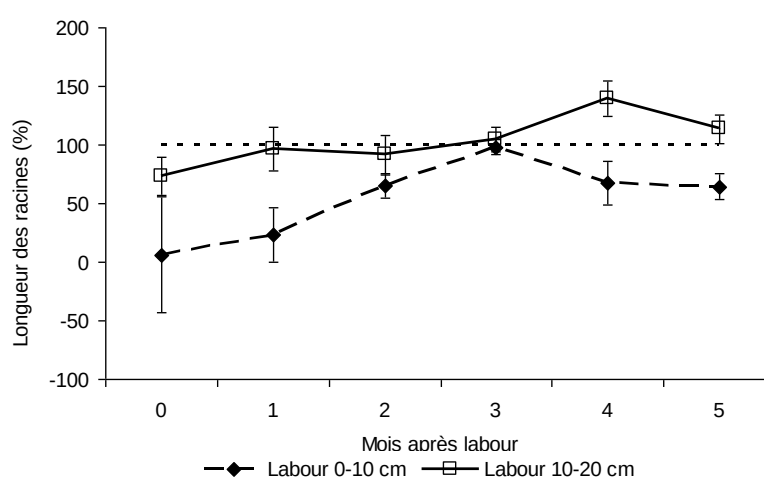


Figure 4.2 Evolution de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement labour exprimée en pourcentage de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour au site de Mulungu aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm. Valeur = Moyenne et erreur standard.

Nécroses racinaires

Tableau 4.3 Nécroses des racines primaires fonctionnelles (% de nécroses moyen $\pm$ erreur standard) aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm au site de Mulungu. Pour une date d'observation et une profondeur donnée, une même lettre indique l'absence de différence significative entre labour et non labour par le test de Wilcoxon.

Mois	Nécroses racinaires (%)			
	0-10 cm		10-20 cm	
	Labour	Non labour	Labour	Non labour
0	0,0 $\pm$ 0,0 N/A	2,4 $\pm$ 1,3	6,7 $\pm$ 2,4a	8,8 $\pm$ 3,1a
1	1,3 $\pm$ 1,3 N/A	6,4 $\pm$ 3,0	9,1 $\pm$ 4,4a	6,0 $\pm$ 1,9a
2	1,3 $\pm$ 0,9a	1,1 $\pm$ 0,5a	2,4 $\pm$ 0,9a	1,8 $\pm$ 0,7a
3	3,0 $\pm$ 1,9a	1,9 $\pm$ 0,8a	6,1 $\pm$ 1,9a	4,8 $\pm$ 1,7a
4	1,4 $\pm$ 0,8a	6,3 $\pm$ 1,9b	1,8 $\pm$ 1,0a	6,7 $\pm$ 1,3b
5	3,9 $\pm$ 1,6a	4,0 $\pm$ 1,8a	3,9 $\pm$ 1,4a	5,2 $\pm$ 2,1a

N/A : non applicable (nombre réduit des racines sur les parcelles labourées). Pour une profondeur donnée, les moyennes suivies des mêmes lettres sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Le pourcentage de nécroses de racines primaires est globalement assez faible et montre une grande variabilité temporelle, quels que soient le traitement et la profondeur de mesure (Tableau 4.3). A la profondeur 0-10

cm, le taux de nécrose ne dépasse jamais 4% en labour, alors qu'il atteint 6,4% en non labour. Entre 10 et 20 cm de profondeur, les valeurs sont globalement comparables entre les deux modalités de travail du sol. Quel que soit le traitement, les nécroses sont en moyenne plus importantes à la profondeur 10-20 cm par rapport à la profondeur 0-10 cm mais ne dépassent jamais 10%. Lorsqu'une différence significative est observée entre labour et non labour, il s'agit à chaque fois d'une valeur plus faible en labour par rapport au non labour. L'occurrence de ces différences significatives ne semble pas coïncider avec une phase particulière de la recolonisation du sol par les racines.

Evolution de la croissance des bananiers

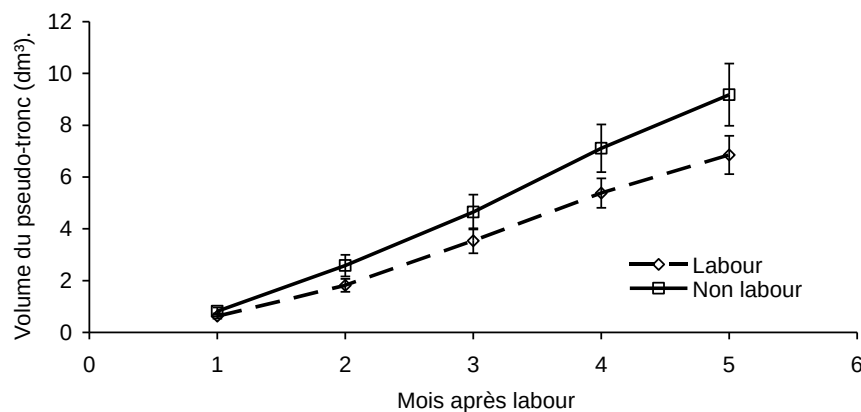


Figure 4.3. Evolution du taux de croissance cumulé du volume de pseudo-tronc en fonction du traitement sur le site de Mulungu. Valeur = Moyenne et erreur standard.

Le taux de croissance du volume du pseudo-tronc des bananiers dans les deux traitements est similaire un mois après labour, puis augmente durant toute la période des observations (Figure 4.3). La comparaison des

moyennes a montré que le volume du pseudo-tronc est significativement plus élevé ($P<0,05$) sous traitement non labour comparé au labour à partir du quatrième mois après labour.

Propriétés chimiques du sol

Le tableau 4.4 relatif aux propriétés chimiques du sol des traitements labour (T0) et non labour (T1) montre des teneurs en azote total, carbone total, calcium, potassium et magnésium légèrement inférieures sous labour comparé au non labour. La teneur en phosphore, par contre, est plus élevée sur les parcelles de T0. Toutefois, l'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative entre les deux traitements.

Tableau 4.4. Propriétés chimiques du sol (0-20 cm) au site de Mulungu.

Echantillons des sols prélevés 24 mois après l'application des traitements.

Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard (n=4).

Propriétés du sol	Traitements	
	Labour	Non labour
N _{tot} (%)	0,41 $\pm$ 0,02	0,43 $\pm$ 0,02
C _{tot} (%)	5,00 $\pm$ 0,23	5,31 $\pm$ 0,20
Ca éch. (cmol+/kg)	18,59 $\pm$ 1,05	19,38 $\pm$ 1,19
K éch. (cmol+/kg)	1,18 $\pm$ 0,25	1,28 $\pm$ 0,22
Mg éch. (cmol+/kg)	4,36 $\pm$ 0,26	4,58 $\pm$ 0,30
P assimilable (mg/kg)	88,84 $\pm$ 5,28	83,95 $\pm$ 7,21
pH _{H2O} (1: 5)	6,3 $\pm$ 0,5	6,3 $\pm$ 0,8

Source: Bizimana (2012), communication personnelle. N_{tot} : azote total, C_{tot} : carbone total. Les bases échangeables (Ca, K et Mg) et le P assimilable ont été extraits avec la solution de Mehlich-3.

4.3.2 Dynamique racinaire du bananier après le travail du sol : essai en milieu paysan (Kabamba)

Dans cette section, nous présentons l'évolution du poids frais et de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement labour (T0), exprimé en pourcentage du poids frais et de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour (T1). Les valeurs absolues sont présentées dans les annexes 5.2.

Poids frais de racines primaires fonctionnelles

Immédiatement après le labour, le poids frais des racines primaires mesuré à la profondeur 0-10 cm sous traitement labour est significativement plus faible qu'en non labour (Figures 4.4 et Tableau 4.5). En moyenne, le poids des racines primaires immédiatement après labour représente 26% du poids frais des racines primaires du traitement non labour. On observe ensuite une augmentation graduelle du poids frais des racines primaires jusqu'au 5^{ème} mois. On note cependant une absence d'effet du traitement au deuxième mois et à partir du quatrième mois après le labour (Tableau 4.5). A la profondeur 10-20 cm, immédiatement après le labour et un mois après, le poids frais des racines est significativement plus faible sous traitement labour comparé au non labour (Figure 4.4). A partir du deuxième mois après le labour, le poids frais des racines primaires n'est plus affecté de façon significative par le travail du sol (Tableau 4.5).



Figure 4.4 Evolution du poids frais des racines primaires fonctionnelles du traitement labour exprimé en pourcentage du poids frais des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour de Kabamba. Valeur = Moyenne et erreur standard.

Tableau 4.5 P-valeurs du test de comparaison des moyennes (test de Wilcoxon) entre les traitements labour et non labour pour le poids frais et la longueur totale des racines primaires aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm à Kabamba.

Profondeur	Durée (mois)						
	0	1	2	3	4	5	6
<i>Poids frais</i>							
0-10 cm	0.002	<0.001	0.145	0.004	0.113	0.132	0.244
10-20 cm	0.025	0.008	0.065	0.687	0.501	0.200	0.083
<i>Longueur totale</i>							
0-10 cm	0.002	0,485	0.763	0.254	0.237	0.421	0.263
10-20 cm	0.014	0.124	0.076	0.821	0.919	0.097	0.404

Longueur des racines primaires fonctionnelles

Aux profondeurs 0-10 et 10-20 cm, immédiatement après labour, la longueur des racines primaires du traitement labour est significativement inférieure à celle du traitement non labour (Figure 4.5). En moyenne, la longueur racinaire a été réduite de 72% dans la couche 0-10 cm et de 49% dans la couche 10-20 cm. Dans la couche 0-10 cm, après une augmentation rapide au cours du premier mois suivant le labour, la longueur des racines primaires du traitement labour continue à augmenter, bien que faiblement, par rapport au traitement non labour jusqu'au cinquième mois après labour. Il n'y a cependant pas d'effet du traitement sur la longueur des racines primaires entre le premier et sixième mois après le labour (Tableau 4.5).

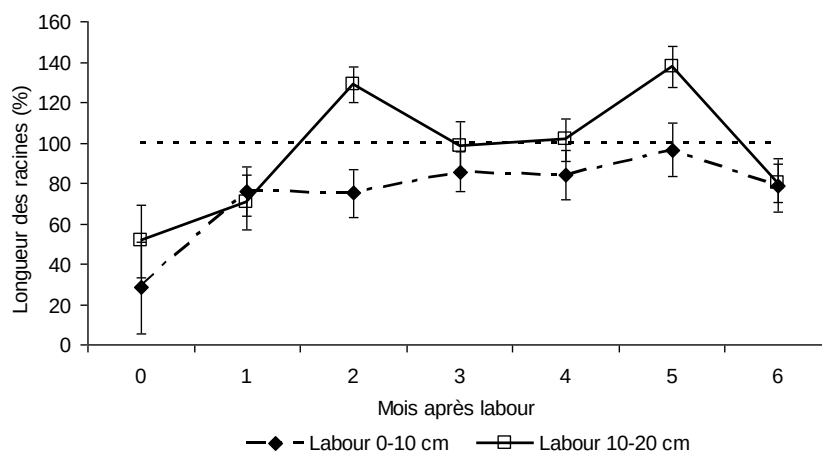


Figure 4.5 Evolution de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement labour exprimée en pourcentage de la longueur des racines primaires fonctionnelles du traitement non labour à Kabamba. Valeur = Moyenne et erreur standard.

A la profondeur 10-20 cm, comme ce qui avait été observé pour le poids frais des racines primaires, la longueur des racines présente une grande

variabilité temporelle (Figure 4.5). On observe une tendance à l'accroissement de la longueur racinaire sur une période de 2 mois environ après labour. Toutefois, entre le premier et le sixième mois, la longueur des racines primaires n'est pas affectée de manière significative par les traitements (Tableau 4.5).

Nécroses racinaires

Tableau 4.6. Nécroses des racines primaires fonctionnelles (% de nécroses moyen $\pm$ erreur standard) au site de Kabamba. Pour une date d'observation et une profondeur donnée, une même lettre indique l'absence de différence significative entre labour et non labour par le test de Wilcoxon.

Mois	Nécroses racinaires (%)			
	0 – 10 cm		10 – 20 cm	
	Labour	Non labour	Labour	Non labour
0	2,5 $\pm$ 1,0N/A	7,1 $\pm$ 1,9	6,2 $\pm$ 2,4a	10,1 $\pm$ 4,2a
1	3,5 $\pm$ 1,5a	9,5 $\pm$ 2,5b	7,6 $\pm$ 2,7a	9,5 $\pm$ 2,3a
2	1,3 $\pm$ 0,8a	1,3 $\pm$ 0,7a	3,7 $\pm$ 1,1a	1,5 $\pm$ 0,9a
3	10,9 $\pm$ 2,5a	13,0 $\pm$ 2,0a	18,1 $\pm$ 1,8a	8,7 $\pm$ 1,3a
4	11,0 $\pm$ 3,1a	11,2 $\pm$ 3,2a	12,5 $\pm$ 2,5a	14,7 $\pm$ 3,1a
5	6,8 $\pm$ 1,4a	9,1 $\pm$ 2,7a	9,3 $\pm$ 2,6a	11,6 $\pm$ 2,2a
6	1,6 $\pm$ 0,5a	3,9 $\pm$ 1,2a	5,8 $\pm$ 1,2a	4,7 $\pm$ 1,2a

N/A : non applicable (nombre trop faible de racines sur les parcelles labourées). Pour une profondeur donnée, les moyennes suivies des mêmes lettres sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Comme à Mulungu, le pourcentage de nécroses présente une grande variabilité temporelle. Immédiatement et un mois après labour, à la

profondeur 0-10 cm, les nécroses racinaires sont plus importantes sous traitement non labour par rapport au labour (Tableau 4.6). A partir du deuxième mois après labour, il n'y a plus de différences significatives entre les traitements dans la couche 0-10 cm. Dans la couche 10-20 cm, aucun effet traitement n'est observé, quelle que soit la date d'observation. Deux mois après labour, on observe une réduction des nécroses quelques soient le traitement et la profondeur du sol. Du troisième au cinquième mois après labour, on observe les valeurs les plus élevées de nécroses racinaires dans tous les traitements et à toutes les profondeurs.

Evolution de la croissance de bananiers

Il ressort de la figure 4.6 que le taux de croissance cumulé du volume de pseudo-tronc des deux traitements (labour et non labour) évolue de la même manière au cours de la période d'observation. Les traitements ne se différencient pas significativement en termes de croissance des plantes.

Propriétés du sol

Le tableau 4.7 présente les propriétés physico-chimiques du sol des parcelles des traitements labour et non labour au site de Kabamba. Comme à Mulungu, les traitements n'ont pas affecté significativement ces propriétés du sol.

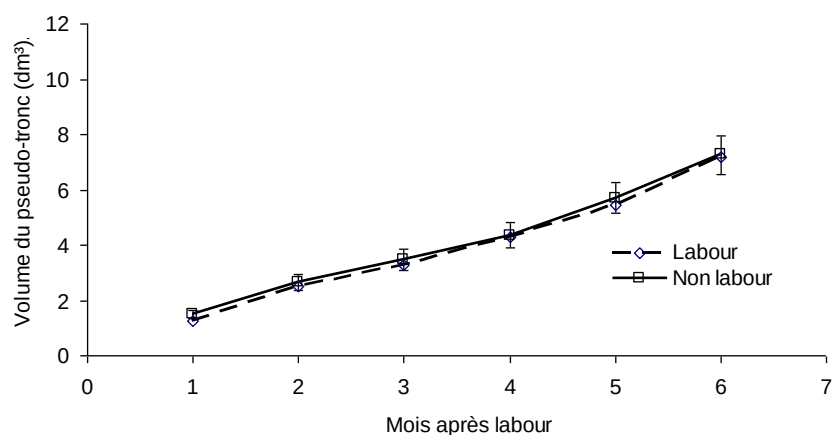


Figure 4.6. Evolution du taux de croissance cumulé du volume du pseudo-tronc (dm³) en fonction de traitement labour et non labour sur le site de Kabamba. Valeur = Moyenne et erreur standard.

Tableau 4.7. Propriétés chimiques du sol (0-20 cm) au site de Kabamba.

Echantillons des sols prélevés 12 mois après l'application des traitements.

Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard (n=3).

Propriétés du sol	Traitements	
	Labour	Non labour
N _{tot} (%)	0,48 $\pm$ 0,07	0,46 $\pm$ 0,16
C _{tot} (%)	6,53 $\pm$ 0,69	6,37 $\pm$ 1,52
Ca (cmol+/kg)	12,34 $\pm$ 0,43	10,87 $\pm$ 2,05
K (cmol+/kg)	2,32 $\pm$ 0,22	2,63 $\pm$ 0,81
Mg (cmol+/kg)	7,13 $\pm$ 0,59	6,40 $\pm$ 0,97
P.assimilable (mg/kg)	52,07 $\pm$ 5,75	40,36 $\pm$ 0,03
pH _{H2O} (1: 5)	6,5 $\pm$ 0,03	6,6 $\pm$ 0,10
Résistance mécanique (kg/cm ²)	6,4 $\pm$ 0,49	8,8 $\pm$ 1,74

Les bases échangeables (Ca, K et Mg) et le P assimilable ont été extraits avec la solution de Mehlich-3.

4.3.3 Impact du type d'outils de travail primaire du sol sur l'enracinement du bananier (Essai en station, Walungu)

Quelle que soit la profondeur, il ressort que les parcelles labourées au moyen du trident ne diffèrent pas significativement des parcelles labourées au moyen de la houe, que ce soit au niveau de la biomasse racinaire fraîche (Figure 4.7) ou de la longueur racinaire (Figure 4.8), bien que les parcelles labourées au trident présentent systématiquement des valeurs plus élevées de biomasse ou de longueur racinaire.

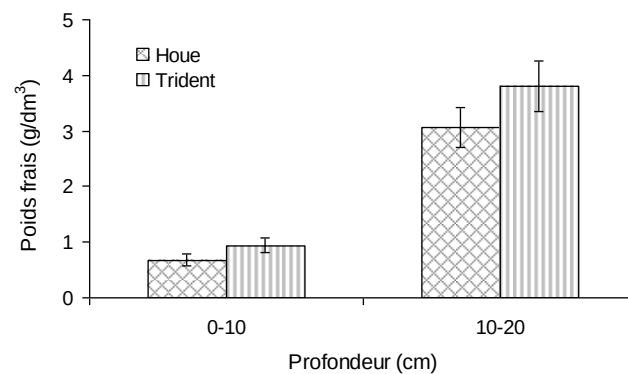


Figure 4.7 Poids frais des racines en fonction de types d'outils du travail primaire du sol (trident et houe) et de profondeur d'observations, mesuré au site de Walungu immédiatement après labour. Valeur = Moyenne et erreur standard.

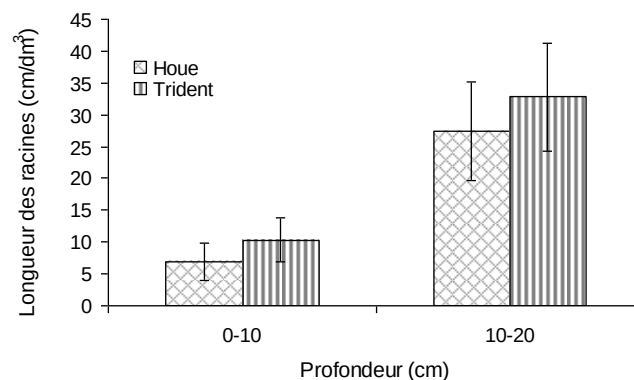


Figure 4.8 Longueur des racines en fonction de types d'outils du travail primaire du sol (trident et houe) et de profondeur d'observations, mesurée au site de Walungu immédiatement après labour. Valeur = Moyenne et erreur standard.

4.4 Discussion

Aussi bien en station qu'en milieu paysan, les résultats montrent que, immédiatement après le labour, tant la biomasse des racines primaires que leur longueur sont fortement réduits par rapport aux parcelles en non labour dans les 10 premiers centimètres du sol. A Mulungu immédiatement après labour, la biomasse des racines primaires et leur longueur dans les parcelles labourées ne représente que 5% de la biomasse et de la longueur observées en non labour (Figures 4.1 et 4.2). A Kabamba, la réduction de la biomasse et de la longueur racinaire est de l'ordre de 74% suite au labour (Figures 4.4 et 4.5). Entre 10 et 20 cm, on n'observe pas d'effets significatifs du labour sur l'enracinement à Mulungu (Figures 4.1 et 4.2), mais à Kabamba, une réduction de 42 à 49% de la biomasse et de la longueur des racines primaires est observée suite au labour (Figures 4.4 et 4.5).

Il apparaît donc que l'action mécanique de la houe détruit une très grande proportion de l'enracinement du bananier sur les 10 premiers centimètres du sol. Que des différences significatives soient observées entre labour et non labour entre 10-20 cm à Kabamba et non à Mulungu pourrait être lié au fait que des laboureurs différents ait été utilisés entre les deux sites. La réduction plus marquée de l'enracinement suite au labour dans la couche 0-10 cm à Mulungu comparé à Kabamba s'explique partiellement par une moindre régénération de l'enracinement dans les parcelles labourées comparé aux parcelles sans labour sur ce site. En effet, on peut observer que la régénération racinaire dans les parcelles labourées à Mulungu ne permet pas d'atteindre le même niveau que celui des parcelles non labourées (Figures 4.1 et 4.2), contrairement à Kabamba où les niveaux d'enracinement sont comparables entre labour et non labour après 6 mois (Figures 4.4 et 4.5). Ce développement racinaire plus faible en labour qu'en non labour à Mulungu sera discuté plus amplement ci-après.

La vitesse de croissance élevée des racines primaires leur permet de recoloniser rapidement l'espace. Ainsi, à Kabamba, des valeurs de biomasses et de longueurs similaires à celles observées en non labour sont atteintes endéans 2 à 4 mois selon la profondeur (Figures 4.4 et 4.5). Sur ce site, la régénération se fait plus rapidement lorsqu'elle est exprimée en termes de longueur qu'en termes de biomasse. En effet, la biomasse des racines dépend non seulement de leur longueur mais aussi de leur diamètre. Suite au labour, on observe dans un premier temps une recolonisation du sol par un grand nombre de racines fines et allongées formées pour compenser les racines coupées au cours du labour. Il est donc logique que la longueur des racines primaires augmente plus rapidement que leur biomasse.

A Mulungu, la biomasse et la longueur racinaire croissent sur une période d'environ 3 mois suivant le labour, avant de se stabiliser (Figures 4.1 et 4.2). Alors que la longueur racinaire atteint un niveau comparable à celui des parcelles en non labour, la biomasse racinaire reste quant à elle significativement inférieure à celle observée en non labour. Que la longueur racinaire des parcelles sous labour soit plus proches des parcelles non labour que pour la biomasse pourrait à nouveau s'expliquer par le fait que, dans les parcelles labourées, l'horizon de surface est recolonisé par des nouvelles racines dont le diamètre est en moyenne plus faible que pour les racines plus anciennes rencontrées dans les parcelles en non labour.

A Mulungu, le fait que la biomasse racinaire et la longueur racinaire en labour restent inférieures aux valeurs observées en non labour ne peut pas être attribué de façon univoque aux effets mécaniques du labour. En effet, les deux traitements se différencient non seulement par le travail du sol (labour / non labour), mais aussi par la présence ou non d'un paillage. Bien que non significatives, le tableau 4.4 relatif aux propriétés chimiques du sol montre des teneurs en azote total, carbone total, magnésium, potassium et calcium échangeables légèrement inférieures sur les parcelles de traitement labour (avec exportation des pailles). Ainsi, le plus faible développement racinaire (Figures 4.3 et 4.4), mais aussi la plus faible croissance des pseudo-troncs (Figure 4.3), dans les parcelles en labour pourraient, dans une certaine mesure, résulter de contraintes d'ordre chimique ou nutritionnel et de l'absence de la couverture au sol plutôt que des seuls effets directs ou indirects de la destruction mécanique des racines par le labour. Une caractérisation des propriétés physiques, notamment la

densité apparente du sol, n'a pas mis en évidence des différences entre les deux traitements (Chap. 3, Figure 3.1).

Les mesures réalisées à Kabamba semblent confirmer cette hypothèse. En effet, sur ce site, les parcelles étaient depuis plusieurs dizaines d'années en labour. L'arrêt du travail du sol sur certaines sous-parcelles n'a pas conduit à une amélioration des propriétés du sol (Tableau 4.7). Ceci se reflète aussi dans l'absence de différence significative dans la croissance des bananiers entre labour et non labour (Figure 4.6). Ainsi, lorsque l'environnement physique et chimique est inchangé, les racines arrivent à recoloniser le sol après le travail du sol jusqu'à un niveau similaire à celui observé en non labour, tout au moins dans un rayon de 45 cm autour du pseudo-tronc. Inversement, on pourrait également conclure de cet essai que l'arrêt du travail du sol ne conduit pas, dans un délai court (15 mois), à une augmentation significative de la biomasse et longueur des racines primaires.

Même si les observations se limitent à un rayon compris entre 15 et 45 cm du pseudo-tronc, le taux de destruction mécanique des racines observés suite au travail du sol) est vraisemblablement applicable à l'ensemble de la parcelle. En effet, la coupe d'une racine primaire lors du travail du sol entraîne automatiquement la perte de toutes les racines secondaires associées. La vitesse de recolonisation du sol par les nouvelles racines formées en remplacement de celles coupées lors du travail quant à elle dépendra de la distance par rapport au pseudo-tronc. Formées dans le rhizome (zone de Mangin), les nouvelles racines recolonisent le sol au fur et à mesure de leur extension dans le sol. Ceci peut donc expliquer la rapide recolonisation du sol à proximité du pseudo-tronc, mais implique

également une recolonisation plus lente du sol au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pseudo-tronc. La réduction de la densité apparente du sol consécutive au travail du sol pourrait favoriser la croissance des nouvelles racines à fortes activités physiologiques sous traitement labour, sans que la biomasse et la longueur racinaire ne dépassent véritablement ce qui est observé en non labour. Il est cependant à noter que les effets améliorants du travail du sol sur les propriétés physiques sont de relativement courte durée, puisque déjà deux mois après le travail du sol on n'observe plus de différence significative en termes de densité apparente entre les parcelles labourées et sans labour (voir chapitre 3).

Selon [Robinson \(1987\)](#), les racines primaires du bananier sont fonctionnelles pendant 4 à 6 mois. La vitesse de renouvellement naturelle des racines dans les parcelles en non labour serait donc du même ordre que celle induite par un travail du sol réalisé tous les 6 mois environ. On peut donc s'interroger sur l'impact réel du travail du sol. Cependant, le renouvellement naturel des racines est un processus continu, contrairement au renouvellement suite au travail du sol qui induit une forte cyclicité, avec des risques plus élevés de stress physiologique pour la plante.

Tant pour l'âge de la plantation (jeunes plantations en milieu contrôlé et anciennes plantations en milieu paysan) que pour la profondeur de mesure (0-10 et 10-20 cm, Tableaux 4.3 et 4.5), le pourcentage de nécroses racinaires évolue en dents de scie et ne dépasse pas 20% durant toute la période des observations. Une évolution du pourcentage de nécroses en dents de scie peut être due au fait que les nématodes des plantes sont des parasites obligatoires. L'infestation racinaire conduit à la mort des racines, ce qui oblige les nématodes à abandonner les racines mortes au profit des

parasites de pourriture pour coloniser des racines saines. Aussi, les nécroses sont des lésions qui se développent après le passage des nématodes sur les racines. Ainsi, suivant la durée de l'infestation, le pourcentage de nécroses pourrait ne pas être lié à la pression de nématodes. Pour des valeurs $\leq 50\%$ de nécroses, [Gaidashova \(2009\)](#) n'avait pas trouvé un impact négatif important des nématodes (*Pratylenchus goodeyi*) sur la croissance des bananiers et le poids de régime des bananes à Kibuye au Rwanda. Les nématodes ne seraient donc pas une des contraintes majeures à la production bananière au site de Mulungu et de Kabamba et le travail du sol ne favoriserait pas l'infestation des racines par les nématodes. [CIALCA \(2007b\)](#), [Bouwmeester et al. \(2009\)](#), [Wairegi \(2010\)](#) et [Delstanche \(2011\)](#) ont également observé que les contraintes biotiques (nématodes et charançons) ne constituent pas des contraintes majeures à la production bananière dans plusieurs zones de la Région des Grands Lacs d'Afrique (Rwanda, Ouganda, Burundi, Sud-Kivu en RDC). Des valeurs de nécroses significativement plus faibles en labour au cours de premiers mois après le travail du sol montrent que les racines nouvellement formées sont saines et sont colonisées au fur et à mesure de leur croissance. Le travail du sol n'a pas favorisé l'infestation des racines par les nématodes tandis que le paillage n'a pas empêché leur colonisation. Comparé à l'essai en milieu paysan (anciennes plantations), le pourcentage de nécroses des racines est quelque peu inférieur en milieu contrôlé (plantations jeunes). Ce résultat est cohérent avec celui de [Delvaux et Guyot \(1989\)](#) qui ont trouvé une dégradation de l'état sanitaire des racines avec l'âge de la plantation bananière en Martinique.

Quel que soit l'outil (houe ou trident) utilisé pour le travail du sol, la pratique du labour dans une bananeraie établie a concerné essentiellement

les racines localisées dans les dix premiers centimètres du sol (Figures 4.7 et 4.8). La houe (outil à lame) coupe irréversiblement une racine tandis que le trident (instrument à dent) la coupe et/ou la blesse et l'expose en surface. Sous l'action des rayons solaires, la racine ainsi exposée finit par flétrir. Ce résultat permet de conclure que les deux outils de travail primaire du sol (houe et trident) ne conviennent pas pour un travail minimum du sol dans une bananeraie établie si l'on souhaite préserver le système racinaire du bananier.

Au regard du dispositif expérimental (Tableau 2.2), cette étude qui compare les parcelles labourées et non paillées (labour) et les parcelles en non labour et paillées (non labour) ne permet pas de discriminer l'effet du travail du sol de celui du paillage sur le système racinaire et la croissance du bananier. Immédiatement après le labour, on observe une forte réduction du poids frais et de la longueur racinaire (Figures 4.1, 4.2, 4.4 et 4.5) puis une régénération racinaire avec le temps. Ceci étant, on pourrait conclure que le travail du sol endommage temporairement les racines sur la couche du sol labourée (effet à court terme). Mais, à moyen et long-termes, aussi bien l'exportation de résidus de bananier que le travail du sol pourrait affecter le système racinaire et la croissance du bananier. Des études supplémentaires intégrant les parcelles labourées et paillées et des parcelles non labourées et non paillées sont indispensables pour séparer l'effet du travail du sol de celui du paillage. Malgré cette limitation du dispositif expérimental, les résultats de cette étude permettent de comprendre la relation entre le système racinaire et l'appareil végétatif du bananier dans une association bananier-haricot telle que pratiquée dans la zone d'étude.

4.5 Conclusions

Cette étude a montré que le travail du sol dans une bananeraie établie, tel que pratiqué par les agriculteurs dans la zone d'étude, concerne essentiellement les dix premiers centimètres du sol. Sur cette profondeur, immédiatement après le travail du sol, le poids frais et la longueur des racines primaires des parcelles labourées ont été réduits de 74% dans les anciennes plantations (essai en milieu paysan) et 95% dans les jeunes plantations (essai en milieu contrôlé) par rapport à ceux des parcelles en non labour. La recolonisation racinaire du sol à proximité du pseudo-tronc intervient plus rapidement en termes de longueur que de biomasse racinaire. Cinq mois après le travail du sol, la régénération racinaire dans les parcelles labourées et non paillées des jeunes plantations n'a pas atteint le niveau des parcelles non labourées et paillées. Dans les anciennes plantations, au contraire, les niveaux d'enracinement des parcelles labourées et non labourées ont été comparables six mois après le travail du sol.

Sur les vingt premiers centimètres du sol, le travail du sol n'a pas favorisé l'infestation des racines par les nématodes, tant pour les jeunes que les anciennes plantations. Sur ces dernières, la suppression du travail du sol n'a également pas amélioré de manière significative la croissance de bananiers à court terme (15 mois après la suppression). Dans les jeunes plantations, par contre, le travail du sol avec exportation de résidus a réduit significativement ($P < 0,05$) la croissance des plantes (bananiers de 2^{ème} cycle) à partir du quatrième mois après le labour. Le travail du sol avec exportation des résidus semble être une pratique culturale susceptible de perturber, à long terme, le développement racinaire et la croissance des

bananiers des jeunes bananeraies. Toutefois, le produit utile du bananier étant le fruit (bananes), il importe de mesurer l'effet des traitements sur les paramètres de rendement (nombre de fruits, poids de régime) plutôt que sur les paramètres de croissance, en ceci qu'une bonne croissance des plantes ne correspond pas toujours à un bon rendement.

Le remplacement d'un outil de travail primaire du sol à lame (houe) par un outil à dent (trident) ne permet pas de réduire l'impact négatif du travail du sol sur la biomasse et la longueur des racines primaires. Ainsi, dans une bananeraie établie, la houe manuelle (lame de 20 cm de longueur) et le trident (dents de 20 cm de longueur) ne conviennent pas pour un travail du sol devant épargner la totalité des racines du bananier.

Chapitre 5. Impact du travail du sol et du paillage sur la conservation du sol des systèmes de culture bananière de l’Afrique de l’Est

Résumé

Dans la RGLA, le travail du sol avec exportation de résidus de cultures dans les associations bananier-haricot pourrait accroître la perte en terres par érosion, engendrer la dégradation de la qualité du sol, affecter négativement le rendement des cultures, et par conséquent compromettre la mise en place d’une agriculture de subsistance durable. Pour remédier concomitamment à la dégradation de la qualité du sol et à la baisse des rendements, la culture sans labour avec paillage pourrait constituer une alternative viable aux pratiques conventionnelles. L’objectif de cette étude était d’évaluer l’impact de pratiques culturales sans labour avec paillage sur la conservation du sol dans les associations bananier-haricot. Des indicateurs d’évaluation de la conservation du sol (stabilité structurale, infiltration, ruissellement et érosion) ont été mesurés sur trois sites d’essai (Mulungu, Walungu et Rubona) soumis à 4 modalités de gestion : le système local courant ou T0 (labour et sans paillage) et trois traitements alternatifs en non labour et paillés de résidus de bananiers uniquement (T1), de résidus de bananiers et d’un paillage supplémentaire de *Hyparrhenia diplandra* ou chaume de riz (T2) ou de résidus de bananiers avec un paillage de *Tripsacum laxum* (T3). Deux mesures de stabilité structurale et d’infiltration (saison sèche et saison des pluies) et des mesures supplémentaires d’hydrophobicité ont été effectuées à Mulungu

et Walungu. En saison pluvieuse uniquement, deux mesures à intervalle de neuf mois (stabilité structurale) et une seule mesure (infiltrométrie, ruissellement et érosion) ont été effectuées à Rubona. Dans tous les sites et pour les deux saisons de mesure, les plus faibles valeurs de stabilité structurale (MWD) ont été observées sous traitement T0 par rapport aux traitements T1, T2 et T3. Toutefois, due à une plus forte hydrophobicité, ces derniers traitements n'ont pas permis d'améliorer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) à Mulungu et Walungu. A Rubona, par contre, le traitement T2 a conduit à une conductivité hydraulique à saturation (K_s) significativement ($P < 0,001$) supérieure (1,76 cm/h) à celle de T0 (0,71 cm/h). Les traitements T1, T2 et T3 ont réduit de manière significative ($0,01 < P < 0,05$) la masse de sédiments entraînés et le ruissellement comparés au traitement T0. A Mulungu et Walungu, les valeurs de ces deux paramètres de contrôle d'érosion ont nettement varié suivant les saisons. En saison sèche, les traitements n'ont pas affecté le ruissellement et la masse de sédiments entraînés à Walungu. A Mulungu, par contre, les traitements T1, T2 et T3, plus hydrophobes, ont induit un ruissellement significativement supérieur à celui de T0, mais n'ont pas affecté la masse de sédiments entraînés. En saison des pluies, les valeurs les plus élevées de ruissellement et de masse de sédiments entraînés ont été observées sur les parcelles de T0. Suivant le site et la saison de mesure, la concentration en sédiments dans l'eau de ruissellement sous T0 est 1,5 à 13 fois supérieure à celles des traitements T1, T2 et T3 ; ce qui indique la forte sensibilité du sol labouré et sans paillage à l'érosion. Ces résultats suggèrent que le non labour avec paillage (culture sans labour avec paillage) peut être une pratique culturale adéquate pour réduire le risque d'érosion des sols des bananeraies de la RGLA, et donc contribuer efficacement à leur conservation.

5.1 Introduction

Dans la province du Sud-Kivu (Kivu montagneux) en RD Congo, au Rwanda et au Burundi, les exploitations agricoles recourent à l'association des cultures ([Akyampong et al., 1995](#)), parmi lesquelles l'association bananier-haricot est courant. Ces régions se caractérisent par des pentes moyennes à fortes (36 à 55%, [Roose et Ndayizigiye, 1997](#)), propices à l'érosion. Néanmoins, en l'absence de cultures annuelles associées aux bananier, l'érosion est nettement moins importante (<30%) sous le couvert permanent du bananier que dans les champs consacrés aux cultures annuelles ([Lufafa et al., 2003](#)). En effet, le bananier dispose d'une canopée bien développée qui permet de dissiper une part importante de l'énergie gravitaire des gouttes de pluie. Lors de l'élagage (feuilles non fonctionnelles) et à la récolte (feuilles et pseudo-tronc), les résidus laissés au champ (auto-paillage) et placés entre les lignes de plantation contribuent efficacement à accroître la rétention d'eau en surface du sol et à réduire le volume du ruissellement ([Rishirumuhirwa, 1993](#); [Kham souk, 2001](#)). Cependant, pour préparer le lit de semis des cultures annuelles associées au bananier, les résidus des bananiers sont écartés de la parcelle pour faciliter le labour à la houe manuelle (trident). Dans le cas du haricot, ce labour à lieu deux fois par an. Les résidus exportés servent de paillis pour le caféier (Rwanda et Burundi) ou pour les cultures annuelles cultivées dans d'autres parcelles (par exemple sous manioc à Kabamba au Sud-Kivu) ([Kirkby et Ngendahayo, 1985](#); [CIALCA, 2007a](#)).

Compte tenu de la faible utilisation des engrais minéraux par les agriculteurs (5% sur 2506 fermiers enquêtés, et en très faible quantité sous cultures annuelles; [Bouwmeester et al. 2009](#) ; [CIALCA, 2007b](#)), l'exportation

de résidus de bananiers pourrait entraîner la baisse de la teneur en éléments nutritifs et en matière organique du sol. Cette dernière joue plusieurs fonctions essentielles : source d'énergie et substrat nécessaire pour l'activité biologique du sol qui affecte l'agrégation du sol et l'infiltration d'eau (Franzluebbers, 2002), facteur de biodiversité de ces mêmes micro-organismes, stabilisation de la structure du sol. L'agrégation du sol est importante pour (i) faciliter l'infiltration d'eau; (ii) fournir un habitat adéquat aux organismes du sol et faciliter la pénétration des racines; (iii) assurer un bon drainage et ainsi fournir suffisamment d'oxygène aux racines des plantes et aux organismes du sol; et (iv) prévenir l'érosion des sols. L'infiltration est une propriété importante du sol qui contrôle le lessivage, le ruissellement et la réserve en eau utile du sol (Franzluebbers, 2002). Sur les terrains à pente raide qui caractérisent la zone d'étude, la pratique du labour accompagné de l'exportation des résidus des cultures pourrait donc engendrer une dégradation de la qualité du sol, en particulier à cause de la désagrégation du sol par le labour (Zhou et al., 2007; Carter, 2002), de la diminution de la teneur en matière organique (exportation et minéralisation accélérée ; Franzluebbers, 2002; Balesdent et al., 2000; Lepecki et Barbec, 1997) et de la perte en terres par érosion suite à l'absence de couverture végétale permanente du sol par les résidus de culture (Rishirimuhirwa, 1997 ; Araya, 2005).

Face à ce problème, la culture sans labour avec paillis (semis direct) serait une alternative en vue de remédier concomitamment à la dégradation de la qualité du sol. Outre les avantages sur le plan économique, du temps de travail et du besoin en énergie, les techniques de semis direct (sans labour) sont une démarche agronomique remise au goût du jour relativement récemment et qui vise à maintenir voire restaurer la fertilité naturelle du

sol en favorisant les processus naturels de régénération du sol plutôt qu'en s'appuyant sur des interventions externes ([Mrabet et al., 2004](#); [Horwath et al., 2008](#)). Cette amélioration de la fertilité du sol s'appuie sur une re-dynamisation organique et biologique des sols et une re-structuration de sa partie superficielle qui, au lieu d'être sensible à la dégradation, deviendra un support pour une agriculture durable ([Mrabet et al., 2004](#)).

En culture bananière, les effets bénéfiques des pratiques culturales sans labour avec paillis ont été rapportés par plusieurs auteurs. [Araya et De Waele \(2005\)](#); [Rishirumuhirwa \(1993\)](#) et [McIntyre et al. \(2000\)](#) ont indiqué un accroissement de la teneur en matière organique et des éléments minéraux des sols en conditions de paillis. [Robinson et al. \(1989\)](#) et [Bhattacharyya et Madhava \(1986\)](#) ont observé une réduction et une stabilisation de la température du sol sur les 15 premiers centimètres de profondeur sur parcelles sous paillage. [Dorel et al. \(2010\)](#) ont observé un accroissement de l'activité et la diversité biologique du sol en conditions de non labour. [McIntyre et al. \(2000\)](#) et [Blomme \(2000\)](#) ont rapporté un accroissement de la croissance et du développement racinaires dans les horizons de surface des parcelles en non labour et paillées. [Rishirumuhirwa \(1993\)](#) et [McIntyre et al. \(2000\)](#) ont observé un accroissement du taux d'infiltration. [Rishirumuhirwa \(1997, 1993\)](#), [Lufafa et al. \(2003\)](#) et [KhamSouk \(2001\)](#) ont rapporté une baisse de l'érosion et du ruissellement. Toutefois, toutes ces études ont été conduites exclusivement en monoculture bananière. Par contre, dans les associations bananier-cultures annuelles qui constituent le système bananier le plus courant dans la zone d'étude (Sud-Kivu montagneux, Rwanda et Burundi), peu de connaissances existent sur l'impact des pratiques culturales (travail du sol, paillage) sur la conservation des sols. Pour combler cette lacune et dans la perspective de

la mise en place d'une association bananier-haricot sans labour, l'impact sur la conservation des sols de pratiques culturales alternatives au travail du sol avec exportation de résidus a été étudié.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'impact de pratiques culturales sans labour avec paillage sur la conservation du sol. Cette évaluation porte sur la qualité physique du sol, notamment la stabilité structurale du sol, l'infiltration et le contrôle de l'érosion. Des mesures d'hydrophobicité sont par ailleurs faites dans la mesure où elles ont semblé être étroitement liées aux processus d'infiltration et d'érosion.

5.2 Matériel et méthodes

Cette étude a été conduite sur trois sites d'essai en milieu contrôlé (essais en station) : le site de Mulungu et Walungu au Sud-Kivu en RD Congo et le site de Rubona au Rwanda. La localisation, les caractéristiques climatiques et pédologiques, le dispositif expérimental et la conduite des essais sont les mêmes que ceux décrits aux § 2.2.1 et 2.2.2 du chapitre 2.

Les mesures faites pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur la conservation du sol peuvent être subdivisées en trois groupes : (i) les mesures de stabilité structurale du sol, (ii) les mesures d'infiltration et d'hydrophobicité, (iii) les mesures de ruissellement et d'érosion.

5.2.1 Stabilité structurale du sol

La stabilité structurale a été déterminée suivant la méthode de [Le Bissonnais et Le Souder \(1995\)](#). Sur les sites de Mulungu et Walungu, les mesures ont été réalisées d'une part en saison sèche (août 2010), 24 mois après la mise en place des traitements, et d'autre part lors de la saison des pluies subséquente (décembre 2010). Sur le site de Rubona, les mesures ont été réalisées 2 fois en saison des pluies, en mars 2010 (12 mois après la mise en place des traitements) et 9 mois plus tard (décembre 2010). Dans tous les sites, une saison culturale de haricot a été organisée entre les deux échantillonnages du sol incluant le travail du sol (labour) dans les parcelles du traitement T0.

Les échantillons de sols ont été prélevés sur 0-5 cm de profondeur à différents points de la parcelle élémentaire. Les agrégats de 2 à 4 mm ont été obtenus par tamisage puis séchés à l'air libre. Trois traitements ont été appliqués aux agrégats : (i) l'humectation rapide (hr), (ii) l'humectation lente (hl), (iii) la désagrégation mécanique (dm). Quatre (Rubona) à cinq (Mulungu et Walungu) grammes d'agrégats du sol (poids initial) ont été utilisés pour chaque test.

- Le test d'humectation rapide par immersion consiste à reproduire l'effet de mouillabilité brutale et de désagrégation du sol sous pluie intense, après une période sèche. Les agrégats du sol sont brusquement immergés dans un bécher contenant 50 ml d'eau déminéralisée pendant 10 minutes. L'excès d'eau est évacué (pipetage) et les agrégats sont transférés sur un tamis de 50 μ m immergé dans l'éthanol en s'aidant d'une pissette d'éthanol.
- Le test d'humectation lente reproduit le comportement du sol sous une pluie modérée en période humide. Les agrégats du sol sont disposés sur un papier 'filtre' de deux épaisseurs posé sur une table

à succion avec une succion de -3 cm pendant une heure puis transférés sur un tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol en s'aidant d'une pissette d'éthanol.

- Le test de désagrégation mécanique permet de tester la cohésion du sol à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Les agrégats du sol sont immergés dans l'alcool (solvant non polaire et miscible à l'eau) pendant 30 minutes. L'excès d'éthanol est évacué et les agrégats sont transférés dans un flacon de 250 ml contenant 50 ml d'eau déminéralisée en s'aidant d'une pissette d'eau déminéralisée. Le niveau d'eau est ajusté à 250 ml en versant avec la pissette sur les bords du flacon. L'ensemble est alors soumis à 20 retournements (10 aller-retour) puis laisser à décanter pendant 30 minutes. L'excès d'eau est évacué (pipetage) et les agrégats sont transférés sur un tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol en s'aidant d'une pissette d'éthanol.

Pour tous les tests, les agrégats transférés sur tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol sont soumis à un mouvement hélicoïdal (appareil de Hénin) pour opérer une première séparation. La fraction supérieure à 50 μm est récupérée dans une coupelle (en s'aidant d'une pissette d'éthanol) puis séchée à l'étuve ventilée (105°C) pendant 48 heures au moins. Après le séchage à l'étuve, la fraction >50 μm est passée sur une colonne de 6 tamis de 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 250 μm , 100 μm et 50 μm . La fraction <50 μm est obtenue par déduction par rapport au poids initial et on peut ensuite calculer le % de chaque fraction par rapport au poids initial. Pour chacun des trois tests de stabilité structurale, huit à douze répétitions ont été faites par traitement. Le résultat de cette mesure est exprimé sous

forme du diamètre moyen pondéral ('Mean Weight Diameter', MWD) dont la formule est :

$$MWD = \sum_n x_i \cdot w_i \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Avec :

n : le nombre de classes d'agrégats

x_i : le diamètre moyen des mailles entre deux tamis consécutifs

w_i : la fraction pondérale de chaque classe par rapport au poids total

Pour chaque test de stabilité, le diamètre moyen pondéral (MWD) a été calculé séparément et est désigné MWD_{hr} , MWD_{hl} et MWD_{dm} , respectivement. Le MWD moyen (MWD_{moyen}) correspond à la moyenne des trois tests. Sur base de la classification de [Le Bissonais et Le Souder \(1995\)](#) (Tableau 5.1), plus grand est le MWD des agrégats après les tests de stabilité, plus stable est la structure du sol concerné.

Tableau 5.1 Classe de stabilité, battance et érosion en fonction du diamètre moyen pondéral (MWD) après désagrégation (d'après [Le Bissonais et Le Souder, 1995](#)).

MWD (μm)	Stabilité	Battance	Ruissellement et Erosion
0 – 400	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
400 – 800	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toutes situations
800 - 1300	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres

			climatiques et topographiques
1300 – 2000	Stable	Occasionnelle	Risque limité
>2000	Très stable	Très rare	Risque très faible

5.2.2 Mesures d'infiltration

Les mesures d'infiltration ont été faites au moyen d'un infiltromètre à disque de la firme SMS (<http://www.soilmeasurement.com>). Dans chaque parcelle élémentaire, deux mesures ont été effectuées, soit huit répétitions par traitement. Avant la mesure, les résidus de culture, le mulch et une éventuelle croûte superficielle du sol ont été délicatement ôtés au moyen d'un couteau. L'enlèvement de la croûte superficielle se justifie par le fait que l'interprétation des mesures d'infiltromètre à disque se base sur l'hypothèse d'un sol homogène, incompatible avec la présence d'une croûte superficielle. Un anneau métallique de 25 cm de diamètre a été posé à l'endroit de mesure puis une fine couche de sable fin a été soigneusement étalée à l'intérieur de l'anneau dans le but d'éliminer les aspérités de surface et d'assurer un bon contact entre le sol et la membrane de l'infiltromètre. En vue de minimiser l'influence du sable sur le taux d'infiltration du sol, le sable a été pré-humidifié à l'aide d'une pissette à jet fin. Quatre suctions ont été successivement appliquées pour chaque mesure: -15, -10, -6 et -3 cm. Pour chaque succion appliquée, l'évolution du niveau d'eau dans la tour réservoir en fonction du temps (minute) a été mesurée régulièrement jusqu'à l'obtention d'un flux stable et constant (flux en régime permanent). Une mesure a été effectuée en mars 2010 au site de Rubona tandis que deux mesures ont été effectuées aux sites de Mulungu et Walungu (saison sèche et saison des pluies).

Pour chaque succion appliquée, la densité de flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol a été calculée suivant la formule de [Wooding \(1968\)](#) qui donne une solution approchée au calcul du flux en régime permanent à partir d'un disque de rayon r (cm) (Eq. 5.2).

$$Q(h_0) = 4r\phi_t + \pi r^2 K(h_0) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$\text{avec } \phi_t = \int_{h_i}^{h_0} K(h_0) dh \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$Q(h_0)$: la densité de flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol (cm^3/h)

ϕ_t : le potentiel de flux matriciel (cm^2/h)

h_0 : la succion imposée par le disque (cm)

h_i : la succion initiale de l'eau dans le sol (cm)

$K(h_0)$: la conductivité hydraulique à la succion h_0 (cm/h)

r : rayon de la base de l'infiltromètre (= 10,4 cm)

Cette équation est soumise à deux conditions d'application : (i) le sol est considéré comme un milieu semi-infini (limité uniquement par sa surface), homogène et isotrope ; (ii) le potentiel initial h_i de l'eau dans le sol est constant dans tout le sol et tel que $K(h_i) \ll K(h_0)$. De plus, afin de trouver une solution analytique à l'équation 5.3, on fait l'hypothèse que la relation $K(h)$ est de type exponentielle ([Gardner, 1958](#)).

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (\text{Eq. 5.4})$$

avec K_s : la conductivité hydraulique en milieu saturé (cm/h).

α : constante caractéristique du sol (cm^{-1}).

Cette dernière équation permet de linéariser l'équation d'infiltration en simplifiant l'expression du potentiel de flux matriciel :

Si $K(h_i)$ est négligeable devant $K(h_0)$ (hypothèse 2), on obtient finalement :

$$\phi_t = \frac{K(h_0)}{\alpha} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

En combinant l'équation 5.2 avec les équations 5.4 et 5.5, on obtient:

$$Q(h_0) = \left(\frac{4r}{\alpha} + \pi r^2 \right) K_s \exp(\alpha h_0) \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Sous forme logarithmique, l'équation 5.6 s'écrit :

$$\ln(Q(h_0)) = \ln \left[K_s \left[\pi r^2 + \frac{4r}{\alpha} \right] \right] + (\alpha h_0) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

D'après l'équation 5.7, on voit que pour un rayon de disque r et un potentiel d'infiltration h_0 donnés, le flux d'infiltration ne dépend que de deux paramètres : la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et le paramètre α . D'où l'idée d'utiliser au minimum deux mesures de $Q(h_0)$ réalisées au même endroit à deux valeurs de h_0 différentes pour en déduire les deux inconnues K_s et α . L'approche multipotentiel ([Ankeny et al., 1991](#)) a été appliquée pour déduire, au moyen de la régression linéaire (Logsdon et Jaynes, 1993 cités par [Coquet et al., 2000](#)) à partir des couples de mesures $\ln Q(h_0)$ et h_0 , le K_s et le paramètre α . Ces deux paramètres (K_s : se déduit de l'ordonnée à l'origine, et α = pente de la droite passant par les

deux points) permettent ensuite de calculer la conductivité hydraulique à différentes succions ($K(h)$) à partir du modèle de [Gardner \(1958\)](#) (Eq. 5.4). Des quatre succions successivement appliquées pour chaque mesure d'infiltration (-15 (h_j), -10 (h_k), -6 (h_l) et -3 (h_m) cm), trois couples de mesures (intervalles de mesure) $\ln Q(h_0)$ et h_0 ont été déterminés : -15 et -10 cm (-12,5 cm, désignée par l'indice '-12,5'), -10 et -6 cm (désignée par l'indice '-8') et -6 et -3 cm (désignée par l'indice '-4,5'). Ainsi, pour chacun de trois intervalles de mesure α est considéré constant.

5.2.3 Hydrophobicité

Lors des mesures d'infiltration en saison sèche, de très faibles valeurs de densité de flux en régime permanent à la surface du sol ont été observées sous traitements T3 et T4 (mulch externe). Afin de vérifier si ceci pouvait être lié à une hydrophobicité du sol suite aux apports de mulch, nous avons entrepris de mesurer le degré d'hydrophobicité de la surface du sol à l'endroit de mesure. L'hydrophobicité a été mesurée *in situ* suivant la méthode de la mesure du temps de pénétration d'une goutte d'eau dans un agrégat ('Water drop penetration time' test, WDPT test ; [Wallis et Horne, 1992](#)). Ce test consiste à placer une goutte d'eau sur des agrégats individuels du sol (3-5 mm) et à mesurer le temps requis pour sa pénétration complète. Toutefois, pour cette étude, la goutte d'eau a été appliquée directement à la surface du sol. En pratique, cela consistait à laisser tomber, à une hauteur de 20 cm du sol, une goutte d'eau de 0,07 g et à mesurer, au moyen d'un chronomètre, le temps nécessaire pour son infiltration complète. Dans les parcelles T1, T2 et T3, le mulch était dégagé à la main et la litière délicatement nettoyé au moyen d'une brosse avant la mesure. Dans chaque parcelle élémentaire, quatre répétitions de cinq

gouttes chacune ont été effectuées. Tout près du point de mesure, un échantillon du sol (0-2,5 cm) a été prélevé à différents endroits pour la détermination de la teneur en eau gravimétrique. Le pH et la teneur en matière organique du sol (0-10 cm) ont été également déterminés. Cette mesure a été effectuée uniquement aux sites de Mulungu et Walungu, aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies. Les résultats de cette mesure ont été exprimés sous forme de la médiane du temps requis pour une pénétration complète de la goutte d'eau.

5.2.4 Ruissellement et érosion

Les mesures de ruissellement et de quantité de sédiments érodés ont été faites au moyen d'un simulateur de pluie de type Eijkelkamp Agrisearch Equipment (LUW, 6987 ZG Giesbeek, Netherlands). Ce simulateur de pluie génère une pluie d'une intensité de 375 ml/min (360 mm/h) sur une surface de contrôle de 0,0625 m² et d'une pente maximale de 40%. La forte intensité de pluie générée par ce simulateur de pluie a été choisie par le fabricant dans le but de compenser la courte distance de chutes des gouttes de pluies (0,4 m en moyenne) et la faible énergie cinétique du volume spécifique résultant de la pluie générée. Dans ces conditions, l'application d'une forte intensité de pluie permet d'atteindre une énergie cinétique temporelle spécifique similaire à celle des pluies naturelles (Salles et al., 2002 cités par [Martin et al., 2010](#)).

En dépit des soins apportés à la régularité des simulations (maintien du simulateur suivant la même position, calibrage de l'intensité de pluie après 4 mesures en vue de minimiser l'effet de la température ambiante sur la viscosité de l'eau et par conséquent l'intensité de la pluie simulée), les

volumes d'eau tombés sur les parcelles variaient quelque peu d'une simulation à l'autre. L'intensité moyenne de pluie (moyenne $\pm$ écart-type) était de 394 ± 14 (saison sèche) et 376 ± 15 mm/h (saison des pluies) au site de Mulungu, 376 ± 17 (saison sèche) et 381 ± 22 mm/h (saison des pluies) au site de Walungu et 349 ± 22 mm/h au site de Rubona.

Dans les parcelles en non labour (T1, T2 et T3), l'endroit choisi pour la mesure était dégagé des gros résidus de bananier et de paillage recouvrant sa surface et pouvant empêcher l'eau d'atteindre le sol lors de la simulation de pluie. Après trois minutes de pluie simulée, l'eau ruisselée et les sédiments entraînés ont été récoltés dans un pot placé du côté le plus bas du point de mesure. Le volume d'eau ruisselée et la quantité de sédiments entraînés ont été déterminés après séchage à l'étuve à une température de 105 °C. Nous avons supposé que 1 g d'eau ruisselée équivaut à 1 ml de volume d'eau ruisselée. Connaissant le volume d'eau ruisselée et la masse de sédiments entraînés, la concentration en sédiments du ruissellement (masse de sédiment par unité de volume d'eau ruisselée) a été calculée. Le taux d'infiltration a été calculé de la manière suivante : (volume d'eau déchargée - volume d'eau ruisselé) / durée de la pluie simulée. Au site de Rubona, deux à trois mesures d'infiltration ont été faites par parcelle élémentaire, soit huit à douze mesures par traitement en mars 2010 uniquement. Aux sites de Mulungu et Walungu, deux répétitions ont été faites par parcelle élémentaire, soit huit mesures par traitement, aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies. A chaque point de mesure, la pente topographique au point de mesure (surface de contrôle du simulateur de pluie) a été déterminée sur base de la différence de hauteur entre les deux pieds avant et arrière du cadre métallique sur lequel le simulateur est posé pendant la mesure.

5.2.5 Analyse statistique

Les données des paramètres observés ont été soumises à l'analyse de la variance (ANOVA) au moyen de Logiciel SAS 9.2 Enterprise Guide 4.2. Les données de conductivité hydraulique ont été transformées (transformation logarithmique) avant l'analyse statistique. Les moyennes significativement différentes ont été séparées au moyen du test de Student-Newman-Keuls. Le test non paramétrique a été appliqué pour les données n'ayant pas satisfait aux hypothèses de l'ANOVA classique. Dans ce cas, le test de Kruskal-Wallis a été appliqué pour tester l'effet des traitements et les moyennes significativement différentes ont été séparées au moyen du test de Wilcoxon. Au niveau d'un site, la régression linéaire a été appliquée pour estimer la relation entre la teneur en carbone organique et le diamètre moyen pondéral (MWD), et celle entre le ruissellement et la masse de sédiments entraînés. Pour évaluer la relation entre les différentes propriétés des sols des sites, l'analyse de corrélations et l'analyse en composante principale (ACP) ont été faites sur l'ensemble des données de sites et saisons de mesure.

5.3 Résultats

5.3.1 Mesures d'hydrophobicité

Au site de Mulungu, le tableau 5.2 montre qu'en saison sèche, le temps d'infiltration des gouttes d'eau croît significativement du traitement T0 jusqu'au traitement T3. Le temps d'infiltration est nul pour les parcelles labourées (T0) alors qu'il atteint 110 secondes pour T3. En saison des pluies,

les traitements appliqués n'ont pas eu d'effet significatif sur le temps d'infiltration des gouttes d'eau. Les durées d'infiltration en saison des pluies sont significativement inférieures à celles observées en saison sèche pour le T1 et T3, alors que la durée d'infiltration a significativement cru pour T0 (Tableau 5.3).

Au site de Walungu, le tableau 5.2 montre qu'en saison sèche, le temps d'infiltration des gouttes est beaucoup plus court qu'à Mulungu et varie de 0 à 5 secondes selon le traitement. Un effet traitement hautement significatif est observé, les valeurs les plus élevées étant observées sous mulch de T3 alors que la durée est nulle sous T0. En saison des pluies, les moyennes des trois traitements paillés (T1, T2 et T3) ne sont pas significativement différentes entre elles mais se différencient significativement de T0. Les durées d'infiltration en saison des pluies sont significativement supérieures à celles observées en saison sèche pour T1 (Tableau 5.3).

D'une manière générale, on observe qu'en saison sèche, les gouttes d'eau s'infiltrant immédiatement sur les parcelles labourées (T0) des deux sites et que le temps moyen d'infiltration des gouttes d'eau dans les traitements en non labour est nettement plus long au site de Mulungu (Tableau 5.2). En saison des pluies, quels que soient les traitements et le site, le temps moyen pour l'infiltration d'une goutte d'eau est généralement du même ordre de grandeur, voire légèrement plus faible, à Walungu qu'à Mulungu.

Tableau 5.2 Temps (secondes) nécessaire pour l'infiltration d'une goutte d'eau à la surface du sol aux sites de Mulungu (M) et Walungu (W). Valeurs = médiane $\pm$ erreur standard.

Site	Saison	T0	T1	T2	T3	P-valeur
M	Sèche	0a	16,0±3,5b	25,8 ±7,6b	110,0 ±34,2c	**
	Des pluies	3,9 ±0,4a	6,4 ±1,2a	7,0 ±0,1a	6,9 ±1,0a	NS
W	Sèche	0a	0a	1,6 ±0,2b	4,8 ±1,0c	**
	Des pluies	1,9 ±1,2a	5,0 ±2,3b	7,8 ±2,9b	8,1 ±2,0b	**

La comparaison entre les traitements est faite horizontalement. NS = Non significatif, ** = $P < 0,01$; *** = $P < 0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Tableau 5.3 P-valeurs des tests de comparaisons des moyennes du temps d'infiltration des gouttes d'eau en saison sèche et saison des pluies, en fonction de sites et des traitements.

Site	T0	T1	T2	T3
Mulungu	*	*	NS	*
Walungu	NS	*	NS	NS

NS = Non significatif, * = $P < 0,05$.

Le tableau 5.4 présente la teneur en eau gravimétrique (%), le pH et la teneur en matière organique en fonction des sites et des traitements. Ce tableau montre que les valeurs de ces trois paramètres sont plus élevées à Mulungu par rapport à Walungu. Bien que non significativement différente, la teneur en eau gravimétrique du sol est plus faible sous T0 comparé aux 3 autres traitements, notamment en saison sèche où la teneur en eau gravimétrique sous T0 est réduite de moitié au site de Mulungu. Le pH et la teneur en matière organique varient très faiblement entre les différents traitements.

Tableau 5.4. Teneur en eau gravimétrique (0-2,5 cm), pH (0-10 cm) et teneur en matière organique MO (0-10 cm ; Corg x 1,72) du sol aux sites de Mulungu et Walungu (valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard).

Paramètres	Site	T0	T1	T2	T3	P-valeur ³
Teneur en eau du sol (%)	M ¹	16 $\pm$ 3	35 $\pm$ 4	35 $\pm$ 6	30 $\pm$ 2	NS
	W ¹	NM	NM	NM	NM	NM
	M ²	25 $\pm$ 4	39 $\pm$ 4	34 $\pm$ 2	34 $\pm$ 7	NS
	W ²	22 $\pm$ 3	25 $\pm$ 4	26 $\pm$ 6	31 $\pm$ 4	NS
pH	M ²	6,2	6,3	6,1	6,1	N/A
	W ²	5,9	5,9	5,9	5,8	N/A
MO (%)	M ²	8,6	8,5	8,2	8,8	N/A
	W ²	5,0	5,0	5,2	5,4	N/A

M¹ : Mulungu saison sèche, M² : Mulungu saison des pluies, W¹ : Walungu saison sèche, W² : Walungu saison des pluies. 3. P-valeur effet traitement. NS = non significatif. NM : non mesuré. N/A = non applicable (pour chaque traitement, l'analyse chimique a été faite à partir d'un échantillon composite).

5.3.2 Stabilité structurale du sol

Site de Mulungu

Tableau 5.5 Stabilité structurale exprimée sous forme de MWD (mm) suite aux tests de [Le Bissonnais et Le Souder \(1995\)](#) appliqué aux échantillons de sols prélevés en saison sèche et en saison des pluies au site de Mulungu. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Saison	Test ¹	T0	T1	T2	T3	P-valeur
sèche	MWD _{hr}	0,97	1,11	1,25	1,32	*

		±0,10a	±0,05ab	±0,11b	±0,04b	
		1,78	1,90	1,95	1,95	
	MWD _{hl}	±0,07	±0,06	±0,06	±0,01	NS
		1,79	1,83	1,84	1,89	
	MWD _{dm}	±0,09	±0,03	±0,04	±0,08	NS
		0,86	1,19	1,25	1,31	
	MWD _{hr}	±0,06a	±0,09b	±0,07b	±0,08b	**
Des		1,70	2,35	2,30	2,29	
pluies	MWD _{hl}	±0,05a	±0,08b	±0,05b	±0,03b	***
		1,80	2,29	2,28	2,24	
	MWD _{dm}	±0,07a	±0,04b	±0,05b	±0,05b	***

1. hr=humectation rapide, hl=humectation lente, dm=désagrégation mécanique. Pour chaque test de stabilité, la comparaison entre les traitements est faite horizontalement. NS= non significatif, *= $P<0.05$, **= $P<0,01$, ***= $P<0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha=0,05$.

Le tableau 5.5 montre que l'humectation rapide conduit à une désagrégation nettement plus poussée que les deux autres tests, quelle que soit la saison. Au sein d'une même saison, les valeurs du MWD après humectation lente et désagrégation mécanique sont comparables.

En saison sèche, le MWD après humectation rapide est significativement plus faible en labour (T0) comparé aux deux traitements avec mulch externe (T2 et T3), le traitement T1 sans mulch externe ayant une valeur intermédiaire. Il n'y a pas d'effet des traitements sur la désagrégation par humectation lente ou mécanique. En saison des pluies, le MWD sur parcelles de T0 est significativement plus faible que pour les 3 autres traitements (T1, T2 et T3), quel que soit le test.

La saison n'affecte pas le MWD sous T0, quel que soit le test. Par contre, pour les parcelles en non labour, il y a un effet saisonnier marqué, mais uniquement après humectation lente ou désagrégation mécanique. Pour ces deux tests, le MWD est plus élevé en saison des pluies qu'en saison sèche.

Site de Walungu

Tableau 5.6 Stabilité structurales exprimée sous forme de MWD (mm) suite aux tests de [Le Bissonnais et le Souder \(1995\)](#) appliqué aux échantillons de sols prélevés en saison sèche et en saison des pluies au site de Walungu. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Saison	Test ¹	T0	T1	T2	T3	P-valeur
Sèche		0,81	0,88	1,15	1,20	
	MWD _{hr}	$\pm 0,04a$	$\pm 0,06a$	$\pm 0,05b$	$\pm 0,04b$	***
		1,46	1,82	2,13	2,24	
	MWD _{hl}	$\pm 0,08a$	$\pm 0,06b$	$\pm 0,07c$	$\pm 0,04c$	***
		1,28	1,76	2,14	2,17	
	MWD _{dm}	$\pm 0,05a$	$\pm 0,08b$	$\pm 0,11c$	$\pm 0,04c$	****
Des pluies		0,68	0,81	1,04	1,02	
	MWD _{hr}	$\pm 0,02a$	$\pm 0,04a$	$\pm 0,09b$	$\pm 0,06b$	***
		1,20	1,55	1,87 $\pm$	1,88 $\pm$	
	MWD _{hl}	$\pm 0,04a$	$\pm 0,07b$	0,11c	0,08c	***
		1,43	1,71 $\pm$	2,00	2,05	
	MWD _{dm}	$\pm 0,04a$	0,04b	$\pm 0,09c$	$\pm 0,08c$	***

1. hr=humectation rapide, hl=humectation lente, dm=désagrégation mécanique. Pour chaque test de stabilité, la comparaison entre les traitements est faite horizontalement. ***= $P < 0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Le tableau 5.6 montre que, tout comme à Mulungu, l'humectation rapide conduit à une désagrégation nettement plus poussée que les deux autres tests, quelle que soit la saison. Pour les deux saisons (saison sèche et des pluies), on observe une augmentation des valeurs de MWD depuis le traitement T0 jusqu'aux traitements non labour paillés avec de la paille externe (T2 et T3). Les deux traitements avec pailles externes (T2 et T3) présentent des valeurs comparables entre elles mais toujours significativement supérieures aux traitements T0 et T1. A l'exception du test de désagrégation mécanique en labour (T0), on observe une tendance à une légère réduction du MWD en saison des pluies par rapport à la saison sèche, sous tous les traitements.

Site de Rubona

Tableau 5.7 Stabilité structurales exprimée sous forme de MWD (mm) suite aux tests de [Le Bissonnais et le Souder \(1995\)](#) appliqué aux échantillons de sols prélevés en saison des pluies au site de Rubona. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Saison	Test ¹	T0	T1	T2	T3	P-valeur
Mars 2010	MWD _{hr}	0,54	0,59	0,63	0,59	*
		$\pm 0,01a$	$\pm 0,02ab$	$\pm 0,02b$	$\pm 0,01ab$	
		2,13	2,38	2,42	2,41	
	MWD _{hl}	$\pm 0,07a$	$\pm 0,07b$	$\pm 0,05b$	$\pm 0,08b$	*
		1,12	1,31	1,19	1,26	
	MWD _{dm}	$\pm 0,04a$	$\pm 0,10a$	$\pm 0,07a$	$\pm 0,11a$	NS
Décembre 2010	MWD _{hr}	0,48	0,49	0,60	0,56	NS
		$\pm 0,02a$	$\pm 0,04a$	$\pm 0,09a$	$\pm 0,06a$	
		1,07	1,51	1,88 $\pm$	1,76 $\pm$	
	MWD _{hl}	$\pm 0,04a$	$\pm 0,02b$	0,05b	0,03b	***
	MWD _{dm}	0,88	1,10 $\pm$	1,39	1,11	***

±0,07a 0,05ab ±0,11b ±0,09ab

1. hr=humectation rapide, hl=humectation lente, dm=désagrégation mécanique. Pour chaque test de stabilité, la comparaison entre les traitements est faite horizontalement. NS= Non significatif, * = $P < 0.05$, *** = $P < 0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha=0,05$.

Le tableau 5.7 montre que, tout comme pour les deux sites précédents, la désagrégation est la plus poussée après humectation rapide. Sur ce site cependant, la désagrégation mécanique conduit à des valeurs de MWD intermédiaires entre humectation lente et rapide. Ceci s'applique pour les deux périodes de mesure.

En mars 2010, l'effet des traitements sur le MWD varie selon le test appliqué, mais globalement les valeurs de MWD les plus faibles sont toujours observées sous T0. Au test d'humectation rapide, le diamètre moyen pondéral sous traitement T2 est significativement supérieur à celui du traitement T0, les deux autres traitements ayant des valeurs intermédiaires. Au test d'humectation lente, les 3 traitements en non labour (T1, T2 et T3) ont un diamètre moyen pondéral significativement supérieur à celui du traitement T0. La désagrégation mécanique ne permet pas de différencier les traitements.

En décembre 2010, on observe comme en mars que les valeurs de MWD les plus faibles correspondent au traitement T0. Comme en mars également, les 3 traitements en non labour et paillées ont un MWD après humectation lente significativement supérieur à celui du traitement T0. Au test d'humectation rapide aucun effet traitement significatif n'est observé. Après désagrégation mécanique, le MWD est significativement supérieur

sous traitement T2 par rapport au traitement T0, les deux autres traitements ayant des valeurs intermédiaires.

Entre mars et décembre 2010, on observe une réduction importante du MWD pour le test d'humectation lente, alors que le test d'humectation rapide montre une réduction de faible amplitude. Suite au test de désagrégation mécanique, le MWD décroît de mars à décembre pour tous les traitements sauf sous traitement T2 où il augmente.

Diamètre moyen pondéral de trois tests de stabilité (MWD moyen)

La figure 5.1 présente la moyenne du MWD des trois tests (MWD moyen) pour les 3 sites. Les valeurs les plus élevées s'observent à Mulungu alors que les plus faibles s'observent généralement à Rubona. Quel que soient le site et la saison, les valeurs de MWD les plus faibles sont observées sur les parcelles de T0, labourées et non paillées. Aux sites de Mulungu (Figure 5.1M) et Walungu (Figure 5.1W), on observe une même évolution du MWD moyen en fonction des traitements pour les deux saisons. A Mulungu, les valeurs du MWD moyen sont cependant plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche pour les 3 traitements non labour (T1, T2 et T3), alors que l'inverse est vrai à Walungu. En labour (T0), l'effet saisonnier est absent. A Rubona (Figure 5.1R), on observe une diminution du MWD moyen sur la période de neuf mois séparant les deux mesures, cette diminution étant cependant la plus faible sous T2.

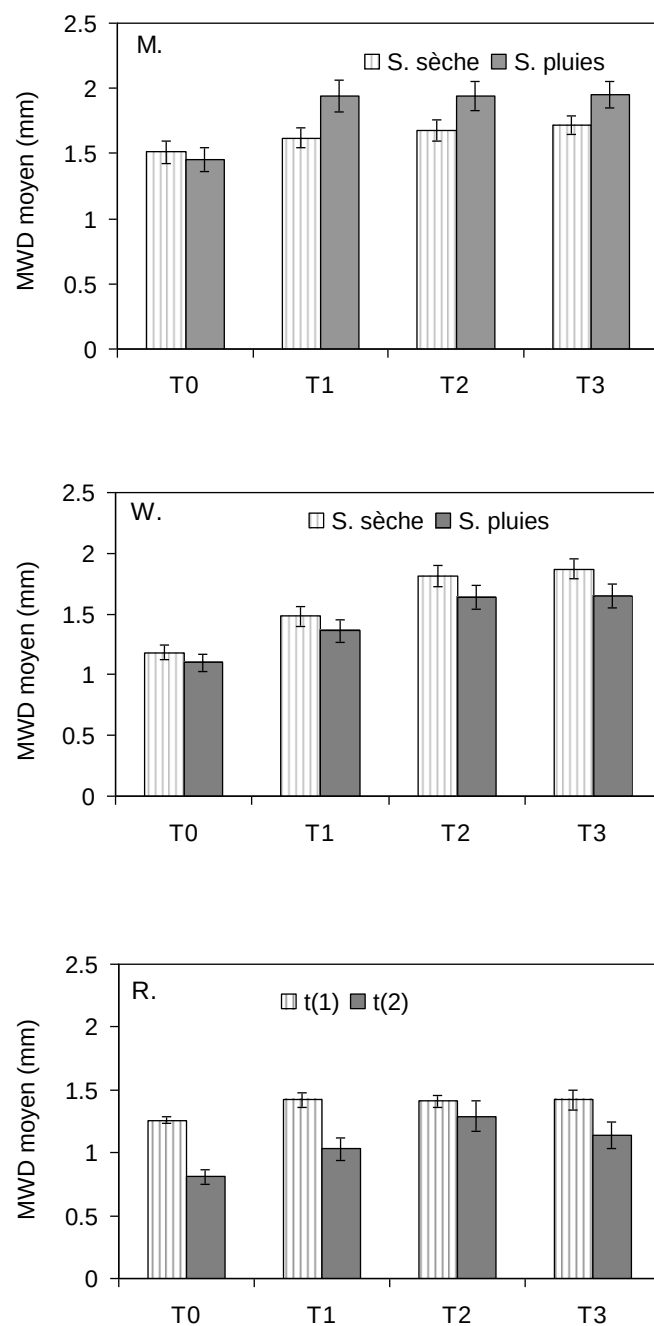


Figure 5.1. MWD moyen (mm) aux sites de Mulungu (M), Walungu (W) et Rubona (R). Barre d'erreur = erreur standard. S. sèche : saison sèche et S.

pluies : saison des pluies. t(1) : saison des pluies, mars 2010 et t(2) : saison des pluies, décembre 2010.

Relation entre les propriétés du sol et le diamètre moyen pondéral (MWD)

Plusieurs caractéristiques du sol sont susceptibles d’affecter la stabilité structurale, notamment la teneur en oxydes et hydroxydes de fer et aluminium, la teneur en matière organique, la texture, et les cations présents dans la solution du sol (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Le tableau 5.8 présente quelques propriétés des sols (0-10 cm) obtenus à partir des échantillons composites des sols des sites d’étude. Comparé à Mulungu et Walungu, le MWD moyen plus faible à Rubona semble attribuable à une plus faible teneur en carbone organique, en oxydes (Fe et Al), en argile et en cations divalents. Les valeurs plus élevées de MWD à Mulungu comparé à Walungu semble surtout s’expliquer par les plus fortes teneurs en Corg et cations divalents.

Tous sites et traitements confondus, la figure 5.2 montre que le MWD moyen augmente avec la teneur en carbone organique (MWD moyen, Y) ($Y = 0,1992 \times \text{Corg} + 0,8881$, $R^2 = 0,6528$, $P < 0,01$). A l’échelle du site, la teneur en carbone organique varie faiblement entre les différents traitements, ce qui ne permet pas de mettre en évidence une relation significative entre teneur en Corg et stabilité structurale ($\text{MWD}_{\text{moyen}}$, MWD_{hl} , MWD_{hr} , MWD_{dm}).

Tableau 5.8 Caractéristiques physiques et chimiques des sols de surface (0-10 cm) aux sites de Mulungu, Walungu et Rubona.

Caractéristiques des sols (0-10 cm)	Mulungu	Walungu	Rubona
--	---------	---------	--------

Carbone organique (%)	4,95	3,01	1,12
Argile (%)	48	71	25
Limon (%)	25	22	8
Sable (%)	27	8	67
Ca échangeable (cmol+/kg)	21,7	12,65	2,93
Mg échangeable (cmol+/kg)	4,86	5,78	0,74
K échangeable (cmol+/kg)	2,37	0,47	0,30
Na échangeable (cmol+/kg)	0,23	0,04	0,04
Al échangeable (cmol+/kg)	0,0	0,0	0,15
CEC pH 7	44,2	26,7	6,2
Saturation en bases (%)	66	71	65
pH _{H2O}	6,0	6,1	5,9
Fe _{dcb} (g/kg)	71,5	104,6	15,6
Al _{dcb} (g/kg)	15,0	8,70	2,70
MWDmoyen (mm) ¹	1,82±0,12	1,59±0,15	1,07±0,17

1. Moyenne de quatre traitements ($\pm$ erreur standard), mesures faites en saison des pluies (Walungu et Walungu) et au t2 à Rubona.

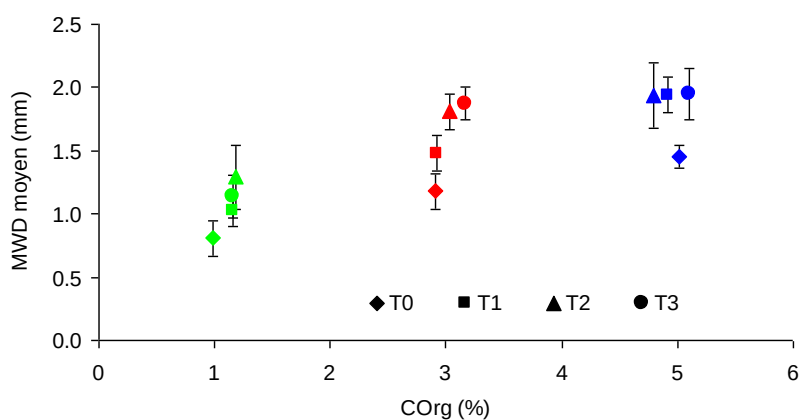


Figure 5.2. Relation entre la teneur en Corg et le MWD moyen. Mesures faites aux sites de Mulungu (saison des pluies) (bleu), Walungu (saison des pluies) (rouge) et Rubona (t2) (vert). Barre d'erreur = Ecart-type.

5.3.3 Mesures d'infiltration

Cette section présente les résultats obtenus au moyen de l'infiltromètre à disque. Deux paramètres sont présentés : le facteur α (pente de la droite de régression), et la conductivité hydraulique (conductivité hydraulique à saturation et à différentes suctions appliquées, désignées K_s et $K(h)$ respectivement). Pour chacun des paramètres susmentionnés, les résultats porteront sur les trois intervalles de mesure de succion (-3, -6 cm ; -6, -10 cm ; -10, -15 cm), sauf pour K_s qui est n'est déterminé qu'à partir de l'intervalle (-3, -6 cm). Les indices '-4,5', '-8' et '-12,5' sont utilisés pour désigner les valeurs relatives à ces trois intervalles de mesure.

Site de Mulungu

Tableau 5.9 Facteurs α de la courbe de conductivité hydraulique obtenus pour les trois intervalles de mesures de succion en fonction des traitements et des saisons au site de Mulungu. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur-standard.

Saison	Paramètres	T0	T1	T2	T3	P-valeur
Sèche	$\alpha_{-12,5}$ (cm ⁻¹)	0,12 $\pm$ 0,02	N/A	N/A	N/A	N/A
	α_{-8} (cm ⁻¹)	0,09 $\pm$ 0,01a	0,11 $\pm$ 0,01ab	0,13 $\pm$ 0,01b	N/A	*
	$\alpha_{-4,5}$ (cm ⁻¹)	0,09 $\pm$ 0,02	0,19 $\pm$ 0,03	0,13 $\pm$ 0,04	0,14 $\pm$ 0,04	NS
	$K_{s,-4,5}$ (cm/h)	3,03 $\pm$ 0,33a	2,10 $\pm$ 0,13b	1,14 $\pm$ 0,28c	0,50 $\pm$ 0,11c	**
Pluies	$\alpha_{-12,5}$ (cm ⁻¹)	0,08 $\pm$ 0,0a	0,13 $\pm$ 0,01b	N/A	0,15 $\pm$ 0,01c	***
	α_{-8} (cm ⁻¹)	0,13 $\pm$ 0,02	0,16 $\pm$ 0,02	0,18 $\pm$ 0,03	0,17 $\pm$ 0,03	NS
	$\alpha_{-4,5}$ (cm ⁻¹)	0,13 $\pm$ 0,01a	0,23 $\pm$ 0,02b	0,23 $\pm$ 0,02b	0,23 $\pm$ 0,02b	***
	$K_{s,-4,5}$ (cm/h)	2,48 $\pm$ 0,79	3,58 $\pm$ 1,32	2,75 $\pm$ 0,38	2,06 $\pm$ 0,25	NS
N/A : non applicable, NS : non significatif, * P<0,05, *** P<0,001.						

Le tableau 5.9 montre que les valeurs de α ont tendance à diminuer au fur et à mesure que la succion devient plus négative. Quelle que soit la saison, les valeurs de α ont également tendance à être plus faibles sous T0 que sous traitement non labour paillé. Bien qu'il y ait une tendance générale à l'augmentation de α en saison des pluies par rapport à la saison sèche, cette tendance est plus prononcée pour les traitements en non labour (T1, T2 et T3) comparés au traitement labour (T0).

En saison sèche, le $K_{s-4,5}$ s'accroît deux fois et demie à six fois sous T0 comparé aux traitements T2 et T3. Comme pour le $K_{s-4,5}$, pour toutes les succions appliquées, les valeurs de $K(h)$ les plus élevées sont observées sur les parcelles de T0 suivies de celles de T1 puis les traitements T2 et T3 (Figure 5.3a). Pour l'intervalle -15 et -10 cm, le calcul de $K(h)$ a été calculé uniquement sous T0, le facteur α étant nul ou négatif pour les trois autres traitements.

En saison des pluies (Figure 5.3b), quelle que soit la succion appliquée, il n'y a pas eu d'effet traitement tant pour le $K_{s-4,5}$ que pour le $K(h)$ à toutes les succions de mesure, bien que le traitement T0 a tendance à présenter des valeurs de $K(h)$ légèrement supérieure à celles des trois autres traitements aux succions les plus négatives.

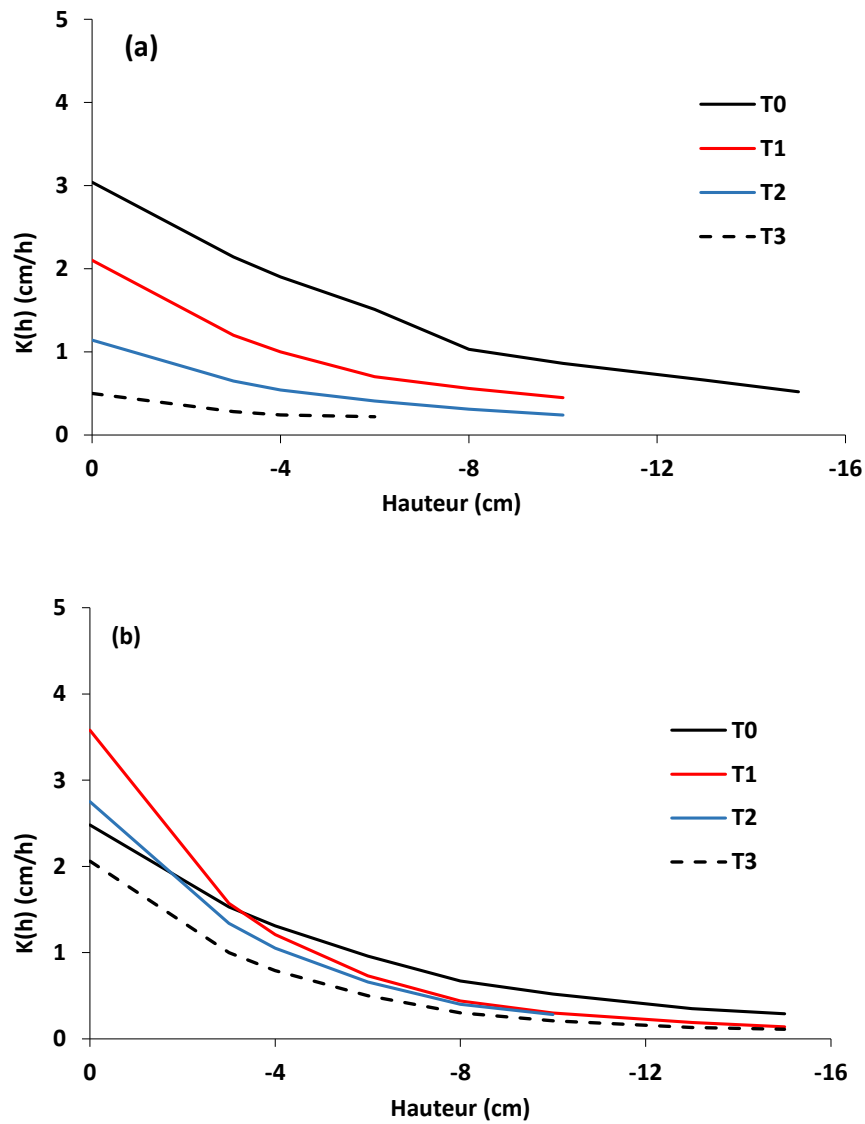


Figure 5.3. Conductivité hydraulique au site de Mulungu : (a) mesures faites en saison sèche et (b) mesures faites en saison des pluies. Les valeurs sont des moyennes et erreur-standard.

Site de Walungu

Tableau 5.10 Facteurs α de la courbe de conductivité hydraulique obtenus pour les trois intervalles de mesures de succion en fonction des traitements et des saisons au site de Walungu. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur-standard.

Saison	Paramètres	T0	T1	T2	T3	P- valeur
Sèche	$\alpha_{-12,5}$ (cm ⁻¹)	0,09 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,01	N/A	N/A	NS
	α_{-8} (cm ⁻¹)	0,13 $\pm$ 0,02	0,10 $\pm$ 0,02	0,09 $\pm$ 0,03	0,06 $\pm$ 0,01	NS
	$\alpha_{-4,5}$ (cm ⁻¹)	0,15 $\pm$ 0,02	0,18 $\pm$ 0,03	0,15 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,02	NS
	Ks _{-4,5} (cm/h)	7,49 $\pm$ 2,5a	6,1 $\pm$ 4,2ab	1,40 $\pm$ 0,31bc	0,98 $\pm$ 0,18c	**
des pluies	$\alpha_{-12,5}$ (cm ⁻¹)	0,12 $\pm$ 0,01	N/A	N/A	N/A	N/A
	α_{-8} (cm ⁻¹)	0,25 $\pm$ 0,02a	0,16 $\pm$ 0,03b	0,20 $\pm$ 0,02ab	0,13 $\pm$ 0,03b	*
	$\alpha_{-4,5}$ (cm ⁻¹)	0,3 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,02	0,228 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,04	NS
	Ks _{-4,5} (cm/h)	10,68 $\pm$ 1,83	1,72 $\pm$ 0,26b	1,37 $\pm$ 0,21b	1,74 $\pm$ 0,36b	**

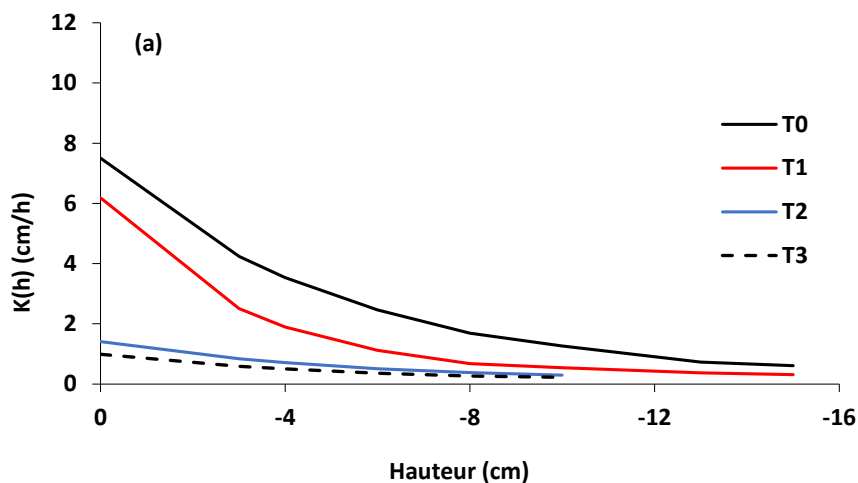
N/A : non applicable. NS = Non significatif au seuil $\alpha = 0,05$, * : significatif $P < 0,05$.

Le tableau 5.10 montre qu'en saison sèche, il n'y a pas d'effet traitement significatif sur α . Cependant, on observe que les valeurs du facteur $\alpha_{-12,5}$ et α_{-8} tendent à décroître depuis le traitement T0 jusqu'aux traitements en non labour avec paille externe (T2 et T3). Cette tendance ne s'observe cependant pas pour $\alpha_{-4,5}$. Quel que soit le traitement, les valeurs de $\alpha_{-4,5}$ sont nettement supérieures à celles de α_{-8} , particulièrement sous traitements en non labour avec ou sans paille externe (T1, T2 et T3) qui présentent un accroissement des valeurs α de 40% à 65% contre 13% sous T0 en saison sèche. En saison des pluies, les valeurs du facteur α de T0 sont supérieures à celles de trois autres traitements, avec des moyennes de α_{-8} significativement différentes à celles des traitements T2 et T3.

Pour les deux saisons de mesure, les valeurs moyennes de Ks_{-4,5} sont nettement supérieures sur les parcelles de T0 comparées aux trois autres traitements. En saison sèche, le traitement T1 présente un comportement

intermédiaire entre T0 et les deux traitements en non labour avec paille externe (T2 et T3). En saison des pluies, le $K_{s-4,5}$ du traitement T0 est 6 à 7 fois supérieur à celui des 3 autres traitements. De la saison sèche à la saison des pluies, le $K_{s-4,5}$ s'accroît pour le traitement T0. Sur les parcelles de T2 et T3, par contre, les valeurs sont du même ordre pour les deux saisons.

Comme pour le K_s , le traitement T0 présente des valeurs de $K(h)$ nettement supérieures à celles de trois autres traitements. Contrairement aux mesures faites en saison sèche, les moyennes des traitements T1, T2 et T3 sont de mêmes ordres et ne diffèrent pas en saison des pluies, quelle que soit la succion de mesure (Figure 5.4). Sur l'intervalle -15 et -10 cm (saison sèche), le $K(h)$ a été calculé pour les traitements T0 et T1 (saison sèche) et T0 (saison des pluies) uniquement. Pour les deux cas, le facteur α des autres traitements était nul ou négatif.



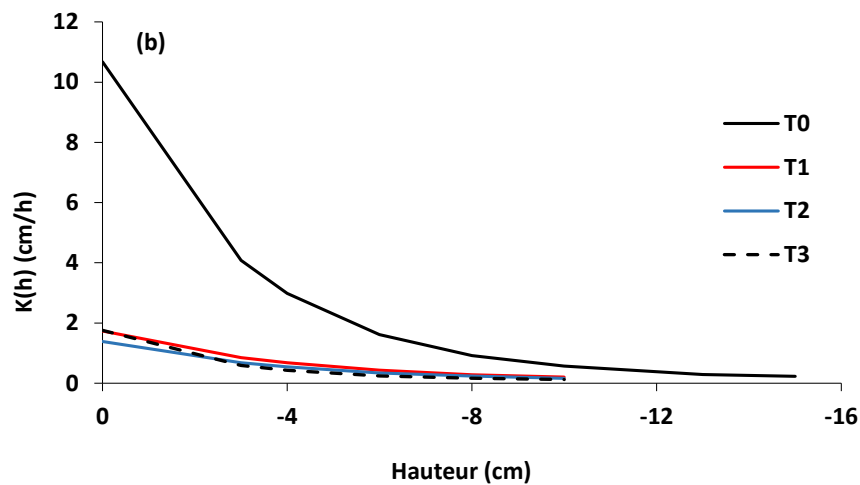


Figure 5.4. Conductivité hydraulique au site de Walungu: (a) saison sèche et (b) : saison des pluies. Les valeurs sont des moyennes et erreur-standard.

Site de Rubona

Tableau 5.11 Facteurs α de la courbe de conductivité hydraulique obtenus pour les trois intervalles de mesures de succion en fonction des traitements au site de Rubona. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur-standard.

Paramètres	T0	T1	T2	T3	P-valeur
$\alpha_{-12,5}$ (cm ⁻¹)	0,13 $\pm$ 0,02	0,11 $\pm$ 0,01	0,10 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,02	NS
α_{-8} (cm ⁻¹)	0,14 $\pm$ 0,01	0,16 $\pm$ 0,02	0,13 $\pm$ 0,01	0,11 $\pm$ 0,02	NS
$\alpha_{-4,5}$ (cm ⁻¹)	0,13 $\pm$ 0,02a	0,18 $\pm$ 0,03ab	0,29 $\pm$ 0,03c	0,23 $\pm$ 0,02bc	***
Ks _{-4,5} (cm/h)	0,71 $\pm$ 0,33a	1,10 $\pm$ 0,33ab	1,76 $\pm$ 0,46b	1,64 $\pm$ 0,69ab	**

Le tableau 5.11 montre que les valeurs de $\alpha_{-12,5}$ et α_{-8} ne varient pas significativement entre les traitements et aucune tendance générale n'apparaît. Le $\alpha_{-4,5}$, par contre, varie significativement en fonction des traitements. Les valeurs de $\alpha_{-4,5}$ s'accroissent depuis le traitement T0 jusqu'aux traitements T2 et T3 qui, comparés au traitement T0, ont des

valeurs significativement différentes. Le $\alpha_{4,5}$ du traitement T2 est également significativement supérieur à celui du traitement T1. En ce qui concerne le $K_{s,4,5}$, les valeurs les plus élevées sont observées sous traitements T1, T2 et T3 et sont une fois et demie à deux fois et demie supérieures à celle du traitement T0.

Pour tous les traitements, le $K(h)$ décroît graduellement aux suctions les plus négatives et aucun effet traitement n'est observé à toutes les suctions appliquées (Figure 5.5).

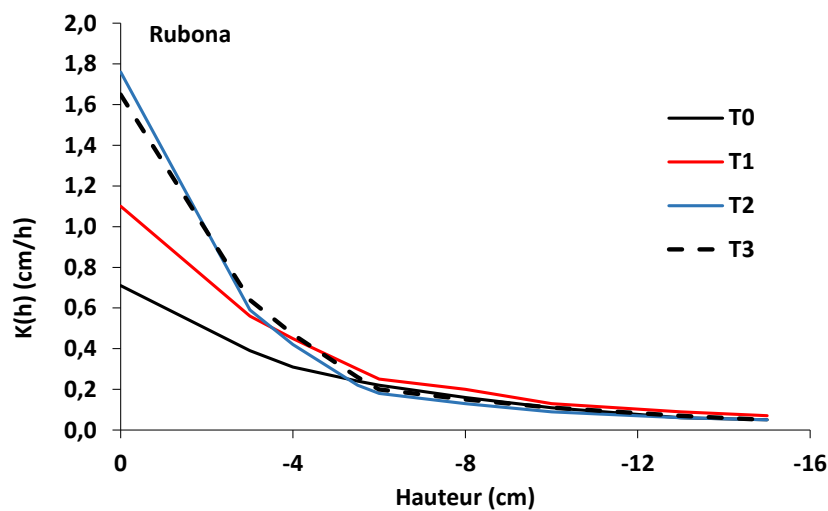


Figure 5.5. Conductivité hydraulique au site de Rubona. Les valeurs sont des moyennes et erreur-standard. Mesures faites en mars 2010.

5.3.4 Ruissellement et érosion

Mulungu

Tableau 5.12 Ruissellement (RUIS, mm), sédiments récoltés (g/m²), concentration (CONC, g/l) et taux d'infiltration (TI, mm/h) (valeurs = moyenne $\pm$ erreur-standard) au site de Mulungu. Mesures faites en saison sèche et en saison des pluies.

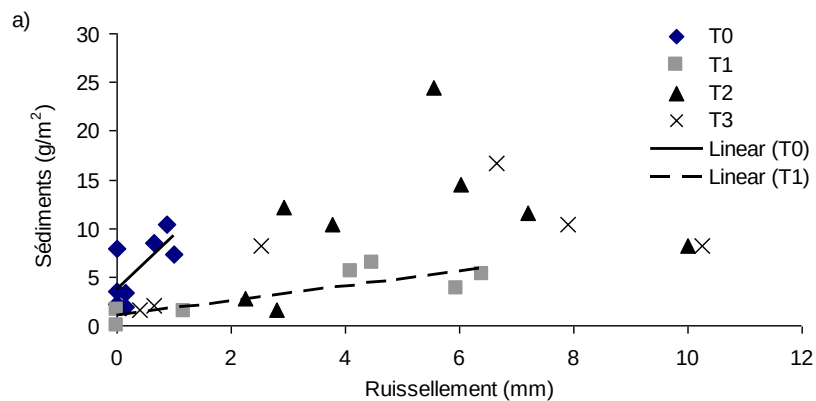
Saison	Paramètres	Traitements				P- valeur
		T0	T1	T2	T3	
Sèche	RUIS	0,4 $\pm$ 0,1b	4,0 $\pm$ 1,2a	5,1 $\pm$ 0,9a	6,8 $\pm$ 1,8a	**
	Sédiments	5,6 $\pm$ 1,1	5,3 $\pm$ 2,0	10,7 $\pm$ 2,5	11,8 $\pm$ 3,6	NS
	CONC	13,5 $\pm$ 1,5a	1,0 $\pm$ 0,2b	2,2 $\pm$ 0,5b	2,4 $\pm$ 1,8b	***
	TI	367 $\pm$ 7a	307 $\pm$ 25ab	275 $\pm$ 19b	240 $\pm$ 37b	**
Des pluies	RUIS	6,8 $\pm$ 1,0a	1,2 $\pm$ 0,4b	0,6 $\pm$ 0,2b	1,9 $\pm$ 0,9b	***
	Sédiments	148,3 $\pm$ 26a	8,3 $\pm$ 2,8b	4,4 $\pm$ 1,1b	4,9 $\pm$ 2,1b	***
	CONC	21,1 $\pm$ 2,8a	13,3 $\pm$ 3,4ab	10,0 $\pm$ 4,5b	7,8 $\pm$ 2,7b	*
	TI	228 $\pm$ 20a	341 $\pm$ 11b	345 $\pm$ 6b	320 $\pm$ 21b	**

La comparaison entre les traitements est faite horizontalement. NS = non significatif, * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; *** = $P < 0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha=0,05$.

On observe qu'en saison sèche, le ruissellement est 10, 13 et 18 fois plus faible sous traitement T0 par rapport aux traitements T1, T2 et T3, respectivement. Inversement, la concentration du ruissellement est la plus élevée sous T0. Pour ces deux variables, une différence significative est observée entre le traitement T0 d'une part et les 3 traitements non labour d'autre part (T1, T2 et T3). Les traitements n'ont pas affecté de manière significative la masse totale de sédiments entraînés par le ruissellement. Le taux d'infiltration évolue logiquement en ordre inverse du ruissellement. En saison des pluies, les traitements ont eu un effet significatif sur le ruissellement et la masse de sédiments récoltés, avec des valeurs

significativement plus faibles dans les parcelles des traitements T1, T2 et T3 comparé au traitement T0. On note que la masse de sédiments érodés sous T0 a été multipliée par 26 entre la saison sèche et la saison des pluies. Cependant, la concentration est quant à elle environ multipliée par 2. Pour les traitements en non labour (T1, T2 et T3), la masse de sédiments érodés est faible quelle que soit la saison et a peu varié entre les traitements. Par contre, pour ces mêmes traitements, la concentration du ruissellement est plus importante en saison des pluies.

La relation entre le ruissellement et la masse de sédiments entraînés est illustrée à la figure 5.6a pour la saison sèche et 5.6b pour la saison des pluies. En saison sèche, une corrélation significative est observée sous traitements T0 et T1 uniquement (Tableau 5.14). En saison des pluies, une corrélation significative n'est observée que pour le traitement T0 (Tableau 5.14).



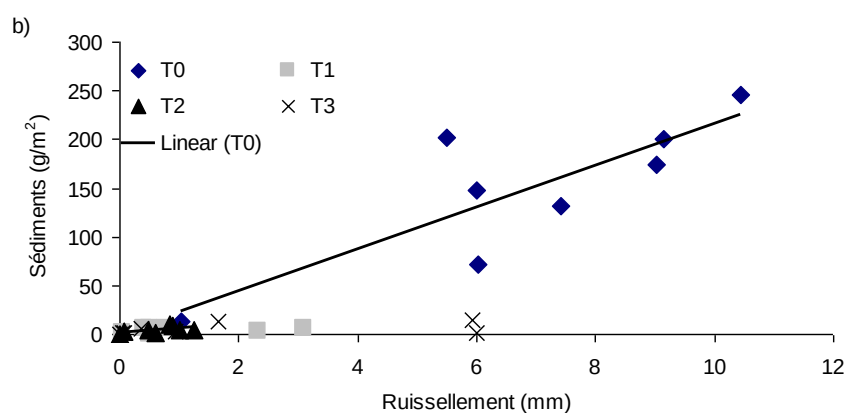


Figure 5.6. Relation entre le ruissellement (mm) et la masse de sédiments (g/m^2) des mesures faites en saison sèche (a) et saison des pluies (b) au site de Mulungu.

Site de Walungu

Tableau 5.13 Ruissellement (RUIS, mm), sédiments récoltés (g/m^2), concentration (CONC, g/l) et taux d'infiltration (TI, mm/h) (valeurs = moyenne $\pm$ erreur-standard) au site de Walungu. Mesures faites en saison sèche et en saison des pluies.

Saison	Paramètres	Traitements				P-valeur
		T0	T1	T2	T3	
Sèche	RUIS	0	0	0	0	
	Sédiments	0	0	0	0	
	TI	>366 $\pm$ 7	>366 $\pm$ 6	>351 $\pm$ 3	>360 $\pm$ 6	NS
Des pluies	RUIS	2,0 $\pm$ 0,9a	0,5 $\pm$ 0,2b	0,8 $\pm$ 0,2ab	1,2 $\pm$ 0,3a	**
	Sédiments	19,8 $\pm$ 8,2a	4,2 $\pm$ 1,7b	5,5 $\pm$ 2,4ab	13,8 $\pm$ 8,6ab	*
	CONC	31,9 $\pm$ 18,1	8,3 $\pm$ 2,8	19,2 $\pm$ 10,6	8,1 $\pm$ 3,5	NS
	TI	328 $\pm$ 21	348 $\pm$ 11	348 $\pm$ 11	349 $\pm$ 9	NS

Comparaison horizontale. NS = Non significatif, * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha=0,05$.

A Walungu en saison sèche, la pluie simulée n'a pas généré de ruissellement, quel que soit le traitement (Tableau 5.13). En saison des pluies, le ruissellement est généralement très faible. La masse de sédiments érodés sous T0 est significativement plus élevée que dans le traitement T1. Toutefois, les valeurs restent globalement faibles, quel que soit le traitement. La concentration du ruissellement s'accroît de 1,5 à 4 fois sous T0 par rapport aux 3 autres traitements, mais l'analyse statistique n'a pas révélé une différence significative en ce qui concerne ce paramètre. Des corrélations significatives entre le ruissellement et la masse de sédiments entraînés sont observées sous traitements T1 et T3 (Figure 5.7, Tableau 5.14). Toutefois, il importe de remarquer des valeurs nettement plus faibles sous traitement T1.

Tableau 5.14 Coefficient de détermination (R^2), coefficient de corrélation de Pearson (r) et P-valeur du coefficient de corrélation de la relation entre le ruissellement et la masse de sédiments aux sites de Mulungu et Walungu.

TR	Site	Saison	R^2	r	P-valeur	Eq. Régression
T1	W	2	0,86	0,92	***	$Y = 9,7894x - 0,3791$
T3	W	2	0,63	0,77	*	$Y = 6,3363x - 1,2823$
T0	M	1	0,50	0,69	*	$Y = 5,4802x + 3,70$
T1	M	1	0,69	0,81	*	$Y = 0,7511x + 1,0788$
T0	M	2	0,69	0,81	**	$Y = 21,5470x + 1,243$

TR : traitements. Site (M : Mulungu, W : Walungu), Saison (1 : saison sèche, 2 : saison des pluies). * = $P < 0,05$; *** = $P < 0,001$.

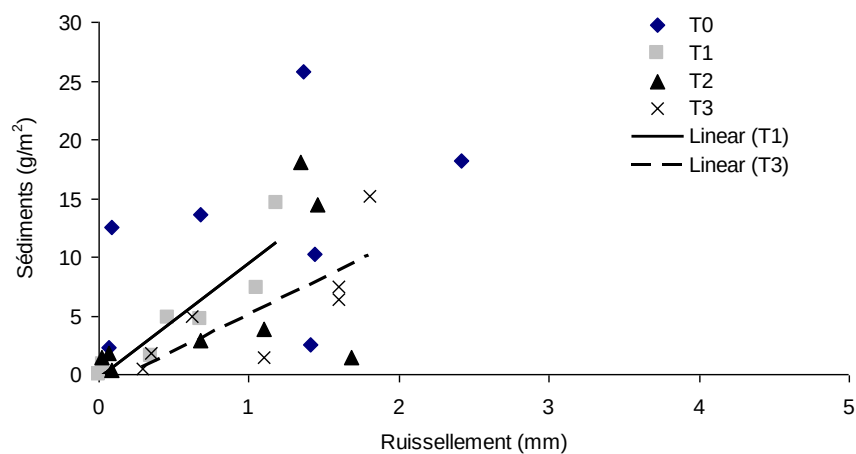


Figure 5.7. Relation entre le ruissellement (mm) et la masse de sédiments (g/m^2) des mesures faites en saison des pluies au site de Walungu.

Site de Rubona

Tableau 5.15. Ruissellement (RUIS, mm), sédiments récoltés (g/m^2), concentration (CONC, g/l) et taux d'infiltration (TI, mm/h) (moyenne $\pm$ erreur-standard) au site de Rubona. Mesures faites en mars 2010.

Paramètres	Traitements				P-valeur
	T0	T1	T2	T3	
RUIS	8,2 $\pm$ 1,0a	3,3 $\pm$ 0,7b	2,7 $\pm$ 1,0b	1,6 $\pm$ 0,5b	*
Sédiments	236,6 $\pm$ 44,5a	28,5 $\pm$ 7,0b	20,2 $\pm$ 7,4b	19,8 $\pm$ 7,0b	**
CONC	30,3 $\pm$ 6,4a	14,21 $\pm$ 3,9b	22,80 $\pm$ 9,7ab	15,3 $\pm$ 5,9ab	**
TI	178 $\pm$ 17a	271 $\pm$ 14b	284 $\pm$ 19b	286 $\pm$ 16b	***

Comparaison horizontale. * = significatif $P < 0,05$; ** = significatif $P < 0,01$; *** = significatif $P < 0,001$. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.

Le tableau 5.15 montre des valeurs de ruissellement et de masse de sédiments entraînés significativement supérieures sous traitement T0 par rapport aux traitements T1, T2 et T3. La concentration sous traitement T0 est une fois et demie à deux fois plus élevée par rapport aux 3 autres traitements. Pour tous les paramètres mesurés, aucune différence significative n'existe entre les différents traitements en non labour. La relation entre le ruissellement et la masse de sédiments entraînés (Figure 5.8) n'est pas significative, quel que soit le traitement.

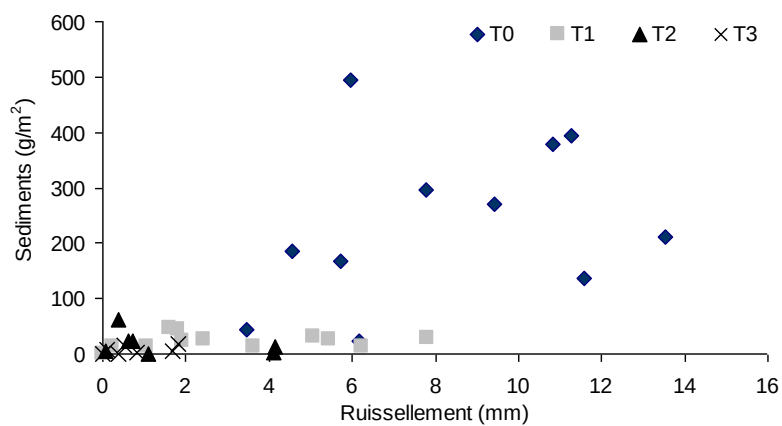


Figure 5.8 Relation entre le ruissellement (mm) et la masse de sédiments (g/m^2) des mesures faites en saison des pluies au site de Rubona.

Comparaison entre la conductivité à saturation mesurée au moyen de l'infiltromètre à succion et les taux d'infiltration mesurés par le simulateur de pluie

Le tableau 5.16 montre que quel que soient le site, la saison et le traitement, les valeurs de Ks mesurées au moyen d'un infiltromètre à succion sont nettement inférieures à celles mesurées par le simulateur de pluie. Suivant le traitement, le taux d'infiltration mesuré au moyen du simulateur de pluie est 3 à 48 fois plus élevé que le Ks_{4,5}.

Tableau 5.16 Comparaison des Ks mesurés au moyen de l'infiltromètre à succion et des taux d'infiltration (TI) mesurés par le simulateur de pluies (cm/h).

Site	Saison	Traitement	Ks _{4,5}	TI
			-----cm/h-----	
Mulungu	Sèche	T0	3,03	36,7
		T1	2,10	30,7
		T2	1,14	27,5
		T3	0,50	24,0
	des pluies	T0	2,47	22,8
		T1	3,58	34,1
		T2	2,75	34,1
		T3	2,06	32,0
Walungu	Sèche	T0	7,49	>36,6
		T1	6,18	>36,6
		T2	1,40	>35,1
		T3	0,98	>36,0
	des Pluies	T0	10,68	32,8
		T1	1,72	34,8
		T2	1,37	34,8
		T3	0,98	34,9
Rubona	Mars 2010	T0	0,71	17,8
		T1	1,10	27,1
		T2	1,76	28,4
		T3	1,64	28,6

5.3.5 Analyse des corrélations entre les différentes propriétés des sols

Pour évaluer la relation entre les propriétés du sol mesurées dans ce chapitre, nous avons procédé à l'analyse des corrélations sur l'ensemble des données de trois sites et de deux saisons de mesure. Pour la conductivité hydraulique à saturation (K_s), seules les données de $K_{s.4,5}$ ont été utilisées.

On observe une relation négative entre le K_s et toutes autres propriétés du sol, excepté le facteur α (Tableau 5.17). Une forte corrélation positive entre le $WDPT_{\text{méd}}$ et le MWD moyen, et le ruissellement s'observe également. Enfin, la masse de sédiments est positivement corrélée avec ruissellement qui l'entraîne mais varie en sens inverse avec le MWD moyen. Ces mêmes tendances de corrélations sont visibles sur le cercle de corrélation de l'analyse en composante principale (ACP) des propriétés des sols (Figure 5.9). Les deux composantes expliquent 66% de la variance des 6 variables d'origine.

Tableau 5.17. Tableau de corrélation entre les différentes propriétés du sol mesurées, tous sites confondus.

	K_s	α	$WDPT_{\text{méd}}$	RUIS.	Sédiment	MWDmoy
K_s	1	0,310	-0,61	-0,343	-0,228	-0,170
α	0,183	1	0,1851	-0,092	0,0493	0,021
$WDPT_{\text{méd}}$	0,011	0,485	1	0,668	0,4086	0,438
RUIS.	0,137	0,697	0,0047	1	0,818	-0,162
Sédiment	0,332	0,836	0,116	<,0001	1	-0,382
MWDmoy.	0,473	0,929	0,089	0,493	0,096	1

RUIS : ruissellement, $WDPT_{\text{méd}}$. : 'Water Drop penetration time' exprimé en médiane du temps nécessaire pour l'infiltration d'une goutte d'eau. Les valeurs en dessous de la diagonale représentent les P-valeurs.

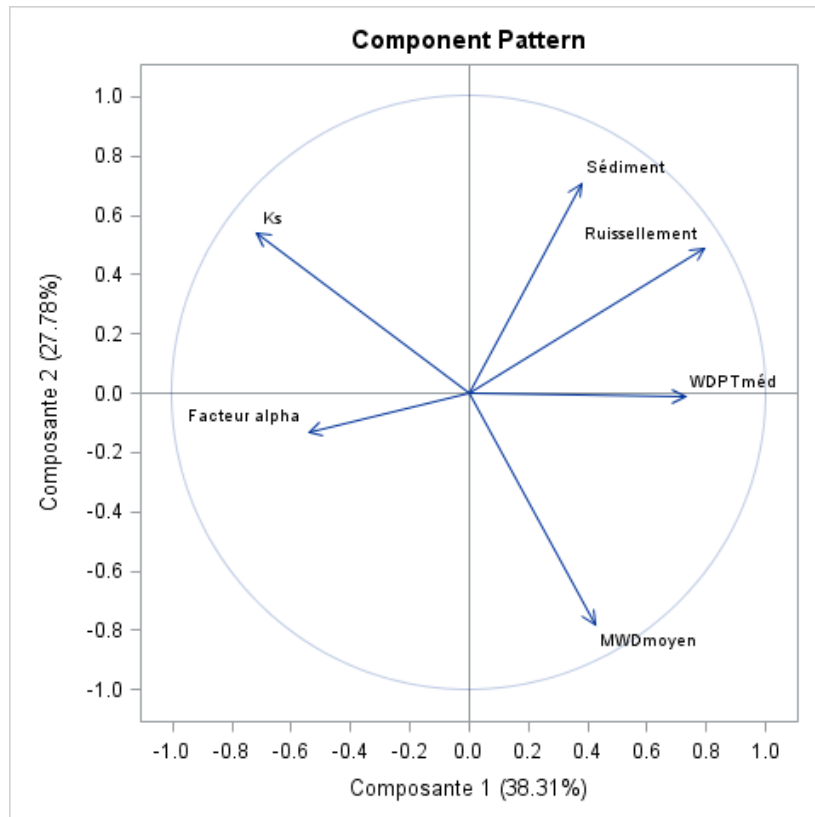


Figure 5.9. Analyse en composante principale (ACP) des propriétés du sol utilisées comme indicateurs de la conservation du sol.

5.4 Discussion

5.4.1 Hydrophobicité

L'hydrophobicité des sols peut être affectée par plusieurs facteurs, notamment le statut organique du sol, la texture, la teneur en eau, le pH, l'incinération et le travail du sol. [Doerr et Thomas \(2000\)](#) et [Mataix-Solera](#)

et Doerr (2004) ont rapporté que le développement ou le degré d'hydrophobicité du sol est lié à la teneur en matière organique du sol et à sa composition chimique. L'accroissement de la teneur en matière organique du sol, et particulièrement de sa teneur en composés hydrophobes, accroît l'hydrophobicité du sol (Harper et al., 2000; Leelamanie et Karube, 2007). La texture, notamment la teneur en argile et le type d'argiles affectent également l'hydrophobicité des sols. Harper et al. (2000) ont montré que l'hydrophobicité est directement proportionnelle à la teneur en matière organique et inversement proportionnelle à la teneur en argile. De Gryze et al. (2006) ont également trouvé une corrélation négative entre la teneur en argile et l'hydrophobicité ($n = 53$, $r = -0,25$, $0,01 < P < 0,05$). Sur des échantillons de sol auxquels ont été rajouté de la kaolinite ou de la montmorillonite et des composés hydrophobes (acide stéarique), Leelamanie et Karube (2007) n'ont observé l'hydrophobie qu'en présence de kaolinite. Pour les auteurs, le caractère hydrophile de la montmorillonite serait liée à sa propriété de former un revêtement hydrophile autour des particules minérales revêtues des composés organiques hydrophobes.

La teneur en eau du sol est l'un des principaux facteurs qui déterminent le degré d'hydrophobicité des sols. Leelamanie et Karube (2007) ont rapporté que l'hydrophobicité est associée à une teneur eau seuil dite critique (« critical water content », CWC), variable suivant la composition minéralogique et la teneur en composés hydrophobes. Lorsque la teneur en eau du sol décroît en dessous de CWC, le sol devient hydrophobe. Dans le cas contraire, le sol reste hydrophile. Selon les études, une relation inverse linéaire (Poulenard et al., 2004 ; Lichner et al., 2006) ou non linéaire (Doerr

[et al., 2002](#) ; [Goebel et al., 2004](#)) entre la teneur en eau et l'hydrophobicité a été rapportée.

Plusieurs études ont observé un effet du travail du sol sur l'hydrophobicité des sols. En Australie, [Chan \(1992\)](#) a observé que le non labour induisait l'hydrophobicité sur un sol limono-argileux. La magnitude de l'hydrophobie induite par le non labour était variable suivant les saisons. Par exemple, comparées aux parcelles soumises au labour, le temps d'infiltration d'une goutte d'eau sur les parcelles en non labour était environ quarante fois plus long en été et deux fois plus long en automne. Sous climat semi-aride modéré en République Tchèque, [Šimon et al. \(2009\)](#) ont observé que les parcelles en non labour avec ou sans mulch avaient une hydrophobie d'environ 20% plus élevée que celles des parcelles labourées. Aux USA, [Pikul et al. \(2009\)](#) ont rapporté que les agrégats des sols des parcelles en non labour étaient 60% plus hydrophobes que ceux des parcelles soumises au labour. Toutefois, d'autres études ([Eynard et al., 2004](#); [Bottinelli et al., 2010](#)) ont montré que le non labour n'entraîne pas toujours un accroissement de l'hydrophobicité du sol.

Pour la présente étude, l'hydrophobicité est très marquée à Mulungu en saison sèche dans les parcelles paillées, avec des temps d'infiltration particulièrement longs dans le traitement T3. A Walungu pour les deux saisons, les durées d'infiltration des gouttes restent modestes, mais des différences significatives persistent entre T0 d'une part, et les traitements non labour paillés d'autre part, qui pourraient résulter de différences d'hydrophobicité. Quatre des facteurs pouvant potentiellement affecter l'hydrophobicité des sols ont été mesurés (Tableau 5.4) pour expliquer la

variabilité d'hydrophobicité aux sites de Mulungu et Walungu : teneur en eau, pH, teneur en MO et teneur en argile.

Tant pour la saison sèche que pluvieuse, la teneur en eau gravimétrique est plus élevée dans les parcelles des traitements T1, T2 et T3, cet effet étant plus prononcé en saison sèche (Tableau 5.4). Une teneur en eau gravimétrique supérieure sous traitements en non labour et paillés serait due au paillage, dont le rôle dans la conservation de l'humidité du sol a été rapportée par de nombreux auteurs ([Kemper et Derpsch, 1981](#); [Benites, 2008](#); [McIntyre et al., 2000](#)). Etant donné que l'hydrophobicité croît lorsque la teneur en eau décroît, il faut en conclure que la teneur en eau n'est pas un facteur explicatif des différences d'hydrophobicité observées entre traitements. Par ailleurs, la forte diminution de l'hydrophobicité à Mulungu entre la saison sèche et la saison des pluies dans les traitements non labour paillés ne semble pas non plus attribuable à des différences de teneur en eau. Cependant, [Hurraß et Schaumann \(2006\)](#) ont rapporté que l'effet de la teneur en eau sur l'hydrophobicité du sol n'est pas isolé mais interagit avec d'autres facteurs (pH, force ionique de la solution du sol, présence et teneur en composés hydrophobes). Par ailleurs, [Horne et McIntosh \(2003\)](#) et [Roy et McGill \(1998\)](#) ont suggéré que la composition structurale et l'arrangement des composés organiques hydrophobes du sol influencent l'hydrophobicité. Les composés humiques du sol forment des structures micellaires avec leurs composés hydrophiles et hydrophobes, lesquels changent d'orientation en fonction du degré d'hydratation du sol. Dans certains cas, les composés hydrophobes s'orientent vers l'intérieur des agrégats tandis que les composés hydrophiles s'orientent vers l'extérieur, rendant ainsi la surface du sol attractive pour l'eau. Dans le cas contraire, la surface du sol devient hydrophobe (Von Wandruszaka, 1998 cité par

[Urbanek et al., 2007](#)). L'orientation des composés hydrophobes et hydrophiles de la matière organique en fonction du degré d'hydratation du sol pourrait donc expliquer la variabilité de l'hydrophobicité en fonction des saisons observée aux sites de Mulungu et Walungu.

Quel que soit le site, le pH varie faiblement en fonction des traitements et le sol de Mulungu est légèrement moins acide (Tableau 5.4). Au sein d'un site, il n'est pas évident que des différences aussi faibles de pH (0,1 - 0,2 unité pH) ([De Gryze et al., 2006](#)) puissent induire d'aussi grandes différences dans les valeurs d'hydrophobicité entre les traitements (Tableau 5.2). Par ailleurs, lorsqu'on compare les deux sites en saison sèche, tous traitements confondus, le temps moyen d'infiltration d'une goutte d'eau est plus long au site de Mulungu, légèrement moins acide. Dans une étude sur l'hydrophobie sur deux différents types de sols, [Hurraß et Schaumann \(2006\)](#) ont, au contraire, trouvé une corrélation négative entre le pH et l'hydrophobicité, mais uniquement sur l'un des deux types de sols étudiés. Les auteurs ont suggéré que, suivant les propriétés intrinsèques des sols, différents mécanismes puissent relier le pH à l'hydrophobicité.

Comme pour le pH, la teneur en matière organique varie faiblement entre les traitements au sein de chaque site (Tableau 5.4). Pour chaque site séparément, la teneur en matière organique ne serait donc pas un des facteurs majeurs affectant l'hydrophobicité. Par contre, un temps moyen de pénétration d'une goutte d'eau plus long au site de Mulungu, plus riche en matière organique, concorde bien avec les résultats de [Šimon et al. \(2009\)](#), [Chenu et al. \(2000\)](#) et [Mataix-Solera et Doerr \(2004\)](#) qui ont observé une corrélation positive entre la teneur en matière organique et l'hydrophobicité. La plus faible teneur en argile à Mulungu pourrait encore

renforcer cet effet, puisqu'il existe une relation inverse entre l'hydrophobicité et la teneur en argile du sol ([Harper et al., 2000](#) ; [De Gryze et al., 2006](#)). Cependant, certains auteurs ([Doerr et al., 2005](#); [Urbanek et al., 2007](#)) ont rapporté que l'hydrophobicité est due au revêtement des particules minérales du sol par la matière organique, et particulièrement ses groupements hydrophobes. Ainsi, l'hydrophobicité dépendrait plus spécialement de la teneur de la matière organique en composés hydrophiles ou hydrophobes susceptibles d'attirer ou de repousser l'eau plutôt que de la teneur en matière organique totale ([Urbanek et al., 2007](#)). Ceci pourrait expliquer la plus forte hydrophobicité du sol observée sous T3 au site de Mulungu comparé à T1 et T2, dans l'hypothèse où les feuilles de *Tripsacum laxum* seraient plus riches en composés hydrophobes que les feuilles de bananier ou de *Hyparrhenia*. Notons que le dosage de la matière organique sur des échantillons prélevés sur les 10 premiers centimètres du sol pourrait ne pas être représentatif des propriétés de la surface du sol (0-2 cm par exemple), particulièrement pour les traitements en non labour. Ainsi, une caractérisation des premiers centimètres des sols de surface (0-2 cm) aurait été préférable en vue d'expliquer la variabilité de l'hydrophobie des sols en fonction des sites.

Pour les deux sites et saisons de mesure, le temps moyen de pénétration d'une goutte d'eau le plus court est observé sous T0 (labour et non paillé). Ceci pourrait donc, en partie, être dû au labour effectué sous ce traitement. Ce résultat concorde avec ceux d'autres auteurs ([Šimon et al., 2009](#); [Pikul et al., 2009](#); [Chan, 1992](#)) qui, comparant sur les mêmes types de sols des parcelles sous labour conventionnel à des parcelles en non labour, ont observé un degré d'hydrophobicité plus élevé sur les parcelles en non labour. Pour [Blanco-Canqui et Lal \(2009\)](#), la différence de degré

d'hydrophobicité entre les parcelles labourées et en non labour est particulièrement importante dans les horizons de surface du sol (<10 cm), caractérisés par des teneurs plus élevées en composés organiques hydrophobes en conditions de non labour ([Šimon et al., 2009](#)). Le travail du sol mélange le sol avec les résidus organiques, accélère la décomposition de la matière organique et perturbe les processus biologiques, ce qui résulte en une réduction de l'hydrophobicité du sol ([Capriel, 1997](#)).

5.4.2 Stabilité structurale

La discussion des résultats de stabilité structurale du sol des systèmes de culture bananière sera subdivisée en deux parties : (i) la première partie discutera de la variabilité de la stabilité structurale du sol en fonction des sites d'essai (effet site), et (ii) la deuxième partie traitera de l'impact des pratiques culturales et de l'évolution temporelle et/ou saisonnière de la stabilité structurale au niveau de chaque site séparément.

Variation de la stabilité structurale en fonction des sites d'étude

Quel que soit le test de stabilité structurale appliqué (humectation rapide, humectation lente ou désagrégation mécanique), le diamètre moyen pondéral (MWD) maximal est observé au site de Mulungu, suivi du site de Walungu puis le site de Rubona (Tableaux 5.5, 5.6 et 5.7). En comparant les diamètres moyens pondéraux de différents sites avec la classification de [Le Bissonnais et Le Souder \(1995\)](#) (Tableau 5.1), on observe que le diamètre moyen pondéral au test d'humectation rapide (MWD_{hr} , test le plus destructeur et recommandé par [Le Bissonnais et Le Souder \(1995\)](#) pour comparer les sols ayant des valeurs de $MWD > 2$ mm) se classe dans la catégorie des sols moyennement stables au site de Mulungu (Tableau 5.5),

instables à moyennement stables au site de Walungu (Tableau 5.6) et instables au site de Rubona (Tableau 5.7). La teneur en oxydes et hydroxydes de fer et aluminium (Le Bissonais et Le Singer, 1993), et la teneur en matière organique (Monnier, 1965; Tisdall et Oades, 1982) pourraient expliquer la variabilité de MWD entre les sites. D'autres caractéristiques comme la texture et en particulier la teneur en argile ainsi que sa minéralogie, et les cations présents dans la solution du sol, avec de nombreuses interactions entre ces caractéristiques (Stern et al., 1991; Mrabet et al., 2004; De Gryze et al., 2006), influencent également la stabilité structurale du sol.

D'une manière générale, les MWD supérieurs sont observés au site de Mulungu et de Walungu qui ont deux à quatre fois plus de carbone organique (Corg) et des teneurs en argile, en oxydes (Fe et Al) nettement supérieures à celles du site de Rubona (Tableau 5.8). En effet, la matière organique (carbone organique) est un agent de liaison entre les particules du sol (Chenu, 1989; Castro Filho, 1988), elle peut également rendre hydrophobes les surfaces des particules minérales, ce qui a pour effet de ralentir la vitesse d'humectation des agrégats et donc de réduire l'éclatement lors de l'humectation rapide (Jouany et al., 1992). En ce qui concerne la teneur en cations, dans tous les sites on observe une prédominance des cations bivalents qui favorisent la stabilité structurale du sol du fait de leur valence susceptible de former des ponts entre les particules chargées négativement (Shainberg, 1992).

En résumé, la faible stabilité à Rubona semble pouvoir s'expliquer par la teneur élevée en sable, et les teneurs nettement plus faibles en MO et

Fe/Al que sur les deux autres sites. Par contre, seule la teneur en MO semble pouvoir expliquer la différence entre Mulungu et Walungu.

Impact des pratiques culturales et évolution de la stabilité structurale

Les tableaux 5.5, 5.6 et 5.7 et la figure 5.1 montrent que, quels que soient le site, la période de prélèvement et le test de stabilité (humectation rapide, humectation lente et désagrégation mécanique), les plus faibles valeurs de MWD sont à chaque fois observées sous T0, parcelles labourées et non paillées. Une telle tendance de distribution des valeurs de MWD sous T0, déjà rapportée par plusieurs auteurs en agriculture mécanisée et traction animale ([Hajabbasi et Hemmat, 2000](#); [Pinheiro et al., 2004](#); [López-Garrido et al., 2010](#)), serait principalement liée au travail du sol et à l'absence de couverture au sol et de restitutions organiques. En effet, le travail du sol (le labour) désagrège les agrégats du sol ([Pinheiro et al., 2004](#)) et l'exportation des résidus de bananiers expose le sol au splash. L'absence de mulch (couverture au sol) pourrait réduire l'activité biologique des microorganismes qui l'utilisent comme substrat et source d'énergie en vue de produire des substances à effet agrégeant ([Paladini et Mielniczuk, 1991](#) cités par [Damacena de Souza et al., 2010](#)). Selon [Tisdall et Oades \(1982\)](#), la stabilité des agrégats de diamètre >2,00 mm est liée aux radicelles de plantes et aux hyphes de champignons. La présence permanente de mulch, les conditions d'humidité plus élevée sous mulch et les apports réguliers de matière organique sur les parcelles en non labour (T1, T2 et T3) contribueraient de façon importante à maintenir un microclimat propice au développement des champignons et à la croissance des radicelles sous paillage. Sur les Andosols et les Ultisols de la région australe chilienne, [Borie et al. \(2006\)](#) et [Cornejo et al. \(2009\)](#) ont montré que le non labour et le travail minimum du sol favorisaient l'activité biologique des champignons

mycorhiziens à arbuscules, y compris le nombre de spores, la colonisation racinaire et la longueur des hyphes. Sur un mollisol, six ans après application des traitements, [Curaqueo et al. \(2010\)](#) ont rapporté un pourcentage plus élevé d'hyphes fonctionnels des champignons mycorhiziens à arbuscules (18,3 vs 16,2 %), une teneur en glomaline (8,16 vs 3,96 mg/g) et un pourcentage d'agrégats stables dans l'eau (59 vs 32 %) significativement supérieurs sur les parcelles en non labour par rapport aux parcelles labourées. Par contre, sur les parcelles labourées avec enfouissement des résidus organiques, [Dorel et al. \(2010\)](#) ont rapporté une réduction de l'activité et de la diversité biologique du sol. De même, [Kabir et al. \(1998\)](#) ont observé que l'utilisation intensive des terres et le labour conventionnel affectaient négativement les hyphes des champignons mycorhiziens à arbuscules.

Des valeurs de MWD supérieures sur les parcelles en non labour et paillées pourraient également s'expliquer par leur degré d'hydrophobicité plus élevé par rapport aux parcelles non labourées et non paillées. Comparées aux parcelles sous labour conventionnel, [Blanco-Canqui \(2011\)](#), [Bottenelli et al. \(2010\)](#) et [Eynard et al. \(2006\)](#) ont rapporté qu'un léger accroissement d'hydrophobicité en conditions de non labour réduisait la vitesse d'humectation des agrégats des sols, ce qui permettait de préserver l'intégrité et la connexion des macropores ainsi que la stabilité des agrégats. Le tableau 5.17 et la figure 5.9 montrent une relation positive ($r = 0,43$) entre le temps de pénétration d'une goutte d'eau à la surface du sol (WDPT_{méd}) et le MWD moyen.

Lorsqu'on compare entre eux les traitements en non labour paillés (T1, T2 et T3), il y a lieu de distinguer différentes tendances suivant les sites. A

Mulungu et Rubona (Tableaux 5.5 et 5.7), l'apport de paille externe (T2 et T3) n'a pas amélioré de manière significative la stabilité structurale du sol par rapport à l'auto-paillage seul (T1). A Walungu par contre (Tableau 5.6), le traitement auto-paillé (T1) se démarque systématiquement des traitements avec paille externe (T2 et T3) par un MWD plus faible. Cette faible performance du traitement T1 (auto-paillé) au site de Walungu peut être due à la faible quantité d'auto-paillage (self-mulch) restitué au sol. En effet, au moment du prélèvement des échantillons (saison des pluies, soit 27 mois après l'application des traitements), seul ~17% (contre 85% en moyenne sur les sites de Mulungu et Rubona) des plantes du premier cycle avaient été récoltées sous ce traitement.

Tous sites et traitements confondus, la relation entre le Corg (0-10 cm) et la stabilité structurale (MWD moyen), illustrée à la figure 5.2 est similaire à celles trouvées par [Bouajila et Gallili \(2010\)](#), [Martínez et al. \(2008\)](#) et [Lipiec et al. \(2006\)](#) qui ont observé un accroissement de la stabilité structurale du sol avec la teneur en Corg du sol. Au niveau de chaque site, la teneur en Corg varie trop faiblement en fonction du traitement appliqué pour pouvoir expliquer les différences de stabilité structurales. La teneur en matière organique ne serait donc pas le principal facteur de la variabilité des valeurs de MWD entre les différents traitements appliqués. Il est cependant possible que le dosage de Corg, ayant porté sur les dix premiers centimètres (0-10 cm), ne soit pas entièrement représentatif de la teneur en Corg des agrégats prélevés dans la couche 0-5 cm. Pour un même site, les faibles valeurs de MWD sous T0 pourraient être liées principalement au travail du sol ainsi qu'à l'absence de couverture au sol et de restitution de matières organiques fraîches. Les agrégats des parcelles de T0 seraient, à priori, plus fragiles (ameublissement du sol lors du travail du sol) et auraient

des teneurs plus faibles en composés à effet agrégeant et hydrophobe d'origines microbiennes. L'impact du travail du sol (labour) et de l'absence de la couverture au sol est particulièrement plus important au site de Mulungu où aucune relation définie ne peut être établie entre la teneur en Corg et le MWD moyen (Figure 5.2).

5.4.3 Infiltrométrie

Méthodes d'estimation des paramètres mesurés (α et conductivité hydraulique)

D'une manière générale, les valeurs de α et conductivité hydraulique tendent à augmenter aux intervalles de mesure -10 et -6 cm et -6 et -3 cm par rapport à l'intervalle -15 et -10 cm. La différence entre les valeurs de T0 et les 3 autres traitements est plus importantes aux intervalles -15 et -10 cm (-12,5) et -10-et -6 cm (-8) que pour l'intervalle de mesure -6 et -3 cm (-4,5). Ceci indique une faible conductivité hydraulique sur les parcelles en non labour et paillées aux succions les plus négatives.

Différences entre sites et liens avec les caractéristiques des sols

Suivant la classification des sols (Tableau 2.1), le sol de Mulungu est un Nitisol, celui de Walungu est un Ferralsol et celui de Rubona est un Acrisol. De par leurs propriétés intrinsèques, ces trois types de sols présentent des propriétés hydrauliques différentes. Sur les dix premiers centimètres de profondeur le sol est de texture argileuse à Mulungu et Walungu, et limon argilo-sableux à Rubona (Figure 2.4). La densité apparente des sols de Mulungu et Walungu est plus faible que celle du sol de Rubona (Figure 2.2). Le sol de ce dernier site se caractérise par des agrégats du sol moins stables, traduisant une structure agrégée moins développée par rapport

aux 2 autres sites (Figure 5.1). Si l'on considère le traitement T0 (non hydrophobe à Mulungu et Walungu, et pouvant être comparé avec le sol de Rubona sur lequel l'hydrophobicité n'a pas été mesurée), les valeurs de $K_{s_{4,5}}$ mesurées en saison des pluies décroissent suivant cet ordre : Walungu (10,6 cm/h) > Mulungu (2,47 cm/h) > Rubona (0,71 cm/h). Les valeurs supérieures de K_s sur le sol de Walungu et de Mulungu pourraient s'expliquer par de bonnes propriétés hydriques et hydrodynamiques des sols ferrallitiques et des Nitisols. Ces propriétés pourraient s'expliquer par la présence des micro-agrégats stables (« pseudo-sables ») qui permettent une bonne infiltration d'eau à la surface du sol. Avec une forte teneur en sable (67%) et des faibles teneurs en Corg, en argile et en oxydes (Fe et Al), les faibles valeurs de K_s mesurées sur le sol de Rubona seraient liées à une structure agrégée moins développée.

Différences entre traitements et liens avec quelques propriétés physiques du sol

De manière variable suivant les sites et la saison de mesures, les traitements appliqués ont affecté significativement la conductivité hydraulique (K_s et $K(h)$) et le facteur α . Les traitements appliqués ont donc modifié les propriétés hydrauliques des sols. En saison sèche (Mulungu et Walungu), les valeurs de conductivité hydraulique du sol décroissent depuis le traitement T0 jusqu'aux traitements T2 et T3. De la saison sèche à la saison des pluies, le K_s a augmenté sous T2 et T3 à Mulungu et sous tous les traitements à Walungu. Une réduction de K_s est par contre observée sous T0 au site de Mulungu. A Rubona (mars 2010), comparé au T0, le traitement T2 a amélioré de manière significative le $K_{s_{4,5}}$.

Le tableau 5.17 et la figure 5.9 montrent une relation négative entre le WDPT et le K_s ($r = -0,632$, $P < 0,01$). Bien que non significative ($r = 0,324$, $P > 0,05$), seul le facteur α est positivement corrélé avec le K_s . En saison sèche (Mulungu et Walungu), les plus faibles valeurs de K_s observées sur les parcelles en non labour, notamment T2 et T3 seraient liées à leur degré d'hydrophobicité significativement supérieur (Tableau 5.2) par rapport aux traitements T0 et T1. Ces plus faibles valeurs de K_s sur les parcelles de T2 et T3 (Figure 5.3a), plus hydrophobes, mettent en évidence la persistance de l'effet de l'hydrophobicité lorsque le régime permanent est atteint au cours d'une mesure d'infiltration. Comparé aux traitements T1, T2 et T3, des valeurs significativement supérieures de K_s sous T0 au site de Walungu (saison sèche et des pluies, Figure 5.4) et de Mulungu (en saison sèche, Figure 5.3a) pourraient être dues non seulement à une plus faible hydrophobicité du sol sous T0 mais également au labour effectué 3 et 5 mois avant les mesures. Comparées aux parcelles en non labour, [Dorel et al. \(2010\)](#) et [Messing et Jarvis \(1993\)](#) ont rapporté, à court terme, un accroissement de la porosité et du taux d'infiltration sur les parcelles labourées.

Des études antérieures (par exemple White et Sully, 1987 ; Philip, 1987) ont rapporté que le facteur α est proportionnel au diamètre des pores hydrauliquement actifs pour une succion h_0 appliquée. Lorsqu'on observe les valeurs de $\alpha_{-4,5}$ à Walungu (Tableau 5.10), on remarque qu'aucun traitement n'a amélioré de manière significative le $\alpha_{-4,5}$. Cependant, les valeurs de $K_{s-4,5}$ sont significativement supérieures sous T0, soit 5 à 11 fois supérieures à celles des traitements T1, T2 et T3. A Mulungu, les valeurs de $\alpha_{-4,5}$ des traitements T1, T2 et T3 sont significativement supérieures à celles de T0 (Tableau 5.9) mais leurs $K_{s-4,5}$ ne sont pas significativement

différentes de celle de T0. Comme en saison sèche, ces résultats montrent que l'accroissement de α sur l'intervalle de mesure -6 et -3 cm ($\alpha_{-4,5}$) n'a pas entraîné un accroissement proportionnel de conductivité hydraulique sur les parcelles en non labour et paillées (T1, T2 et T3). Des résultats similaires ont été obtenus par [López-Garrido et al. \(2010\)](#) dans une étude comparant, à court terme (4 ans), les propriétés hydrauliques des parcelles labourées et leurs sous-parcelles converties en non labour. Ce même résultat a également été trouvé par [Angulo-Jaramillo et al. \(1997\)](#) qui ont suggéré qu'à court terme, les faibles valeurs de Ks en non labour étaient dues à l'absence des pores interconnectés.

A Rubona, contrairement aux mesures faites à Mulungu et Walungu, la différence entre les moyennes de $K_{s-4,5}$ de différents traitements pourrait, en partie, être liée au α notamment le $\alpha_{-4,5}$ (Tableau 5.11). Avec des valeurs supérieures de $\alpha_{-4,5}$, les traitements T1, T2 et T3 ont des valeurs de $K_{s-4,5}$ supérieures à celle de T0 qui, comparé au traitement T2, est significativement inférieure. Comparées aux mesures faites en saison des pluies sur les 2 autres sites, les valeurs de Ks des traitements avec paille externe (T2 et T3) sont plus proches ou supérieures à celles de T0 au site de Rubona. Pour le traitement T3 (non labour + auto-paillage + paillage avec *Tripsacum*) qui est similaire sur les 3 sites, la différence de comportement de ce traitement serait liée aux caractéristiques physico-chimiques des sols qui sont fortement différentes entre les sites (Tableau 5.8). La caractérisation du degré d'hydrophobicité au site de Rubona aurait peut-être pu apporter un éclairage complémentaire pour comprendre le comportement de ce traitement. De même, pour le traitement T2 (non labour + auto-paillage + paillage avec le chaume de riz), appliqué uniquement au site de Rubona et qui a induit un $K_{s-4,5}$ significativement

supérieure à celle de T0, il serait utile à l'avenir de tester la performance de ce traitement sur les 2 autres sites.

5.4.4 Erosion et ruissellement

Intensité de la pluie

L'intensité moyenne (moyenne $\pm$ écart-type) de pluie générée par le simulateur de pluie a été de 378 ± 13 (saison sèche) et 361 ± 14 (saison des pluies) mm/h à Mulungu, 361 ± 16 (saison sèche) et 366 ± 21 (saison des pluies) mm/h à Walungu et 335 ± 21 mm/h à Rubona. Comparées à l'intensité typique des pluies en régions tropicales (100 mm/h ; [Lal, 1984](#)), quels que soient le site et la saison de mesure, ces intensités de pluie correspondent à des orages assez forts pour générer rapidement du ruissellement.

Différences entre sites et liens avec les caractéristiques des sols

Pour les mêmes traitements appliqués, les valeurs de volume d'eau ruisselé et de masse de sédiments entraînés sont les plus élevées au site de Rubona et les plus faibles au site de Walungu (Tableaux 5.12, 5.13 et 5.15). Le ruissellement est nul quel que soit le traitement à Walungu en saison sèche et le taux d'infiltration le plus élevé y est observé (Tableau 5.13). Les valeurs de concentration en sédiments les plus faibles sont observées au site de Mulungu en saison sèche.

L'érosion hydrique dépend de plusieurs facteurs notamment, notamment: l'infiltration, la teneur en eau initiale du sol, la texture, la teneur en matière organique, le type et le pourcentage de couverture du sol et la pente ([Vahabi et Nikkam, 2008](#); [Warrington et al., 1989](#); [Gross et al., 1991](#)). Pour

cette étude, les propriétés édaphiques mesurées, notamment la conductivité hydraulique (Tableau 5.9, 5.10 et 5.11), la teneur en eau du sol (Tableau 5.4), la texture et la teneur en matière organique (Tableau 5.8), l'hydrophobicité (Tableau 5.2), la stabilité structurale (Figure 5.1) et la pente topographique au point de mesure de simulation de pluie (Annexes 6) varient largement entre les sites, et semblent corroborer les différents degrés d'érodibilité des sols observés entre les sites.

La figure 5.9 et le tableau 5.17 montrent une relation négative entre le ruissellement et le K_s ($r = -0,34$) ou le α ($r = -0,092$), et une relation positive entre WDPT (WDPT_{méd}) et le ruissellement ($r = 0,67$). La masse de sédiments entraînés, quant à elle, a une relation négative avec le MWD moyen mais est positivement corrélée avec le ruissellement ($r = 0,81$). Sur base des mesures faites en saison des pluies qui concernent l'ensemble des sites, les valeurs maximales de volume d'eau ruisselé et de masse de sédiments entraînés observées sur le sol de Rubona sont en accord avec des valeurs plus faibles de K_s et les agrégats du sol les moins stables. De même, les faibles valeurs de ruissellement et de masse de sédiments entraînés ainsi que les valeurs supérieures de taux d'infiltration observées à Walungu seraient liées aux valeurs plus élevées de K_s et à la plus faible hydrophobicité. Cette dernière propriété du sol paraît être le facteur déterminant de la variabilité des paramètres mesurés entre le site de Walungu et de Mulungu, surtout en saison sèche (Tableau 5.2). Malgré des valeurs de pente légèrement supérieures à celles des 2 autres sites (Annexes 5), le site de Walungu présente les plus faibles valeurs de ruissellement et de masse de sédiment entraînés. La pente au point de mesure de simulation de pluie ne serait donc pas un des facteurs déterminants des variations intersites de l'érosion. Par contre, une teneur

en eau gravimétrique plus élevée au site de Mulungu (Tableau 5.4) pourrait expliquer en partie les valeurs de volume d'eau ruisselé et de masse sédiments entraînés plus élevés en saison des pluies.

Hormis les différences édaphiques et la saison de mesure (saison sèche et saison des pluies), les différences entre les sites pourraient également être liées au temps écoulé entre l'installation des essais/application des traitements et les mesures d'une part, et de l'autre le temps écoulé entre le travail du sol et les mesures. A Mulungu et Walungu, les mesures ont été faites 24 (saison sèche) et 27 mois (saison de pluies) après application de traitements et 5 (saison sèche) et 3 (saison des pluies) mois après le dernier labour sur les parcelles de T0. A Rubona, les mesures ont été faites 12 mois après l'application de traitements et une dizaine de jours seulement après le dernier travail du sol des parcelles de T0. Il est difficile de se prononcer sur l'effet de la durée d'installation des traitements. Par contre, la plus grande proximité temporelle entre le travail du sol et les mesures à Rubona pourrait mener à des valeurs plus élevées d'infiltration sur T0 que si les mesures avaient été faites plus tard. Malgré cela, les taux d'infiltration à Rubona étaient les plus faibles de trois sites.

Différences entre traitements et liens avec quelques propriétés physiques du sol

En saison sèche, à Mulungu, un volume d'eau ruisselé significativement inférieur sous T0 par rapport aux 3 autres traitements pourrait s'expliquer par les valeurs de Ks significativement supérieures (Tableau 5.12, Figure 5.3a). Par ailleurs, sous traitements T1, T2 et T3, le volume d'eau ruisselé est nettement plus important, soit en moyenne 10 à 18 fois supérieur que sous T0 alors que la masse de sédiments entraînés est, quant à elle,

similaire ou environ deux fois plus élevée (Tableau 5.12). Sur les parcelles de T1, T2 et T3, les mesures de concentration en sédiments dans l'eau de ruissellement montre qu'il faut entre 6 à 14 fois plus d'eau ruisselée pour entraîner la même quantité de sédiments que sur les parcelles de T0. L'eau tombée sur les parcelles de T1, T2 et T3 (en non labour et paillées) n'a donc que faiblement participé à la désagrégation et arrachage des agrégats du sol ainsi qu'à leur transport. L'absence de corrélation significative entre le volume d'eau ruisselé et la masse de sédiments entraînés sur les parcelles de T2 et T3 semble confirmer cette observation. Ainsi donc, le ruissellement plus important sous T2 et T3 s'explique vraisemblablement par la forte hydrophobicité du sol sous ces deux traitements (Tableau 5.2). L'hydrophobicité a comme effet d'accroître le ruissellement tout en retenant les particules du sol. Ce résultat concorde bien avec celui de Ghidey et Alberts (1996) cités par [Blanco-Canqui \(2011\)](#) qui, comparant les sols des parcelles en non labour et des parcelles labourées, ont rapporté que dans certains cas (notamment forte hydrophobicité en non labour), le ruissellement des parcelles en non labour peut être supérieur à celui des parcelles labourées.

Dans tous les sites, le volume d'eau ruisselé et la masse de sédiments entraînés en saison des pluies sont significativement supérieurs sous traitement T0 comparé aux traitements non labour paillés (Tableaux 5.12, 5.13 et 5.15). Les valeurs supérieures de ruissellement et de masse de sédiments sur les parcelles de T0 en saison des pluies peuvent également s'expliquer par le travail du sol et l'absence de couverture au sol préalablement aux mesures. Le travail du sol (labour) aurait comme effet, entre autres, de désagréger ou fragiliser les agrégats du sol et de les rendre plus vulnérables à la battance et à l'érosion. A Mulungu et Walungu, la

stabilité structurale était effectivement plus faible sous T0. Par ailleurs, l'absence de couverture au sol expose directement les agrégats du sol à l'agressivité des gouttes des pluies.

Le ruissellement étant le deuxième agent de détachement des sédiments et le mécanisme principal de leur transport, il est logique que les parcelles labourées et non paillées (T0) présentent des valeurs de concentration en sédiments dans l'eau du ruissellement supérieures à celles des parcelles en non labour et paillées. Ce détachement est par ailleurs favorisé en T0 par une plus faible stabilité structurale, telle qu'observée à Mulungu et Walungu.

En conditions de non labour avec ou sans paille externe, par contre, la présence permanente de mulch joue le rôle d'écran pour réduire l'énergie gravitaire des gouttes de pluies et permet de conserver la structure agrégée du sol. Le mulch favorise également l'activité des microorganismes qui produisent des composés aux effets agrégeant. Tous ces facteurs contribuent à accroître la résistance des agrégats du sol contre l'agressivité des gouttes des pluies, conserver la porosité du sol en surface, empêcher la mise en place d'une croûte de battance, et par conséquent limiter le ruissellement et l'érosion.

Lorsqu'on compare le traitement T1 (non labour + auto-paillage) et les traitements T2 et T3 (non labour + auto-paillage + paille externe), excepté pour le volume d'eau ruisselé en saison des pluies (Walungu), ces 3 traitements ne sont pas significativement différents quant à leurs effets sur le contrôle de l'érosion (Tableaux 5.12, 5.13 et 5.15). Pour les trois sites, l'apport de pailles externes n'a pas entraîné une amélioration plus importante de la structure du sol par rapport à l'auto-paillage. A noter que

les mesures effectuées reflètent la sensibilité du sol à l'érosion sous les différents traitements, et non pas la sensibilité des traitements à l'érosion, puisque la couverture de mulch était enlevée préalablement aux mesures.

Les taux d'infiltration mesurés sous simulateur de pluie sont nettement supérieurs aux valeurs de K_s déterminées au moyen de l'infiltromètre à succion. Quelques hypothèses peuvent être émises pour expliquer cet important écart :

- Premièrement, il faut noter que la conductivité hydraulique à saturation déterminée par infiltrométrie correspond à une infiltration verticale de l'eau dans le sol pour une charge nulle, celle-ci ne dépendant que de la gravité. Au contraire, les taux d'infiltration dérivés des mesures de simulateur de pluie correspondent à une infiltration à trois dimensions dans le sol ; elle n'est pas limitée à la direction verticale. De plus, une lame d'eau, de l'ordre de quelques millimètres, peut s'accumuler à la surface, augmentant ainsi la charge hydraulique et le gradient de potentiel total (gravité + potentiel matriciel). Enfin et surtout, le sol n'étant pas initialement à saturation, il existe un gradient de potentiel matriciel non nul dans le sol au cours de l'infiltration, ce qui a pour effet d'accroître le taux d'infiltration. Ces différences conduisent donc à une surestimation de cette deuxième variable par rapport à la première.
- Un autre élément explicatif résulte du fait que lors des simulations de pluie, de l'eau peut être stockée par des obstacles créés par le

paillage, des micro-dépressions, ou par des agrégats de terre plus importants. Les valeurs d'infiltration sont dès lors surestimées.

- Pour le site de Rubona uniquement, un labour à la houe, précédant le semis des haricots, a été réalisé par inadvertance sur les parcelles témoins (T0) entre les mesures de Ks et de simulateur de pluie. Celui-ci a eu comme effet de casser la croûte en place et d'augmenter la macroporosité. L'absence de croûte et la plus grande macroporosité due au labour pourrait donc expliquer en partie les valeurs plus élevées d'infiltration par rapport à Ks, mais seulement dans le cas des parcelles témoins.
- Il faut cependant rappeler que la croûte superficielle du sol avait été enlevée lors des mesures réalisées à l'aide de l'infiltromètre à succion, car celle-ci possède des propriétés hydrodynamiques différentes du reste du sol. En effet, sa présence n'est donc pas compatible avec les hypothèses de base de l'équation de Wooding utilisée pour interpréter les mesures d'infiltrométrie. Lors des mesures, il a pu être remarqué que la croûte était partout présente en saison des pluies, quel que soit le traitement, mais plus épaisse sur les parcelles de T0. La supposition peut être faite que les différences entre les deux mesures auraient probablement été encore plus grandes en sa présence.
- Enfin, lors de certaines mesures avec le simulateur de pluie, des petites fuites d'eau ont été observées hors du cadre en aluminium posé au sol. Celles-ci ont été colmatées au plus vite, mais leur

présence a également sous-estimé le ruissellement et donc surévalué le taux d'infiltration lors de ces mesures.

Aux sites de Mulungu et Walungu, les mesures relatives à la conservation du sol (stabilité structurale, infiltrométrie et contrôle de l'érosion) ont été faites en saison sèche et en saison des pluies. Contrairement aux mesures faites en saison des pluies, les valeurs obtenues en saison sèche ont été mesurées dans des conditions expérimentales différentes des conditions naturelles que l'on rencontrerait au cours de la saison des pluies. Ainsi, nous ne saurions clôturer cette discussion sans nous poser la question de savoir : Quel est l'intérêt pratique des mesures faites en saison sèche ? L'intérêt pratique des mesures faites en saison sèche réside en ceci, qu'elles permettent de comprendre la réponse des traitements à la pluie 1) en début de saison des pluies, et 2) suite à des périodes de dessiccation prolongée. On a donc pu mettre en évidence que les traitements paillés présentent un risque accru de ruissellement après une période sèche prolongée, sans toutefois accroître le risque de perte en terre par érosion diffuse. A l'avenir, il conviendrait de préciser à quelle vitesse l'hydrophobicité s'installe et la durée pendant laquelle les effets de l'hydrophobicité se maintiennent après le démarrage de la saison des pluies.

Les résultats de cette étude ont permis de comprendre la performance de systèmes de cultures alternatifs au système local courant (labour et exportation des résidus de bananiers) dans la conservation des sols des systèmes de culture bananier-haricot de la RGLA. Toutefois, du point de vue scientifique, les traitements appliqués entretiennent un flou dans la mesure où ils ne permettent pas de tirer des conclusions univoques quant à l'effet

individuel du paillage et du non labour sur les paramètres étudiés. De nouveaux essais intégrant deux traitements additionnels (labour + paillage, non labour et non paillage) s'avèrent donc nécessaire afin de pouvoir différencier les effets des techniques du travail du sol de ceux du paillage.

5.5 Conclusions

Cette étude a montré que les propriétés hydrodynamiques des sols de Mulungu, Walungu et Rubona varient largement et seraient liées à leurs propriétés intrinsèques. Les valeurs les plus élevées de volume d'eau ruisselé et de masse de sédiments entraînés sont observées sur le sol de Rubona, caractérisé par de plus faibles valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_s) et des agrégats du sol les moins stables du fait de sa forte teneur en sable et d'une plus faible teneur en Corg et en oxydes (Fe et Al). Les différences observées entre Mulungu et Walungu seraient principalement dues à des différences de K_s et d'hydrophobicité (saison sèche).

Au niveau de chaque site, le travail du sol et le paillage ont affecté de manière significative les propriétés des sols. Pour tous les sites et les deux saisons de mesure, le travail du sol (T0) a réduit la stabilité structurale comparé aux traitements en non labour avec paillage (T1, T2 et T3) qui, sauf pour les mesures faites à Walungu, n'ont pas révélé des différences significatives. La gradation des valeurs de MWD observée depuis le traitement T0 (labour et sans paillage) jusqu'aux traitements T2 et T3 (non labour avec paille externe) montre que l'apport supplémentaire de matière organique permet d'accroître la stabilité structurale du sol par rapport aux résidus de bananiers uniquement. Le non labour avec paillage (T1, T2 et T3)

a permis de diminuer significativement le taux d'érosion (env. 10 fois moindre) et le ruissellement (2 à 4 fois moindre) par rapport au T0 à Rubona. Sur ce site, le non labour avec paillage de chaume de riz (T2) a également induit un Ks significativement supérieur à celui de T0. A Mulungu et Walungu, le non labour avec paillage a augmenté l'hydrophobicité, ce qui a réduit le Ks (Mulungu en saison sèche et Walungu pour les deux saisons) et augmenté le ruissellement (Mulungu en saison sèche). Quels que soient le site et la saison de mesure, la concentration en sédiments dans l'eau de ruissellement est plus importante sur les parcelles de T0, indiquant que le travail du sol et l'absence de couverture au sol semblent être deux pratiques culturales qui favorisent l'érodibilité des sols. Ces résultats suggèrent que les pratiques culturales sans labour sont nécessaires pour la conservation des sols des associations bananier-haricot de la RGLA.

Chapitre 6. Discussion générale et perspectives

6.1 Discussion générale

Dans cette thèse, nous avons évalué l'influence du travail et de la couverture du sol sur les propriétés physiques du sol et le système racinaire du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique (RGLA). En particulier, les objectifs spécifiques étaient de : (i) identifier les contraintes édaphiques des systèmes bananiers dans les différentes zones pédoclimatiques de la RGLA (Sud-Kivu en RD Congo, Rwanda et Burundi), (ii) quantifier l'impact des pratiques culturales (labour / non labour, paillage) sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du bananier, et enfin (iii) évaluer l'impact des pratiques culturales (labour / non labour, paillage) sur la conservation du sol (stabilité structurale du sol, contrôle de l'érosion, infiltration).

Avancées et limitations

1. Propriétés édaphiques des sols de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega et distribution de l'enracinement du bananier de hautes altitudes de la RGLA (**Chapitre 2**).

Avancées

Une bonne production bananière requiert, entre autres, des racines fonctionnelles et en bon état sanitaire ([Araya, 2005](#)). Au champ, les racines du bananier sont soumises aux contraintes biotiques et abiotiques ([Delvaux](#)

et Guyot, 1989) qui peuvent affecter négativement leur croissance. Ainsi, la compréhension de la relation entre les propriétés du sol et le système racinaire est nécessaire afin d'améliorer les conditions de croissance des racines. Cette relation a été étudiée en détail dans plusieurs régions de production bananière à travers le monde, notamment en Guadeloupe (Dorel, 2000), en Martinique (Delvaux et Guyot, 1989), au Costa Rica (Gauggel et al., 2005 ; Vaquero, 2005), au Nigeria (Blomme, 2000). Pour la RGLA, une caractérisation simultanée des profils pédologique et racinaire du bananier n'a pas jusque-là été rapportée. Toutefois, quelques études (par exemple, Sebuwufu et al., 2004 ; Blomme et al., 2008) ont décrit la variabilité dans la distribution racinaire de différents génotypes de bananier de hautes altitudes de la RGLA. Ces études, conduites en Ouganda et en Ethiopie, ont rapporté i) une baisse de la densité racinaire avec la profondeur du sol, ii) des différences significatives dans le poids frais et la longueur des racinaires primaires des différents cultivars, iii) une distribution similaire des racines autour du pseudo-tronc quel que soit le génotype.

Sur quatre sites d'essai et trois types de sols (Nitisols, Ferralsols, Acrisols), nous avons décrit les propriétés édaphiques (physiques et chimiques) et cherché à établir la relation entre ces propriétés et le système racinaire du bananier. La caractérisation pédologique montre que les propriétés physiques et chimiques des sols de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega se différencient fortement. Suivant les types de sols, un gradient décroissant de fertilité s'établit entre les sites : Mulungu (Nitisol sur cendres volcaniques) > Walungu (Ferralsol humique) > Rubona (Acrisol sur granite) > Gitega (Ferralsol rhodic). La distribution racinaire varie également fortement suivant les sites et est fortement liée aux types de sols. La

densité racinaire maximale a évolué dans le même sens que le gradient de fertilité : Mulungu (entre 3 et 4 racines/dm²) > Walungu (entre 2 et 3 racines/dm²) > Rubona (entre 1 et 2 racines/dm²) > Gitega (<0,5 racine/dm²). La profondeur maximale d'enracinement semble quant à elle principalement régie par les propriétés physiques, notamment l'accroissement de la densité apparente, de la résistance mécanique et de la teneur en argile qui limitent l'exploration racinaire dans les horizons profonds du sol. Ceci qui confirme notre première hypothèse : la distribution racinaire du bananier de hautes altitudes de la RGLA est fortement dépendantes des propriétés édaphiques qui, elles-mêmes, sont fortement liées aux types de sols.

Sur base des propriétés édaphiques des sites d'étude, les contraintes au développement racinaire du bananier sont notamment les valeurs élevées de résistance mécanique du sol dès 20 cm, les faibles teneurs en K et P, une toxicité manganique (30-50 cm) à Walungu ; une faible teneur en carbone organique, une déficience en Ca, Mg, K et en P assimilable et un pourcentage élevé en sable (57-71%) à Rubona ; des valeurs de pH très acides (pH ≤5,1), un taux de saturation en Al échangeable élevé (21 à 29%), un ratio Al/bases échangeables élevé (52 à 88%), une déficience en Ca, Mg, K, P assimilable et Mn à Gitega. Le site de Mulungu, par contre, ne présente pas de stress abiotiques apparent liés au sol. L'identification de ces contraintes peut guider le choix des pratiques culturales adéquates pour favoriser la croissance et le développement racinaire du bananier : améliorer la fertilité du sol (correction du pH et apport en éléments minéraux) à Gitega, accroître la teneur en carbone organique et en éléments minéraux à Rubona et Walungu. Le travail du sol avant la plantation du bananier serait également nécessaire sur le sol de Walungu

qui présente des valeurs très élevées de résistance mécanique du sol dès les horizons de surface. A Mulungu, des mesures de conservation du sol (paillage) seraient nécessaires pour maintenir ses propriétés édaphiques optimales pour la croissance et le développement racinaire du bananier.

Limitations

L'interprétation des données pédologiques s'est basée sur les valeurs seuils de la littérature dont certaines ont été établies sur base de types de sols différents de ceux étudiés ici. D'autres auteurs (par exemple [van Asten et al, 2005](#)) recommandent la validation des valeurs seuils des analyses des sols par les analyses des tissus végétaux (racines, feuilles) qui donnent une bonne appréciation de l'état nutritionnel des plantes. Ces aspects n'ont pas été abordés dans cette étude.

Le faible nombre de sites (4 sites) d'étude : cette étude doit être complétée par d'autres observations sur d'autres sites.

2. Impact du travail du sol manuel et du non labour (couverture du sol) sur les propriétés physiques et l'enracinement du bananier des horizons de surface (0-40 cm) (**Chapitres 3 et 4**).

2.1 Avancées

Cette étude a quantifié l'impact du travail du sol manuel et de la couverture du sol sur propriétés physiques d'une part. D'autre part, elle a évalué l'impact à court et moyen termes sur l'enracinement du bananier dans les horizons de surface (0-40 cm). En comparant la densité apparente et la résistance mécanique avec les caractéristiques racinaires (densité racinaire, biomasse, longueur, état sanitaire) et la croissance du bananier des parcelles labourées et non paillées avec celles des parcelles en non labour

avec ou sans paille externe, cette étude a permis de collecter les données qui mettent en évidence:

1. L'impact négatif du travail du sol manuel, quel que soit l'outil de travail primaire du sol (houe manuelle ou trident), sur les racines du bananier localisées sur les dix premiers centimètres du sol. Immédiatement après le travail du sol manuel, le poids frais et la longueur des racines primaires des parcelles labourées ont été réduits de 74% dans les anciennes plantations (essai en milieu paysan) et 95% dans les jeunes plantations (essai en milieu contrôlé) par rapport à ceux des parcelles en non labour. La régénération racinaire du bananier consécutive au travail du sol manuel requiert plusieurs mois et se fait plus rapidement pour les anciennes plantations que les jeunes plantations. Dans ces dernières, la régénération racinaire dans les parcelles labourées et non paillées n'a pas atteint le niveau observé dans les parcelles en non labour et paillées.
2. Une amélioration temporaire des propriétés physiques du sol consécutive au travail du sol : le travail du sol manuel a réduit de manière significative la résistance mécanique du sol mais n'a pas eu d'effet sur la densité apparente mesurée deux mois après le dernier travail du sol.
3. Un impact positif du non labour avec paillage sur l'enracinement du bananier : l'abandon du travail du sol manuel a induit une résistance mécanique légèrement plus élevée par rapport aux parcelles labourées depuis deux mois mais n'a pas eu d'impact

négalif sur le système racinaire du bananier. Au contraire, l'absence du travail du sol a favorisé le maintien d'une densité racinaire supérieure à celle des parcelles labourées et non paillées dans la couche superficielle du sol (0-10 cm).

4. Un impact négatif du travail du sol avec exportation de résidus de bananier sur la croissance du bananier des jeunes plantations.
5. Le remplacement du labour avec exportation de résidus par le non labour avec paillage ne se traduit pas par une amélioration de la croissance du bananier après 15 à 21 mois (anciennes plantations à Kabamba).
6. Trente mois après plantation, l'apport de paille externe n'a pas permis d'améliorer la structure du sol (densité apparente, résistance mécanique) ni favorisé le développement racinaire par rapport au paillage avec les résidus de bananiers uniquement.
7. Le travail du sol n'a pas affecté l'état sanitaire des racines.

Ces résultats permettent de confirmer l'hypothèse : le travail du sol a un impact négatif sur le système racinaire du bananier, en réduisant la densité, la biomasse et la longueur racinaires dans la couche du sol labourée. Toutefois, le travail du sol ne favorise pas l'infestation des nématodes. Ces résultats montrent également que les deux outils de travail primaire du sol dans les bananeraies de la zone d'étude (houe avec une lame de 20 cm et trident avec dents de 20 cm de longueur) ne conviennent pas pour un travail du sol devant épargner la totalité des racines du bananier.

2.2 Limitations

Ces résultats concernent les parcelles labourées et non paillées et les parcelles en non labour et paillées, sans distinction sur l'implication respective de ces deux pratiques culturales.

Une mesure ponctuelle des propriétés physiques (densité apparente, résistance mécanique), effectuée 2 mois après le dernier travail du sol (parcelles témoins) ne permet pas d'évaluer la dynamique des propriétés physiques sur les parcelles labourées. Du fait d'un travail du sol bisannuel sur les parcelles labourées (témoins) qui, à priori, ameublisse le sol (réduction de la densité apparente et de la résistance mécanique), l'amélioration de la structure du sol sur les parcelles en non labour et paillées devrait être comparée au précédent cultural (mesures effectuées avant l'application des traitements) plutôt qu'à celle des parcelles labourées. Ces mesures avant l'application de traitement n'ont cependant pas été effectuées.

La régénération racinaire du bananier consécutive au travail du sol a été évaluée sur sols de Mulungu et Kabamba qui sont les plus fertiles des sols étudiés ici (Tableaux 2.5 et 4.7). Ceci ne permet pas de comprendre la réponse du bananier au travail du sol sur un sol moins fertile.

Dans une bananeraie établie, les bananiers appartiennent à différents stades de développement. Nos observations, faites uniquement sur des plants ne devant pas entrer en stade de floraison 6 mois plus tard, ne permettent d'identifier le stade du développement du bananier auquel l'impact du cisaillement des racines est plus marqué.

3. Impact du travail manuel du sol et de la couverture sur la conservation des sols des associations bananier-haricot

3.1 Avancées

Comparativement aux études antérieures qui ont évalué la conservation du sol en monoculture bananière (Rhishirumuhirwa, 1993, 1997), la présente étude a évalué la conservation du sol au sein d'une association bananier-haricot et a pris en compte le travail du sol manuel avec exportation des résidus qui constitue le mode de gestion local courant des bananeraies dans la zone d'étude. Il a été noté que le travail du sol et l'absence de couverture réduit la stabilité structurale et accroît la susceptibilité du sol à l'érosion sous bananier. Pour les deux saisons de mesure (saison sèche et des pluies), un accroissement graduel des valeurs de stabilité structurale est observée depuis les parcelles labourées et non paillées (témoins), les parcelles en non labour et paillées avec les résidus de bananier uniquement et les parcelles en non labour avec la paille externe (*Hyparrhenia diplandra*/chaume de riz, *Tripsacum laxum*). Le non labour avec paillage peut entraîner un accroissement de l'hydrophobicité en saison sèche, ce qui réduit le taux d'infiltration et favorise le ruissellement. Ce phénomène a été plus marqué sur les parcelles en non labour avec paille externe d'*Hyparrhenia* et de *Tripsacum*. Toutefois, l'accroissement du ruissellement consécutif à l'hydrophobicité sur les parcelles en non labour et paillées contribue faiblement à l'arrachage des particules du sol et au transport des sédiments. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'hydrophobicité accroît la stabilité des agrégats du sol en réduisant la vitesse d'humectation des agrégats du sol (faible éclatement des agrégats du sol). Ainsi, la concentration en sédiments dans l'eau du ruissellement des parcelles en non labour et paillées était plus faible que celles des parcelles labourées et non paillées. La comparaison des mesures effectuées en saison sèche avec celles de la saison des pluies a permis de comprendre la réponse des traitements à la pluie 1) en début de saison des pluies, et 2) suite à des périodes de dessiccation prolongée. Cette étude a pu mettre en évidence

que les traitements paillés présentent un risque accru de ruissellement après une période sèche prolongée, sans toutefois accroître le risque de perte en terre par érosion diffuse. Ces résultats confirment l'hypothèse : le non labour avec paillage améliore la conservation du sol des associations bananier-haricot. Toutefois, l'impact positif du non labour avec paillage sur les propriétés du sol peut varier suivant les sites et les types de paillage. Contrairement à Rubona, il a été constaté par exemple, une plus faible conductivité hydraulique à saturation sur les parcelles en non labour avec paillage de *Tripsacum* comparé aux parcelles labourées à Mulungu et Walungu. D'où la nécessité de sélectionner les types de résidus pour le paillage à l'échelle locale.

3.1 Limitations

Comme évoqué antérieurement, la comparaison des parcelles labourées et non paillées avec les parcelles en non labour avec paillage externe ne permet pas de discriminer l'effet du travail du sol de celui de la couverture du sol.

Les mesures d'érosion ont été effectuées au moyen d'un simulateur de pluie. Sur les parcelles en non labour et paillées, l'endroit choisi pour la mesure était dégagé de gros résidus (paillage) recouvrant sa surface et pouvant empêcher l'eau le sol lors de la simulation de pluie. Dans ces conditions, ces mesures reflètent la sensibilité du sol à l'érosion sous les différents traitements, et non pas la sensibilité des traitements à l'érosion.

6.2 Perspectives

Les résultats de cette recherche ouvrent de nouvelles perspectives ci-après :

1. Dispositif expérimental

Quatre traitements ont été évalués dans cette étude (Tableau 2.2) : le traitement T0 ou témoin (labour avec exportation de résidus de bananier) a été comparé à trois traitements alternatifs en non labour sans (T1) ou avec paille externe (T2 et T3). Les résultats de cette étude concernent les parcelles en non labour et paillées ou labourées et non paillées, sans distinction sur l'implication respective de ces deux pratiques culturales. Certes, des systèmes culturels tels que non labour avec exportation de résidus de bananiers ou le paillage sur les parcelles préalablement labourées ne se pratiquent généralement pas. Toutefois, du point de vue scientifique, cela se justifierait afin de pouvoir tirer des conclusions univoques quant à l'effet individuel du paillage et du labour sur les paramètres étudiés. Un dispositif expérimental intégrant les parcelles labourées et paillées et les parcelles non labourées et non paillées est indispensable pour séparer l'effet du travail du sol de celui du paillage.

Dans la littérature, l'impact à court terme du travail du sol dans une bananeraie établie n'a pas jusque-là été quantifié. Cette étude constitue la première étude détaillée évaluant l'impact d'un travail du sol bisannuel sur l'enracinement et la croissance du bananier. Ainsi, des mesures supplémentaires seraient nécessaires pour confirmer les résultats de nos observations.

Nos mesures, effectuées sur une période d'environ 3 ans après la mise en place des essais (essais contrôlés) et une année après application des traitements (essais en milieu paysan), reflètent les effets à court et moyen termes des traitements. Dans la mesure où la durée d'exploitation des

bananeraies dépasse plusieurs dizaines d'années dans la zone d'étude, il serait nécessaire d'évaluer également les effets à long terme des traitements.

2. Travail du sol dans une association culturale bananier-cultures annuelles

Dans une association bananier-cultures annuelles (haricot), le travail du sol est pratiqué dans le but de préparer le lit de semis de haricot. Ainsi, il serait nécessaire d'évaluer l'impact du travail du sol sur la croissance et le rendement de haricot. Le travail du sol pourrait favoriser le développement initial du haricot en améliorant temporairement les propriétés physiques du sol, ainsi qu'en réduisant la compétition souterraine entre les haricots et les bananiers. Des études supplémentaires seront nécessaires pour évaluer si la restitution de résidus de culture dans les bananeraies labourées suffit à réduire l'impact négatif du labour sur la croissance et le développement du bananier. Pour le bananier dont le produit utile est le fruit (banane), il importe également de mesurer l'effet du travail du sol sur les paramètres de rendement (nombre de fruits, poids de régime) plutôt que sur les paramètres de croissance, en ceci qu'une bonne croissance des plantes ne correspond pas toujours à un bon rendement.

Contrairement à notre zone d'étude (Sud-Kivu, Rwanda et Burundi), l'association culturale bananier-cultures annuelles est conduite en non labour dans d'autres pays de la RGLA (par exemple l'Ouganda et le Kenya). Il paraît donc que l'abandon du travail du sol dans une association culturale bananier-haricot est compatible avec la production de haricot. L'analyse des rendements des cultures (bananier et haricot, Thèse de Syldie

Bizimana) permettra de juger de la pertinence du travail du sol dans les conditions édaphiques de nos essais.

Les systèmes culturaux non labour avec apport de paille externe impliquent des coûts supplémentaires liés à l'achat, au transport et l'application de paille externe. De même, les parcelles labourées et non paillées impliquent des coûts spécifiques liés au travail du sol. Au-delà des rendements, il serait plus approprié d'évaluer la productivité et la rentabilité de ces différents systèmes culturaux.

[Rhishirumuhirwa \(1993\)](#) a montré que la culture bananière jouait un rôle important dans la gestion et la conservation des sols ferralitiques du Burundi, grâce à sa capacité à produire une masse importante de biomasse. Le transfert de résidus post-récolte de bananes vers l'élevage ramenait le fumier dans la bananeraie alors que le transfert des résidus de récolte vers d'autres cultures (caféier) appauvrissait le sol sous bananier au profit du caféier. En Chine, [Zhong et al. \(2014\)](#) ont rapporté que l'exportation ou l'incinération de résidus de bananiers entraînait une perte de 16 kg N/ha et affectait négativement le rendement du bananier. Si le transfert de résidus post-récolte de bananes est nécessaire pour accroître la productivité d'autres cultures, il est cependant important de garder une quantité minimale d'auto-paillage pour maintenir la fertilité et conserver le sol sous bananier. Pour chaque site, une telle quantité d'auto-paillage nécessite d'être déterminée. Un travail du sol avec exportation totale de résidus tel que pratiqué dans la zone d'étude n'est pas recommandable si l'on veut conserver le sol sous bananier.

Dans cette étude, trois types de paille ont été appliqués : résidus de bananiers uniquement (traitement T1), paillage d'*Hyparrhenia*/chaume de riz (traitement T2) et paillage de *Tripsacum* (traitement T3). Les parcelles de chacun des trois traitements ont produit de résidus (feuilles non fonctionnelles, feuilles et pseudo-tronc à la récolte) qui constituent l'auto-paillage. Si l'on considère les mesures faites en saison des pluies qui concernent tous les sites, d'une manière générale, l'apport de paille externe (37,5 t MS/ha de paille externe, 25 t MS/ha à la 1ère année et 12,5 t MS/ha à la 2ème année) n'a pas amélioré considérablement les propriétés et l'enracinement du bananier par rapport résidus de bananiers (16,7 t MS/ha à la première année uniquement, moyenne des trois sites). Ceci pourrait être due au fait que la paille est appliquée à la surface du sol et se minéralise progressivement. Une incorporation dans le sol aurait pu avoir un effet proportionnel à la quantité de paille. Ainsi, à défaut d'apport de paille externe, l'auto-paillage s'avère donc nécessaire pour la culture bananière.

Annexes

Annexe 1.

Annexe 1a Teneurs (%) en éléments totaux exprimés sous forme d'oxydes, TRB (somme des cations alcalins et alcalino-terreux totaux) et teneur en phosphore total (P_{tot}), mesurés sur quatre profondeurs pour les sols de Mulungu, Walungu, Rubona et Gitega.

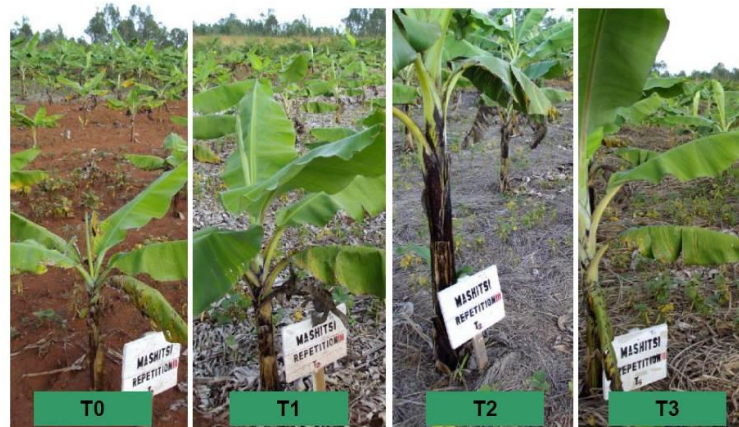
	Prof.									
Site	(cm)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TRB	P _{tot.}
		%							cmolc/kg	(g/kg)
Mulungu	0-10	19.17	15.04	1.50	0.80	0.08	0.65	0.63	105	10.0
	30-40	18.72	15.02	1.75	0.98	0.07	0.69	0.63	123	10.7
	60-70	22.89	16.43	0.95	0.66	0.06	0.54	0.59	76	6.9
	80-90	21.96	16.15	0.79	0.68	0.05	0.55	0.50	72	6.3
Walungu	0-10	19.83	23.04	0.47	0.56	0.03	0.15	0.61	47	1.1
	30-40	19.91	22.23	0.34	0.51	0.03	0.13	0.53	39	0.8
	60-70	17.15	19.21	0.52	0.40	0.02	0.13	0.33	41	0.8

	80-90	21.26	22.00	0.38	0.43	0.02	0.14	0.38	37	1.0
Rubona	0-10	7.19	2.69	0.38	0.09	0.03	0.38	0.08	25	0.4
	30-40	7.72	2.74	0.28	0.09	0.03	0.39	0.09	22	0.3
	60-70	9.91	3.23	0.16	0.10	0.03	0.42	0.08	19	0.3
	80-90	10.64	3.45	0.20	0.10	0.03	0.43	0.06	21	0.2
Gitega	0-10	14.99	8.44	0.16	0.09	0.02	0.12	0.01	13	0.4
	30-40	16.58	8.86	0.18	0.09	0.02	0.10	0.01	13	0.3
	60-70	14.57	10.07	0.14	0.10	0.02	0.11	0.02	13	0.3
	80-90	15.35	10.04	0.07	0.11	0.02	0.12	0.02	11	0.3

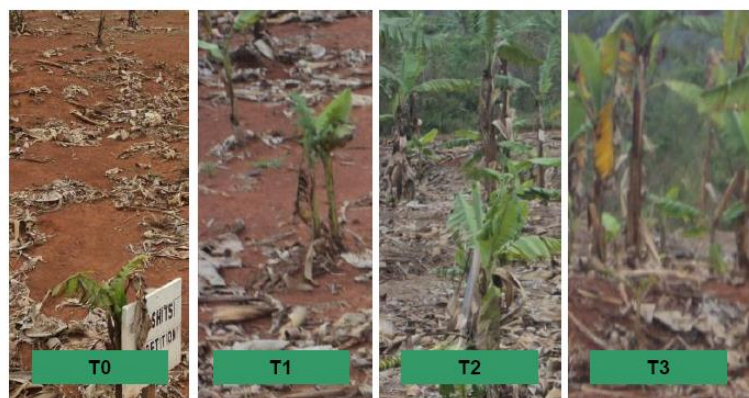


Annexe 1b Vue générale de l'essai de Gitega, 30 mois après la plantation. A l'avant plan, traitement T1 (auto-paillage) ; à l'arrière-plan, on distingue plusieurs parcelles paillées avec un mulch externe.

Annexe 2



Annexe 2a. Vue de l'essai de Gitega, 14 mois après la plantation.



Annexe 2b. Vue de l'essai de Gitega, 30 mois après la plantation.

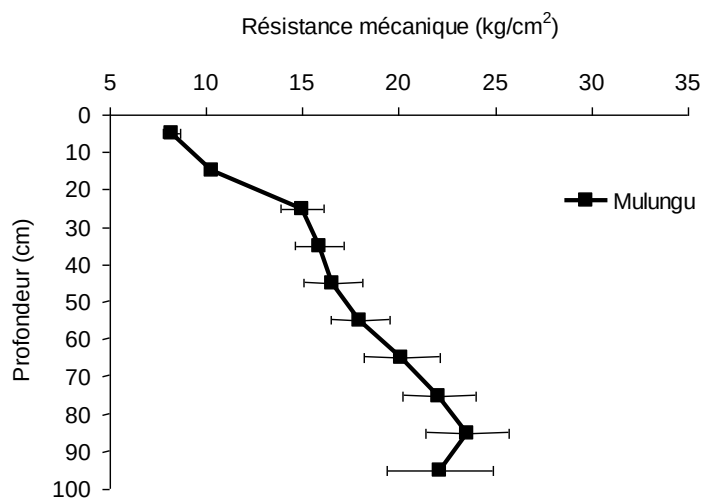
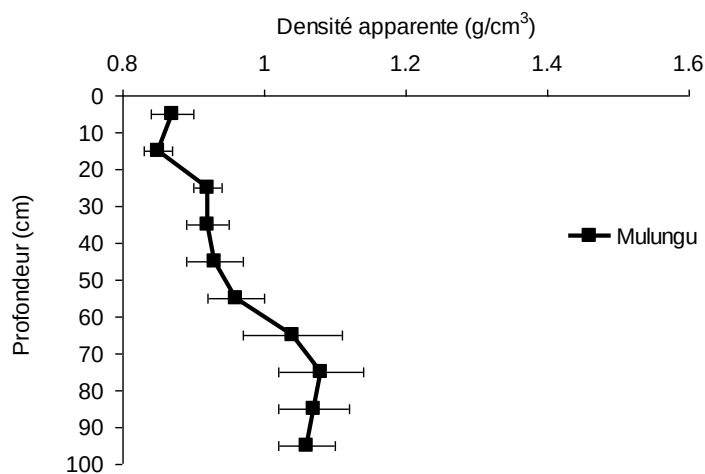
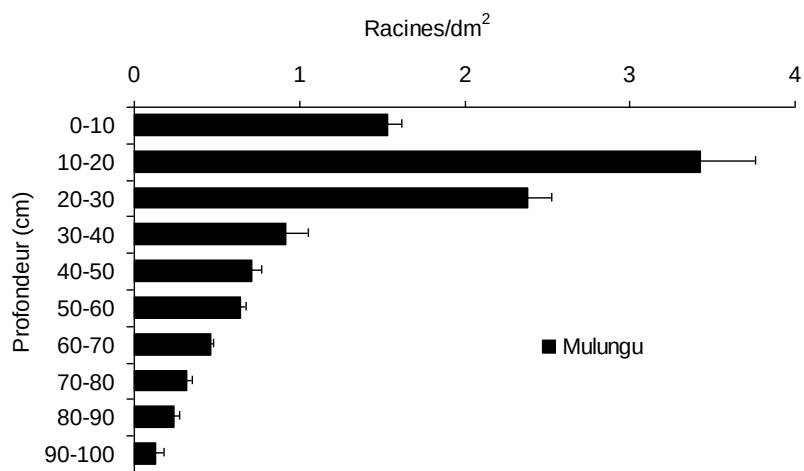
Annexe 3. Figures de densité racinaire, densité apparente, résistance mécanique, composition et profil racinaire groupés suivant les sites.

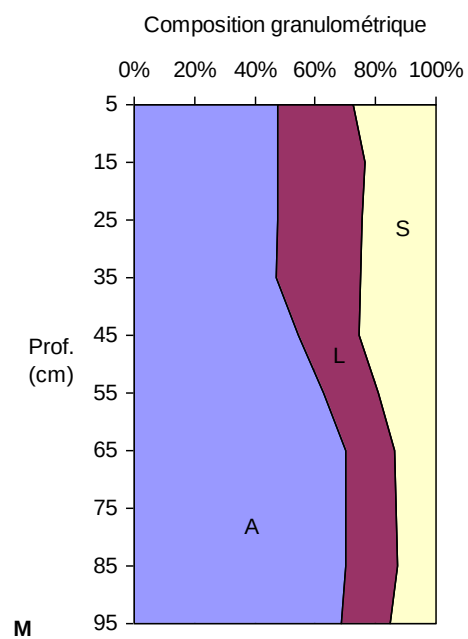
Annexe 3.a. Mulungu

Annexe 3.b. Walungu

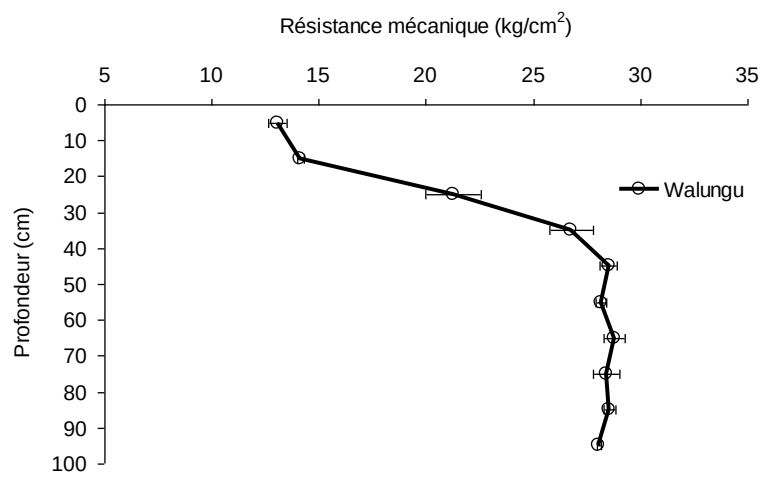
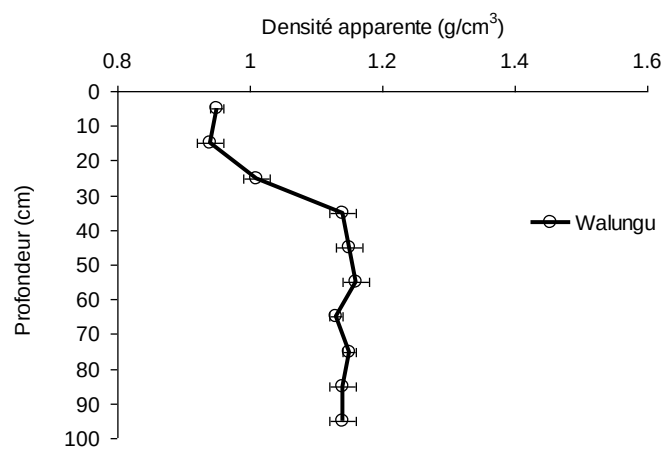
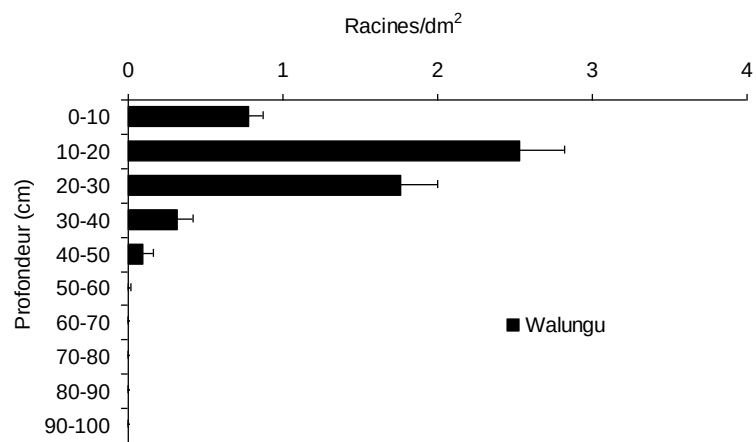
Annexe 3.c . Rubona

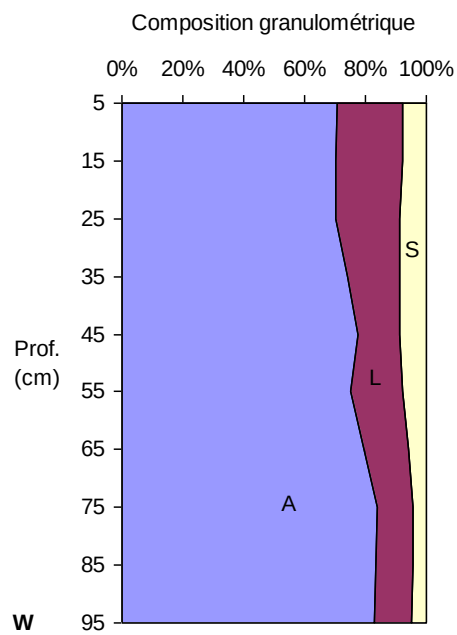
Annexe 3.d. Gitega



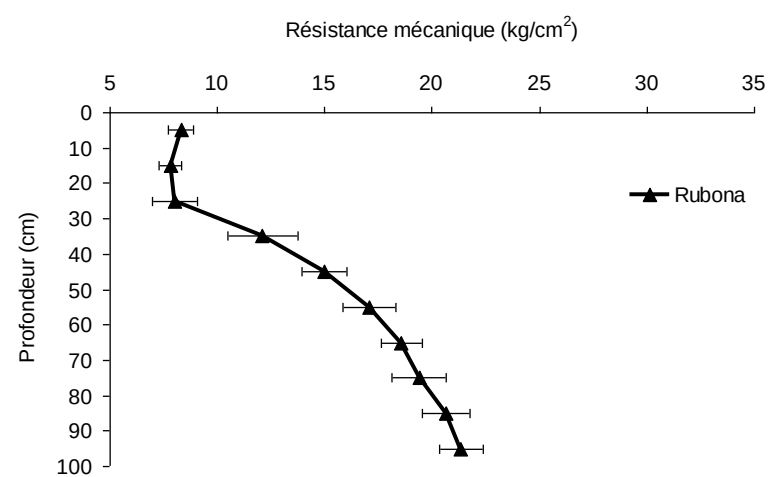
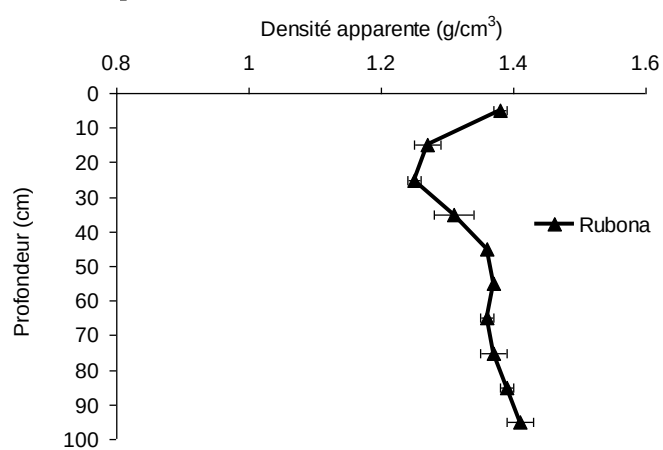
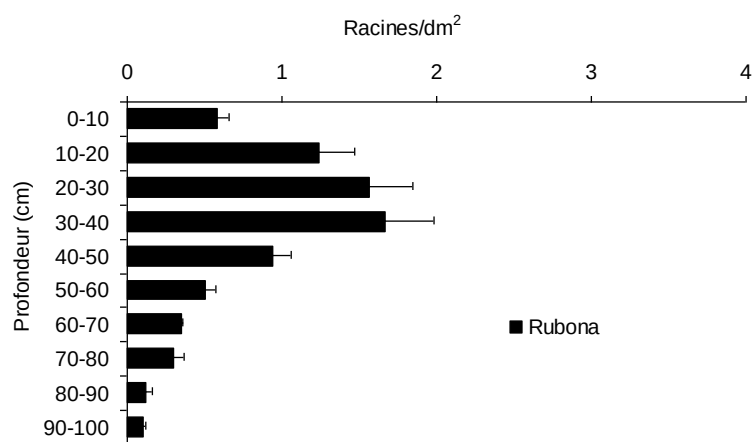


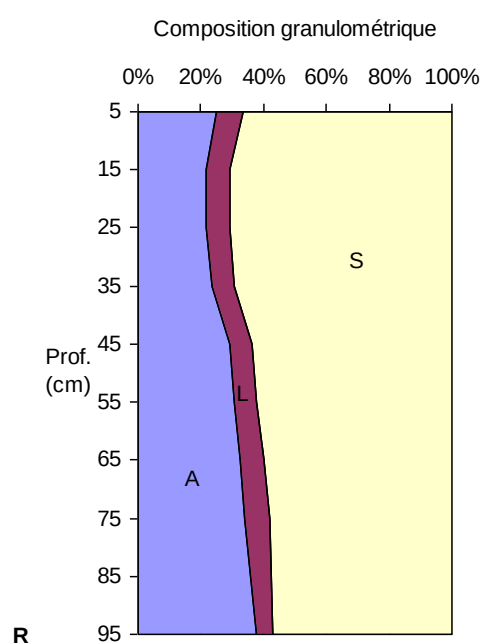
Annexe 3a. Densité racinaire, densité apparente, résistance mécanique, composition granulométrique du sol et profil racinaire au site de Mulungu.



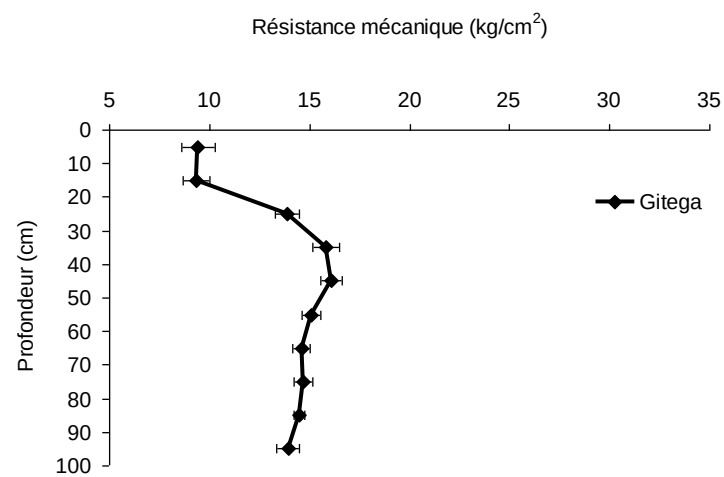
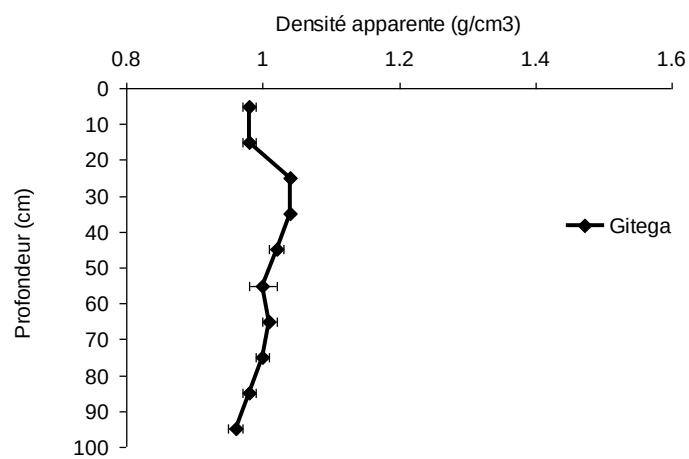
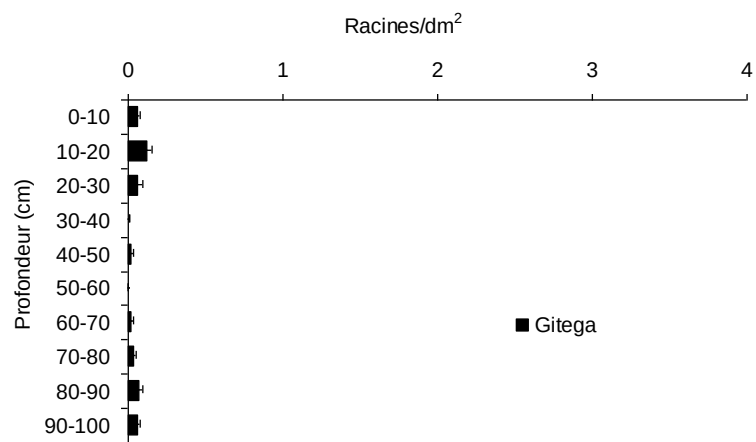


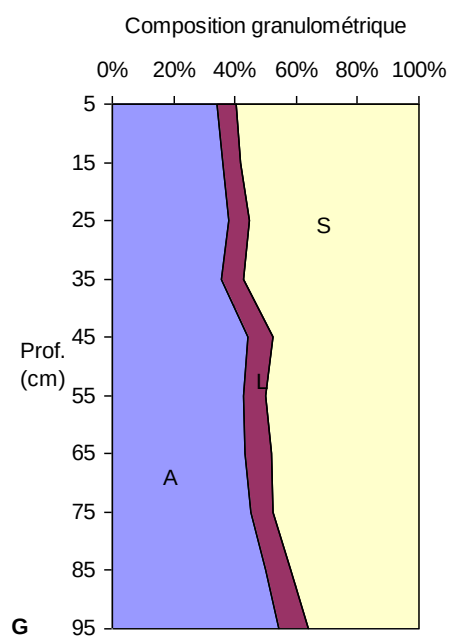
Annexe 3b. Densité racinaire, densité apparente, résistance mécanique et composition granulométrique du sol mesurées au site de Walungu.





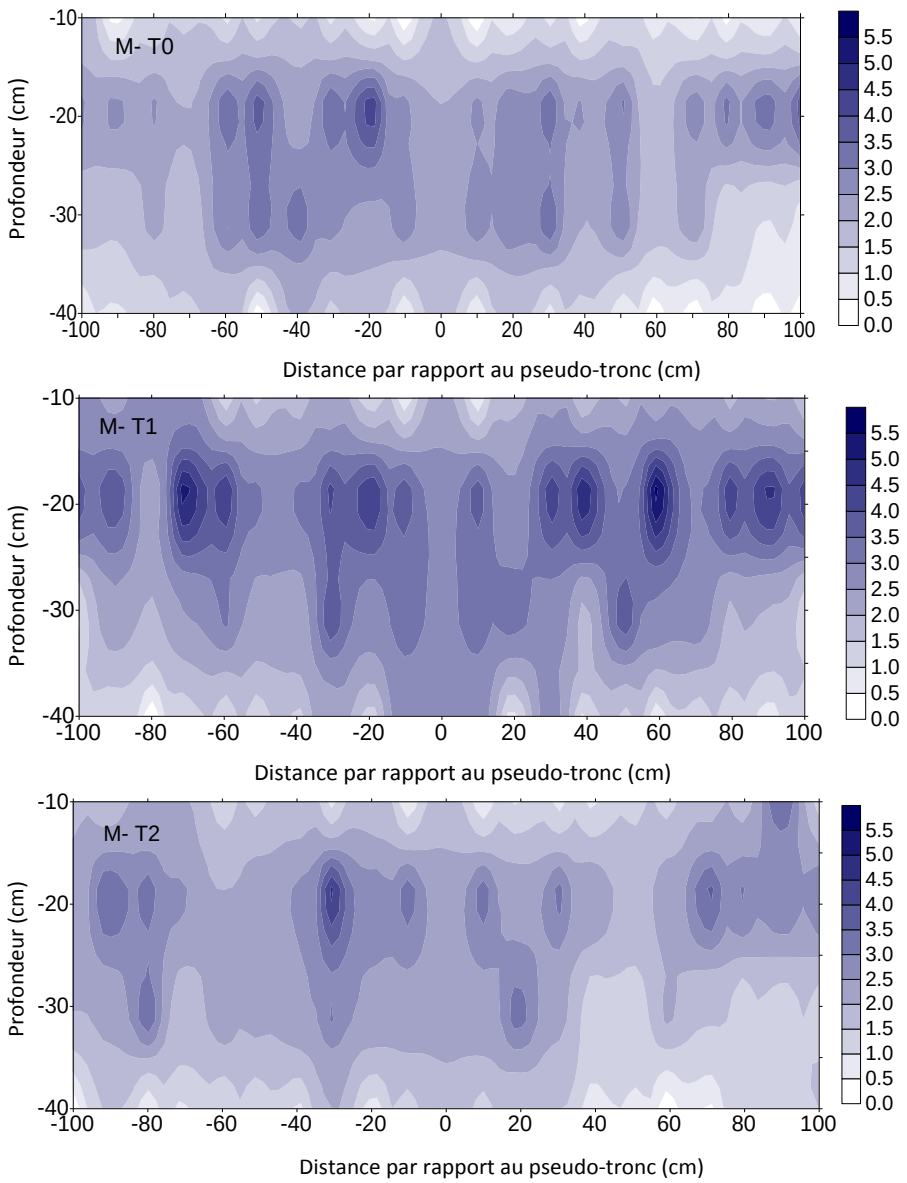
Annexe 3c. Densité racinaire, densité apparente, résistance mécanique, composition granulométrique du sol et profil racinaire au site de Rubona.

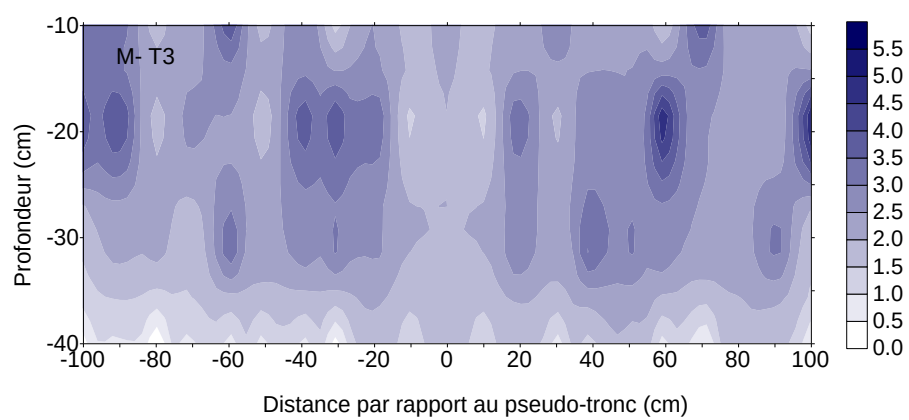




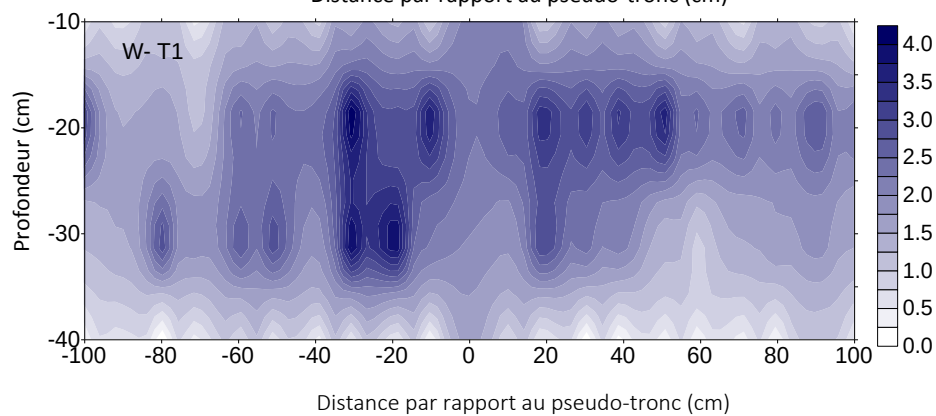
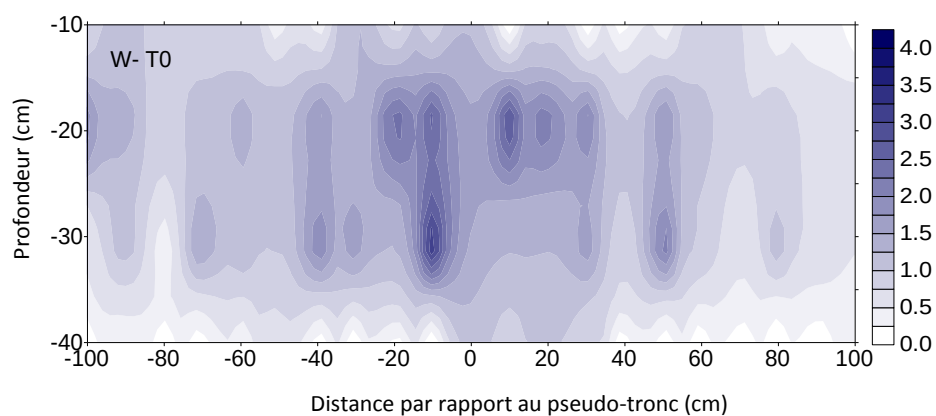
Annexe 3.d. Densité racinaire, densité apparente, résistance mécanique, composition granulométrique du sol et profil racinaire au site de Gitega.

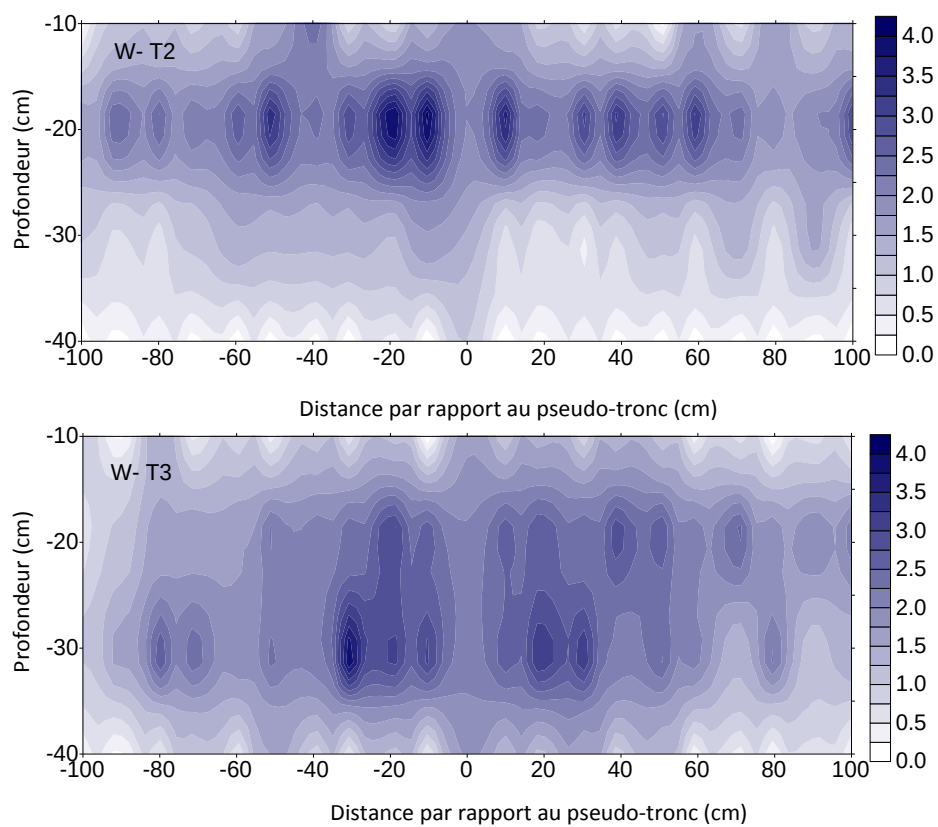
Annexes 4. Distribution spatiale des racines



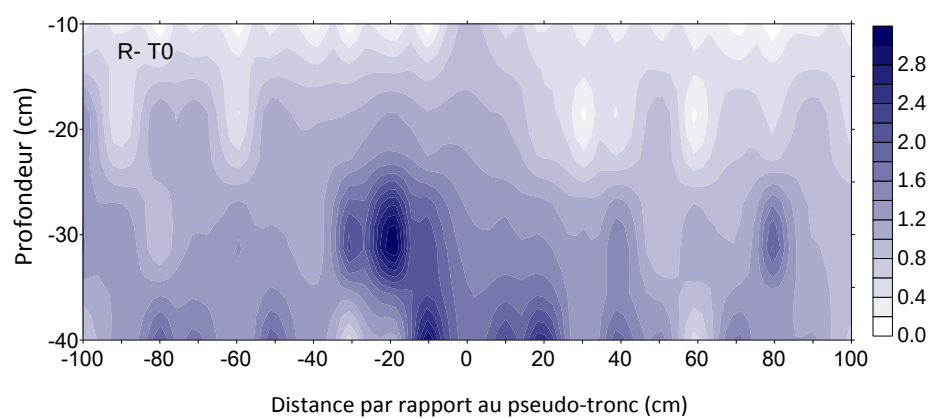


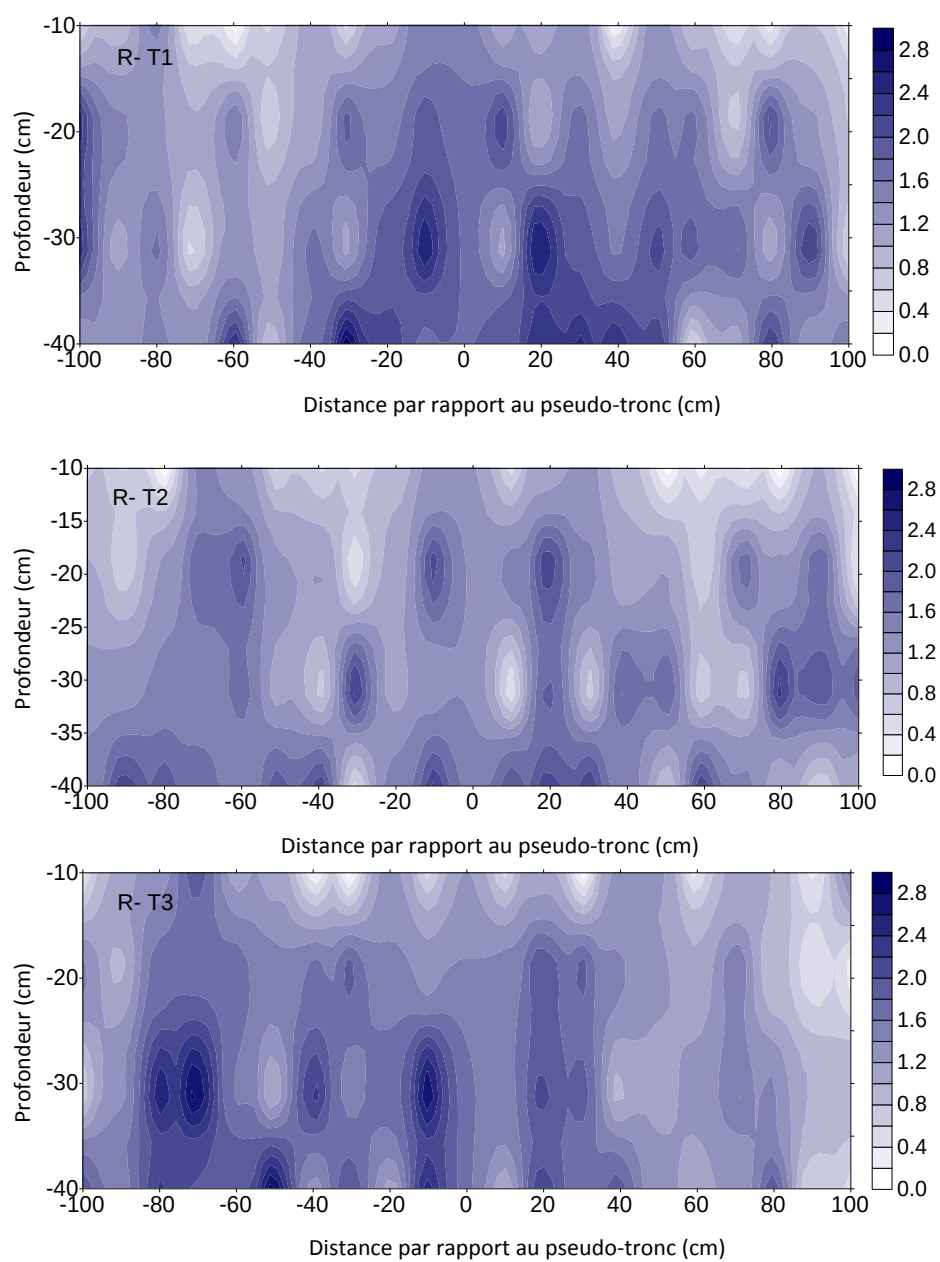
Annexe 4. 1. Distribution spatiale des racines à Mulungu





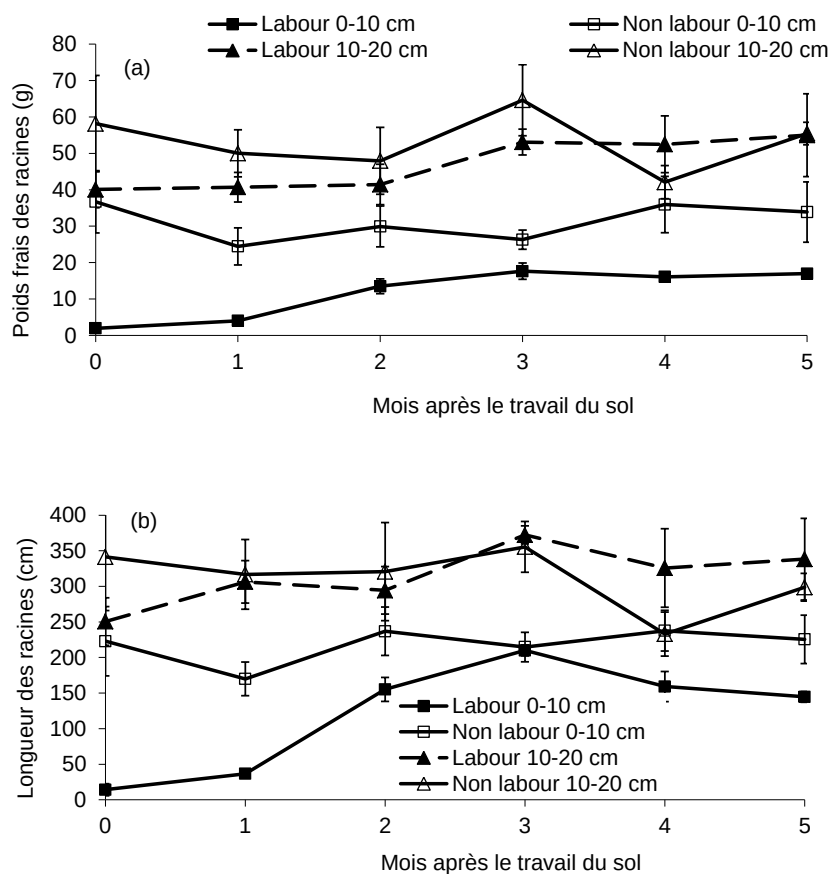
Annexe 4. 2. Distribution spatiale des racines à Walungu



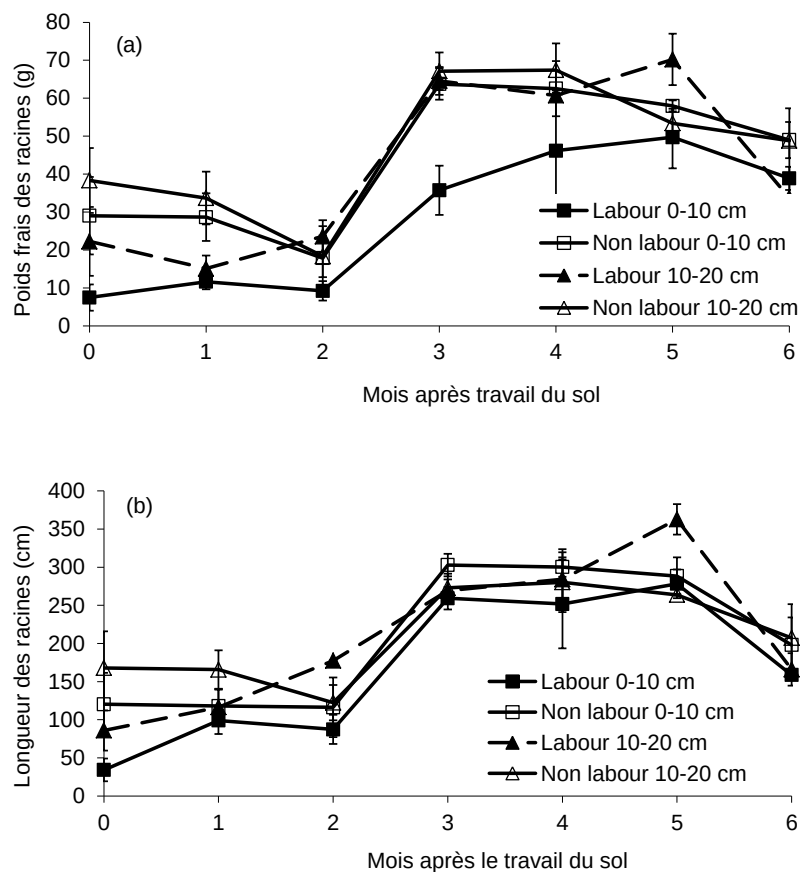


Annexe 4. 3. Distribution spatiale des racines à Rubona

Annexe 5. Evolution du poids frais et de la longueur des racines primaires en fonction des traitements et des mois après le travail du sol à Mulungu (Annexe 5.1) et Walungu (Annexe 5.2).



Annexe 5.1. Evolution du poids frais (a) et de la longueur (b) des racines primaires en fonction des traitements et des mois après le travail du sol à Mulungu.



Annexe 5.2. Evolution du poids frais (a) et de la longueur (b) des racines primaires en fonction des traitements et des mois après le travail du sol à Kabamba.

Annexe 6.

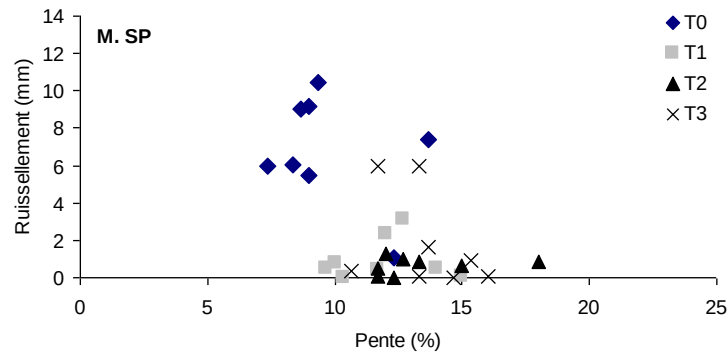
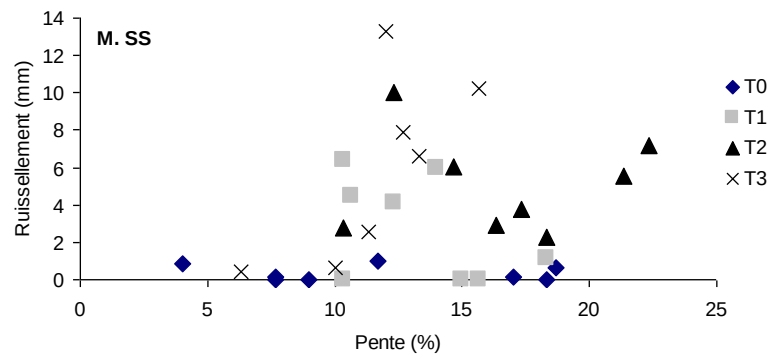
Relation entre la pente au point de mesure faite avec le simulateur de pluie et le volume d'eau ruisselé

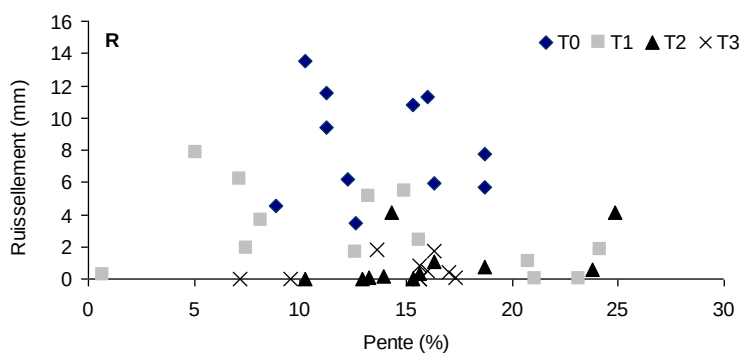
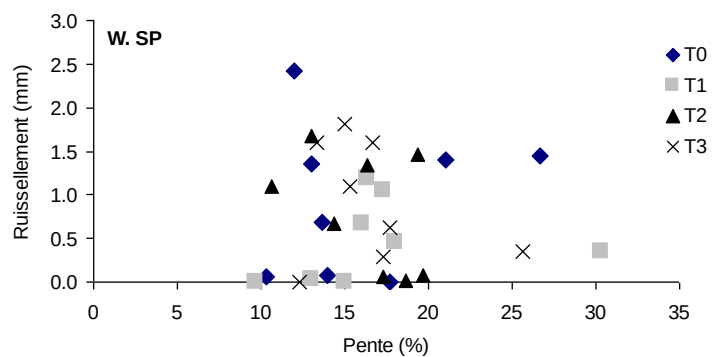
Tous sites confondus, la pente moyenne a varié entre 10 et 17% (Annexe 6.1). En saison sèche, des différences significatives sont observées entre le traitement T0 et T2 à Mulungu, et entre les traitements T0, T1 et T3 à Walungu. Mise à part pour le traitement T0 qui présente une pente moyenne significativement inférieure à celle de 3 autres traitements à Mulungu, aucune différence significative n'est observée sur les 2 autres sites en saison des pluies. La relation entre la pente et le ruissellement n'est pas univoque. L'accroissement de la pente n'entraîne pas une augmentation du volume d'eau ruisselé (Annexe 6.2).

Annexe 6.1. Valeurs moyennes de pente (%) mesurée aux points de mesures de simulation de pluie à Mulungu, Walungu et Rubona. Valeurs = moyenne $\pm$ erreur standard.

Saison	Traitements	Mulungu	Walungu	Rubona
Sèche	T0	12 $\pm$ 2,0b	13 $\pm$ 0,6b	NM
	T1	13 $\pm$ 1,0ab	12 $\pm$ 0,6b	NM
	T2	17 $\pm$ 1,5a	14 $\pm$ 0,7ab	NM
	T3	13 $\pm$ 1,5ab	15 $\pm$ 1,1a	NM
De pluies	T0	10 $\pm$ 0,8b	16 $\pm$ 1,9a	14 $\pm$ 1,1a
	T1	12 $\pm$ 0,7a	17 $\pm$ 2,1a	13 $\pm$ 2,1a
	T2	13 $\pm$ 0,8a	16 $\pm$ 1,1a	16 $\pm$ 1,4a
	T3	14 $\pm$ 0,6a	17 $\pm$ 1,4a	14 $\pm$ 1,0a

NM : non mesuré. Pour chaque site et saison de mesure, la comparaison entre les traitements est faite verticalement. Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$.





Annexe 6.2. Relation entre la pente au point de mesure effectuée au moyen du simulateur de pluie et le ruissellement. M. SS : Mulungu saison sèche, M. SP : Mulungu saison des pluies, W. SP : Walungu saison sèche, R : Rubona (mars 2010).

Publications relatives à cette thèse

Valorisation de cette thèse par des articles

Muliele M.T., van Asten P.J.A., Biielders C.L. Short- and medium-term impact of manual tillage and no-tillage with mulching on banana roots and yields in banana-bean intercropping systems in the East African Highlands. *Field Crops Research*, **accepted**.

Muliele, M.T., van Asten, P.J.A, Biielders, C.L. Impact of conservation tillage on soil aggregate stability and hydrophobicity in East-African banana-bean intercropping systems.

Article préparé pour *Geoderma*.

Valorisation de cette thèse dans des réunions scientifiques

Muliele T., Biielders C., van Asten P. Short-term effect of tillage on the rooting system and growth of East-African highland banana. PhD Student Day ENVITAM (Espace Senghor, Gembloux, 08.02.2012). In: *Proceedings, 2012*, p.67.

Muliele T., Biielders C., van Asten P. 2013. Impact du contexte pédologique sur l'enracinement du bananier (*Musa* AAA-EA) de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique. In Gaidashova S.V., Kagabo D.M., Ebong E., Biryomumaisho S., Kugonza D.R., Walyaro D., Gahakwa D., Mbonigaba Muhinda J.J. (eds) 'Confronting the challenges of food insecurity in the era of climate change and

variability'. RAB first Biennial Conference on Agricultural Research and Extension. Kigali 21-23 August 2013. Book of Abstracts p.30.

Muliele M.T., Biielders C.L., van Asten P.J.A. Impact of soil properties on the rooting system of the East African highlands banana. Book of Rwanda Agriculture Board (RAB) conference full paper proceedings, ***accepted.***

Références

- Akyampong E., Hitamana L., Franzel S. and Manyemana P. 1995. The agronomic and economic performance of banana, bean and tree intercropping in the highlands of Burundi: An interim assessment. *Agroforestry systems* 31: 199-210.
- Akyempong E., Hitimana E. and Munyemana T. 1999. Multistrata Agroforestry with beans, bananas and *Grevillea robusta* in the highlands of Burundi. *Experimentale Agriculture* 35: 357-369.
- Akyampong, E. 1998. Plantain production, marketing and consumption in West and Central Africa. In: Picq C., Fouré E. and Frison E.A. (eds) *Bananas and Food Security*, International symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November 1998, pp 353-360.
- Angulo-Jaramillo R., Moreno F., Clothier B.E., Thony J.L., Vachaud G., Fernández-Boy E. and Cayuela J.A. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61: 27-32.
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C. and Horlon R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 55: 467-470.
- Araya M. 2005. Stratification and spatial distribution of the banana (*Musa* AAA, Cavendish subgroup, cvs 'Valery' and 'Grande Naine') root system. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an International symposium held in San Jose, Costa Rica, 3-5 November 2003, pp 83-103.

- Araya M. and De Waele D. 2005. Effect of weed management on nematode numbers and their damage in different root thickness and its relation to yield of banana (Musa AAA cv. 'Grande Naine'). *Crop Protection* 24: 667-676.
- Arshad M.A., Lowery B. and Grossman B. 1996. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: Doran J.W. and Jones A.J. (eds) *Methods for assessing soil quality*, Madison, WI, pp 123-141.
- Arvidsson J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil and Tillage Research* 49: 159-170.
- BAA. 2008. Bureau of African Affairs: Background note; Burundi. February, 2008.
- Bagamba F., Ssenyonga J.W., Tushemereirwe W.K. and Gold C.S. 1998. Performance and profitability of the banana sub-sector in Uganda farming systems. In: Picq C., Fouré E. and Frison E.A. (eds) *Bananas and Food Security*, International symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November 1998, pp 729-740.
- Balesdent J., Chenu C. and Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-230.
- Barber S.A. 1992. Roots - past, present and future. In: Reetz H.F. (ed) *Plant nutrition conference Addressing the physical/Chemical/biological/environmental interactions relating to root growth and plant nutrition*, Proceedings of plant nutrition conference, July 8-12, 1992, Champaign, Illinois, USA, pp 19-29.
- Batlle-Viera A. and Pérez-Vicente L. 2002. Etude des espèces de champignons endophytes associés à la nécrose des racines de

bananiers des plantations de bananiers et de bananiers plantain à Cuba. *InfoMusa* 11: 22-25.

- Bekunda M.A., Wortmann C.S., Bwamiki D.P. and Okwakol M. 2003. Potentials and challenges of soil fertility management in the banana-based cropping systems of Eastern Africa. In: Gichuri M.P., A.Bationo, Bekunda M.A., Goma H.C., Mafongoya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.K., Nandwa S.M., Nyathi P. and Swift M.J. (eds) *Soil fertility management in Africa: a regional perspective*. Academy Science Publishers (ASP), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), Nairobi, Kenya, pp 123-147.
- Belalcázar S., Franklin C., Rosales F.E. and Pocasangre L. 2005. Development and formation of plantain roots (*Musa* AAB Simmonds). In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium held San Jose, Costa Rica, pp 75-82.
- Benites J.R. 2008. Effect of no-till on conservation of the soil and soil fertility. In: Goddard T., Zebisch M., Gan Y., Ellis W., Watson A. and Sombatpanit S. (eds) *No-till farming systems*. Special Publication No. 3, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, pp 59-72.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., Volkoff B. and Jolivet C. 1998. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 62: 743-749.
- Beugnon M. et Champion J. 1966. Etude sur les racines du bananier. *Fruits* 21: 309-327.
- Bhattacharyya R.K. and Madhava R.V. 1986. Management. Effect of soil covers on soil temperature in a banana plantation. *Banana Newsletter*, pp 8-9.

- Biielders C.L., De Backer L.W. and Delvaux B. 1990. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. *Soil Science Society of America Journal* 54: 822-826.
- Bizimana, S., Ndayihanzamaso, P., Nibasumba, A. et Niko, N. 2012. Conduite culturale et protection du bananier du Burundi. Publication Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU)/Référentiel sur la culture du bananier. <http://www.isabu-bdi.org>
- Blakemore L.C., Searle P.L. and Daly B.K. 1987. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau scientific report 80, p 103.
- Blanco-Canqui H. 2011. Does no-till farming induce water repellency to soils? *Soil Use and Management* 27: 2-9.
- Blanco-Canqui H. and Lal R. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma* 149: 171–180.
- Blomme G. 2000. The interdependence of root and shoot development in banana (*Musa* spp.) under field conditions and the influence of different biophysical factors on this relationship. Ph.D-dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, p 183.
- Blomme G., Draye X., Rufyikiri G., Declerck S., De Waele D., Tenkouano A. and Swennen R. 2000. Progress in understanding the roots of *Musa* spp. In: INIBAP (ed) INIBAP Annual Report 1999, Montpellier, France, pp 14-19.
- Blomme G., Sebuwufu G., Addis T. and Turyagyenda L. 2008. Relative performance of root and shoot development in Enset and East African Highland Bananas. *African Crop Science Journal* 16: 51-57.
- Blomme G., Swennen R. and Tenkouano A. 2003. Assessment of rooting depth in banana (*Musa* spp.) under two cropping systems. *MusAfrica* 15: 2-3.

- Blomme G., Swennen R., Tenkouano A. et Vuylsteke D. 2001. Estimation du développement des racines à partir des caractéristiques des parties aériennes chez les bananiers et les bananiers plantain (*Musa* spp.). *InfoMusa* 10: 15-17.
- Booth C. and Stover R.H. 1971. *Cylindrocarpon musae* sp. nov., commonly associated with burrowing nematode (*Radopholus similis*) lesions on banana. *Transactions British Mycology Society* 63: 503-507.
- Borie F., Rubio R., Rouanet J.L., Morales A., Borie G. and Rojas C. 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil and Tillage Research* 88: 253-261.
- Bottinelli N., Hallaire V., Manasseri-Aubry S., Le Guillou C. and Cluzeau D. 2010. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth. *Soil and Tillage Research* 106: 263-267.
- Bouajila A. and Gallili T. 2010. Land use effect on soil and particulate organic, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *African Journal of Agricultural Research* 5: 764-744.
- Bouwmeester H., van Asten P. and Ouma E. 2009. Mapping key variables of banana based cropping systems in the Great Lakes Region: Partial outcomes of the baseline and diagnostic surveys. *CIALCA Technical Report* 11.
- Boyer J. 1976. L'aluminium échangeable: incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cahier Orstom, série Pédologie* 14: 259-269.
- Capriel P. 1997. Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management. *European Journal of Soil Science* 48: 457-462.

- Carter L. and Colwick R. 1971. Evaluation of tillage systems for cotton productions systems. *Transactions of the ASAE* 14: 1116-1121.
- Carter M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94: 38-47.
- Castro Filho C. 1988. Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion. Ph.D-Dissertation. The Ohio State University, Columbus, OH, USA.
- Cattan P., Cabidoche Y.M., Lacas J.D. and Voltz M. 2006. Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa* spp.) on a tropical Andosol. *Soil and Tillage Research* 86: 38–51.
- Champion J. 1963. *Le bananier*. Blume, Editions Maisonneuve et Larose, 263 pp.
- Champion J. 1967. *Les bananiers et leur culture*. Tome 1. Botanique et Génétique. Edition SETCO, 214 pp.
- Champion J. 1970. La culture du bananier au Rwanda. *Fruits* 25: 161-168.
- Chan K.Y. 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Science Society of America Journal* 56: 326–329.
- Chandler S. 1995. The nutritional value of bananas. In: Gowen S. (ed) *Bananas and Plantains*. Chapman and Hall, UK.
- Charreau C. and Nicou R. 1971. Amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *L'Agronomie Tropicale* 11: 1184-1247.
- Chenu C. 1989. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biology and Biochemistry* 21: 299-305.
- Chenu C., Le Bissonnais Y. and Arrouays D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1479–1486.

- CIALCA. 2007a. Survey data availed by International institute of Tropical Agriculture. Kampala, Uganda.
- CIALCA. 2007b. Technical Progress Report, November 2006 – December 2007.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P. et Roger-Estrade J. 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques, aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des sols* 7: 7–24.
- Cornejo P., Rubio R. and Borie F. 2009. Mycorrhizal propagule persistence in a succession of cereals in a disturbed and undisturbed andisol fertilized with two nitrogen sources. *Chilean Journal of Agriculture Research* 69: 426-434.
- Curaqueo G., Acevedo E., Cornejo P., Seguel A., Rubio R. and Borie F. 2010. Tillage effect on soil organic matter, mycorrhizal hyphae and aggregates in a mediterranean agroecosystem. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10: 12-21.
- Daddow R.L. and Warrington G.E. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Watershed Systems Development Group (WSDG), USDA Forest Service, WSDG-TN-00005, Colorado, USA, p 17.
- Damacena de Souza E., Gigante de Andrade Costa S., Ibanor Anghinoni I., César de Faccio Carvalho P., Victor de Oliveira Ferreira E., Martins A.P., Cao E. and Andrighetti M. 2010. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS)* 34: 1365-1374.
- De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J. and Merckx R. 2006. Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *European Journal of Soil Science* 57: 235-246.

- De Guiran G. and Vilardebo A. 1962. Le bananier aux îles Canaries. IV. Les nématodes parasites du bananier. *Fruits* 17: 263-277.
- Delstanche S. 2011. Drivers of soil fertility in smallholder banana systems in the African Great Lakes Region. PhD-dissertation, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, p 458.
- Delvaux B. 1995. Soils In: Gowen S. (ed) In *Banana and plantains*. Chapman Publishers, London, U.K., pp 230-257.
- Delvaux B. 1998. Banana cropping systems: characterization, dynamics and modelling in view of improving the management of soil fertility. In: Picq C., Fouré E. and Frison E.A. (eds) *Bananas and Food Security*, International symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November 1998, pp 637-645.
- Delvaux B. et Guyot P. 1989. Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. *Fruits* 44: 633-647.
- Doerr S.H., Dekker L.W., Ritsema C.J., Shakesby R.A. and Bryant R. 2002. Water repellency of soils: the influence of ambient relative humidity. *Soil Science Society of America Journal* 66: 401–405.
- Doerr S.H., Llewellyn C.T. and Douglas P. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research* 43: 225–237.
- Doerr S.H. and Thomas A.D. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*: 231–232, 134–147.
- Dorel M. 1993. Développement du bananier dans un andosol de Guadeloupe: effet de la compacité du sol. *Fruits* 48: 83-88.
- Dorel M. 2001. Effet des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement

du bananier. PhD-Thèse, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, p 129.

Dorel M., Lakhia S., Petetin C., Bouamer S. and Risede J.M. 2010. No-till banana planting on crop residue mulch: effect on soil quality and crop functioning. *Fruits* 65: 55-68.

Dowiya N.B., Rweyemamu C.L. and Maerere A.P. 2009. Banana (*Musa* spp. Colla) cropping systems, production constraints and cultivar preferences in Eastern Democratic Republic of Congo. *Journal of Animal and Plant Sciences* 4: 341-356.

Draye X., Lecompte F. and Pages L. 2005. Distribution of banana roots in time and space: new tools for an old science. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*, Proceedings of an international symposium held in San Jose, Costa Rica, pp 58-78.

Draye X., Delvaux B. and Swennen R. 1999. Distribution of lateral root primordia in root tips of *Musa*. *Annals of Botany* 84: 393-400.

Drieiseidler, C. 2011. Root system response of banana and plantain cultivars to an agroforestry tree shade gradient in the central highlands of Costa Rica. PhD-dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany, 141p.

Ehlers W., Kopke U., Hesse F. and Bohm. W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess. *Soil and Tillage Research* 3: 261-275

Eledu C., Karamura E. and Tushemereirwe W.K. 2004. Agroecological distribution of banana systems in the Great Lakes Region. *African Crop Science Journal* 12: 33-42.

- Eynard A., Schumacher T.E., Lindstrom M.J., Malo D.D. and Kohl R.A. 2004. Wettability of soil aggregates from cultivated and uncultivated Ustolls and Usterts. *Australian Journal of Soil Research* 42: 163-170.
- Eynard A., Schumacher T.E., Lindstrom M.J., Malo D.D. and Kohl R.A. 2006. Effects of aggregate structure and organic carbon on wettability of Ustolls. *Soil and Tillage Research* 88: 205-216.
- FAOSTAT. 2008. FAO Statistics online databases, www.fao.org.
- FAO 2005. Irrigation in Africa in figures. FAO water reports Nr. 29, Aquastat Survey, FAO land and water development division editions, Rome, 635pp
- Feller C., Burtin G., Gerard B. et Balesdent J. 1991. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : intérêt et limites. *Science du Sol* 29: 77-93.
- Ferree D.C. 1994. Root distribution following 9 years of root-pruning "Me1rose"/M.26 Apple Trees. *HortScience* 29: 76-78.
- Franzluebbers A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66: 95–106.
- Frison E. and Sharrock S. 1998. Introduction. The economic, social and nutritional importance of banana in the world. In: Picq C., Fouré E. and Frison E.A. (eds) *Bananas and Food Security*, International symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November 1998, pp 21-35.
- Gaidashova S. 2009. Effect of plant parasitic nematodes and arbuscular mycorrhizal fungi on banana (*Musa* spp.) in the East African Highland cropping systems. PhD-dissertation, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, p 270.
- Gaidashova S.V., Nsabimana A., van Asten P.J.A., Delvaux B., Elsen S. and Declerck S. 2013. Impact of arbuscular mycorrhizal Fungi on growth of

banana genotypes in three different, pasteurized and non – pasteurized soils, of Rwanda In : Blomme G, van Asten P and Vanlauwe B (eds) Banana systems in the humid highlands of Sub-Saharan Africa. Enhancing resilience and productivity. CAB International, London, U.K., pp 72-82.

Gardner W.R. 1958. "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table." Soil Science 85: 228–232.

Garrido E and Matus F. 2012. Are organo-mineral complexes and allophone content determinant factors for the carbone level in Chilean volcanic soils? Catena 92: 106-112.

Gauggel C.A., Sierra F. and Arévalo G. 2005. The problem of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) Banana Root System: towards a better understanding for its productive management, Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, pp 13-22.

Geisler D. and Ferree D.C. 1984. The influence of root pruning on water relations, net photosynthesis, and growth of young 'Golden Delicious' apple trees. American Society of Horticulture Science 109: 827-831.

Ghobrial G.I. 1983. Effects of root pruning on translocation of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. J Expt Bot 34: 20-26.

Giller K.E., Corbeels M., Nyamangara J., Triomphe B., Affholder F., Scopel E. and Tittonell P. 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. Field Crop Research 124: 468-472.

- Glenn D. and Welker W. 1989. Cultural practices for enhanced growth of young peach trees. *American Journal for Alternative Agriculture* 4: 8-11.
- Godefroy J. 1969. Le développement des racines du bananier dans divers sols: relation avec la fertilité. *Fruits* 24: 101-104.
- Godefroy J. 1974. Evolution de la matière organique du sol sous cultures du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. PhD-Thèse, Université de Nancy, France, p 166.
- Godefroy J., Perrier, X., Rutunga V. et Sebahatu A. 1991. Relations entre les caractéristiques physico-chimiques des sols de la région de Kibungo au Rwanda et le potentiel de production des bananiers. Application à la gestion de la fertilité des sols *Fruits* 46: 625-631.
- Goebel M.O., Bachmann, J., Woche S.K., Fischer W.R. and Horton R. 2004. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. *Soil Science Society of America Journal* 68: 383–393.
- Gowen S. and Quénéhervé P. 1990. Nematodes parasites of banana, plantains and abaca. In: Luc M., Sikora R.A. and Bridge J. (eds) *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*, CAB International, Wallingford, UK, pp 431-460.
- Gross C.M., Angle J.S., L. H.R. and Welterlen M. 1991. Runoff and sediment losses from tall fescue under simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality* 20: 604-607.
- Grossman J.W. and Quarles. 1993. Strip intercropping for Biological control. *IPM Practitioner* April, pp 1-11.
- Hajabbasi M.A. and Hemmat A. 2000. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. *Soil and Tillage Research* 56: 205-212.

- Harper R.J., Mckissock I., Gilkes R.J., Carter D.J. and Blackwell P.S. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *Journal of Hydrology*: 231-383.
- Hartaman J.B., Vuyssteke D., Speijer P.R., Ssango F., Coyne D.L., De Waele D. 2010. Measurement of the field response of *Musa* genotypes to *Radopholus similis* and *Helicotylenchus multicinctus* and the implications for nematodes breeding. *Euphytica* 172: 139-148.
- Hauser, S. 2007. Plantain (*Musa* spp. AAB) bunch yield and root health response to combinations of mechanical, thermal and chemical nematode control measures on suckers. *African Plant Protection* 13: 1-15.
- Higgins J.E. 1904. The banana in Hawaii. Bulletin No 7. Hawaiian Gazette Compagny, LTD., Honolulu.
- Horne D.J. and McIntosh J.C. 2003. Hydrophobic compounds in sands from New Zealand. In: Ritsema C.J. and Dekker L.W. (eds) *Soil water repellency Occurrence, Consequences, and Amelioration*. Elsevier, Wageningen, The Netherlands, p 25.
- Horwath W.R., Mitchell J.P. and Six J.W. 2008. Tillage and crop management effects on air, water, and soil quality in California. *ANR publications* 8331: 1-9.
- Hurraß J. and Schaumann G.E. 2006. Properties of soil organic matter and aqueous extracts of actually water repellent and wettable soil samples. *Geoderma* 132: 222-239.
- Itai C. and Birnbaum H. 1996. Synthesis of plant growth regulators by roots. In: Waisel Y., Eshel A. and Kafkafi U. (eds) *Plant roots: The hidden half*. Marcel Dekker, Inc, New York, USA, pp 273-284.

- Jagwe J., van Asten P. and Steffen A. 2008. Banana marketing in Rwanda, Burundi and South-Kivu. Technical report 9. CIALCA project survey.
- Jassogne L., Nibasumba A., Wairegi L. Baret P.V., Deraeck J., Mukasa D., Wanyama I., Bongers G. and van Asten P.J.A . 2013. Coffee/Banana intercropping as an opportunity for smallholder coffee farmers in Uganda, Rwanda and Burundi Rwanda In : Blomme G, van Asten P and Vanlauwe B (eds) Banana systems in the humid highlands of Sub-Saharan Africa. Enhancing resilience and productivity. CAB International, London, U.K., pp 143-149.
- Jeffrey D.W. 1970. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. *Journal of Ecology* 58: 297-299.
- Jefwa J.M, Rurangwa E., Gaidashova, S.V, Kavoo A.M., Mwashasha M., Robinson J., Blomme G. and Vanlauwe B. 2013. Indigenous arbuscular mycorrhizal Fungi and growth of tissue-cultured banana plantlets under Nursey and Field conditions in Rwanda In : Blomme G, van Asten P and Vanlauwe B (eds) Banana systems in the humid highlands of Sub-Saharan Africa. Enhancing resilience and productivity. CAB International, London, U.K., pp 82-92.
- Jodha N.S. 1979. Intercropping in traditional farming systems. In: crops I. (ed) *Proceeding of an International Workshop on Intercropping*, Hyderabad, India, 10-13 Jan 1979.
- Jouany C., Chenu C. et Chassin P. 1992. Détermination de la mouillabilité des constituants du sol à partir des mesures d'angles de contacts: revue bibliographique. *Science du Sol* 30: 33-47.
- Kabir Z., O'Halloran I.P., Fyles J.W. and Hamel C. 1998. Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn: effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extraradical

mycorrhizal hyphae in the field. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 68: 151-163.

Kainga P.E. 2013. Empirical review of problems and prospects of banana (*Musa sapientum* L.) and plantain (*Musa paradisiaca* L.) production enterprises. *Global Journal of Biology, Agriculture and Health Sciences* 2: 181-186.

Kalyebara M.R., Ragama P.E., Kagezi G.H., Kubiriba J., Bagamba F., Nankinga K.C. and Tushemereirwe W. 2006 Economic importance of the banana bacterial wilt in Uganda. *African Crop Science Journal* 14: 93–103.

Karamura D. and Karamura E. 1994. A provisional Checklist of Bananas Cultivars in Uganda. National agricultural Research organization (NARO), International network for the improvement of Banana and Plantain. INIBAP, Montpellier, France p28.

Karamura E., Frison E., Karamura D. and Sharrock S. 1998. Banana production systems in eastern and southern Africa. In: Picq C., Fouré E. and Frison E.A. (eds) *Bananas and Food Security*, International symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November 1998, pp 401-412.

Kemper B. and Derpsch R. 1981. Results of studies made in 1978 and 1979 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná. *Soil and Tillage Research* 1: 253-267.

Khamsouk B. 2001. Influence des systèmes de culture bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments en Martinique (sol brun rouille à halloysite). PhD-Thèse, ENSAM, Montpellier, France, p 214.

Kirkby R.A. and Ngendahayo D. 1985. Production et recherche sur la banane en Afrique de l'Est et en Afrique Centrale. Manuscript report of the

- regional workshop (MR114f), Bujumbura, Burundi, 14-17 December.
International Development Research Center, Ottawa, Canada, p 154.
- Kobenan K., Aké S. and Koné D. 1997. Study of the reactions of the roots of banana Musa (AAA) cv 'Grande Naine' to artificial lesions. *InfoMusa* 6: 21-23.
- Kumar D., Bansal M.L. and Phogat V.K. 2009. Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian Journal of Agriculture Research* 43: 180-186.
- Lal R. 1984. Soil erosion from tropical arable land and its control. *Advances in Agronomy* 37: 183-247.
- Lassoudière A. 1978. Quelques aspects de la croissance et du développement du bananier 'Poyo' en Côte d'Ivoire. Le système radical. *Fruits* 33: 314-338.
- Lassoudière A. 2007. Le bananier et sa culture. Editions Cemagref, Cirad.
- Lassoudière A. 1980. Matière végétale élaborée par le bananier 'Poyo' depuis la plantation jusqu'à la récolte du deuxième cycle. *Fruits* 35: 405-446.
- Lassoudière A. 1989. Enquête diagnostic sur la culture bananière. Préfecture de Kibungu. IRFA-CIRAD, ISAR, p 154.
- Lassoudière A. et Maubert L. 1971. Evolution des dimensions des bananes entre l'émission de l'inflorescence et la récolte du régime. *Fruits* 26: 321-331.
- Lavigne C. 1987. Contribution à l'étude du système racinaire du bananier. Mise au point de rhizotrons et premiers résultats. *Fruits* 42: 265-271.
- Le Bissonais Y. and Le Singer M.J. 1993. Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. *Soil Science Society of America Journal* 57: 224-229.

- Le Bissonnais Y. et Le Souder C. 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols* 2: 43-56.
- Leelamanie D.A. and Karube J. 2007. Effects of organic compounds, water content and clay on the water repellency of a model sandy soil. *Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition* 53: 711–719.
- Lepecki J. and Barbec S. 1997. Soil management in perennial crops: orchards and hop gardens. *Soil and Tillage Research* 43: 169-184.
- Leprun J. 1994. Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols. Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. *Etude et Gestion des sols* 1: 45-65.
- Lichner L., Dlapa P., Doerr S.H. and Mataix-Solera J. 2006. Evaluation of different clay minerals as additives for soil water repellency alleviation. *Applied Clay Science* 31: 238-248.
- Lipiec J., Kús J., Nosalewicz A. and Turski M. 2006. Tillage system effects on stability and sorptivity of soil aggregates. *International Agrophysics* 20: 189-193.
- Llewellyn R.S., D'Emden F.H. and Kuehne G. 2012. Extensive use of no-tillage systems. *Field Crops Research* 132: 204–212.
- López-Garrido R., López M.V., Melero S., Murillo J.M., Girón I., Madejón E. and Moreno F. 2010. Effect of tillage systems on soil aggregation and hydraulic properties in SW Spain. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Loridat P. 1989. Etude de la microflore fongique et des nématodes associés aux nécroses de l'appareil souterrain du bananier en Martinique. Mise en évidence du pouvoir pathogène du genre *Cylindrocladium*. *Fruits* 44: 587-598.

- Lu P., Woo, K.C. and Liu Z.T. 2002. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Biology* 53: 1771-1779.
- Lufafa A., Tenywa M.M., Isabirye M., Majaliwa M.J.G. and Woomer P.L. 2003. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss Model. *Agricultural Systems* 76: 883-894.
- Martínez E., Fuentes J.P., Silva P., Valle S. and Acevedo E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research* 99: 232–244.
- Martin C., Pohl M., Alewell C., Körner C. and Rixen C. 2010. Interrill erosion at disturbed alpine sites: Effects of plant functional diversity and vegetation cover. *Basic and Applied Ecology* 11: 619–626.
- Martin-Prével P. 1987. Banana. In: Martin-Prevél P., Gagnard J. and Gautier P. (eds) *Plant Analysis as a Guide to the Nutrients Requirements of Temperate and Tropical Crops*. Lavoisier, Paris, pp 637-670.
- Martins A., Marques G., Borges O., Portela E., Lousada J., Raimundo F. and Madeira M. 2011. Management of chestnut plantations for a multifunctional land use under Mediterranean conditions: effects on productivity and sustainability. *Agroforestry Systems* 81: 175–189.
- Mataix-Solera J. and Doerr S. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous top soils from fireaffected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma* 118: 77–88.
- Materechera S.A., Alston A.M, Kirby J.M. and Dexter A.R. 1992. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil* 144: 297-303.

- McIntyre B.D., Speijer P.R., Riha P.R. and Kizito F. 2000. Effects of mulching on biomass, nutrients and soil water in banana inoculated with nematodes. *Agronomy Journal* 92: 1081-1085.
- McLean E.O. 1965. Aluminum. In: Black C.A. (ed) *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical methods*. Madison: ASA, pp 978-998.
- McMichael B.L. and Burke J.J. 1996. Temperature effects on root growth. In: Waisel Y., Eshel A. and Kafkafi U. (eds) *Plant roots the hidden half*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, pp 383-396.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. pp 1409–1416.
- Mehra O.P. and Jackson M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium carbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
- Messing I. and Jarvis N.J. 1993. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *Journal of Soil Science* 44: 11–24.
- Monnier G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, Paris, pp 327-400.
- Moens, T. 2004. Variability in reproductive and pathogenicity of *Radopholus similis* in *Musa*: Effect of biotic and abiotic factors. PhD-dissertation, K.U. Leuven, p215.
- Mpyisi E., Weber M., Shingiro E. and Loveridge S. 2003. Changes in allocation of land production and farm area size in the Rwandan smallholder sector over the period 1984/90 to 2002 *Agricultural Policy Synthesis 6E*, Rwanda Food Security Project / MINAGRI, Kigali.
- Mrabet R., Lahlou S., Le Bissonnais Y. et Duval O. 2004. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains : Influence des

techniques culturales simplifiées. Bulletin du Réseau Erosion 23: 405-415.

Mukasa H., Ocan D., De Waele D., Rubaihayo P.R. and Blomme G. 2006. Effect of a multispecies nematode population on the root, corm, and shoot growth of East African Musa genotypes. *Biology and Fertility of soils* 43: 229-235.

Ndabamenya T. 2013. Plant density management and its effects on the productivity of low inputs East African Highland Banana (*Musa* spp.)-based cropping systems. PhD-dissertation, University of Pretoria , South-Africa, p 203.

Ngongo M. et Lunze L. 2000. Espèce d'herbe dominante comme indice de la productivité du sol et de la réponse du haricot commun à l'application du compost. *African Crop Science Journal* 8: 251-261.

Nicou R. 1997. Le travail du sol dans les terres exondées du Sénégal: Motivations, contraintes. Doc mult ISRA CNRA, Bambey, Sénégal, p 52.

Noordwijk M. van, Rahayu S., Williams S.E., Hairiah K., Khasanah N. and Schroth G. 2004. Crop and tree root-system dynamics. In: *Below-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Concepts and Models with Multiple Plant Components*, Noordwijk M. van, Cadisch G. and Ong C.K. (eds.). CAB International, UK, and ICRAF, Nairobi, Kenya, p. 83-107.

Norgrove L. and Hauser S. 2014. Improving plantain (*Musa* spp. AAB) yields on smallholder farms in West and Central Africa. *Food security* 6: 501–514.

Norman M.J., Pearson C.J. and Searle P.G. 1995. *The ecology of tropical food crops*. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 440 pp.

- Nyabuhwanya J. 1993. Contribution à l'étude de l'influence de l'érosion hydrique sur les propriétés chimiques et physiques du sol dans le Kirimiro central. Étude sur les parcelles expérimentales. Mémoire présenté pour l'obtention du grade d'Ingénieur Agronome. FACAGRO, Université du Burundi, p 52.
- Nzawe D.B., Blomme G., Dheda D.B., Rweyemam C.L., Velly D., Vigheri N., Milango A., Eden-Green S., Karamura E. and Maerere A.P. 2010. The alarming spread of banana Xanthomonas wilt in eastern Democratic Republic of Congo and its impact on food security and income. *Tree and Forestry Science and Biotechnology* 4: 56–59.
- O'Connell D.J. 1975. The measurement of apparent specific gravity of soils and its relationship to mechanical composition and plant root growth. In *Soil Physical Conditions and Crop Production*. Ministry of Agriculture, Fisheries, and Food. Technical Bulletin 29, London, pp 298-313.
- Odeke M., Rubahaiyo P.R. and Osiru D.S.O. 1999. Effect of spacing, stage and method of desuckering on bunch size and yield of banana cultivar 'Kibuzi (AAA-EA). *African Crop Science Journal* 7: 349-353.
- Okech S., Gaidashova S., Gold C., Nyagahungu I. and Musumbu J. 2005. The influence of socio-economic and marketing factors on banana production in Rwanda: Results from a Participatory Rural Appraisal. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 12: 149-160.
- Okech S., Gold C., Speijer P., Karamura E., Ssali H. and McIntyre B. 1996. Relationships between soil fertility, banana weevil, nematodes and agronomic practices in Southwestern Uganda. *MusAfrica* 10: 31.
- Okumu M.O., van Asten P.J.A., Kahangi E., Okech S.H., Jefwa J. and Vanlauwe B. 2011. Production gradients in smallholder banana (cv.

- Giant Cavendish) farms in Central Kenya. *Scientia Horticulturae* 127: 475-481.
- Ouma G. 2009. Intercropping and its applications to banana production in East Africa: a review. *Journal of plant breeding and crop science* 12: 13-15.
- Pattison T., Smith L., Moody P., Armour J., Badcock K., J. C., Rasiah V., Lindsay S. and Gulino L. 2005. Banana root and soil health project – Australia. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*, Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, pp 149-165.
- Pfammater W. 1994. L'entretien du sol sur la ligne d'arbres fruitiers. *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* 16: 235-236.
- Philip J.R. 1987. The infiltration joining problem. *Water Resource Research* 23: 2239-2245.
- Pickering A.H., Warrington I.J. and Woolley D.J. 2005. Root Pruning of Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) Decreases Bunch stem Necrosis. Limiting factors for primary production. June, 2005, Lincoln, New Zealand (Conference Presentation).
- Pikul J.L., Chilom G., Rice J., Eynard A., Schumacher T.E., Nichols K., Johnson J.M.F., Wright S., Caesar T. and Ellsbury M. 2009. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. *Soil Science Society of America Journal* 73: 197-206.
- Pinheiro E.F.M., Pereira M.G. and Anjos L.H.C. 2004. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. *Soil and Tillage Research* 77: 79–84.

- Pochet G., Van der Velde M., Vanclooster M. and Delvaux B. 2007. Hydric properties of high charge, halloysitic clay soils from the tropical South Pacific region. *Geoderma* 138: 96-109.
- Poulenard J., Michel J.C., Bartoli F., Portal J.M. and Podwojewski P. 2004. Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *European Journal of Soil Science* 55: 487–496.
- Pypers P., Sanginga J.M., Kasereka B., Walangululu M. and Vanlauwe B. 2011. Increased productivity through integrated soil fertility management in cassava–legume intercropping systems in the highlands of Sud-Kivu, DR Congo. *Field Crops Research* 120: 76–85.
- Price N.S. 1995. Banana morphology, part 1: roots and rhizomes. In: Gowen S. (ed) *Bananas and plantains*. Chapman and Hall, pp 190-205.
- RADA. 2007. Rwanda Agricultural Development Authority. [Online] Available [http: www.rada.gov.rw](http://www.rada.gov.rw).
- Ramcharan C., Ingram D.L., Nell T.A. and Barrett J.E. 1995. Interactive effects of root-zone temperature and irrigation volume on banana vegetative growth in two environments. *Fruits* 50: 225-232.
- Rishirimuhirwa T. 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique centrale. PhD-Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, p 321.
- Rishirumuhirwa T. 1993. Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi. *Cahier Orstom, série Pédologie* 28: 367-383.
- Robin J. and Champion J. 1962. Etudes des émissions des racines de la variété du bananier Poyo. *Fruits* 17: 93-94.

- Robinson J.C. 1985. Root depth in bananas. Citrus Subtropical Fruit Research Institute Information Bulletin 155: 6-8.
- Robinson J.C. 1987. Root growth characteristics in banana. Citrus Subtropical Fruit Research Institute Information Bulletin 183: 7-9.
- Robinson J.C. 1988. Underground observation chambers provide root growth data for bananas. Citrus and Subtropical Fruit Journal 641: 7.
- Robinson J.C. 1995. Systems of cultivation and management In: Gowen S. (ed) Bananas and plantains. Chapman and Hall, pp 15-65.
- Robinson J.C. 1996. Bananas and Plantains. CAB International, Wallingford, UK.
- Robinson J.C. 2000. Banana productivity - The impact of agronomic practices. In: Craenen et al. (ed) International Symposium on banana and plantain for Africa. Acta Horticulturae, pp 247-258.
- Robinson J.C. and Alberts A.J. 1989. Seasonal variation in the crop water-use coefficient of banana (cultivar 'Williams') in the subtropics. Scientia Horticulturae 40: 215-225.
- Robinson J.C., Alberts A.J. and Reynolds R. 1989. Irrigating bananas in the subtropics. Banana Newsletter 12: 23-25.
- Roose E. and Ndayizigiye F. 1997. Agroforestry, water and soil fertility management to fight erosion in tropical mountains of Rwanda. Soil Technology 11: 109-119.
- Roy J.L. and McGill W.B. 1998. Characterization of disaggregated nonwetable surface soils found at old crude oil spill sites. Canadian Journal of Soil Science 80: 143-152.
- Rubaihayo P., Odongo O. and Bananuka J. 1994. Some highland banana production constraints in Masaka district of Central Uganda. In: Proceedings of African Crop Science Society (ed) African Crop Science Society, Uganda, pp 188-192.

- Rufyikiri G., Nootens D., Dufey J.E. and Delvaux B. 2000. Effect of aluminium on bananas (*Musa* spp.) cultivated in acid solutions. 1. Plant growth and chemical composition. *Fruits* 55: 367-378.
- Rufyikiri G., Nootens D., Dufey J.E. and Delvaux B. 2001. Effect of aluminium on bananas (*Musa* spp.) cultivated in acid solutions. 2. Water and nutrients uptake. *Fruits* 56: 5-15.
- Ruhigwa B.A., Gichuru M.P., Spencer D.S. and Swennen R.L. 1995. Economic analysis of cut-and-carry and alley cropping systems of mulch production for plantains in Southeastern Nigeria. *IITA Research* 11: 11-14.
- Russell R.S. 1977. Plant root systems: Their function and interaction with the soil. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 298 pp.
- Sakin E. 2012. Organic carbon organic matter and bulk density relationships in arid-semi arid soils in Southeast Anatolia region. *African Journal of Biotechnology* 11: 1373-1377.
- Salau O.A., Opara-Nadi O.A. and Swennen R. 1992. Effects of mulching on soil properties, growth and yield of plantain on a tropical ultisol in southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 23: 73-93.
- Schupp J.R. and Ferree D.C. 1988. Effect of root pruning at four levels of severity on growth and yield of 'Me1rose/26 Apple Trees. *American Society of Horticulture Science* 113: 194-198.
- Schupp J.R. and Ferree D.C. 1990. Influence of time of root pruning on growth, mineral nutrition, net photosynthesis and transpiration of young apple trees. *Scientia Horticulturae* 42: 299-306.
- Sebuwufu G., Rubaihayo P. and Blomme G. 2004. Variability in the root system of East African banana genotypes. *African Crop Science Journal* 12: 85-93.

- Serrano E. 2005a. Banana soil acidification in the Caribbean coast of Costa Rica and its relationship with increased aluminium concentrations. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) Banana root system: towards a better understanding for its productive management, Proceedings of an International symposium held in San Jose, Costa Rica, pp 142-148.
- Serrano E. 2005b. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) Banana root system: towards a better understanding for its productive management, Proceedings of an International symposium held in San Jose, Costa Rica, pp 25-36.
- Shainberg I. 1992. Chemical and mineralogical components of crusting. In: Sumner M.E. and Stewart B.A. (eds) Advance in Soil Science Soil crusting: physical and chemical processes. Lewis, pp 33-54.
- Shepherd K. 1957. Banana cultivars in East Africa. Tropical Agriculture 34: 277-286.
- Simmonds N.W. 1976. Evolution of crop plants. Ed. Longman London and New-York.
- Šimon T., Javu rek M., Mikanova O. and Vach M. 2009. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. Soil and Tillage Research 105: 44–48.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook, 436. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Speijer P.R. and De Waele D. 1997. Screening of Musa germoplasm for resistance and tolerance to nematodes. INIBAP Technical Guidelines¹. INIBAP, International Network for Improvement of Banana and Plantain, Montpellier, France, p 47.

- Speijer P.R. and De Waele D. 2001. Nematods associated with East African Highland cooking bananas and cv. Pisang Awak (*Musa* spp.) in Central Uganda. *Nematology* 3: 535-541.
- Speijer P.R. and Fogain R. 1999. *Musa* and *Ensete* nematode pest status in selected African countries. In: Frison E.A., Gold C.S., Karamura E.B. and Sikora R.A. (eds) *Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa*, Workshop proceedings. South Africa, 23-28 November 1998. INIBAP, pp 99-108.
- Spilsbury J.D., Jagwe J.N., Wanda K., Nkuba J. and Ferris R.S. 2004. Evaluating the Marketing Opportunities for Banana and its Products in the Principle Banana Growing Countries of ASARECA, Kenya, Rwanda, Tanzania and Uganda. ASARECA / IITA Monograph 8, IITA Ibadan, Nigeria.
- Stefanou S. and Papazafeiriou A. 2013. Effects of iron and aluminum oxides and clay content on penetration resistance of five Greek soils. *Eurasian Journal of Soil Science* 2: 122-130.
- Stern R., Ben-hur M. and Shainberg I. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation, and soil losses. *Soil Science* 152: 455-452.
- Stover R.H. and Simmonds N.W. 1987. *Bananas*. 3rd ed. Tropical Agriculture Series, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.
- Swennen R. 2003. East African highland bananas. Report of Small Group Meeting (SGM) on Improved Production of Bananas and Plantains in sub-Saharan Africa: Agricultural Technology Interventions for Increasing the Production of Bananas and Plantains in sub-Saharan Africa. African Agricultural Technology Foundation, 22nd August 2003, Kampala, Uganda, p 16.

- Swennen R. 1990. Plantain cultivation under West African conditions. A reference manuel. International Institute of Tropical Agriculture, Ibandan, Nigeria, p 24.
- Swennen R., De Langhe E., Janssen J. and Decoene D. 1986. Study of the root development of some Musa cultivars in hydroponics. *Fruits* 41: 515-524.
- Sys C. 1979. Regional Pedology. Tropical soils. Part II. International Training Center for Post-Graduate Soil Scientists. Lecture notes, State University of Ghent.
- Taulya G. 2004. Topsoil depth-banana yield relationships on a chromic luvisol in a Lake Victoria basin microcatchment. MSc Thesis Makerere University, Kampala, Uganda, p 72.
- Taulya G. 2013. East African highland bananas (*Musa* spp. AAA-EA) 'worry' more about potassium deficiency than drought stress. *Field Crops Research* 151: 45–55.
- Tavares-Fihlo J. et Tessier D. 1998. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés des sols du Paraná (Brésil). *Etude et Gestion des sols* 5: 67-82.
- Tisdall J.M. and Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Turner D.W. and Lahav E. 1985. Temperature influences nutrient absorption and uptake rates of bananas grown in controlled environments. *Scientia Horticulturae* 26: 311-322.
- Tushemereirwe W.K. and Bagabe M. 1999. Review of disease distribution and pest status in Africa. In: Frison E.A., Karamura E.B. and Sikora R.A. (eds) *Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa*, Workshop proceedings. South Africa, 23-28 November 1998. INIBAP, pp 139-147.

- Unger P. and Kaspar T. 1994. Soil compaction and root growth: A review. *Agronomy Journal* 86: 759-766.
- Urbanek E., Hallett P., Feeney D. and Horn R. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma* 140: 147–155.
- Vahabi J. and Nikkam D. 2008. Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. *International Journal of Sediment Research* 23: 376-386.
- Valmayor R., Silayoi B., Jamaluddin S., Kusumo S., Espino R. and Pascua O. 1991. Banana classification and commercial cultivars in South East Asia. *Information Bulletin* 24.
- Van Asten P., Fermont A. and Taulya G. 2011. Drought is a major yield loss factor for rainfed East African highland banana. *Agricultural Water Management* 98: 541-552.
- Van Asten P.J.A., Gold C.S., Okech S.H., Gaidashova S.V., Tushemereirwe W.K. et De Waele D. 2005. Problèmes liés à la qualité des sols dans les systèmes de production en Afrique de l'Est et leur lien avec les autres facteurs qui réduisent le rendement. *InfoMusa* 13: 20-25.
- Van Damme J., De Bouver D. Dupriez M., van Asten P.J.A., Baret P.V. 2013. A comparative and systems approach to Banana cropping systems in the Great Lakes Region In: Blomme G, van Asten P and Vanlauwe B (eds) *Banana systems in the humid highlands of Sub-Saharan Africa. Enhancing resilience and productivity*. CAB International, London, U.K., pp 166-174.
- Vanlauwe B., Pypers P., Birachi E., Nyagaya M., van Schagen B., Huising J., Ouma E., Blomme G. and van Asten P.J.A. 2012. Integrated Soil Fertility Management in Central Africa: Experiences of the

- Consortium for Improving Agriculture-based Livelihoods in Central Africa (CIALCA). Eco-Efficiency: From Vision to Reality, p 17.
- Vaquero R. 2005. Soil physical properties and banana root growth. In: Turner D.W. and Rosales F.E. (eds) *Banana Root System: towards a better understanding for its productive management*, Proceeding of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, pp 125-131.
- Vaz C.M.P., Bassoi L.H and Hopmans J.W. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil and Tillage Research* 60: 35-42.
- Veihmeyer F.J. and Hendrickson A.H. 1948. Soil Density and Root Penetration. *Soil Science* 65: 487-493.
- Wairegi L. 2010. Management practices and opportunities in the East African Highland Banana (*Musa AAA-EA*) production in Uganda. PhD-dissertation, Wageningen University, The Netherlands, p 180.
- Wairegi L., van Asten P., Tenywa M. and Bekunda M. 2010. Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. *Field Crops Research* 117: 146-153.
- Wairegi, L.W.I., van Asten, P.J.A, Giller, K.E., Fairhurst, T. 2014. *Banana-Coffee system cropping guide*. Africa Soil health Consortium, Nairobi. CAB International, p121.
- Walkley A. and Black I.A. 1934. An examination of degiareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the Chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Wallis M.G. and Horne D.J. 1992. Soil water repellency. *Advance Soil Science* 20: 91–146.

- Warrington I., Shainberg I., Agassi M. and Morin J. 1989. Slope and phosphogypsum effect on runoff and erosion. *Soil Science Society of America Journal* 53: 1201-1205.
- White I. and Sully M.J. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resource Research* 23: 1514-1522.
- Wooding E.G. 1968. "Two- and three-dimensional infiltration: seepage from irrigation channels and infiltrometer rings." *Journal of Hydrology* 15: 301–315.
- Wortmann C.S., Sengooba T. and Kyamanywa S. 1992. Banana and bean intercropping: factors affecting bean yield and land use efficiency. *Experimental Agriculture* 28: 287-294.
- Zhong S, Mo Y., Guo G, Zeng H. and Jin Z. 2014. Effect of Continuous Cropping on Soil Chemical Properties and Crop Yield in Banana Plantation. *Journal of Agricultural Science and Technology* 16: 239-250.
- Zhou H., Lv Y.Z., Yang Z.C. and Li B.G. 2007. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain. *China Sci Agri Sin* 40: 1973–1979.