

**Université catholique de Louvain**  
**Faculté d'ingénierie biologique,**  
**agronomique et environnementale**



---

Identification des contraintes en culture bananière traditionnelle dans trois régions  
du Rwanda par enquête diagnostic.

---

Promoteur : B. Delvaux

Co-promoteur : S.V. Gaidashova

Mémoire présenté par  
Geoffroy Germeau  
en vue de l'obtention du  
diplôme de bio-ingénieur

Année académique 2005/2006

# Remerciements

*Je souhaite exprimer ici mes plus vifs remerciements à mon promoteur, le professeur Bruno Delvaux, pour m'avoir permis de réaliser ce travail passionnant, ainsi que de m'avoir guidé et conseillé tout au long de la réalisation de celui-ci. Le travail de terrain a été réalisé avec la chercheuse Svetlana Gaidashova, responsable du Programme Banane de l'ISAR. Elle fût d'une aide précieuse durant les phases de planification, d'analyse et de rédaction. Je lui en suis sincèrement reconnaissant. Permettez-moi de remercier également Monsieur Piet Van Asten, responsable à l'IITA des recherches relatives à la banane, pour l'intérêt qu'il aura porté à ce travail, le temps qu'il nous aura consacré ainsi que pour ses nombreux conseils.*

*Merci aux Professeurs Frédéric Garspart, Stéphan Declerck, et Eric Leboulenge d'avoir consacré du temps pour répondre à mes questions.*

*Merci à toutes les personnes de l'ISAR ayant travaillé avec nous sur le terrain ; en particulier merci à François, Eustache, Thierry et Kalonji. Merci à Béatrice pour son travail de labo.*

*Merci à toutes les personnes travaillant au laboratoire UCL de Michamps pour leur accueil et les nombreuses analyses qu'ils ont réalisées.*

*Merci à toutes les personnes qui m'ont conseillé durant la rédaction : Estelle Carton, Séverine Delstanche et Etienne Germeau.*

*Permettez-moi finalement de saluer ici les résistants de la salle Atlas : Emilie, Thomas, Maxime, Benjamin, Christina et Live.*

*Le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce à l'intervention financière du Conseil interuniversitaire de la Communauté française de Belgique - Commission universitaire pour le Développement - Rue de Namur, 72-74, 1000 Bruxelles - <http://cud.ciuf.be>».*

## Résumé

La culture bananière est particulièrement importante au Rwanda, d'un point de vue alimentaire, économique et social. Sa productivité y est cependant faible.

Ce mémoire ambitionne de mieux identifier les contraintes écologiques et techniques à la production. Pour atteindre cet objectif, une démarche de type « enquête diagnostic » a été adoptée.

L'étude a été réalisée dans trois régions productrices de banane du Rwanda. L'une est caractérisée par des sols volcaniques récents de fertilité élevée (Ruhengeri), la seconde par des sols dérivés de roche-mère acides, de très faible fertilité (Gitarama- Butare) et la troisième par des sols de fertilité intermédiaire, dérivés de matériaux schisteux (Kibungo). Elle a été effectuée dans le cadre d'un projet de coopération entre l'Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda (ISAR), l'*International Institute of Tropical Agronomy* (IITA) et l'Université catholique de Louvain (UCL).

L'enquête s'est limitée à la variété *Intuntu*. Plusieurs variables ont été collectées dans 108 parcelles cultivées. Dans chaque parcelle, nous avons effectué une caractérisation du statut nutritionnel des bananiers par échantillonnage et analyse sol-plante, des populations de nématodes et de l'état sanitaire des racines. Un estimateur quantitatif du poids de régime a été proposé et utilisé.

L'enquête a confirmé l'omniprésence de *Pratylenchus goodeyi*. Son impact sur la production n'est néanmoins pas mis en évidence. Ce nématode a un impact sur l'état sanitaire des racines qui pourrait être limitant. D'autres facteurs/organismes y contribuent certainement.

Les contraintes nutritionnelles en potassium et en azote sont importantes, particulièrement à Butare. La nutrition en potassium est essentiellement conditionnée par la teneur en potassium dans le sol. D'autres facteurs interviennent également. La teneur critique en potassium serait d'environ 1.5 meq/100g de sol. La nutrition en azote répond à des mécanismes plus complexes. L'enquête met en évidence un effet bénéfique probable du paillage sur le rendement, et sur l'état sanitaire du système racinaire. Des densités de plantation élevées auraient un impact négatif sur la productivité par pied. L'effet serait cependant positif sur la productivité par unité de surface. La productivité estimée est de 20t/ha en moyenne. Ce résultat est étonnamment élevé. La productivité pourrait avoir été surestimée.

# Table des matières

Introduction.....	1
<b>1. Contexte et problématique .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.Le Rwanda .....</b>	<b>2</b>
1.1.1.Localisation .....	2
1.1.2.Topographie .....	2
1.1.3.Climat .....	2
1.1.4.Lithologie et sols .....	3
1.1.5.Végétation .....	4
1.1.6.Population et démographie .....	4
1.1.7.Economie .....	5
1.1.8.L'agriculture rwandaise .....	5
<b>1.2.La bananeraie rwandaise .....</b>	<b>6</b>
1.2.1.Importance alimentaire, économique et sociale .....	6
1.2.2.Système de culture .....	7
<b>1.3.Problématique liée à la production bananière .....</b>	<b>8</b>
1.3.1.Rendements potentiels et rendements actuels .....	8
1.3.2.Contraintes principales pesant sur la production .....	8
<b>1.4.Objectif global et spécifique .....</b>	<b>11</b>
1.4.1.Objectif global .....	11
1.4.2.Objectif spécifique .....	11
1.4.3.Questions de recherche .....	12
<b>2.Revue bibliographique : fertilité du sol et potentialité culturale .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.Le sol .....</b>	<b>13</b>
2.1.1.Caractéristiques physiques .....	13
2.1.2.Caractéristiques chimiques .....	14
<b>2.2.L'alimentation minérale de la plante .....</b>	<b>16</b>
2.2.1.Eléments et rôle .....	17
2.2.2.Valeurs critiques .....	18
<b>2.3.Les nématodes .....</b>	<b>19</b>
2.3.1.Espèces et cycle de vie .....	19
2.3.2.Conséquences des dommages .....	20
2.3.3.Evaluation des dommages .....	20
2.3.4.Complexe nématode-parasite .....	21
2.3.5.Facteurs influençant les dégâts .....	21
<b>2.4.Le climat .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.Les pratiques culturales au Rwanda .....</b>	<b>25</b>
2.5.1.Application de matière organique .....	25
2.5.2.Association culturale .....	25
2.5.3.Le labour .....	26
2.5.4.Le désherbage .....	26
<b>3.Matériel et méthode .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.La notion d'enquête diagnostic .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.Définition des objectifs et de la zone d'étude .....</b>	<b>27</b>
3.2.1.Définition des objectifs .....	27
3.2.2.Définition de la zone d'étude .....	27
3.2.3.Les exploitations .....	28
<b>3.3.La collecte de l'information .....</b>	<b>29</b>
3.3.1.Durée et période d'échantillonnage .....	29

3.3.2.Stratégie et schéma de collecte des données	29
3.3.3.Les données récoltées	31
3.3.4.Le rendement	31
3.3.5.Facteur pédologique	33
3.3.6.La nutrition minérale : échantillonnage foliaire	34
3.3.7.Facteur sanitaire	34
3.3.8.Les pratiques culturales	35
3.3.9.Informations complémentaires	35
<b>3.4.Analyses de laboratoire</b>	<b>36</b>
3.4.1.Analyses de sols	36
3.4.2.Analyses foliaires	36
3.4.3.Les racines	36
<b>3.5.Récapitulatif des données récoltées</b>	<b>37</b>
<b>3.6.Traitement des données</b>	<b>38</b>
3.6.1.Stratégie d'analyse	38
3.6.2.Analyse en composante principale (ACP)	38
3.6.3.Analyse en courbe limite (« <i>Boundary line analysis</i> »)	38
<b>4.Présentation des résultats</b>	<b>41</b>
<b>4.1.Données générales</b>	<b>41</b>
4.1.1.Données générales mesurées	41
4.1.2.Données générales informées	42
<b>4.2.Les pratiques culturales</b>	<b>46</b>
4.2.1.Pratiques culturales informées	46
4.2.2.Pratiques culturales mesurées	47
<b>4.3.Données pédologiques</b>	<b>47</b>
4.3.1.Caractéristiques physiques	47
4.3.2.Caractéristiques chimiques	48
<b>4.4.Données relatives au statut nutritionnel des bananiers</b>	<b>53</b>
<b>4.5.Données sanitaires</b>	<b>58</b>
4.5.1.Observations	58
4.5.2.Populations de nématodes dénombrées	58
4.5.3.Etat sanitaire des racines	59
<b>4.6.Données morphologiques</b>	<b>60</b>
4.6.1.Présentation des données et comparaison entre les régions	60
4.6.2.Choix de l'estimateur de productivité	61
4.6.3.Les rendements estimés	63
<b>4.7.Comparaison générale entre les trois régions d'enquête.</b>	<b>65</b>
<b>5.Discussion</b>	<b>67</b>
<b>5.1.La nutrition minérale du bananier</b>	<b>67</b>
5.1.1.L'azote	68
5.1.2.Le potassium	69
<b>5.2.Populations de nématodes dénombrées et état sanitaire du système racinaire</b>	<b>72</b>
5.2.1.Facteurs affectant la présence de nématodes	72
5.2.2.L'état sanitaire du système racinaire	75
<b>5.3.Les rendements</b>	<b>79</b>
5.3.1.Discussion sur les valeurs obtenues	79
5.3.2.Facteurs déterminant la productivité	81
<b>5.4.Détection des facteurs limitants la productivité</b>	<b>86</b>
<b>5.5.Discussion générale sur la densité de plantation</b>	<b>92</b>
<b>Conclusion</b>	<b>94</b>

*Recherches ultérieures* ..... 96  
*ANNEXES* ..... 98  
*Bibliographie* ..... 99

# Introduction

Avec une contribution au produit intérieur brut excédant les quarante pourcent, l'agriculture est un élément primordial de l'économie nationale rwandaise. Elle fait cependant face à un véritable défi : dans ce pays surpeuplé (340 habitants/km<sup>2</sup>), essentiellement agricole, présentant un déficit alimentaire rendant obligatoire le recours aux importations commerciales et à une aide alimentaire directe, une intensification du système de production apparaît à présent indispensable.

Parmi les productions agricoles du Rwanda, la banane tient une place particulièrement importante : elle est effectivement rapportée comme étant la principale source alimentaire et économique de la communauté rurale du pays. Elle joue de plus un rôle essentiel dans les cérémonies traditionnelles et coutumes sociales de la population rwandaise. La productivité estimée par la FAO, à l'échelle du pays, des systèmes de culture bananières est pourtant faible (<8t/ha), bien loin du potentiel génétique des variétés cultivées. Les études réalisées jusqu'ici suggèrent que les populations de nématodes, couplés à une faible fertilité du sol, figurent parmi les contraintes principales limitant la production bananière du pays.

Le présent travail, qui s'intègre dans le cadre d'un partenariat entre l'Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda (ISAR), l'*International Institute of Tropical Agronomy* (IITA), l'Université catholique de Louvain (UCL) et qui est financé par la Direction Générale de la Coopération au Développement (DGCD), vise à identifier les contraintes à la production dans les systèmes de culture bananière au Rwanda. Pour ce faire, une démarche de type « enquête diagnostic » a été adoptée. Elle implique dans une première phase une prise de données à l'échelle des exploitations et des parcelles cultivées concernant les itinéraires techniques, les indicateurs de production, diverses variables relatives à l'état nutritionnel des bananeraies (analyses de sols et de plantes) et divers indicateurs de la pression induite par le parasitisme foliaire et tellurique (teneurs en nématodes dans les racines, indice de nécrose racinaire, pourcentage de racines mortes). Dans une seconde phase, le travail a impliqué un traitement des données notamment par analyses multivariées. L'enquête diagnostic a été réalisée entre le 1<sup>er</sup> mars et le 5 avril 2006, dans 108 parcelles localisées dans trois régions productrices du pays : Gitarama-Butare, Kibungo, Ruhengeri.

# 1. Contexte et problématique

## 1.1. Le Rwanda

Les statistiques et chiffres présentés ici sont les plus récents disponibles à notre connaissance.

### 1.1.1. Localisation

La République du Rwanda se situe dans la région des grands lacs d'Afrique centrale. Son territoire, enclavé, s'étend sur une superficie de 26 340 km<sup>2</sup> dont 1 390 sont immergés. Le pays partage ses frontières avec l'Ouganda au Nord, la Tanzanie à l'Est, le Burundi au Sud et la République démocratique du Congo (RDC) à l'Ouest (Figure 1). La capitale est Kigali.

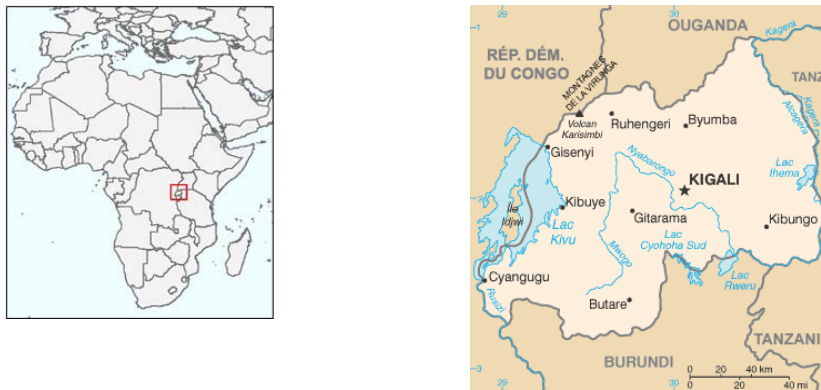


Figure 1. Localisation du Rwanda (source : Wikipédia, *online*)

### 1.1.2. Topographie (Aquastat, *online*)

D'une altitude moyenne de 1 250 m, avec une inclinaison générale orientée d'ouest en est, le relief s'élève progressivement des *Plateaux de l'Est*, relief ondulé de 1 000 à 1 500m d'altitude, au *Plateau central* (1500-2000m), collinaire, vers le nord et l'ouest, en une chaîne de montagnes appelée «Crête Congo-Nil» (2200 m à 3000 m), culminant finalement en une chaîne de volcans (volcan Karisimbi à 4 507 m). On distingue encore *Les basses terres de l'Ouest*, d'une altitude de 900 m, dans la province de Cyangugu.

### 1.1.3. Climat

En dépit de la proximité de l'équateur, grâce à l'altitude, le climat est tropical tempéré ; le régime thermique du Rwanda est pratiquement constant tout au long de l'année. C'est le rythme des précipitations qui détermine ici les saisons (MINITERE, 2005).

Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1 200 mm (variant de 700 à plus de 2 000 mm selon les régions), le régime pluviométrique est bimodal. Les régions de l'Est et du Sud-Est sont les plus touchées par les sécheresses prolongées tandis que la partie du Nord-Ouest (Ruhengeri, Gisenyi, Byumba) connaît surtout les fortes précipitations qui provoquent l'érosion, les inondations, les éboulements et glissements de terrain (MINITERE, 2005).



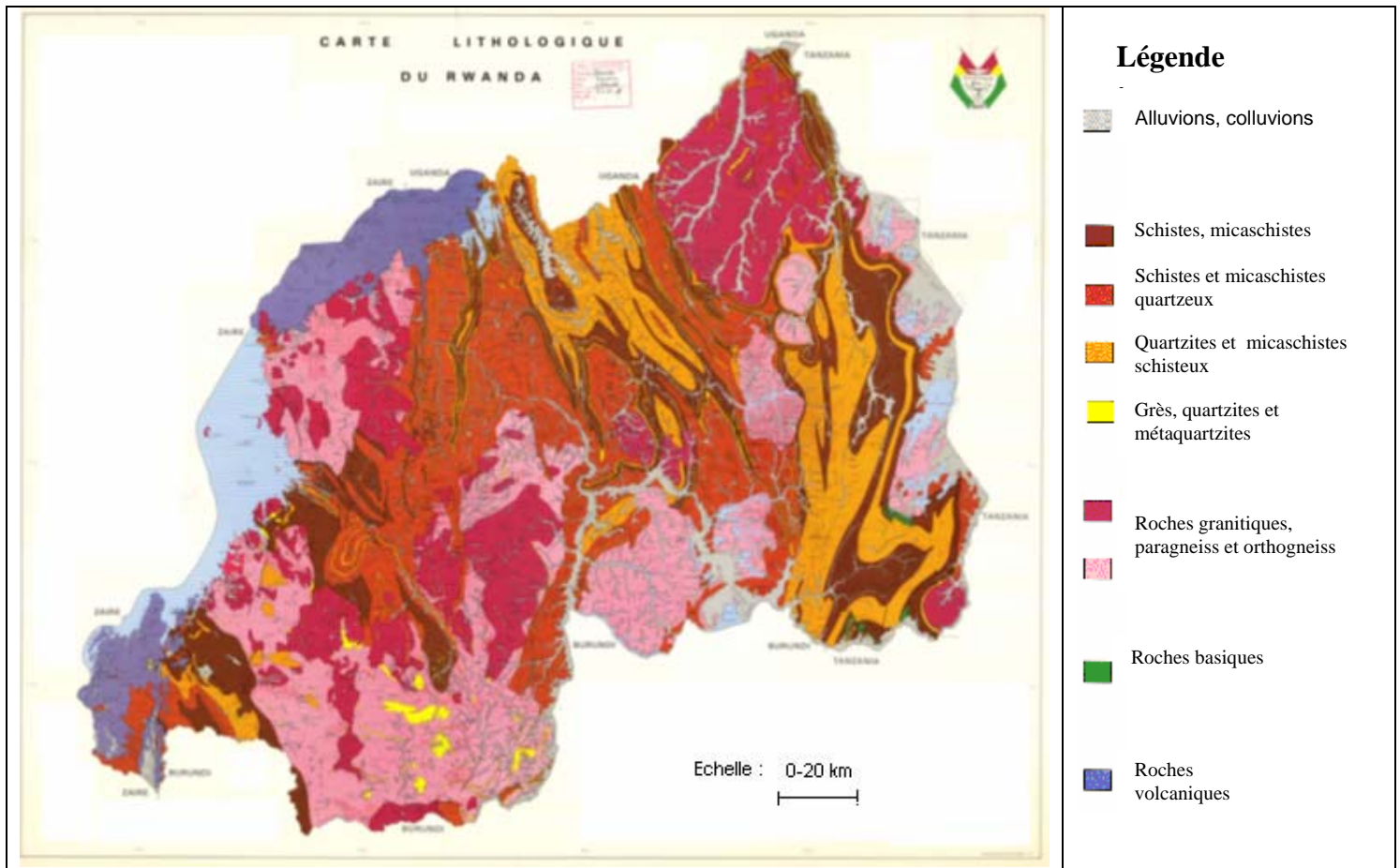
Le pays peut être divisé en trois zones agro-climatiques (Tableau 1): i) la région de haute altitude, ii) le Plateau central, et iii) le Plateau de l’Est et les basses terres de l’Ouest (Aqustat, *online*).

**Tableau 1. Les trois zones agro-climatiques du Rwanda (source : Aqustat, *online*)**

Paramètre	Région de haute altitude	Plateau central	Plateau de l’est et basses terres de l’ouest
Pluie (mm/an)	1 300 – 2 000	1 200 – 1 400	700 – 1 400
Température (°C)	16 – 17	18 – 21	20 – 24
Evapotranspiration (mm/an)	1 000 – 1 300	1 300 – 1 400	1 200 – 1 750
Humidité relative (%)	80 – 95	70 – 80	50 – 70
Coefficient d’écoulement (%)	18	22	10

### 1.1.4. Lithologie et sols

Le Rwanda se caractérise par une diversité lithologique importante (Figure 2). Cinq grands types de sols s’y sont développés : i) Les sols dérivés de formations schisteuses, grès et quartzites, largement dominants (50% de la superficie) ; ii) les sols dérivés de granite et gneiss (20%), iii) les sols dérivés de roches basiques intrusives (10%), iv) les sols dérivés de matériaux volcaniques récents et anciens (14%), et v) les sols alluvionnaires et colluvionnaires, dont la superficie est estimée à 6% (MINITERE, 2005).



**Figure 2. Carte lithologique du Rwanda (source : Eusoil, *online*)**

### 1.1.5. Végétation

Alors que la superficie cultivable est estimée à environ 1.5 millions d'hectares, les terres cultivées couvraient déjà 1 385 000 ha en 2002, ce qui représente plus de la moitié de la superficie totale du pays et près de 92 % de la superficie cultivable (Aquastat, *online*).

La couverture forestière nationale était estimée à 527 653 ha en 2004, soit 20 % de la superficie totale. Entre 1960 et 2002, les superficies des forêts naturelles sont passées de 634 000 ha à 221 200 ha soit une régression de 65% (Aquastat, *online*). Cette situation résulte de plusieurs facteurs parmi lesquels le défrichement dû à la recherche de terres cultivables et une gestion non raisonnée des ressources (MINITERE, 2005).

### 1.1.6. Population et démographie

En 2004, La population était estimée à presque 8.5 millions d'habitants dont 80 pour cent de ruraux (Aquastat, *online*). C'est une population jeune où la moitié des habitants est âgée de moins de 17 ans (FAO, 2003). Le graphique de la Figure 3 montre l'impressionnante croissance de la population : celle-ci a plus que doublé en trente ans. L'effet du génocide de 1994 est très visible.

La densité de population, 340 habitants/km<sup>2</sup> de terre émergée, est l'une des plus importantes d'Afrique (FAOSTAT, *online*).

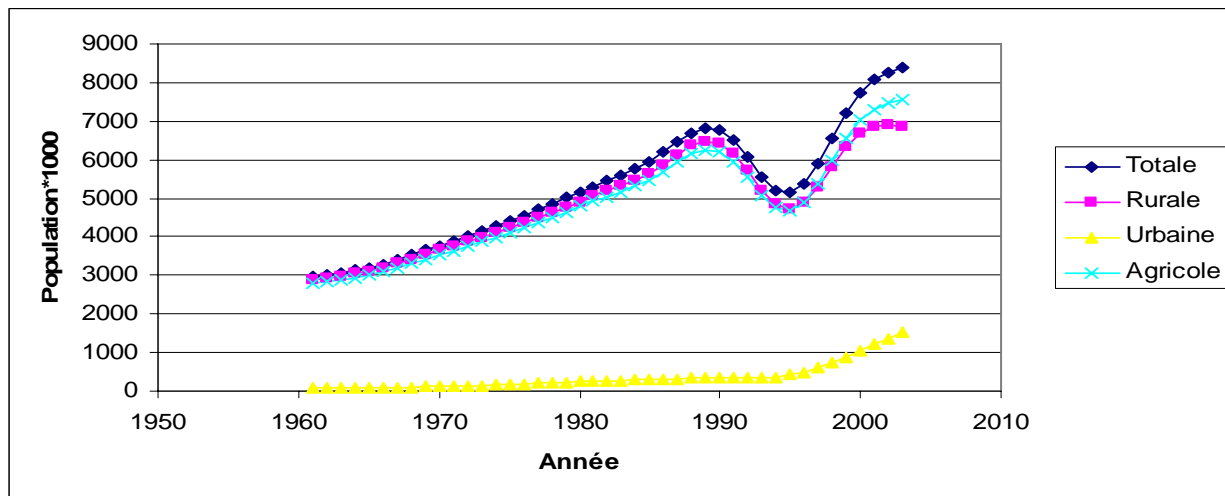


Figure 3. Evolution des populations entre 1961 et 2003 (source : FAOSTAT, *online*)

NB : la population agricole est la partie de la population dont l'activité professionnelle est l'agriculture; et par extension, ensemble des ménages dont un membre au moins fait partie de cette population.

En 2002, plus de 60 % de la population vivaient en dessous du seuil de pauvreté (FAO, 2003). La prévalence du VIH/SIDA parmi la population âgée de 15 à 49 ans était estimée à 13,7% en 2002 (Tableau 2). L'espérance de vie en 2002 était de 49 ans et la mortalité infantile de 10,7%.

**Tableau 2. Indicateurs socio-économiques du Rwanda (source : MINITERE, 2005)**

Indicateurs socio-économiques <sup>8</sup>	1980	1990	2002
Population (million)	5,163	6,879	8,162
% sexe féminin	-	51,3	52,3
Taux de fécondité	8,3	6,9	5,6
Taux de mortalité maternel (pour 100.000 naissances)	-	1300	1071
Taux d'accroissement annuel (%)	3,1	3,1	1,2
Indice de la pauvreté (%)	40	53	60
Espérance de vie	46	49,5	49
Mortalité infantile (par 1000 naissances)	128	85	107
Mortalité pour les - de 5 ans (par 1000 naissances)	224	150	196
Prévalence VIH/SIDA (entre 15-49 ans)	-	-	13,7
Prévalence VIH/SIDA (plus de 12 ans) : milieu rural	-	-	10,8
Préval. VIH/SIDA (plus de 12 ans) : milieu urbain)	-	-	11,6

L'habitat rural au Rwanda a depuis longtemps été et reste très dispersé. En 2004, le gouvernement a adopté la politique nationale de l'habitat visant l'établissement d'un modèle d'habitat rural amélioré et regroupé communément appelé « IMIDUGUDU » (MINITERE, 2005).

### 1.1.7. Economie

Le produit intérieur brut du Rwanda est dominé par le secteur agricole, principale source de devises du pays et de moyen de subsistance de la population. Ce secteur emploie 90 pour cent de la population active totale. En 2002, la part de l'agriculture dans le PIB était de plus de 43%, celle de l'industrie 19% et celle des services 37% (MINITERE, 2005). Le café et le thé sont les principales cultures d'exportation.

### 1.1.8. L'agriculture rwandaise

Le système de production agricole est basé sur de petites exploitations familiales de cinq à six membres, dont la production est auto-consommée à plus de 80 % (MINITERE 2005). En 2002, la taille moyenne des exploitations était estimée à 84 ares, 72% des ménages ruraux possédant moins de 75 ares (Mpyisi et al., 2003).

Les systèmes de culture sont complexes, basés sur la diversification de productions et l'association des cultures. Les cultures principales sont: i) en basse et moyenne altitude : la banane, le haricot, le sorgho, le manioc et la patate douce et ii) en haute altitude : le haricot, le maïs, la patate douce et la pomme de terre (Aquistat, *online*)

Le niveau d'utilisation d'intrant est faible. L'agriculture utilise toujours des outils rudimentaires. Tous les travaux sont réalisés manuellement, sans utilisation d'énergie animale ou mécanique. La productivité de la main d'œuvre est en conséquence faible (FAO, 2003). L'utilisation d'engrais minéraux est quasi nulle : moins de 3 kg/ha en moyenne (FAO, 2003), ceux-ci étant principalement appliqués sur les cultures de pomme de terre à Gisenyi (Kelly et al., 2001). L'application de pesticide est de plus très faible.

L'élevage fait traditionnellement partie des systèmes d'exploitation et l'utilisation du fumier est une pratique courante, contrairement à la jachère rendue impossible par la faible disponibilité des terres (Aquistat, *online*).

Ce faible niveau d'intrants et d'équipement, couplé à l'application très limitée des technologies mises au point par la recherche, se traduit par des rendements médiocres, très sensibles aux aléas climatiques (FAO, 2003).

## 1.2. La bananeraie rwandaise

La Figure 4 représente schématiquement un bananier et la nomenclature associée.

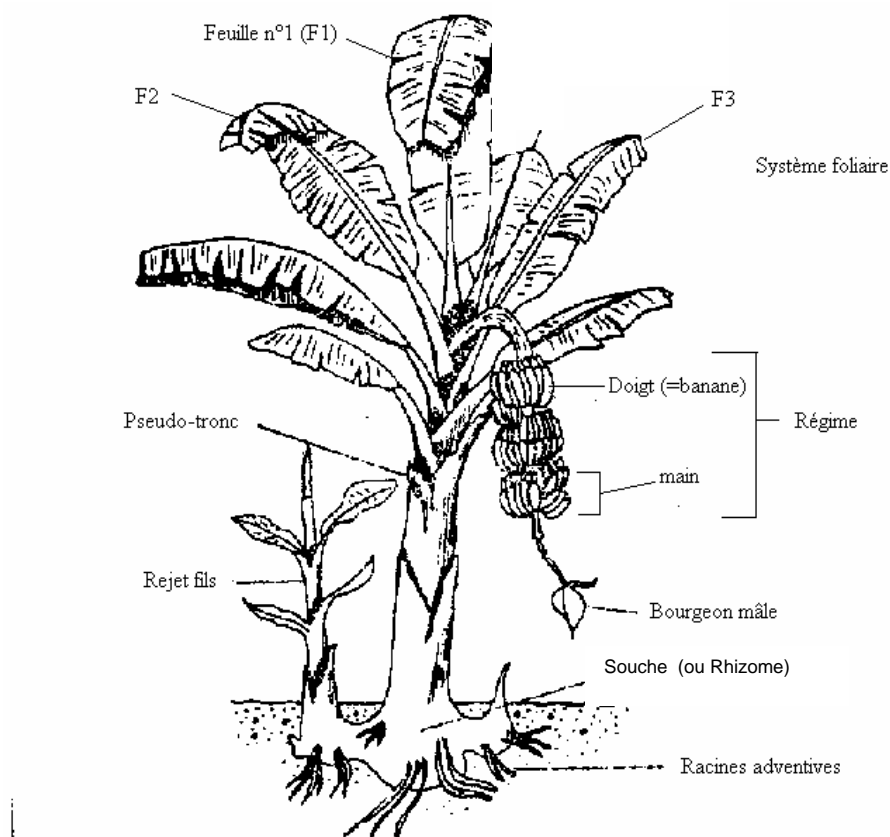


Figure 4. Représentation d'un bananier et nomenclature associée (Adapté de FAO, *online*)

### 1.2.1. Importance alimentaire, économique et sociale

La banane semble être la principale source alimentaire et économique de la communauté rurale du Rwanda (Okech et al., 2005), constituant ainsi un élément-clé de la sécurité alimentaire de la population. La banane étant, au Rwanda, une culture pérenne à production quasiment continue, son importance peut s'avérer primordiale lorsque les conditions locales réduisent la disponibilité des produits provenant de cultures saisonnières.

Les géotypes cultivés comprennent principalement des variétés locales à cuire et à bière (AAA-EA : triploïdes *Acuminata*, sous groupe des bananes de haute altitude de l'Afrique de l'Est), endémiques de l'Afrique de l'Est. Des variétés exotiques à bière (ABB), ainsi que des variétés dessert

(AB et AAA) sont également cultivées (Okech et al., 2002). La classification en banane à bière, cuire, ou dessert se base essentiellement sur la manière dont le régime sera consommé.

A l'échelle du pays, la banane à bière domine largement ; elle représenterait jusqu'à 71% de la production bananière (Okech et al. 2005), et ce malgré la réduction de la valeur nutritionnelle du fruit due au brassage (Kangasniemi, 1998). Elle peut être cuite durant les périodes de famines, mais est généralement transformée à la ferme sous forme de bière. Seule la région de Kibungo voit une prédominance de variétés à cuire (Okech et al., 2002).

La banane à cuire est abondamment consommée dans le pays : avec une moyenne de 250g par habitant et par jour, la consommation de banane au Rwanda se classe parmi les plus élevées au monde (ISAR *online*).

La banane dessert est cultivée largement dans le pays mais en faible quantité (Okech et al., 2002).

Outre son rôle économique et alimentaire, le bananier joue également un rôle primordial dans les cérémonies traditionnelles (Kangasniemi, 1998).

### **1.2.2. Système de culture**

Le système traditionnel de culture est étroitement lié au système social où chaque famille devait construire son habitat (« Rugo ») et établir au moins une petite bananeraie alentour. Le bananier apportait la sécurité, la richesse et la considération sociale (Lassoudière, 1989).

En moyenne, une bananeraie représente une surface inférieure à un demi-hectare et est constituée d'un mélange de nombreuses variétés (Lassoudière, 1989).

La replantation totale, de même que l'irrigation ou l'application d'engrais ou de pesticide, semble inexistante. Ici encore les outils sont rudimentaires (FAO, 2003).

Le paillis est une technique culturelle traditionnelle des hauts plateaux de l'Afrique de l'Est, favorisée par la suppression d'adventices, la conservation de l'humidité et de la fertilité du sol (Bekunda et al., 2003). Traditionnellement, les feuilles élaguées et les résidus de récoltes retournent au sol, avec ajout de matière provenant des champs alentours, des espaces en jachères, des marais, ainsi que de fumier (Bekunda et al., 2003). Une fumure privilégiée (« résidus de balayage ») confère un port vigoureux aux bananiers proches de l'habitat, créant ainsi une variabilité spatiale de la fertilité sur de petites distances (Bekunda et al., 2003).

Les parcelles sont parfois cultivées sur des pentes abruptes pouvant générer des problèmes d'érosion (FAO, 2003).

### 1.3.Problématique liée à la production bananière

#### 1.3.1. Rendements potentiels et rendements actuels

Compte tenu de l'accroissement de la population rwandaise, l'intensification de la productivité agricole est indispensable. La Figure 5 montre l'évolution des rendements estimés entre 1961 et 2003. Ceux-ci, à prendre de manière indicative car basés sur des estimations, illustrent bien la faiblesse des rendements obtenus au Rwanda. Alors que le potentiel génétique des *Musa* AAA-EA serait d'au moins 67 t/ha/an (Smithson et al., 2001), le MINAGRI estime la potentialité des rendements bananiers au Rwanda à 35 t/ha (FAO, 2003). Les rendements actuels semblent cependant se stabiliser entre 6 et 8 t/ha (Figure 5).

En plus de la faiblesse des rendements obtenus, de nombreux auteurs rapportent une baisse de la productivité des bananeraies à l'échelle de la Région des Grand Lacs (Van Asten et al., 2004). Plusieurs facteurs contribuent à cette baisse ; parmi eux, on peut citer les mauvaises pratiques culturales, la faible fertilité du sol et le parasitisme (Musabyimana, 1988).

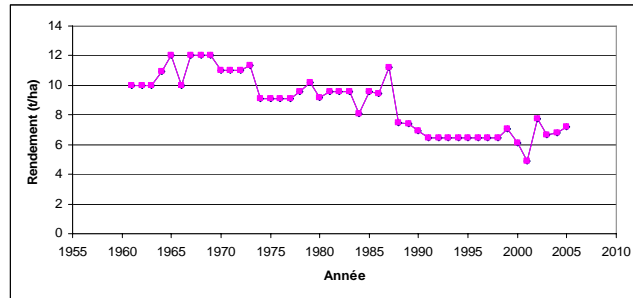


Figure 5. Evolution des rendements de la bananeraie rwandaise (source : FAOSTAT, *online*)

#### 1.3.2. Contraintes principales pesant sur la production

##### a) Pression démographique et gestion de la fertilité des sols

En réponse à la pression démographique, les ménages rwandais tendent à augmenter la surface cultivée aux dépens des pâturages, jachères et forêts (Mpyisi et al, 2003), (Figure 6). Ces observations, couplée à la non-utilisation d'engrais minéraux, impliquent une utilisation intensive et non durable des terres ; les conséquences potentielles pour la productivité ainsi que pour l'environnement sont préoccupantes (Mpyisi et al, 2003). Donovan et al. (2002), insistent également sur la diminution du cheptel bovin, indiquant que la fertilité des sols est de plus en plus problématique.

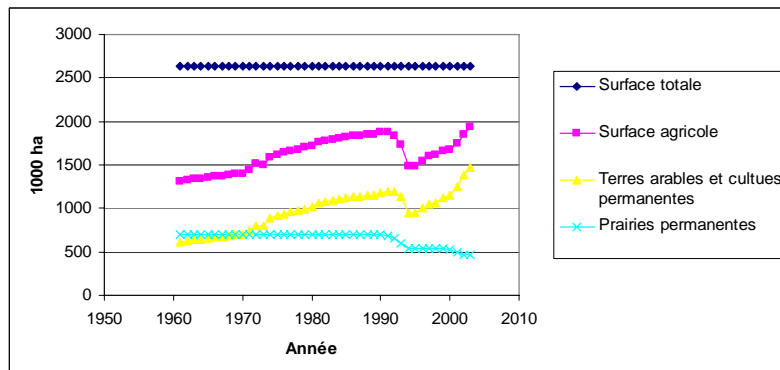


Figure 6. Evolution de l'occupation des terres au Rwanda entre 1961 et 2003 (source : FAOSTAT, *online*)

Dans ce pays où de nombreuses parcelles se trouvent sur de fortes pentes, l'érosion hydrique est considérée comme le facteur principal de dégradation du milieu de production agricole (FAO, 2003). Kelly et al (2001), soulignent le fait que le faible taux d'adoption de pratiques anti-érosives et le manque d'intrant organique sont plus préoccupants que la faible utilisation d'engrais minéraux, ceux-ci ne pouvant être efficaces sur des sols sujets à l'érosion ou ne présentant pas un minimum de matière organique. Remarquons à ce titre que la banane est une culture permettant une bonne protection du sol menant à des pertes par érosion généralement moindre que des cultures annuelles (Bekunda et al., 2003). La grande quantité de matière produite permet un paillage abondant, et son imposante surface foliaire protège le sol de l'impact des gouttes de pluies. Elle est considérée comme un élément important de la lutte anti-érosive au Rwanda (Kangasniemi, 1998 ; Donovan et al., 2002 ; FAO, 2003).

L'accroissement de la population a entraîné l'établissement de bananeraies dans des conditions écologiques de plus en plus éloignées de l'optimum (pente prononcée, haute altitude, fertilité moindre) et une réduction progressive des surfaces par famille (Lassoudière, 1989). La pénurie de terres pousse les petits exploitants à cultiver les bananes en association dense plutôt qu'en champs séparés (Kangasniemi, 1998). Kelly et al. (2001) font cependant remarquer que la diminution des exploitations n'est pas forcément négative ; des analyses avant-guerre montrent en effet que les exploitations de moindre taille sont souvent cultivées plus intensivement (plus d'intrants, plus de travail, et plus techniques de conservation par hectare) que les exploitations de taille supérieure. Etant donné les faibles possibilités actuelles de travail non agricole, un nombre important de foyers ruraux ont peu d'autres options que d'essayer de produire davantage sur leurs petites parcelles (Mpyisi et al., 2003).

Sans intensification de la lutte anti-érosive et de l'utilisation d'engrais (tant minéraux qu'organiques), l'érosion du sol et le déclin de la fertilité vont demeurer des problèmes majeurs ayant pour corollaire de faibles productivités agricoles, de faibles revenus des ménages ruraux et une augmentation de l'insécurité alimentaire au Rwanda (Kelly et al., 2001).

#### b) Contraintes biotiques

Les ravageurs et les maladies semblent affecter de manière préoccupante la production bananière. De plus, ils sont des éléments susceptibles de favoriser le remplacement des bananes à cuire par des variétés à bières, moins susceptibles aux parasites principaux du bananier. Ce changement a d'ailleurs déjà été observé dans certaines régions de Tanzanie et d'Ouganda (Kangasniemi, 1998).

#### ***Les nématodes***

Partout où sont cultivées des bananes, la présence de nématodes parasites du bananier a été signalée (Luc et Vilardebo, 1961). Leur importance dans le déclin des bananiers de haute altitude de l'Afrique de l'Est a été suggérée dans de nombreuses études (Gaidashova et al., 2004a ; Rufino, 2003 ; Talwana et al., 2003 ; Ssango et al., 2004). Au Rwanda, des enquêtes réalisées dans les quatre régions principales de culture bananière montrent que les nématodes, bien que largement inconnus des agriculteurs (Okech et al., 2002), sont susceptibles de constituer une contrainte importante : ils affectant tous les génotypes, dans toutes les régions (Okech et al., 2002 ; Gaidashova et al., 2004a).

### **Les charançons**

Les charançons sont des insectes coléoptères dont les femelles pondent leurs œufs dans les gaines foliaires ou la partie supérieure du rhizome. Ils constituent une préoccupation importante des agriculteurs rwandais (Okech et al., 2002). Les auteurs remarquent cependant que des symptômes caractéristiques d'autres maladies (telle que la maladie de Panama) sont largement attribués à tort aux charançons, exagérant ainsi leur importance.

### **Autres**

La maladie de Panama est causée par des souches pathogènes du champignon *Fusarium oxysporum Cubense*. L'enquête réalisée par Okech et al. (2002) indique que les variétés de bananiers susceptibles sont principalement les variétés exotiques (*Kayinja*, ABB), Gros Michel (AAA) et « *apple banana* » (*Ndiizi*, AAB). Les dommages sont très variables d'un site à l'autre. Par mesure de contrôle les fermiers ont tendance à remplacer la variété *Kayinja* par des variétés résistantes à bière AAA-EA comme mesure de contrôle.

La mosaïque en tiret (« Banana streak virus ») n'apparaît pas comme une maladie importante aux yeux des fermiers, et semble se restreindre à la région de Kibungo (Okech et al., 2002).

Toujours dans l'enquête d'Okech et al. (2002), la cercosporiose, maladie foliaire causée par le champignon *Mycosphaerella fijiensis*, a été diagnostiquée dans plus de 50% des sites, mais à faible incidence. Les autres maladies identifiées ont été jugées globalement négligeables.

#### c) Facteurs commerciaux

Les analystes s'accordent à dire que l'agriculture rwandaise manque cruellement d'activités de soutien, tant en amont qu'en aval (Donovan et al., 2002 ; FAO, 2003). En amont, le manque d'approvisionnement en intrants, de disponibilité de crédits, d'organisation et d'encadrement du monde rural limite les investissements (FAO, 2003). En aval, le manque d'accès aux marchés - de par l'insuffisance d'infrastructure routière, de moyens de transports, d'infrastructures de marché et de stockage -, le faible niveau de transformation des produits et l'absence d'information sur les débouchés constituent des freins au développement agricole.

Le cas de la banane à bière est symptomatique. Depuis plusieurs années, le gouvernement rwandais exprime le souhait de voir diminuer sa production et consommation au profit de la banane à cuire et de cultures annuelles alimentaires. Cependant, le peu d'alternatives existantes continuent à favoriser la production de banane à bière laquelle, outre ses exigences moindres en intrants et sa gestion plus aisée, est transformée en produits ayant une durée de vie supérieure et qui sont plus aisément commercialisés (Okech et al, 2005).

#### d) Contraintes climatiques

La variabilité inter-annuelle du climat reste un des facteurs principaux de la variabilité inter-annuelle de la production agricole et de l'insécurité alimentaire du pays (René Gomme, *online*). La sécheresse apparue entre 1 999 et 2 000 a ainsi provoqué de graves disettes dans l'est et le sud du pays. Le nombre de personne à assister sur le plan agricole s'est ainsi élevé à 550 000, soit 7% de la population totale en l'an 2000 (FAO, 2003).



## 1.4. Objectif global et spécifique

### 1.4.1. Objectif global

Comme précisé ci-dessus, l'agriculture est un élément primordial de l'économie nationale rwandaise. Elle fait cependant face à un véritable défi : dans ce pays surpeuplé, essentiellement agricole, présentant un déficit alimentaire aigu rendant obligatoire le recours aux importations commerciales et à une importante aide alimentaire directe, une intensification du système de production apparaît indispensable. De concert avec les populations rurales, entrepreneurs et les bailleurs de fonds, il s'agira, dans un avenir plus ou moins proche, d'intégrer une agriculture vivrière et familiale dans un environnement macro-économique, et d'en augmenter de manière significative la productivité, et ce, dans un souci de préservation du patrimoine naturel et du tissu social.

Le présent travail s'intègre dans le cadre d'un projet de longue haleine de partenariat entre l'Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda (ISAR), l'*International Institute of Tropical Agronomy* (IITA), l'Université catholique de Louvain (UCL) et financé par la Direction Générale de la Coopération au Développement (DGCD). L'objectif global du projet est l'atteinte, par une intensification des systèmes de culture bananière, d'une sécurité alimentaire accrue de la population. En accord avec les objectifs gouvernementaux, le projet s'insère dans une démarche visant à intégrer l'agriculture paysanne rwandaise aux marchés macro-économiques des intrants (devant permettre d'élever les rendements), ainsi que de développer les circuits de transformation, de stockage et de distribution des produits. Une étape préliminaire et essentielle est la détermination des contraintes majeures limitant la production. Cette première étape constitue un prérequis nécessaire au développement de stratégies de recherches et de politiques agricoles devant mener à une augmentation de productivité.

### 1.4.2. Objectif spécifique

Nous avons eu l'occasion de mettre en avant l'importance de la culture bananière au Rwanda. La PRA (*Participatory Rural Appraisal*) et l'enquête diagnostic réalisées par Okech et al. (2002) ont suggéré que les maladies et ravageurs figurent parmi les contraintes principales de la production bananière au Rwanda. Parmi celles-ci, les nématodes sont considérés comme dominants car ils affectent tous les génotypes, dans toutes les régions. Le déclin de la fertilité est également rapporté comme une contrainte majeure dans la région (Van Asten et al., 2004). Une première évaluation des facteurs restreignant la production bananière au Rwanda a été réalisée par Lassoudière (1989), mais la caractérisation des populations de nématodes n'avait pu être réalisée, faute de possibilités techniques. L'estimation des productions fut alors basée sur la mesure de la circonférence du pseudo-tronc, couplée à une évaluation visuelle de l'état du régime. La productivité n'avait alors pas été chiffrée. De plus, l'enquête s'était alors limitée à la région de Kibungo. L'enquête d'Okech et al. (2002) a permis une évaluation des dégâts causés par différents pathogènes, sans toutefois associer ces dégâts à des pertes de production. Gaidashova et al. (2004a) ont réalisé un inventaire des populations de nématodes présentes au Rwanda, mais sans relier ces populations à des dégâts racinaires ni à des productions. La présente enquête vise à élargir l'état des connaissances concernant les interactions sol-nématodes et leur impact sur la production au Rwanda. Elle devra permettre de faire progresser la réflexion sur les améliorations à apporter, et définir des thèmes de recherches à privilégier.

### **1.4.3. Questions de recherche**

Plus précisément, l'enquête réalisée visera à apporter un éclairage sur les questions suivantes :

1. Quels sont les facteurs déterminant l'absorption des éléments principaux par la plante ?
2. Quels sont les facteurs déterminant la présence des nématodes ?
3. Quels sont les facteurs déterminant l'état sanitaire des racines ?
4. Quels sont les facteurs principaux déterminant la productivité des bananeraies ?
5. Quels sont les facteurs limitant la productivité des bananeraies dans trois régions contrastées du Rwanda ?

## 2. Revue bibliographique : fertilité du sol et potentialité culturale

La fertilité du sol est probablement l'un des concepts les plus mal définis en science du sol (Delvaux, 1995). Elle a longtemps été considérée comme une propriété liée essentiellement aux facteurs chimiques du sol et pouvant être améliorée par la fertilisation (Godefroy 1990). Actuellement, les notions de potentialité culturale ou d'aptitude à produire tendent à se substituer à la notion de fertilité (Godefroy 1990). L'aptitude d'un sol comprend les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, ainsi que leur interaction avec la plante, le climat et les pratiques culturales dans un système dynamique (Delvaux, 1995 ; Bekunda et al., 2003). L'aptitude d'un sol doit être définie pour un niveau de gestion donné et doit être considérée comme variable dans le temps. Il n'existe pas de méthode universelle pour son évaluation et la méthodologie à utiliser dépend principalement des conditions locales (Delvaux, 1995).

### 2.1. Le sol

Le sol va influencer l'état nutritionnel du bananier, son aptitude à développer son système racinaire, ainsi que son environnement biotique ; il est de première importance dans la détermination des potentialités culturales

#### 2.1.1. Caractéristiques physiques

L'aptitude d'un sol est principalement liée aux caractéristiques physiques telles que le drainage, la texture, la structure et la profondeur (Dorel et Perrier, 1990 ; Delvaux, 1995). Pour des rendements optimaux, les bananiers doivent croître sur des sols d'une profondeur supérieure à 60cm, bien drainant et présentant un niveau élevé de matière organique (Delvaux, 1995 ; Zake et al., 2000). L'engorgement et les niveaux élevés de nappes phréatiques réduisent le rendement, la quantité de racines et la croissance des racines du bananier (Delvaux, 1995).

En Afrique de l'Est, les bananiers croissent principalement sur des oxisols et ultisols pourvus de bonnes propriétés physiques (Bekunda et al., 2003). L'enquête effectuée par Lassoudière (1989) dans la région de Kibungo au Rwanda montre de fait que la production bananière n'y est que peu influencée par la texture, les facteurs chimiques ayant par contre un effet majeur. Lassoudière (1989) y a identifié le potassium et le phosphore comme les principaux éléments limitants.

Le système racinaire du bananier semble particulièrement sensible aux propriétés physiques du sol. Godefroy (1969) fait remarquer qu'un développement racinaire en profondeur peut permettre un potentiel élevé de certains sols, et ce malgré de faibles teneurs en éléments chimiques. Les racines du bananier n'atteignent que rarement des profondeurs de 60-80cm et sont habituellement confinées dans les 30-35 premiers centimètres, voir moins dans les sols compactés (Delvaux, 1995). Les résultats de Delvaux et Guyot (1989), en bananeraie intensive, montrent une relation inverse entre la densité racinaire des horizons superficiels et leur densité apparente.

De nombreuses études mettent en évidence une augmentation de la croissance de la plante en condition de paillis (Speijer et al., 1999 ; Swennen, 1985 et Noupadja, 1993 cités par Bananuka et al., 2000 ; Zake et al., 2000 ; Rotimi, 2003 ; Ssali et al., 2003 ; McIntyre et al., 2000). Selon les résultats de McIntyre et al. (2000), l'augmentation de biomasse en condition de paillis se ferait sans

modification significative du rapport entre biomasse aérienne et souterraine. Ces auteurs signalent un effet significatif du paillis sur la diminution de la densité apparente du sol. Lassoudière (1989), au Rwanda, observe un effet bénéfique de l'épaisseur de l'horizon humifère sur le développement du système racinaire du bananier. Swennen (1984 cité par Blomme et al., 2003) a rapporté une augmentation de la ramification racinaire en conditions de paillis, stimulant une croissance rapide.

L'apport en matière organique améliore la structure du sol en profondeur (Blomme et al., 2003), conserve l'humidité (Bananuka et al., 2000), améliore le drainage (McIntyre et al., 2000), modère les températures (McIntyre et al., 2000 ; Talwana et al., 2003). La matière organique possède une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, et sa décomposition libère des nutriments dans la solution du sol. En outre, le paillage supprime le développement des adventices (Bananuka et al., 2000) et augmente l'activité biologique du sol (Zake et al., 2000 ; Bananuka et al., 2000 ; Akhtar et Malik, 2000). La conservation de l'humidité du sol est particulièrement importante en bananeraies car celles-ci sont très sensibles au stress hydrique (Bananuka et al., 2000). La modération des températures pourrait avoir une influence favorable sur le taux d'extension racinaire ( $\text{mm jour}^{-1}$ ), lequel est particulièrement sensible aux variations de températures (Turner, 1995). De plus, les températures élevées promeuvent le processus de pourriture des racines (Speijer et Fogain, 1998). Robinson (1995, cité par Bananuka et al., 2000) observe que le paillis réduit la détérioration des racines et augmente la productivité.

La densité racinaire est également susceptible de varier avec la densité de plantation et la pression parasitaire du sol (Turner et al., 1989). Dans les exploitations intensives de Martinique, l'état sanitaire des racines est reconnu comme étroitement lié au type de sol : l'intensité des nécroses y serait particulièrement élevée dans les sols de texture grossière, développés sur cendres et ponces ; et par contre très faible dans les sols vertiques riches en argiles gonflantes (Delvaux et Guyot, 1989). Il est possible que ces différences soient liées à l'écologie des parasites telluriques et/ou au comportement des nématocides, susceptibles de varier en fonction du type de sol (Delvaux et Guyot, 1989).

### 2.1.2. Caractéristiques chimiques

Lorsque des rendements de haut niveau sont atteints, une grande quantité de nutriments est extraite du système de production et exportée par la récolte (Tableau 3). On remarquera l'importante quantité de potassium consommée par la plante de bananier. Ces nutriments doivent être apportés afin de maintenir la fertilité du sol et permettre une production élevée et durable (Lahav, 1995). Une tonne de banane contient près de 6 kg de  $\text{K}_2\text{O}$ , puis 1,25 à 2 kg d'azote, et quelques centaines ou dizaines de grammes de chaque autre élément majeur (Martin-Prével, 1980). Les pertes par lessivage et ruissellement sont plus difficiles à estimer mais peuvent être considérables sous certaines conditions (Godefroy et al., 1975 cité par Lahav, 1995).

**Tableau 3. Quantité de nutriments (kg/ha) contenues dans les plantations de bananiers, racines non incluses (basé sur 2400 plantes par ha et un rendement de 50 t/ha ; source : Lahav et Turner, 1983 cités par Bekunda et al., 2003)**

Elément	Quantité exportée dans le fruit ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	Quantité restant dans la plante ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	Total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
N	180	199	378
P	29	23	52
K	778	660	1438
Ca	101	126	227
Mg	49	76	125

Les principales sources de nutriments proviennent de l'altération du sol et de l'apport en amendement organique ou chimique (Lahav, 1995). Rappelons qu'au Rwanda, en bananeraie, peu voir aucun fertilisant chimique n'est appliqué. Dans les systèmes de production à faibles intrants, l'altération des minéraux primaires peut être une source importante de nutriments tels le potassium, le calcium, le magnésium, le phosphore et d'autres éléments ; la réserve en nutriment dépend de la composition de la roche mère, ainsi que du stade d'altération (Delvaux, 1995).

L'absorption d'éléments par la plante varie selon les propriétés du système racinaire (densité racinaire, rayon des racines, efficacité du transfert à travers la racine) et de la concentration en éléments à la surface des racines (Turner et al., 1989). La concentration d'un élément à la surface des racines est fonction de sa mobilité (en relation notamment avec la teneur en eau du sol), de son prélèvement et de son apport.

De par son rôle prépondérant dans la nutrition minérale du bananier, le potassium est de loin l'élément ayant été le plus étudié en bananeraie (Delvaux, 1995). Son absorption par la plante de bananier est particulièrement sensible aux déséquilibres cationiques (Montagut et al., 1965 ; Martin-Prével and Montagut, 1966a,b cités par Delvaux, 1995). Les quantités d'éléments K, Ca, Mg, mobilisées par le bananier, sont étroitement régies par leurs proportions relatives dans leur forme échangeable (Martin-Prével et al., 1965). De même, les valeurs critiques en potassium échangeable (du sol) varient selon la saturation du sol en calcium et magnésium : le niveau critique est fortement diminué lorsque le taux de saturation en base est faible (Delvaux, 1995).

Les niveaux critiques et proportions en cations ont été établis dans de nombreuses aires de production. Les différences observées suivant les sites illustrent le fait que les valeurs critiques d'équilibre cationiques ont un usage strictement local (Delvaux, 1995). Le Tableau 4 présente les valeurs critiques minimales déterminées par Lassoudière (1989) dans la région de Kibungo, au Rwanda.

**Tableau 4. Teneurs minimales critiques en éléments dans le sol.** Données relatives à la culture bananière et déterminées par Lassoudière (1989) lors d'une étude dans la région de Kibungo, Rwanda.

Teneurs minimales critiques <sup>1</sup>	
Ca éch (méq/100g)	6
Mg éch (méq/100g)	2.5
K éch (méq/100g)	1.5
K/Ca+Mg (%)	10
P Olsen-Dabin ppm	75
P total ppm	1000

<sup>1</sup>L'analyse des cations échangeables (Ca, Mg, K, Na, Al et Mn) a été réalisée par extraction au chlorure de cobaltihexamine

Les valeurs extrêmes de l'intervalle de pH permettant la croissance du bananier seraient de 4.5 et 8.2, l'optimum se situant entre 5.6 et 7.5 (Sys et al., 1993). L'acidité du sol peut augmenter la disponibilité de certains éléments mineurs à des niveaux toxiques (Delvaux, 1995). D'un autre côté, les déficiences en calcium et magnésium sont associées à de faibles valeurs de pH (Bwamiki, 2004). Lorsque l'aluminium est présent dans les constituants du sol, l'acidité augmente mobilité cet élément. Des taux de saturation élevés en aluminium sur le complexe d'échange peuvent avoir un effet direct sur l'absorption de nutriments par les racines en remplaçant les cations « basiques » et provoquant leur

lessivage. L'augmentation du pH favorise la disponibilité et le prélèvement de calcium et Magnésium (Marshner, 1995 cité par Bwamiki, 2004), tandis que des déficiences en zinc peuvent apparaître à des pHs supérieurs à 6 (Sys et al., 1993). Le pH peut également affecter indirectement le développement des nématodes à travers les réactions de l'hôte, en modifiant la composition chimique du sol, ou encore en modifiant les populations d'organismes antagonistes (Declerck et al., 1998).

Maintenir des équilibres cationiques ainsi que des niveaux adéquats en potassium et azote disponibles est de loin l'aspect le plus important de la chimie du sol pour faire croître des bananiers de hauts rendements (Delvaux, 1995). Il faut toutefois faire preuve de réserve en tirant des conclusions sur les carences en éléments nutritifs à partir de la seule analyse chimique des sols (Van Asten et al., 2004). En effet, certaines études mettent en évidence une faible corrélation entre les paramètres caractérisant la fertilité des sols et les rendements des régimes (Banananuka et Rubaihayo 1994 cités par Van Asten et al., 2004; Rufino, 2003 ; Smithson *et al.*, 2001).

## **2.2.L'alimentation minérale de la plante**

Les teneurs en nutriments dans le sol peuvent varier dans le temps et selon la saison (Delvaux, 1995). Leur mesure ponctuelle n'est donc pas un indicateur unique de la fertilité du sol dans une plantation pérenne comme une bananeraie (Okech et al., 2000). Elle sera utilement complétée par un diagnostic foliaire pour évaluer le statut nutritionnel d'une plantation (Delvaux, 1995). L'analyse foliaire est un moyen de contrôle de l'absorption d'un élément déterminé et de ses répercussions sur les autres éléments (Martin-Prével, 1980), et un outil intéressant dans le diagnostic de désordres nutritionnels et de la gestion de la fertilité du sol de cultures pérennes (Wortmann et al., 1994).

Les résultats de l'évaluation foliaire sont typiquement évalués en termes de niveaux critiques, intervalles optimaux, ou valeurs seuils. Bien que facilement appliquées, ces normes dépendent de nombreux facteurs dont l'âge de la plante et les stress environnementaux qui affectent l'absorption et la distribution des nutriments dans la plante.

La plupart des études recourant à l'analyse foliaire dans la région des Grands Lacs (Bosch *et al.* 1996, Gold et al., 1999 cités par Van Asten 2004 ; McIntyre et al., 2000 ; Smithson *et al.* 2001, Smithson *et al.* 2004, Rufino 2003, Ssali *et al.* 2003) ont relevé les carences en potassium surtout, mais aussi en azote et magnésium, comme étant les principales contraintes à la culture bananière. La carence en phosphore, bien que considérée comme marginale dans les bananeraies des hauts plateaux d'Afrique de l'Est (Van Asten, 2004) est signalée au Rwanda par Lassoudière (1989).

Avant d'examiner différentes normes présentées dans la littérature, nous verrons brièvement les principaux rôles de quelques éléments majeurs à savoir le potassium, l'azote et le phosphore.

### 2.2.1. Eléments et rôle

#### a) Le potassium

Le bananier consomme d'importantes quantités de potassium (Tableau 3). Le régime est l'organe le plus fortement affecté par la carence en potassium, tandis que le système racinaire semble le moins sensible (Lahav, 1995). Une déficience en K entraîne une réduction de la surface foliaire du bananier et retarde l'initiation florale (Lahav, 1995). La synthèse de protéines serait également affectée (Lahav, 1995).

Le potassium régule le transfert de nutriments vers le xylème ; le transfert diminuerait généralement lorsque l'apport en K est faible (Turner, 1987 cité par Lahav, 1995). L'exception est le K lui-même : une proportion constante de K étant transférée vers l'inflorescence quelque soit l'apport en K (Lahav, 1995). Un effet négatif de l'absorption de potassium sur l'absorption du magnésium est reporté par Ssali et al. (2003), et des antagonismes entre (Ca, Mg) et K sont rapportés par McIntyre et al. (2000) et Lassoudière (1989). La circonférence du bananier a tendance à croître avec la teneur en potassium dosée dans le limbe, et à diminuer avec l'augmentation de celle en calcium et magnésium (Lassoudière, 1989). L'auteur rapporte un effet antagoniste probable entre l'absorption de K et d'azote.

#### b) L'azote

L'azote est le second élément consommé en terme de quantité par le bananier. Celui-ci ne peut stocker l'azote autrement qu'en l'utilisant pour sa croissance ; l'élément est considéré comme quasiment universellement déficient (Lahav, 1995). Il existe une relation étroite entre l'absorption d'azote et la production totale de matière sèche et ce, en prenant compte différents variétés, environnements et sols (Lahav, 1995). Un apport en azote promeut la croissance, sauf lorsque d'autres facteurs la limitent ; l'azote n'est alors plus absorbé (Lahav, 1995).

Les symptômes de déficience sont souvent observés dans des conditions de faible développement racinaire et de compétition par les adventices ; les symptômes sont également associés au déficit hydrique et à un drainage insuffisant (Lahav, 1995).

#### c) Le phosphore

Les besoins en phosphore du bananier sont relativement faibles en terme de quantité (Martin-Prével, 1978 cité par Lahav, 1995) et les symptômes de déficience sont rarement observés en champs (Lahav, 1995). De plus, les bananiers présentent généralement une faible réponse à l'application de phosphore (Lahav, 1995). Cet élément est accumulé sur une large période de temps, exporté en faibles quantités dans le fruit et rapidement redistribué entre les différents organes du bananier (Lahav, 1995). La carence en phosphore a été observée dans les Andosols riches en gibbsite (Delvaux, 1995) ; elle a également été diagnostiquée au dans la région de Kibungo par Lassoudière (1989).

## d) Interactions

Le Tableau 5 montre l'effet de déficiences minérales sur la concentration foliaire d'autres nutriments. On y retrouve l'antagonisme Ca, Mg *versus* K.

**Tableau 5. Effet de déficiences minérales en N, P, K, Ca, Mg, Zn, et S sur la concentration foliaire des éléments (source : Lahav, 1995)**

	Elément déficient							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	S
N	-		-		+0			+0
P	+	-	-	+	-	0	+	+
K	+		-	+	+0	0	-	
Ca	-		+	-	+0	+-		+
Mg	+	-	+	+	-	+		0
Mn			-		+	-		
Cu			+		0			
Zn			0-		0		0	

- : Effet négatif ; + : effet positif ; 0 : absence d'effet

### 2.2.2. Valeurs critiques

De nombreuses expériences couvrant une large gamme de conditions environnementales ont été menées afin d'établir la concentration critique d'un élément sous laquelle une réponse à un ajout de fertilisant peut être attendue (Lahav, 1995). Ces normes, identifiées en utilisant des courbes représentant la relation entre la composition de la plante et le rendement, ont une application qui se limite aux conditions dans lesquelles elles ont été établies (Angeles et al., 1993). Les différentes valeurs citées dans la littérature peuvent s'expliquer par des différences de variétés, de méthode de prélèvement, de conditions environnementales (Lahav, 1995), ainsi que par la variabilité des méthodes de sélection de ces paramètres (Angeles et al., 1993). Le peu de données disponibles suggère que les différences variétales sont importantes (Lahav, 1995).

Le Tableau 6 présente quelques valeurs foliaires critiques disponibles dans la littérature pour le groupe *Musa* AAA. Le tableau 7 fournit les intervalles de teneurs foliaires optimales relatifs aux rapports cationiques reportés par Wortmann et al. (1993) et Wortmann et al. (1994).

**Tableau 6. Valeurs foliaires critiques minimales déterminées pour le groupe *Musa* AAA**

N	P	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe	Source	Variété
			g/kg matière sèche							
31			11.3	4.8			18.4		(1)	AAA-EA
		28-29							(2)	AAA-EA
26	2.1	33							(3)	AAA-EA
	2.0	30.0	5.0	3.0	25.0	9.0	18	80	(4)	AAA Cavendish

(1) Wortmann et al., 1994 ; (2) Lassoudière, 1989 ; (3) Bosch et al., 1996 cité par Rufino 2003 ; (4) Renter et Robinson 1986 cités par Bwamiki, 2004.



**Tableau 7. Intervalles de teneurs foliaires optimales déterminés pour le groupe AAA-EA. Teneurs exprimées sous formes de rapports cationiques.**

K/(K+Ca+Mg)	Ca/(K+Ca+Mg)	Mg/(K+Ca+Mg)	Source	Variété
0.54 – 0.67	0.22 - 0.32	0.09 - 0.15	Wortmann et al., 1994	AAA-EA
0.50-0.57	0.28-0.34	0.14-0.19	Wortmann et al., 1993	AAA-EA

Les normes présentées dans la littérature peuvent diverger fortement (voir par exemple les valeurs relatives au calcium dans le Tableau 6) suivant les conditions dans lesquelles elles ont été établies. La période d'échantillonnage pourrait également avoir un effet important. Les précipitations induisent en effet en une perte d'éléments par lessivage depuis les feuilles du bananier (Lahav, 1995). En régions tropicales, ces pertes peuvent être très importantes ; celles en potassium étant particulièrement élevées (Lahav, 1995). Ssali et al. (2003) observent une variation de la teneur foliaire en nutriments en relation avec la distribution des pluies. Smithson et al (2004) constatent une corrélation étroite entre la quantité de pluie précédant l'échantillonnage foliaire et les teneurs en nutriments : P et K diminuent, tandis que Ca et Mg augmentent avec l'augmentation de la pluie. Une grande partie de la variabilité de leurs résultats a ainsi été attribuée à des différences de pluviométrie. Il convient dès lors de considérer avec réserve les valeurs de teneurs foliaires critiques et optimales trouvées dans la littérature.

L'étude de l'alimentation minérale du bananier n'en demeure pas moins un outil intéressant. Il est cependant important de garder à l'esprit qu'elle ne peut être envisagée séparément des autres facteurs influençant la potentialité de production du système cultural. Smithson *et al.* (2001) et Ssali et al. (2003) ont par exemple montré que l'impact des amendements organiques et minéraux du sol peut être fortement réduit lorsque la pression parasitaire est forte. De ce fait, il conviendrait de combiner la gestion de la fertilité des sols à la lutte contre les ravageurs et maladies de manière à accroître les bienfaits des interventions sur la fertilité des sols (Van Asten, 2004).

## 2.3. Les nématodes

### 2.3.1. Espèces et cycle de vie

Plus de 150 espèces de nématodes associées aux racines des bananiers ont été identifiées. Les plus destructrices et répandues sont les nématodes endoparasites migrants (Carlier et al., 2002), incluant :

- le nématode foreur *Radopholus similis*,
- les nématodes à lésion *Pratylenchus goodeyi* et *Pratylenchus coffeae*
- le nématode spiralé *Helicotylenchus multicinctus*, (qui est en réalité semi-ectoparasite).

*R. similis*, *Pratylenchus spp* et *Helicotylenchus spp* envahissent, se nourrissent et se reproduisent dans les cellules parenchymatiques de la zone corticale de la racine causant la destruction des cellules et la formation de cavités. *Pratylenchus spp* et *R. similis* pénètrent également le rhizome du bananier (Gowen, 1995 ; Luc et Vilardebo, 1961). Le cylindre central n'est pas lui-même atteint par ces nématodes, mais les attaques secondaires peuvent finir par le détruire (Luc et Vilardebo, 1961 ; Bridge et al., 1997).

Le nématode endoparasite sédentaire *Meloidogyne* spp, est également commun, mais son statut de pathogène sur bananier n'est pas clair (Carlier et al., 2002). Ce nématode possède un mode de nutrition hautement spécifique. Les juvéniles pénètrent la racine et migrent jusqu'au cylindre central où des cellules spécialisées (« nurse cell system ») sont initiées (Back et al., 2002).

### 2.3.2. Conséquences des dommages

Les dégâts causés par les nématodes sur le système racinaire affaiblissent l'ancrage de la plante et affectent l'absorption et le transport d'eau et de nutriments (Carlier et al. 2002 ; Luc et Vilardebo, 1961). Les nématodes à lésion (*P. goodey*, *H. multincinctus* et *R. similis*) peuvent induire une diminution du niveau de branchement ainsi que de l'élongation du système racinaire (Kashaija et al., 1998). La présence de nématode entraîne de plus une réduction du nombre de racines fonctionnelles (Kashaija et al., 1998). La diminution de stabilité qui en résulte favorise la chute des plants, particulièrement lors de la phase de maturation durant laquelle le poids du régime augmente. Ces chutes peuvent provoquer des pertes de productivité importantes (Gowen, 1995). Il a été observé que lorsqu'une plante subit une chute, la probabilité que le pied produise des régimes récoltables dans les cycles ultérieurs est fortement réduite (Speijer et al., 1999).

Il semblerait que les nématodes réduisent les quantités absolues de nutriments prélevés par la racine plutôt que leurs proportions (McIntyre et al., 2000). En affectant son statut nutritionnel, les populations de nématodes ont un impact sur la capacité photosynthétique de la plante (Bwamiki, 2004). En réponse à l'infection, les bananiers infectés produisent une quantité moindre de fleurs, la floraison et la maturation sont retardées, et le poids des régimes diminue (Luc et Vilardebo, 1961 ; Bridge et al., 1997 ; Speijer et al., 1999 ; Speijer et Kajumba, 2000 ; Gaidashova et al., 2004b).

### 2.3.3. Evaluation des dommages

Le pourcentage de racines mortes ainsi que le niveau de nécroses racinaires sont considérés comme de bons indicateurs des dommages causés par les nématodes au système racinaire et de la perte de production résultante (Speijer et al., 1998; Speijer et Ssango, 1999; Speijer et De Waele, 2001). Il faut quand même signaler qu'il n'existe pas toujours de corrélation tangible entre la présence des nématodes et le poids du régime ou les dommages observés au niveau des racines (Batlle-Viera et Perez-Vincente, 2002 ; Araya et De Waele, 2005 ; Gaidashova et al., 2004b). Il est en effet difficile d'attribuer ces symptômes à des parasites spécifiques à partir d'échantillons prélevés en pleine terre dans les bananeraies, étant donné toutes les interactions possibles entre les nombreux microorganismes présents (Loridat, 1989). Okech et al. (2002) observent des taux de nécrose racinaire faibles, alors que les densités de population de nématodes (*Pratylenchus goodeyi* principalement) sont élevées. De nombreuses études illustrent le fait que les dommages causés par les nématodes ont un rôle dans l'établissement et le développement de maladies causées par des pathogènes du sol (Back et al., 2002). Selon Hugon et Picard (1988), la présence de nématodes et de nécroses dans les racines résulterait de deux phénomènes liés entre eux mais aux dynamiques différentes : pénétration et développement des nématodes d'une part, attaques fongiques secondaires nécrosant et détruisant finalement la racine d'autre part. Une infestation des parties saines de la racine par les nématodes libérés dans le sol du fait de la destruction des tissus se produirait alors (Hugon et Picard, 1988).

### 2.3.4. Complexe nématode-parasite

L'interaction entre nématodes et champignons peut varier fortement selon les espèces parasites impliquées, l'espèce hôte, ainsi que d'autres facteurs abiotiques tels que le type de sol, le pH, l'humidité du sol et la température (Back et al., 2002). Les mécanismes impliqueraient notamment l'utilisation des cavités et galeries produites par les nématodes par des champignons parasites, ainsi que des modifications de l'exsudation racinaire causée par l'infection des nématodes (Back et al., 2002).

Toutes plantes hôtes confondues, le nématode *Méloidogyne* spp. est probablement le plus souvent documenté comme faisant partie d'un complexe parasitaire incluant des champignons (Back et al., 2002). Sur bananier, un champignon non-identifié a été reconnu comme fortement et fréquemment associé avec les lésions provoquées par le nématode spiralé *Helicotylenchus multicinctus* (Orion et al, 1999 cité par Back et al., 2002). Une forte corrélation entre la présence de *Pratylenchus* spp et des infections de champignons tels que *Fusarium* spp, *Nigrospora musae* et *Rhizoctonia solani* est généralement observée (Bridge et al., 1997). Le complexe parasitaire *Radopholus similis* – *Cylindrocladium* spp occasionne des dégâts particulièrement importants en bananeraie intensives (Loridat, 1989).

Des études mettent en évidence un taux d'attaque de charançons supérieur dans les champs infestés par les nématodes (Speijer and Kajumba, 2000 ; Speijer et al., 1999) ; aucune hypothèse explicatrice n'est cependant avancée.

### 2.3.5. Facteurs influençant les dégâts

L'intensité des dégâts occasionnés par les nématodes parasites sur la plante hôte sont déterminés par les nématodes responsables, l'hôte ainsi que les facteurs environnementaux susceptibles d'affecter les nématodes et/ou la réponse de la plante.

#### a) Les nématodes responsables

*Espèces présentes au Rwanda.* Au Rwanda, les études menées dans les principales régions productrices de bananes du pays ont identifié *Pratylenchus goodeyi* comme l'espèce dominante (Okech et al., 2002 ; Gaidashova et al., 2004a). Cette espèce est présente dans toutes les régions productrices, dans pratiquement toutes les fermes, et dominante en nombre à partir de 1000m (Gaidashova et al., 2004a). *Helicotylenchus multicinctus* a été observé dans les sites d'altitude inférieure à 1.600 m mais en densité généralement moindre (Okech et al., 2002; Gaidashova et al., 2004a). *Meloidogyne* spp a une large distribution géographique, mais n'est présent qu'en quantité modérée (Gaidashova et al., 2004a ; Okech et al., 2002). L'espèce *R. similis*, considérée comme l'espèce de nématode parasite principale en Ouganda (Speijer et De Waele, 2001), semble limitée aux sites d'altitude inférieure à 1000m (Gaidashova et al., 2004a).

Cette répartition des espèces est globalement en accord avec celle observée par Kashaija et al. (1994) en Ouganda. La répartition altitudinale des espèces serait en lien avec la température : *P. goodeyi* prospère à des températures plus basses que *R. similis*, et sa distribution correspond à des zones de production bananière de climat plus tempéré (Bridge et al., 1997).

*Pathogénicité.* Il a été suggéré que *P. goodeyi* soit moins destructif que *R. similis* (Sebasigari et Stover, 1987 ; Elsen et al., 2000 cités par Talwana et al., 2003), bien que les dégâts occasionnés par les

deux espèces soient très similaires (Bridge et al., 1997). Les résultats de Talwana et al. (2003) indiquent que *P. goodeyi* peut causer des dommages considérables (20% de pertes de production par chute avant récolte, 40% de nécrose racinaire sur rejet) lorsque le niveau de gestion est faible (sol nu comparé à sol paillé). Il existe une diversité chez *P. goodeyi*, dont les populations et les dégâts qu'elles occasionnent varient fortement selon les groupes et les cultivars de *Musa* (Bridge et al., 1997). Cependant la diversité chez *P. goodeyi* apparaît minime comparée à celle trouvée chez *R. similis* (De Waele et Speijer, 1998). *P. goodeyi* est considérée comme une espèce indigène à l'Afrique (Bridge et al., 1997), contrairement à *R. similis* qui présente une répartition géographique nettement plus étendue.

En Ouganda, des pertes de production de 30 à 50% par cycle ont été attribuées à la présence de *R. similis* et *H. multicinctus* (Speijer et al., 1999 ; Speijer et Kajumba, 2000), ces deux espèces semblant avoir un impact comparable. Cependant, selon Belpaire (1997 cité par Speijer et Fogain, 1998) *R. similis* serait plus destructif car il contribuerait significativement à la chute des plants.

#### b) Facteurs environnementaux affectant les populations de nématodes

Lorsque l'on passe en revue la littérature sur le bananier, il existe un vide concernant la détection des sols qui suppriment les nématodes (Sikora et Pocasangre, 2004). Le terme « suppressif » est traditionnellement utilisé pour décrire des sols dans lesquels le développement d'une maladie est supprimé, malgré la présence dans le champ d'un ravageur ou d'une maladie (Sikora et Pocasangre, 2004).

*La communauté microbienne du sol.* Sikora (1992 cité par Sikora et Pocasangre, 2004) rapporte que l'activité suppressive d'un sol est essentiellement régulée par le potentiel antagoniste des organismes qui y sont présent. Le concept de « suppressivité in planta » proposé par Sikora et Pocasangre (2004) est basé sur l'hypothèse que les plantes sélectionnent activement dans la rhizosphère, par exsudation racinaire, les microorganismes qui ont un effet positif sur leur santé. Outre les champignons mycorrhiziens, d'autres organismes sont susceptibles d'avoir un effet positif sur la plante : des lignées non-pathogènes de *Fusarium oxysporum* ont par exemple montré un effet antagoniste sur la pénétration de *P. goodeyi* (Speijer et Sikora, 1990, 1993 cités par Okech et al., 2000). Declerck et al. (1998) ont montré que l'alimentation minérale du bananier peut modifier le pH rhizosphérique, probablement via l'exsudation racinaire. De nombreux facteurs environnementaux sont cependant susceptibles d'affecter les populations de nématodes et d'organismes antagonistes (Akhtar et Malik, 2000).

*Alimentation minérale de la plante.* Les nématodes peuvent affecter le statut nutritionnel du bananier. A l'inverse, le statut nutritionnel du sol aurait un impact sur l'infection par les nématodes et sur les dégâts causés, ceux-ci étant plus sévères lorsque les éléments nutritifs minéraux sont déficients. Par conséquent, adapter la nutrition minérale du bananier pourrait être outil de gestion des nématodes et de limitation de leurs dégâts (Talwana, 2003). De fait, Bwamiki (2004) a montré que la nutrition peut modifier le nombre de nématodes (*Radophouls similis*) dans les racines ainsi que les dommages engendrés. Les résultats de Bwamiki (2004) montrent que l'amélioration de la nutrition du bananier peut diminuer les dommages causés par les nématodes à un niveau comparable voire meilleur à celui d'un traitement par nématicides. Ses observations suggèrent une forme de mécanisme actif de la plante réduisant la capacité des nématodes à pénétrer ou à se multiplier dans les racines du bananier en fonction du type d'alimentation minérale (Bwamiki, 2004). Globalement, l'étude montre que les éléments K, Ca, Mn, et Zn sont susceptibles de jouer un rôle dans la résistance des bananiers à *R. similis*.

Sur bananier plantain, Rotimi (2003) observe un effet suppressif des résidus de palmier sur l'établissement et la multiplication des nématodes. L'auteur suggère que le potassium, dont les résidus de palmier sont riches, peut avoir un effet important dans le contrôle des nématodes sur plantain. Cependant, Smithson et al. (2001) n'observent pas d'impact de l'application d'engrais azoté et/ou de potassium sur les dommages causés par les nématodes *Radopholus similis* et *Helicotylenchus multicinctus* sur bananier AAA-EA. Bwamiki (2004) observe quant à lui une augmentation de la susceptibilité de bananiers (AAA) à *Radopholus similis* suite à un apport excessif de potassium.

En conclusion, la modification du statut nutritionnel par amendement est susceptible de réduire l'infection et la reproduction des nématodes, mais cet effet est dépendant de l'espèce de nématode et du type de nutriment (Talwana, 2003).

*Le pH du sol.* Le pH peut affecter indirectement le développement des nématodes à travers les réactions de l'hôte, en modifiant la composition chimique du sol ou encore en modifiant les populations d'organismes antagonistes (Declerck et al., 1998). Bien qu'il n'y ait que peu d'information concernant l'effet du pH sur l'interaction nématode- plante, une littérature importante existe sur les effets du pH du sol sur la disponibilité en nutriments et l'activité de la flore et faune du sol (Haverkort et al., 1993 cités par Bwamiki, 2004). Par exemple, le nématode foreur *R. similis* est sensible aux variations de pH rhizosphérique et possède un intervalle étroit de valeur optimale entre 5 et 5.6 (Davide, 1980 cité par Bwamiki, 2004).

*Texture et température.* Des études ont montré une plus faible prolifération des nématodes dans des sols de texture très argileuse (O'Bannon et Reynolds, 1961; Elmiligy, 1969 cités par Delvaux et Guyot, 1989). La présence d'argiles de type smectite peut favoriser l'adsorption de certaines molécules nématocides, et, par là, une meilleure régulation de leur activité toxique au cours du temps (Green, 1981 cité par Delvaux et Guyot, 1989). D'autres études rapportent un développement favorisé de *Radopholus similis* sur sol sableux, probablement en lien avec une amélioration de l'aération et des températures supérieures (Bwamiki, 2004).

*Le paillis et l'apport de matière organique.* Dans son étude sur bananiers plantains au Nigéria, Rotimi (2003) observe un effet du paillis sur la répartition des populations de nématodes. Certaines espèces auraient tendance à coloniser les parcelles paillées, d'autres des parcelles non-paillées. En Ouganda, Talwana et al (2003), ainsi que Speijer et al. (1999) observent un phénomène analogue sur bananier AAA-EA, probablement en lien avec une diminution de la température résultant du traitement paillé. En Ouganda, Okech et al. (2000) observent une corrélation négative entre la teneur en matière organique du sol et les nécroses racinaires du bananier, tandis qu'au Rwanda, Okech et al. (2002) signalent des effets significativement positifs de l'association avec le haricot et du paillis sur les densités de population de *Pratylenchus goodeyi* et *Helicotylenchus multicinctus*. Les relations entre les populations de nématodes, l'environnement pédologique, l'apport d'amendements organiques et la santé de la plante hôte sont évidemment complexes et rendent difficile l'évaluation des activités qui se produisent dans le sol (Akhtar et Malik, 2000)..

*Association culturale.* Cultures associées et adventices peuvent avoir des propriétés nématocides. Il a ainsi été suggéré que ces propriétés pouvaient être utilisées afin de réguler les populations de nématodes en champs (Akhtar et Malik, 2000). Des composés nématocides ont été détectés dans de nombreuses espèces, représentant 57 familles (Sukul, 1992 cité par Akhtar et Malik (2000). McIntyre et al. (2001) n'observent cependant pas d'effet d'association avec des légumineuses (*Canavalia ensiformis*, *Mucuna pruriens* et *Tephrosia vogelii*) vis-à-vis des populations de nématodes ou de charançons. Ces légumineuses appartiennent pourtant à des genres reportés comme

possédant des propriétés repoussantes ou insecticides. Kashaija et al. (1994) reportent que la polyculture (avec haricot ou café) et les champs présentant des adventices favorisent probablement la présence du nématode *Meloidogyne* spp., qui est d'ailleurs reporté comme étant également un parasite des haricots. Le haricot et le maïs sont considérés comme plantes hôtes de *Pratylenchus* (Namaganda et al., 2000).

*Variations saisonnières.* L'étude de Sundararaju (2002), en Inde, révèle des variations saisonnières de populations de nématodes (*Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae*) chez le bananiers en fonction des conditions écologiques telles que la pluviométrie, la température et l'humidité du sol et la disponibilité en racines sensibles.

#### c) La plante hôte

La plupart des groupes *Musa* cultivés parmi les plantains et bananes de hautes altitudes sont hautement susceptibles vis à vis des nématodes et subissent de lourdes pertes (Speijer et Fogain, 1998). Les pertes de production sont cependant dépendantes du génotype (Speijer et Bosch, 1996 ; Speijer et Ssango, 1999). Speijer et Bosch (1996) remarquent, dans la région de Kagera en Tanzanie, que les variétés traditionnelles (AAA-EA) semblent plus sensibles à *P. goodeyi* que les variétés *Pisang Awak* (AAB) et *Kanana* (AB) nouvellement introduites. Cette sensibilité accrue des cultivars anciens pourrait expliquer leur remplacement, observé dans cette région, par des cultivars importés (Speijer et Bosch, 1996). Les données de Gold et al. (1994) suggèrent également des différences de susceptibilité aux dommages causés par les nématodes parmi les cultivars de haute altitude.

#### d) Facteurs environnementaux affectant la réponse de la plante

*La température.* En Afrique, les pertes provoquées par les nématodes sont plus sévères dans les zones de basse altitude que dans les zones de haute altitude (Speijer et Fogain, 1998). Une raison majeure pourrait être les températures élevées accélérant le processus de pourriture des racines (Speijer et Fogain, 1998). Nous avons vu également que la température avait un effet sur la répartition géographique des espèces. De plus, le taux d'extension racinaire (mm jour<sup>-1</sup>) est particulièrement sensible aux variations de températures (Turner, 1995).

*Le vent et la verse des bananiers.* Les vents violents augmentent la probabilité de verse, quel que soit l'état du système racinaire. La probabilité est cependant d'autant plus élevée que le système racinaire est déficient. Price (1995) indique des pertes importantes sur sols saturés en eau. Bridge et al. (1997) notent que le phénomène de chute des plantes peut être considérablement accentué sur sols pauvres à faibles teneurs en éléments nutritifs. Gowen (1995) signale que les pertes dues aux verses pourraient être supérieures sur sols meubles tels les sols volcaniques dérivés de cendres récentes que sur sols des argileux. Rotimi (2003) observe finalement un nombre supérieur de verses de bananiers en condition de paillis par rapport à des sols non-paillés (le rendement global restant supérieur en condition de paillis).

*Le sol.* La section 2.1.1 soulignait l'importance des propriétés physiques du sol sur le développement du système racinaire. Dosselaere (2003), au sujet de *R. similis*, suggère que lorsque les tissus abîmés sont remplacés rapidement, en d'autres termes, quand l'infestation ne peut suivre le développement racinaire, l'absorption d'eau et de nutriments ainsi que l'ancrage devraient être suffisants. Le sol va également conditionner le statut nutritionnel de la plante.

## 2.4. Le climat

La température a une influence importante sur le taux d'apparition de nouvelles feuilles. Le taux d'extension racinaire ( $\text{mm jour}^{-1}$ ) est particulièrement sensible aux variations de températures (Turner, 1995). La température moyenne journalière a également une influence sur la vitesse de remplissage des fruits. La relation entre grossissement et température varie notamment avec l'apport en éléments, et en eau, et selon le cultivar (Turner, 1995). Le déficit en eau réduit la capacité de la plante à fixer le carbone, la taille de la plante, et donc la productivité (Turner, 1995). Des retards dans l'initiation florale peuvent également être dus à des déficits hydriques, notamment par augmentation du nombre de feuilles par cycle avant l'initiation florale (Turner, 1995).

Les conditions climatiques optimales ont été évaluées pour les cultivars commerciaux. Aucune étude du genre n'a cependant été conduite concernant les bananiers de haute altitude de l'Afrique de l'Est.

## 2.5. Les pratiques culturales au Rwanda

### 2.5.1. Application de matière organique

En Afrique de l'Est, la fertilité du sol est souvent gérée de manière à favoriser la bananeraie sur d'autres cultures à travers l'application de fumier, de résidus de cultures et d'autres matières organiques (Bekunda et al., 2003). Cependant, l'apport de fumier est généralement insuffisant pour remplacer les éléments exportés par la récolte, l'érosion et les autres pertes (Bekunda et al., 2003). Au Rwanda, 78% des fermiers interviewés affirment manquer de fumier pour satisfaire les besoins de leurs champs (Voss et Graf, 1991 cité par Bekunda et al., 2003). Le recyclage des seuls résidus de bananiers ne peut fournir suffisamment de paillis pour une conservation de l'humidité du sol et un réapprovisionnement en éléments exportés par la récolte (Bekunda et al., 2003). L'utilisation de résidus organiques d'une autre culture, ne fait que reporter le problème d'épuisement ; à long terme, ce système n'est pas durable (Bekunda et al., 2003).

Le fumier, les matières organiques et les résidus de récoltes appliqués en culture bananière varient fortement en composition. Pour la plupart, ces résidus sont pauvres en N, P, et K.

### 2.5.2. Association culturale

L'association du haricot avec la banane est une pratique courante dans les pays de la région des Grands Lacs (Wortmann et al., 1992). Les deux cultures sont considérées compatibles dans un système multi-couches : le haricot n'entrerait pas en compétition avec le bananier sous le sol et serait plus tolérant à l'ombre que la plupart des autres cultures vivrières (Bekunda et al., 2003). Au Rwanda, Lassoudière (1989) n'observe pas d'effet significatif de l'association culturale sur la circonférence des bananiers. Cependant, l'auteur rapporte un effet négatif sur la nutrition en N et celle en K, cette dernière étant fortement corrélée à la circonférence du bananier. En Ouganda, McIntyre et al. (2001) n'observent pas de différences significatives entre les niveaux nutritionnels de bananiers en monoculture et en interculture avec trois types de légumineuses. De même, les rendements du bananier ne furent pas négativement affectés par la présence de culture associée. Les auteurs concluent que l'efficacité d'utilisation des terres peut être améliorée en associant la culture bananière à des légumineuses. Cependant, il faut remarquer que les légumineuses de l'essai sont taillées au début

de la saison sèche afin de limiter la compétition pour l'eau, que les parcelles sont amendées, que le désherbage est manuel et que la durée de l'expérimentation n'excède pas deux années. De plus, la densité de plantation des légumineuses est faible. Quoi qu'il en soit, l'association pratiquée sans augmentation des intrants favorise une compétition pour les nutriments et l'eau, menant inexorablement à un déclin de productivité et à un appauvrissement accru des réserves minérales du sol (Zake et al., 2000 ; Bekunda et al., 2003).

### **2.5.3. Le labour**

L'intérêt du travail du sol consiste en l'homogénéisation verticale et horizontale du profil et, dans les sols argileux et compacts, en une diminution de la résistance mécanique à la pénétration ainsi qu'un accroissement de la porosité (Delvaux et Guyot, 1989).

Au Rwanda, dans les systèmes de cultures associées, un labour léger est réalisé pour les semis du haricot. Il est de l'ordre de 15-25 cm, parfois plus profond. Parfois, ces labours sont réalisés très près de la touffe de bananier, pouvant entraîner des perturbations de croissance consécutives au sectionnement des racines (Lassoudière, 1989).

### **2.5.4. Le désherbage**

Au Rwanda, dans la région de Kibungo, le désherbage est réalisé principalement par sarclage superficiel. La répercussion de l'intensité de l'enherbement sur le développement de la plante serait primordiale dans les conditions de culture de Kibungo (Lassoudière, 1989).



## 3. Matériel et méthode

### 3.1. La notion d'enquête diagnostic

L'approche expérimentale classique, basée sur la comparaison de traitements au sein de dispositifs planifiés, est difficilement applicable dès lors qu'on s'intéresse à un grand nombre de facteurs différents, à fortiori lorsque l'on s'intéresse aux interactions entre ces facteurs. La durée et le coût des expérimentations seraient démesurés. Il est alors intéressant de pouvoir analyser la variabilité existant naturellement dans une zone d'étude, plutôt que de chercher à la recréer partiellement et imparfaitement (Delvaux et al., 1986 ; Lassoudière, 1987 ; Perrier et Delvaux, 1991). Cette approche, appelée « enquête-diagnostic », a été utilisée à plusieurs reprises dans le cadre de la culture bananière (Delvaux et al., 1986 ; Lassoudière, 1989 ; Delvaux et Guyot, 1989 ; Delvaux et al., 1990 ; Dorel et Perrier, 1990 ; Perrier et Delvaux, 1991).

Les principales étapes d'une enquête sont les suivantes :

- Définition des objectifs et de la zone d'étude ;
- Collecte de l'information ;
- Analyses de laboratoire ;
- Enregistrement et traitement statistique des données recueillies ;
- Interprétation des résultats.

### 3.2. Définition des objectifs et de la zone d'étude

#### 3.2.1. Définition des objectifs

La définition des objectifs spécifiques de l'enquête a fait l'objet du point 1.4.2.

#### 3.2.2. Définition de la zone d'étude

Les critères ayant permis de déterminer les zones à échantillonner sont la nécessité de variabilité du milieu de production (d'un point de vue pédologique et cultural) ainsi que la représentativité des zones principales de production. D'autres critères qui seront exposés par après ont du être satisfait par les exploitations pour être échantillonnées. Dès lors, et c'est important de le souligner, les exploitations visitées peuvent ne pas être *représentatives* des exploitations existantes au Rwanda.

Trois zones, ont ainsi été parcourues :

- a) L'axe Butare-Gitarama (altitude 1700-1800m).

Les sols, pauvres, sont dérivés de formations granitiques, paragneiss et orthogneiss. Les bananeraies y sont, d'une façon générale, médiocres. Parmi les causes de cet état végétatif insatisfaisant : la diminution de la fertilité du sol, des techniques culturales déviantes et une inadéquation des associations culturales (Lassoudière, 1989). La pluviométrie moyenne annuelle avoisine les 1100 mm.an<sup>-1</sup>

b) La région de Kibungo (Plateau de l'Est, environ 1500m d'altitude).

Colonisée assez récemment par le bananier, cette région est devenue la zone de production principale de bananes à cuire (Okech et al., 2002). Les sols, ferrallitiques à dominance de ferrisols, sont dérivés de schiste ou de quartzite. La pluviométrie moyenne annuelle y est de 800 à 1000 mm/an. L'irrégularité inter-annuelle des pluies est considérée comme une caractéristique importante de la région, rendant particulièrement importante l'incidence des techniques culturales (Lassoudière, 1989). Le niveau le plus élevé de gestion y est d'ailleurs généralement rencontré (Okech et al., 2002).

c) La plaine de Ruhengeri (altitude d'environ 1650 m).

Cette zone, dont la contribution à la production nationale est relativement faible, a été choisie pour la richesse de ses sols. D'origine volcanique, ceux-ci sont considérés comme parmi les plus fertiles du pays. La pluviométrie moyenne annuelle y excède de peu les 1100 mm.an<sup>-1</sup>.

### 3.2.3. Les exploitations

Au sein des trois « zones » ou régions, les exploitations ont été choisies pour leur accessibilité et leur taille, un minimum de 5 bananiers de variété et de stade déterminé devant être échantillonné par parcelle, avec idéalement deux parcelles par ferme (voir point 2.3.1). La Figure 7 localise les fermes échantillonnées.

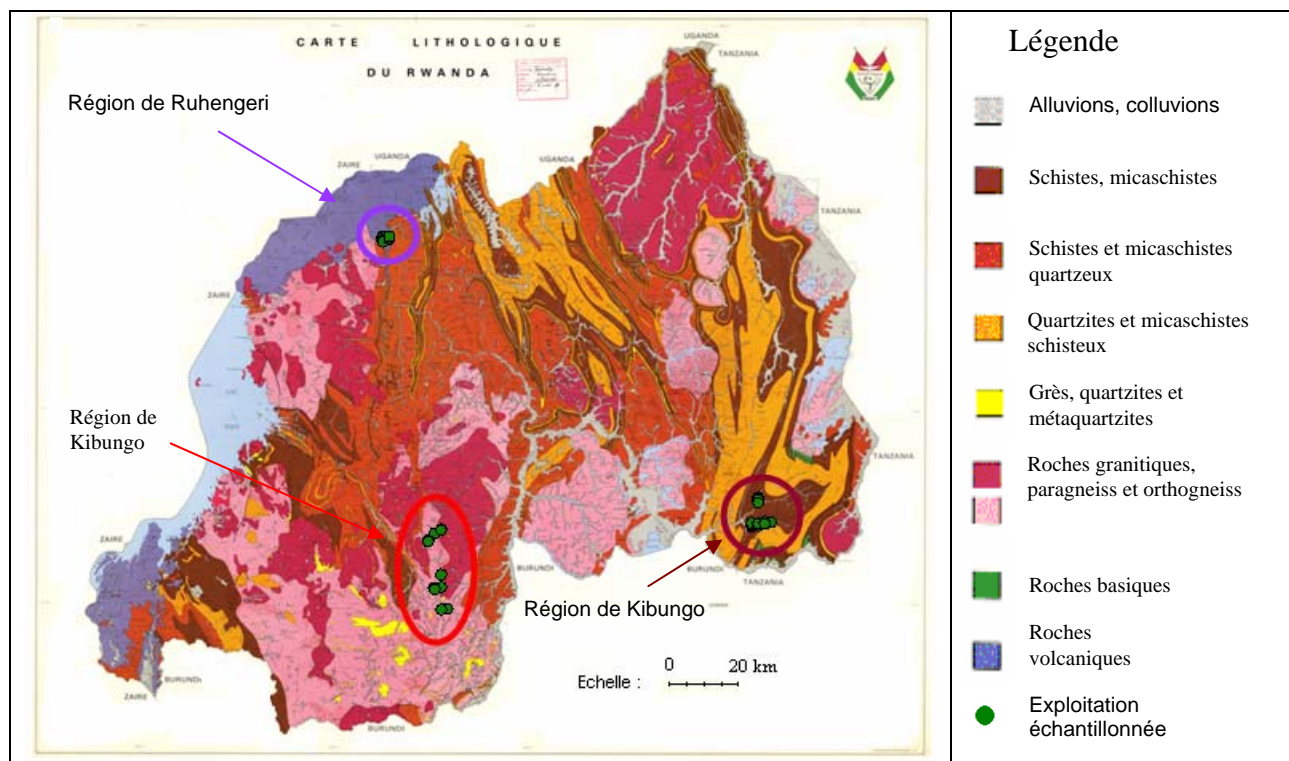


Figure 7. Représentation spatiale des exploitations visitées (adaptation de Eusoil, *online*)

Le tableau 8 reprend les principales caractéristiques climatiques des zones échantillonnées.

**Tableau 8. Principales caractéristiques climatiques des régions échantillonnées. ND : donnée manquante. (source : cartes pédologiques du Rwanda au 1/50 000)**

Variable	Zone			
	Axe Butare-Gitarama		Kibungo	Ruhengeri
	Station de Nyamiyaga <sup>(1)</sup>	Station de Butare <sup>(1)</sup>	station de Bare <sup>(2)</sup>	station de Nyakinama <sup>(3)</sup>
Altitude (m)	1 800	1 706	1 500	1 650
Tmoy annuelle (°C)	19.9	19.2	20.2	18.4
Tmax annuelle (°C)	24.9	24.3	26.8	25.9
Tmin annuelle (°C)	14.9	13.9	13.6	11.4
Tmin absolue (°C)	10.5	9.5	10	5.6
Précipitation annuelle (mm)	1 092	--	1 057	1 110
Humidité relative (%)	75	--	75	75
ETP <sup>(4)</sup> (mm)	947	982	1140	1167
IH <sup>(5)</sup>	1.2	1.2	0.9	1
Période sèche (j)	31	--	62	62
Période humide (j)	243	--	153	183
Période intermédiaire (j)	91	--	150	120

(1) Les sites échantillonnés se situent entre ces deux stations

(2) Distance approximative de 20 km des sites échantillonnés

(3) Distance approximative de 5 km des sites échantillonnés

(4) ETP est l'évapotranspiration.

(5) Indice d'humidité (IH)= pluviosité/ETP.

Sur base de cet indice, on définit :

- les mois humides: mois avec indice d'humidité supérieur à 1.0

- les mois intermédiaires: mois avec indice d'humidité entre 0.5 et 1.0

- les mois secs: mois avec indice d'humidité inférieur à 0.5

### 3.3.La collecte de l'information

#### 3.3.1. Durée et période d'échantillonnage

La période effective d'échantillonnage s'est étalée entre le 1<sup>er</sup> mars et le 5 avril 2006, durant la grande saison des pluies.

#### 3.3.2. Stratégie et schéma de collecte des données

Dans chaque zone géographique, une vingtaine de ferme a été visitée (Tableau 10). Au sein de chaque ferme, lorsque cela était possible, deux parcelles correspondant à des performances visuellement distinctes ont été différenciées :

- une parcelle « A », à potentiel élevé, généralement proche de l'habitat ;
- et une parcelle « B » à faible potentiel apparent.

Lorsqu'une seule parcelle était présente, elle fut classée dans une des catégories précitées, en fonction de l'aspect de la parcelle.

*Remarque* : Dans la région de Kibungo, suite à une politique de centralisation de l'habitat rural (« *Imidugudu* »), les champs ne se situent plus à proximité directe de l'habitat. De plus, le niveau de

gestion et de performance y est apparu relativement uniforme. Il nous fût dès lors plus difficile de déterminer l'appartenance des bananiers échantillonnés à l'une ou l'autre catégorie parcellaire. Ceci dit, l'essentiel était d'obtenir une variabilité des conditions de production à l'échelle de la région, et non de déterminer les différences de performances existant au sein d'une exploitation particulière.

Les parcelles échantillonnées devaient contenir cinq bananiers répondant aux critères suivants :

- a) *Critère de stade fleur-mains-femelles découvertes* : imposé par le protocole d'analyse foliaire standard international (Martin-Prével, 1984 – cité par Perrier et Delvaux, 1991). Les limites tolérées étant d'une part la sortie de l'ensemble de doigts, permettant d'en compter le nombre, et le non-grossissement des fruits. Lors du grossissement des fruits un transfert de nutriments a lieu depuis les feuilles (Lahav, 1995) pouvant ainsi influencer les analyses ultérieures.

Remarquons qu'à partir du stade de floraison, le plant ne produit plus de nouvelles racines, et que sa hauteur demeure constante jusqu'à la récolte (Carlier et al., 2002). La circonférence du pseudo-tronc peut, elle, diminuer de près de 10% durant la période de maturation entre la floraison et la récolte (Yamaguchi et Araki, 2004). Le stade de floraison récente est considéré comme approprié et facilement standardisable pour l'échantillonnage et l'évaluation des dégâts causés par les nématodes (Gold et al., 1994). Il correspond de plus au stade reflétant au mieux l'effet des nématodes durant la période de croissance (Gold et al., 1994).

- b) *Critère de variété* : l'étude de phénomènes en milieu naturel a pour inconvénient majeur l'impossibilité de mesurer et contrôler toutes les conditions du milieu. Dans le but de diminuer la variabilité incontrôlée, nous avons choisi de nous concentrer sur une seule variété : la variété *Intuntu* (prononcer « Inhunho »), banane à bière particulièrement répandue au Rwanda. Outre sa prédominance et très large répartition géographique, le choix de cette variété fut motivé par sa reconnaissance aisée, ainsi que par sa faible sensibilité, voire insensibilité à la fusariose, nous permettant ainsi d'éliminer un paramètre dont nous ne pouvions pas tenir compte.

Le nombre de cinq plants est considéré optimal pour l'échantillonnage des nématodes (Speijer et al., 1998). Dans neuf parcelles visitées, il ne nous fût cependant pas possible d'en trouver autant (rappelons que la bananeraie Rwandaise est caractérisée par la surface réduite de ses exploitations) : six parcelles ne comportent donc que quatre plantes, et trois n'en contiennent que trois (Tableau 10).

**Tableau 9. Nombre de fermes, parcelles et bananiers échantillonnés par région**

	<b>Butare</b>	<b>Kibungo</b>	<b>Ruhengeri</b>
Nombre de ferme échantillonnées	20	22	20
Nombre ferme avec 1 parcelle	10	7	0
Nombre de ferme avec 2 parcelles	10	14	20
Nombre de ferme avec 3 parcelles	0	1	0
Nombre de parcelles	30	38	40
Nombre de parcelles avec 6 bananiers	0	3	0
Nombre de parcelles avec 5 bananiers	28	28	40
Nombre de parcelles avec 4 bananiers	2	4	0
Nombre de parcelles avec 3 bananiers	0	3	0
Nombre de bananiers	148	183	200

### 3.3.3. Les données récoltées

Les données récoltées peuvent être classées dans cinq grandes rubriques (Figure 8):

- les données relatives à l'estimation de la productivité;
- les données relatives au facteur pédologique ;
- les données relatives à l'état nutritionnel des bananiers ;
- les données relatives au facteur sanitaire ;
- et les données relatives aux pratiques culturales.

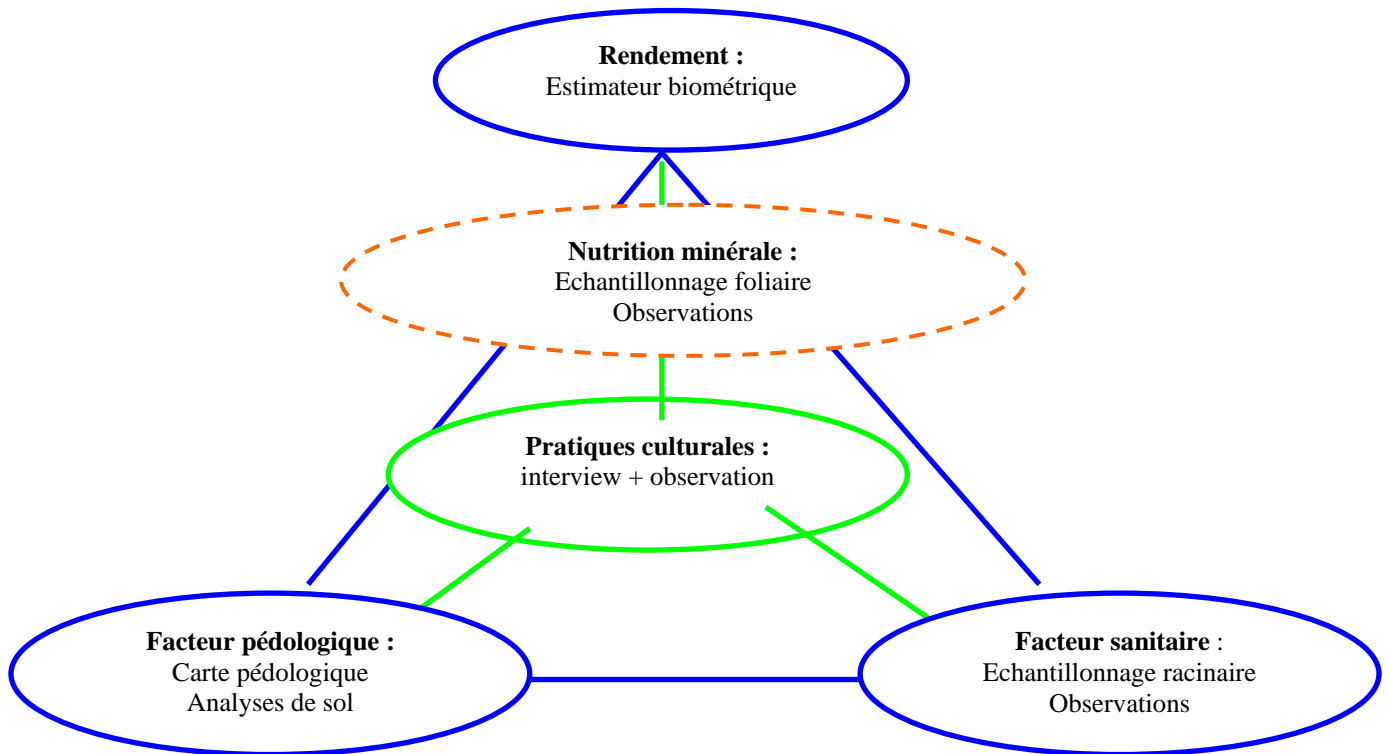


Figure 8. Les cinq lots de données récoltées

### 3.3.4. Le rendement

#### a) Le manque d'estimateur

Le facteur but ultime de nombreuses enquêtes-diagnostic est la hiérarchisation des facteurs limitant la production afin de déterminer, *in fine*, les stratégies à mettre en œuvre pour développer économiquement une région. Aussi, le facteur à expliquer est généralement une production, élément primordial de l'économie rurale.

Sur bananier, ce facteur est pourtant difficile à déterminer en pratique (Perrier et Delvaux, 1991) car : i) le stade d'échantillonnage ne correspond pas au stade de récolte (voir point 3.3.2 a), la détermination des poids des régimes nécessiterait donc des passages supplémentaires sur le terrain ; et ii) le rendement est une mesure de production par unité de surface et de temps. Or, le cycle du bananier est hautement variable d'une année à l'autre (Wortmann et al., 1994), les nématodes pouvant en être en partie responsables. Le rendement est également susceptible de varier suivant les saisons.

Il est donc fait appel à des estimateurs. Le nombre de doigts peut être considéré comme un estimateur grossier du potentiel fixé lors de la différenciation florale (Delvaux et al., 1990). Il s'agit généralement d'un estimateur fiable du potentiel de production (Perrier et Delvaux, 1991). Il ne prend cependant pas en compte les variations possibles de remplissage du fruit au cours de son développement, variations qui peuvent, sous certaines conditions, biaiser sensiblement l'estimation (Perrier et Delvaux, 1991). La circonférence du pseudotrunc est donc également utilisée (Delvaux et al., 1986 ; Dorel et Perrier, 1990), ce paramètre étant reconnu comme hautement corrélé au rendement (Lossois, 1963 ; Delvaux, communication personnelle). Lassoudière (1989) utilise la circonférence couplée à une évaluation visuelle des régimes. Dans certains cas encore, il est fait appel à des estimations des paysans eux-mêmes (Rufino, 2003 ; Wortmann et al., 1993), éventuellement couplée à une observation de terrain (Wortmann et al., 1994).

Dorel et Perrier (1990) remarquent que la circonférence et le nombre de doigts sont assez bien corrélés, mais ne répondent pas de la même façon aux contraintes de l'environnement (altitude, sol, climat). Les auteurs indiquent que l'analyse des variations du nombre de doigts est d'une interprétation plus délicate que celle de la circonférence. Ce nombre est fixé durant la différenciation florale et ne s'élabore donc pas sur une période plus large comme la circonférence, qui est susceptible d'incorporer des effets plus représentatifs des conditions de croissance rencontrées.

Une enquête récente, menée au Nord-Ouest de la Tanzanie (Yamaguchi et Araki, 2004), rapporte une corrélation très étroite entre le volume du pseudo-tronc et les poids de régimes mesurés. Smithon et al (2001) indiquent quant à eux que les rendements ( $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ) inter-sites, sont mieux corrélés au nombre de feuilles ( $r^2=0,75$ ) qu'à la circonférence ( $r^2=0,46$ ). Ssali et al. (2003) reportent une corrélation importante ( $r^2=0.92$ ) entre le nombre de mains et le poids des régimes.

Malgré l'importance de ce paramètre, l'estimateur de production n'est donc pas unanimement partagé par la communauté scientifique.

#### b) La recherche d'estimateur

Afin d'obtenir un éclairage quant au choix d'un estimateur de productivité, des données provenant d'expériences antérieures réalisées au Rwanda ont été utilisées. Les données dont nous disposons proviennent du germoplasme de l'ISAR, à Butare (10 plants ; altitude 1706 m) ; ainsi que d'un essai réalisé à Kibuye, aux abords du lac Kivu (55 plants ; altitude 1480 m). Tous les plants sont de la variété *Intuntu* et correspondent au deuxième ou troisième cycle de culture. Les données disponibles au stade floraison sont la hauteur, la circonférence à un mètre, le nombre de feuilles fonctionnelles (NFF) et le nombre de doigts. Au stade récolte, le poids du régime est disponible, ainsi que la durée en jour entre deux récoltes successives.

#### c) Données biométriques mesurées durant l'enquête

Les données morphologiques ayant été mesurées durant notre enquête, individuellement sur chaque bananier sont les suivantes :

- le nombre de doigts de l'inflorescence ;
- la circonférence, prise à 1 mètre du sol ;
- la hauteur du bananier, définie comme la distance entre le point d'intersection des deux dernières feuilles formées et le sol ;
- le nombre de feuilles fonctionnelles (NFF), la longueur (LF3) et la largeur (IF3, mesurée à mi-longueur) de la troisième feuille.

Le nombre de mains, a également été enregistré dans le but d'estimer le nombre de doigts lorsque la taille du bananier ne nous permettait pas l'accès à cette information. Ce fut le cas pour onze plantes à Butare et quatre à Kibungo. Lorsque cette donnée manquait, le nombre de doigts total a été estimé à partir du paramètre morphologique lui étant le mieux corrélé (l'analyse étant réalisée par région). La valeur estimée a ensuite été utilisée dans les analyses ultérieures. Il est intéressant de constater que le paramètre le mieux corrélé au nombre de doigts total était le nombre de mains ( $r=0.92$  et  $0.86$  à Butare et Kibungo respectivement) et non la circonférence ( $r=0.82$  et  $0.79$ ).

Les valeurs de NFF, LF3 et IF3 ont été enregistrés afin d'estimer la surface foliaire totale (SFT), paramètre utilisé pour estimer le potentiel photosynthétique d'une plante (Kumar, 2002). L'auteur a déterminé un estimateur de la SFT sur bananier:

$$\text{SFT (m}^2\text{)} = \text{LF3 (m)} \times \text{IF3 (m)} \times 0,80 \times \text{NFF} \times 0,662.$$

Turner (2003) a lourdement critiqué la méthode, en se basant entre autre sur le fait que la taille des feuilles est variable au cours du développement. Les plantes échantillonnées étant toutes à un stade similaire, on s'attend cependant à ce que l'estimateur soit fiable.

Une moyenne parcellaire a ensuite été calculée pour chaque paramètre morphologique.

Remarquons que la mesure des paramètres biométriques du bananier souffre d'un manque d'uniformisation entre les différents chercheurs :

- La *circonférence*, généralement mesurée à 1m (Delvaux et al., 1990, Smithson et al., 2001 ; Talwana et al., 2003b ; Ssali et al., 2003), est tantôt prise à 1m50 (Lassoudière, 1989), tantôt à 50 cm (Gold et al., 1994), tantôt à la base du pseudo-tronc (Bwamiki, 2004). La distinction entre la prise à 1m et 1m50 pourrait être justifiée suivant la taille moyenne de la variété (une estimation du volume du pseudo-tronc sera d'autant meilleure que la circonférence est prise à mi-hauteur), mais cette justification n'est pas explicitée.
- Le comptage du NFF nécessite la définition de la première et dernière feuille comptée. La première feuille (dernière feuille émise) est prise en compte par Lassoudière (1989) lorsque sa longueur est d'au moins 100 cm, par Rufino (2003), Ssali et al. (2003) lorsqu'elle est complètement développée. La dernière feuille est tantôt définie comme présentant plus de 50% de surface verte (Lassoudière, 1989 ; Smithson et al., 2001 ; Ssali et al., 2003) ; tantôt au moins 75% de surface verte (Wilians Herrera et Manuel Aristizabal, 2003). Dans notre enquête, nous avons considéré la première feuille comme la dernière produite dont la longueur excède 50 cm, et la dernière feuille comme la plus ancienne produite dont la surface nécrosée n'excède pas 50%.

### 3.3.5. Facteur pédologique

Dans chaque ferme, la profondeur du sol a été évaluée en enfonçant la tarière aussi profondément que possible et en notant l'épaisseur ainsi pénétrée.

Un échantillon composite de terre a de plus été prélevé autour de chaque plante dans le but de réaliser des analyses minérales. Cet échantillon est composé de trois prélèvements élémentaires (carottes 0-25 cm) à 50 cm du plant. Les échantillons ont ensuite été séchés, tamisés à 2 mm et conditionnés en sacs de polyéthylène. Une attention particulière a été portée à ne pas dépasser 36

heures de séchage à l'air pour les andosols prélevés, et ce afin de ne pas induire la formation de micro-agrégats pouvant fausser les analyses. Des composites ont finalement été réalisés afin de n'avoir plus qu'un échantillon par parcelle. Les analyses ont été effectuées au laboratoire UCL de Michamps (Point 3.4.1).

### 3.3.6. La nutrition minérale : échantillonnage foliaire

La feuille 3 de chaque bananier échantillonné a été prélevée et mesurée. A mi-longueur, un morceau de nervure de 10 cm est découpé, et le limbe déchiré en suivant les nervure secondaires. Le limbe de chaque côté de la nervure principale a été découpé et divisé en deux parts de tailles identiques : la partie « interne » (correspondant à la référence internationale ; Martin-Prével, 1980) et la partie « externe ». Nervure, limbe interne et limbe externe ont été emballés séparément par parcelle. Ils ont ensuite été séchés dans un four à 60°C pendant 2 jours et finement broyés avant de faire l'objet d'analyses minérales (Point 3.4.2).

### 3.3.7. Facteur sanitaire

#### a) Echantillonnage racinaire

Le prélèvement des racines est réalisé en creusant un trou de dimension standard 20\*20\*20 cm sous la souche du plant en direction de l'extérieur (Figure 9). Le nombre de racines mortes et de racines vivantes est annoté. Le pourcentage de racines mortes est calculé par parcelle. Cinq racines primaires de 10 cm sont prélevées aléatoirement par plant pour une estimation des nécroses racinaires. Ces racines serviront également au comptage des populations de nématodes effectué au laboratoire de protection des plantes de l'ISAR (Point 3.4.3).



Figure 9. Prélèvement des racines à l'intérieur du trou de dimension standard 20\*20\*20 cm (source : Carlier et al., 2002)

#### b) Observations complémentaires

Les symptômes de la mosaïque en tiret, de la cercosporiose ainsi que les symptômes de dommages causés par des charançons ont également fait l'objet d'une évaluation visuelle durant l'échantillonnage. Les symptômes de la mosaïque en tiret ont été classés dans une des trois catégories suivantes : faible, moyen, prononcé. L'évaluation des dégâts causés par la cercosporiose est réalisée en notant le numéro de la plus jeune feuille présentant au moins 10 taches nécrotiques.



### 3.3.8. Les pratiques culturales

Les variables observées peuvent être distinguées des variables informées (Perrier et Delvaux, 1991). Ces dernières s'obtiennent par interview de personnes ayant une bonne connaissance de l'exploitation.

Les variables *observées* relatives aux techniques culturales sont les suivantes :

- *La distance moyenne séparant les plants de taille ou de stade comparables*: quatre (cinq dans de rares cas) mesures ont été effectuées pour chaque plant échantillonné. Lorsqu'une même souche présentait deux plants de stade/taille similaire, la distance entre ces deux plants a été comptabilisée. La moyenne parcellaire est ensuite calculée.
- *La surface des adventices* : ce paramètre est estimé. Des classes de surface ont été définies : 0-2% ; 2-5% ; 5-10% ; 10-25% ; 25-50% et plus de 50%. Une classe est assignée à chaque bananier échantillonné. Une valeur parcellaire est ensuite calculée comme étant la moyenne des valeurs médianes des classes individuelles.
- *L'épaisseur de paillis* : mesure, en cm, à l'aide d'une latte graduée de l'épaisseur de la litière non incorporée au sol. Cinq répétitions d'épaisseur sont effectuées pour chaque bananier échantillonné et la moyenne parcellaire est ensuite calculée.
- *Association culturale* : la présence de cultures associées a été annotée en considérant la surface séparant le bananier échantillonné des bananiers les plus proches. Une valeur de 1 (présence) ou 0 (absence) est assignée à chaque plant et une moyenne est calculée par parcelle. La valeur moyenne est donc comprise entre 0 et 1.

Les variables observées présentent le grand avantage d'être relativement objectives. Cependant, un inconvénient important est le caractère ponctuel (dans le temps) de ces observations. Il est dès lors intéressant de compléter ces observations par un questionnaire d'enquête soumis à l'agriculteur.

Les questions posées étaient relatives au niveau d'entretien et à la gestion de la fertilité. L'interview fut conduite en Kinyarwanda, langue locale, par un technicien du Programme Banane de l'ISAR, autant que faire se peut en aparté afin de réduire les biais relatifs aux observateurs. Une brève explication de la recherche menée et des buts recherchés fut préalablement exposée à chaque personne interviewée.

### 3.3.9. Informations complémentaires

Des informations d'ordre général ont été récoltées pour chaque ferme. Il s'agit des coordonnées géographiques, mesurées avec un GPS (Garmin 12 ; précision d'environ 10 m) de la pente et l'orientation. Des questions d'ordre général ont également été posées aux agriculteurs durant les interviews. Ces questions sont relatives à la surface totale possédée, l'âge de la plantation, les contraintes rencontrées et solutions envisagées.

### 3.4. Analyses de laboratoire

#### 3.4.1. Analyses de sols

- a) Mesure du pH : Le  $pH_{H_2O}$  est mesuré après agitation de 10g de sol dans 50 ml d'eau déminéralisée ; le  $pH_{KCl}$  est mesuré après agitation de 10g de sol dans une solution de 25 ml de KCl 1M. Les valeurs sont lues sur un pH mètre 3-4 heures après la mise en solution.
- b) Dosage de l'azote total : Déterminé en utilisant la méthode de Kjeldahl modifiée selon TECATOR.
- c) Dosage du carbone oxydable : Méthode de Walkley-Black.
- d) Extraction des éléments majeurs et micronutriments échangeables : Les éléments échangeables sont extraits à l'acétate d'ammonium + EDTA à pH 4.65. La détermination de la teneur des éléments K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn et Mn est ensuite réalisée par spectrométrie d'absorption atomique (appareil VARIAN type 300). La teneur en P est déterminée par colorimétrie au nitrovanadate d'ammonium ou au molybdate d'ammonium, appareil : SHIMADZU UV-1205. La précision de ces mesures est de 5-10%.
- e) Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) : Le sol est lessivé en colonne de percolation avec une solution d'acétate d'ammonium 1 N à pH 7,0. La quantité totale d'ions  $NH_4^+$  retenus par le sol après rinçage de l'excès d'acétate d'ammonium est considérée comme une estimation de la CEC. L'ammonium adsorbé est libéré par percolation avec une solution de chlorure de potassium 1 N à pH 3,0 et ensuite déterminé par distillation.

#### 3.4.2. Analyses foliaires

- a) Dosage de l'azote total : Méthode de Kjeldahl modifiée selon TECATOR
- b) Dosage des éléments majeurs et micronutriments : La détermination de la teneur des éléments K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn et Mn est réalisée par spectrométrie d'absorption atomique (appareil VARIAN type 300). La teneur en P est déterminée par colorimétrie nitrovanadate d'ammonium ou au molybdate d'ammonium, appareil : SHIMADZU UV-1205. Les valeurs sont ensuite exprimées en pourcentage de poids sec. La précision de ces mesures est de 5-10%.

#### 3.4.3. Les racines

- a) Evaluation du taux de nécroses et du pourcentage de racines mortes

Les cinq fragments de racines prélevés par plants sont découpés longitudinalement et une évaluation des nécroses est effectuée en suivant la méthode expliquée dans le guide technique de Carlier et al. (2002) (Figure 10). Une valeur moyenne parcellaire est calculée. Le pourcentage de racines mortes a été déterminé durant la phase d'échantillonnage dans le trou standard 20\*20\*20 cm.

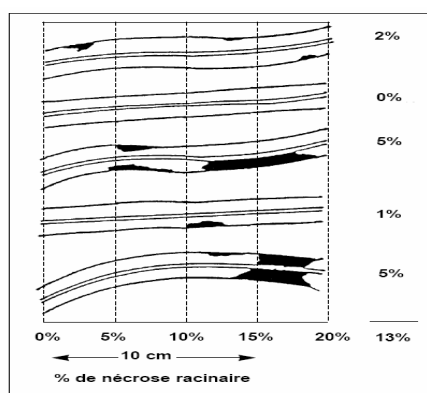


Figure 10. Evaluation du taux de nécrose racinaire (source : Speijer et De Waele, 1997).

b) Extraction et comptage des populations de nématodes

Les fragments racinaires prélevés sont ensuite regroupés par parcelles, découpés en morceaux de 0.5 cm et mixés complètement. Un sous-échantillon de 5 g est ensuite utilisé pour l'extraction des nématodes (la méthode de broyage et séparation à l'aide de l'entonnoir ou récipient de Baermann décrite par Speijer et De Waele, 1997). Les densités de population sont comptées dans trois aliquotes de 2ml provenant d'une suspension de 25ml. Lorsque les densités étaient trop élevées, la suspension fut diluée 2 (50ml) ou 3 (75ml) fois avant le comptage. Les nématodes furent comptés par espèces et ramenés à une valeur d'individus par 100g de poids frais de racine.

### 3.5. Récapitulatif des données récoltées

Un récapitulatif des données mesurées durant l'enquête est présenté au Tableau 11. En plus des données mesurées, des données générales et relatives aux pratiques culturales ont été obtenues auprès des agriculteurs par interview. Des données relatives aux caractéristiques physiques des sols échantillonnés ont de plus été obtenues à partir de la carte pédologique du Rwanda (MINAGRI 1992).

Tableau 10. Récapitulatif des données mesurées durant l'enquête.

	Données générales	Pratiques culturales	Données pédologiques	Données relatives au statut nutritionnel	Données sanitaires	Données morphologiques
<b>Données par exploitation</b>	- Altitude - Coordonnée GPS - Pente		- Profondeur de sol			
<b>Données parcellaires</b>		- Distance entre les plants - <b>Sadventice</b> : Surface des adventices - Epaisseur de <b>paillage</b> - <b>association</b> culturale : fraction de bananiers échantillonnés sur la parcelles présentant une culture associée dans leur entourage immédiat.	- <b>pH</b> - <b>CEC</b> <b>Teneur du sol en :</b> - <b>N<sub>sol</sub></b> : en azote - <b>P<sub>sol</sub></b> : phosphore - <b>K<sub>sol</sub></b> : potassium - <b>Ca<sub>sol</sub></b> : calcium - <b>Mg<sub>sol</sub></b> : magnésium - <b>Fe<sub>sol</sub></b> : fer - <b>Zn<sub>sol</sub></b> : zinc - <b>Cu<sub>sol</sub></b> : cuivre - <b>Mn<sub>sol</sub></b> : manganèse	<b>Teneur foliaire en :</b> - <b>N<sub>limbe</sub></b> : en azote - <b>P<sub>limbe</sub></b> : phosphore - <b>K<sub>limbe</sub></b> : potassium - <b>Ca<sub>limbe</sub></b> : calcium - <b>Mg<sub>limbe</sub></b> : magnésium - <b>Fe<sub>limbe</sub></b> : fer - <b>Zn<sub>limbe</sub></b> : zinc - <b>Cu<sub>limbe</sub></b> : cuivre - <b>Mn<sub>limbe</sub></b> : manganèse	- Populations de <b>nématodes</b> par espèce : - <b>NR %</b> : Indice de nécrose racinaire (%) - <b>RF</b> : Nombre de racines fonctionnelles - <b>RM %</b> : pourcentage de racines mortes. - Présence de symptôme de <b>cercosporiose</b> , de <b>mosaïque</b> en tiret, de <b>charançons</b>	- <b>Hauteur</b> du plant - <b>Circonférence</b> du pseudo-tronc - <b>LF3</b> : longueur de la feuille 3 - <b>IF3</b> : largeur de la feuille 3 - <b>NFF</b> : nombre de feuilles fonctionnelles - <b>SFT</b> : surface foliaire totale. - <b>Ndoigts</b> : Nombre de doigts de l'inflorescence

### 3.6. Traitement des données

#### 3.6.1. Stratégie d'analyse

La stratégie d'analyse a suivi la logique suivante : les données sont initialement regroupées par lot : données générales, données relatives aux pratiques culturelles, données pédologiques, données nutritionnelles, données sanitaires et données morphologiques. Des statistiques descriptives sont effectuées par lot : moyennes, écart-types, corrélations. Des analyses en composante principale (ACP) sont également effectuées afin de comparer les régions entre elles. Les questions de recherche (point 1.4.3) ont guidé l'analyse ultérieure des données.

Il s'agissait, dans un premier temps, d'identifier les facteurs déterminant une réponse : Etat nutritionnel, populations de nématodes, dégâts racinaires, productivité. Des cadres théoriques ont été proposés, et testés par régression linéaire multiple. Toutes ces analyses ont été effectuées à l'aide de la version Enterprise Guide du logiciel SAS (SAS Institute Inc.). Dans un second temps, une analyse de type « courbe limite » ou « *boundary line* » (BLA) a été effectuée afin de tenter une identification des facteurs principaux limitant la productivité.

#### 3.6.2. Analyse en composante principale (ACP)

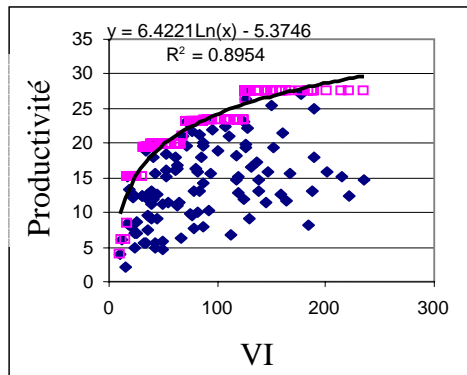
L'analyse en composantes principales (ACP) consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendant compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données. Cette méthode permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information (XLSTAT, *online*).

#### 3.6.3. Analyse en courbe limite (« *Boundary line analysis* »)

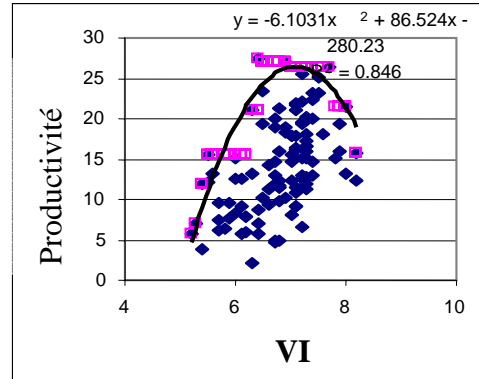
Pour l'analyse en courbe limite (« *boundary line analysis* »), les nuages des données parcellaires sont projetés, pour chaque variable indépendante (VI), sur le plan défini par les axes « productivité » et « VI ». L'analyse en courbe limite est basée sur l'hypothèse que la courbe reliant les « points limites » (« courbe limite » ou « *boundary line* ») du nuage de point représente la fonction de dépendance (« fonction limite ») de ces variables, toutes autres conditions étant égales (comparables) par ailleurs. Sur cette courbe, la variable indépendante (VI) est supposée être le seul facteur limitant la productivité ou variable dépendante. Les points présents sous la « courbe limite » seraient ainsi limités par une autre VI.

La construction des « courbes limites », dans le cas d'une relation de type croissante entre la productivité une VI, est réalisée de la manière suivante : les individus (productivité, variable VI) sont triés par valeur de VI décroissante, et par productivité croissante. On part de l'individu 1 caractérisé par la valeur maximale de la productivité correspondant à la valeur minimale de la VI<sub>i</sub>. Le point « limite » 1 prend la valeur de la productivité du point 1. Le point « limite » 2 prend ensuite la valeur de la productivité de l'individu 2 selon qu'elle soit supérieure à la valeur « limite » 1 ou prend la valeur « limite » 1 dans le cas contraire. A chaque combinaison (productivité, VI) est ainsi assignée un point « limite ». Une régression est ensuite effectuée afin de déterminer une fonction approximant au mieux l'ensemble des points « limites ». Une courbe limite est ainsi définie pour chaque VI séparément. Un exemple est présenté à la figure 11.1.

Dans le cas d'une relation décroissante entre la productivité et la VI, le même raisonnement est suivi, si ce n'est que le classement est différent : pour chaque VI, on classe les individus par valeur croissante de cette VI, et en second lieu, par productivité croissante. Dans le cas de réponse de type « parabolique », le classement est réalisé en deux temps. Un exemple de réponse de type « parabolique » est présenté à la figure 11.2



**Figure 11.1** Cas d'une relation croissante entre variable dépendante (VD) et variable indépendante (VI)



**Figure 11.2** Cas d'une relation « parabolique » entre la variable dépendante (VD) et la variable indépendante (VI)

**Figure 11.** Détermination des courbes limites

Une fois les « fonctions limites » définies pour chaque VI, on les applique, parcelle par parcelle sur chacune des VI de la parcelle considérée. La réponse prédite par le modèle ou « réponse limite » pour une parcelle donnée, est finalement la valeur minimale résultant de l'application des « fonctions limites » sur la valeur de chacune des VI de la parcelle considérée. Cette « valeur limite » est considérée comme la valeur potentielle maximale que la parcelle puisse atteindre, compte tenu des valeurs prises par ses VI. Dans notre cas, il s'agit de la « productivité limite ». La variable indépendante à laquelle correspond cette valeur prédite minimale est considérée comme la « variable limitante » de la production de la parcelle.

Il n'existe pas de technique quantitative d'évaluation de la qualité du modèle. Une évaluation de la qualité du modèle peut cependant être approchée en représentant les individus dans le plan formé par les axes « productivité, productivité prédite » (Figure 12). La droite horizontale correspond à la productivité potentielle de la variété. La droite en pointillé correspond à la droite 1 :1. La quantité séparant la valeur potentielle de la droite 1 :1 est la perte de productivité expliquée par le modèle. La quantité séparant les individus de la droite 1 :1 est la perte de productivité non prédite. La valeur du  $r^2$  de la régression linéaire effectuée sur les individus, et la pente de cette droite sont des indicateurs de la fiabilité du modèle.

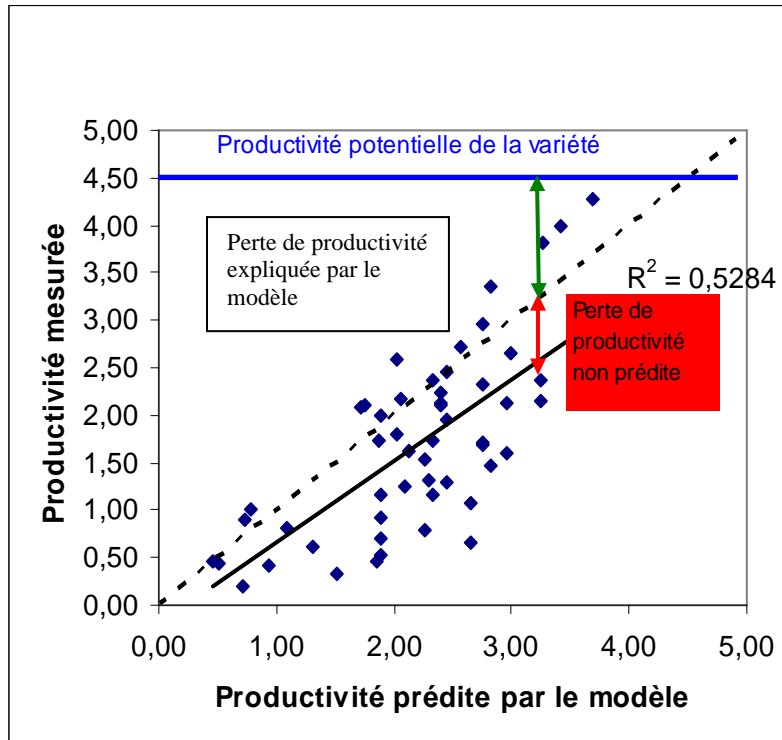


Figure 12. Représentation du modèle "Boundary line analysis"

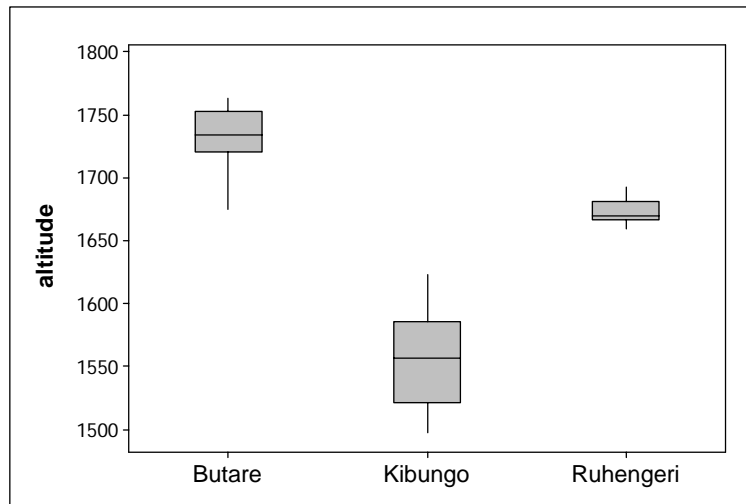
## 4. Présentation des résultats

### 4.1. Données générales

#### 4.1.1. Données générales mesurées

##### a) L'altitude

L'altitude des sites échantillonnés varie entre 1498m à Kibungo et 1763 m à Butare (Figure 13). Butare présente l'altitude moyenne la plus élevée (1731m), et Kibungo la plus faible (1557m). Ces deux régions présentent une variation importante des valeurs autour de la moyenne. Les sites échantillonnés dans la plaine de Ruhengeri présentent une altitude intermédiaire et peu variable.



**Figure 13.** Altitude des exploitations échantillonnées dans les trois régions d'enquête. Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, la médiane et le quartile inférieur.

##### b) La pente

Le pourcentage de ferme par région correspondant aux classes de pente 0-5%, 6-10% et +10% sont présentées dans le Tableau 12. A Butare, trente pourcent de parcelles échantillonnées présentent des pentes de plus de cinq pourcent, et vingt pourcent des pentes supérieures à 10%. Les parcelles échantillonnées à Ruhengeri présentent toutes des pentes jugées très faibles ou nulles.

**Tableau 11.** Pente des parcelles échantillonnées dans les trois régions d'enquête, par classe de valeur.

Pente	Butare	Kibungo	Ruhengeri
0-5 %	70	95	100
6-10 %	10	5	0
+10 %	20	0	0

### 4.1.2. Données générales informées

#### a) Surface totale des exploitations

La surface totale, toutes cultures confondues, était en général assez difficile à déterminer pour les fermiers. Deux d'entre eux, l'un à Kibungo, l'autre à Ruhengeri n'ont pas pu répondre. Les données fournies sont très variables au sein d'une même région (Figure 14). Globalement, à Kibungo, les fermes échantillonnées étaient de taille supérieure à celle des deux autres régions : plus de la moitié des fermiers interviewés y affirment posséder plus d'un hectare. A Butare et Ruhengeri, plus de 20 des personnes interrogées affirment posséder moins de 25 ares.

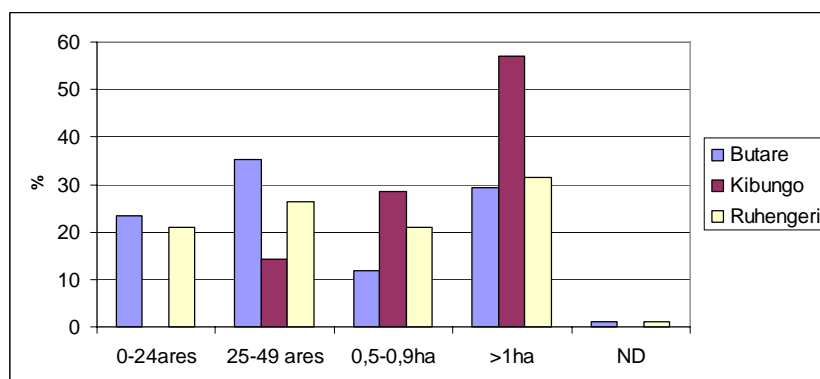


Figure 14. Pourcentage d'exploitation, par région, appartenant à différentes classes de surface. La surface est la surface totale estimée par les agriculteurs. ND = donnée manquante.

#### b) Association élevage-culture

Les questions relatives au nombre d'animaux possédés ont été systématiquement éludées par les personnes interviewées. Ces données ne seront donc pas présentées ici.

#### c) Cultures principales et secondaires

La banane est la culture principale d'une grande majorité des fermes échantillonnées, ce résultat étant probablement en lien avec le choix même des fermes. La culture la plus fréquemment cultivée est ensuite le haricot (Tableau 13).

Tableau 12. Cultures principales et secondaires cultivées dans les fermes échantillonnées. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de fermes par région.

Culture principale (%)	Butare	Kibungo	Ruhengeri
Banane	89	90.5	90
Haricot	5.5	9.5	10
Café	5.5	0	0
Culture secondaire (%)			
Banane	5.5	9.5	10
Haricot	55.5	81	50
patate douce	0	0	5
Sorgho	5.5	0	25
Manioc	28	9,5	0
Autre	5.5	0	10



d) Principale source de revenu

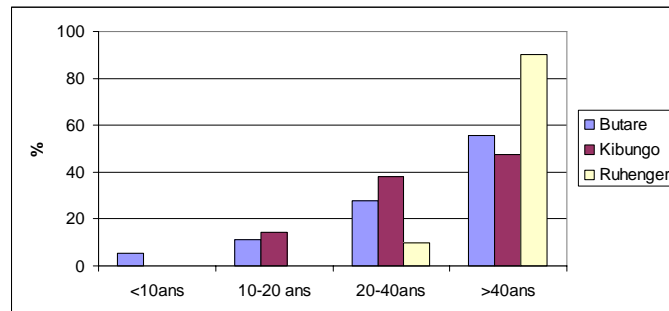
A la question « quelle est votre source principale de revenu ? », l'immense majorité des personnes interrogées a répondu soit l'agriculture et les produits de la ferme, soit plus spécifiquement la bananeraie (Tableau 14). A Ruhengeri, 20% des personnes interrogées affirment avoir une source de revenu principale autre que l'agriculture.

**Tableau 13. Principale source de revenu des ménages interviewés. Valeurs en pourcentage de fermes par région.**

Source de Revenu principale (%)	Butare	Kibungo	Ruhengeri
Agriculture, produits de la ferme	12	79	0
Bananiers	76	21	80
Autre	12	0	20

e) Age de la bananeraie

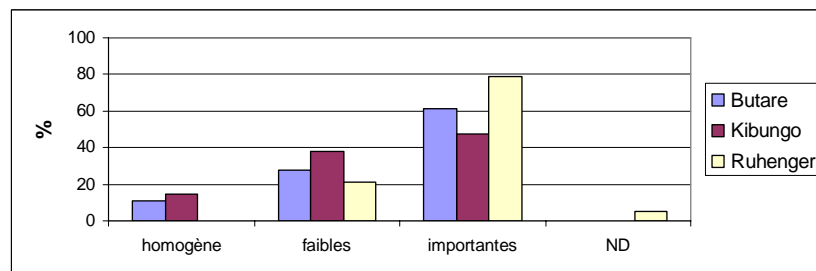
L'enquête a confirmé l'ancienneté des plantations (Figure 15). Particulièrement à Ruhengeri, où près de 90% des fermiers interviewés déclarent posséder une bananeraie plantée depuis plus de 40 ans. Remarquons que Lassoudière (1989), dans la région de Kibungo, n'avait pas observé de différence significative de la circonférence du pseudo-tronc entre des bananeraies de 5 à dix ans et celles de plus de dix ans.



**Figure 15. Age des bananeraies échantillonnées par région. (Les valeurs sont des pourcentages de fermes, par région appartenant à différentes classes de valeurs d'âge)**

f) Différences entre les parcelles d'une même exploitation

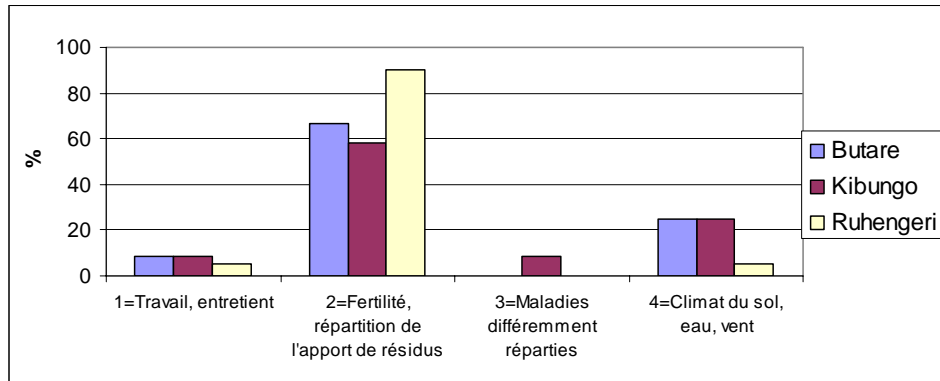
A la question de savoir s'il existait des différences de rendements entre les différentes parcelles de leur exploitation, la grande majorité des fermiers de Butare et Ruhengeri ont répondu qu'il existait des différences importantes (Figure 16).



**Figure 16. Différences de rendement entre les parcelles d'une même ferme selon les agriculteurs interrogés. ND = donnée manquante.**

g) Origine du contraste

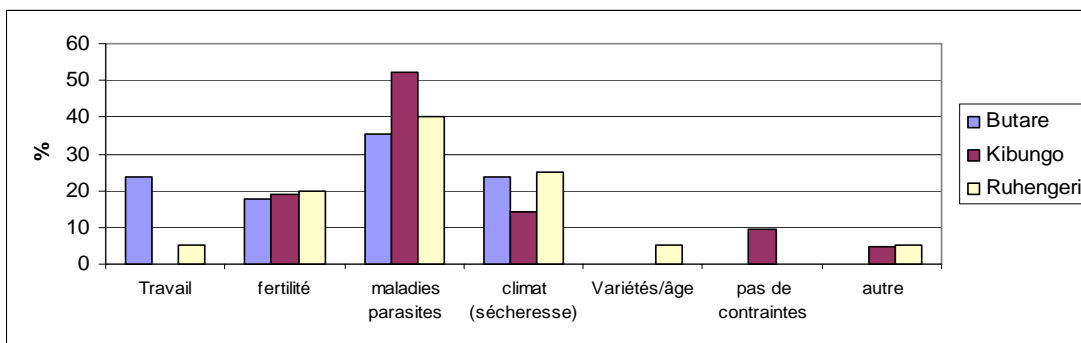
Lorsque les agriculteurs ont affirmé qu'il existait une distinction (faible ou importante) entre la performance de leurs parcelles, nous leur avons posé la question de l'origine des ces différences. La réponse est majoritairement en lien avec la fertilité du sol et la répartition différentielle des résidus (résidus de culture, résidus de « balayage ») (Figure 17).



**Figure 17. Cause première de la différence de performance entre les parcelles d'une même exploitation selon les agriculteurs. Les valeurs sont données en pourcentage de réponse par région.**

h) Contrainte principale

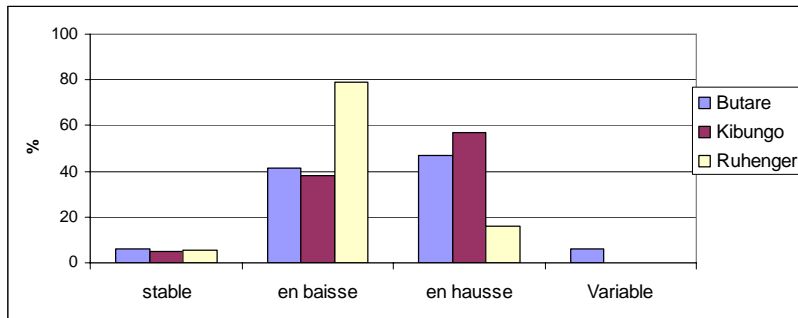
A la question « quelle est votre contrainte principale ? », les réponses fournies furent principalement en lien avec les parasites et les maladies. Viennent ensuite les préoccupations concernant le climat (sécheresse), la fertilité (manque de fumier, de bétail), et le manque de main d'œuvre (Figure 18).



**Figure 18. Contrainte principale perçue par les agriculteurs. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de réponse par région.**

i) Evolution des rendements

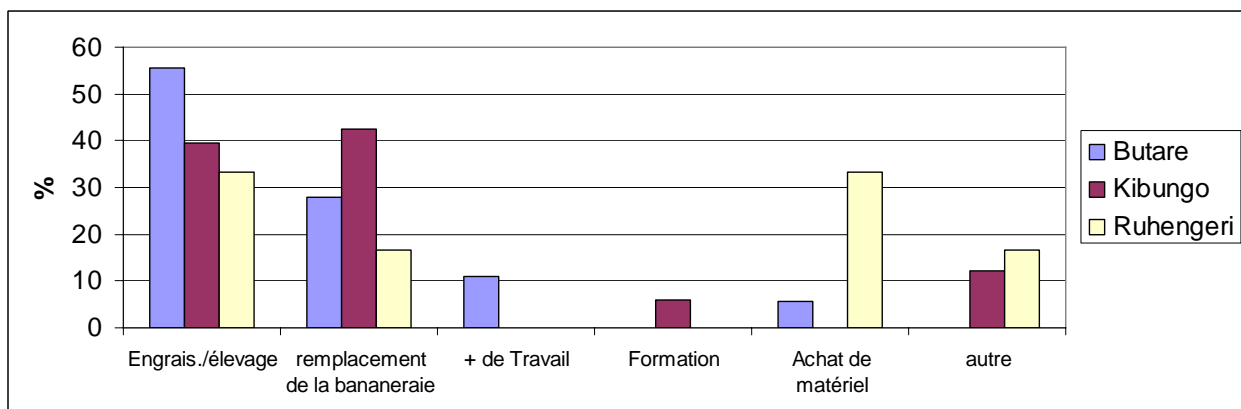
La grande majorité des agriculteurs de Ruhengeri affirment faire face à une baisse de rendement (Figure 19). A Kibungo et Butare, les réponses sont plus variables selon les personnes interrogées. En cas de hausse, les raisons invoquées sont l'entretien régulier ainsi que l'apport de matière organique. En cas de baisse, les raisons évoquées sont une baisse de la fertilité, les maladies et parasites, l'âge de la bananeraie, ainsi que le climat (sécheresse).



**Figure 19. Evolution des rendements telle que perçue par les agriculteurs. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de réponse par région.**

j) Solutions envisagées

Les solutions envisagées par les fermiers pour augmenter leur production sont principalement à Kibungo et Butare l'apport d'engrais (organique ou minéral) ou l'élevage, et le renouvellement (arrachage, replantation) de la bananeraie (Figure 20). A Ruhengeri, l'achat de matériel est également fréquemment énoncé. Bien que la lutte contre les parasites et les maladies ne soit pas mentionnée directement, le renouvellement était, dans les réponses fournies par les fermiers, en lien avec le désir d'obtenir des variétés plus résistantes / tolérantes à leur « milieu ».



**Figure 20. Solutions envisagées par les agriculteurs interviewés afin de palier aux contraintes perçues. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de réponse par région.**

## 4.2. Les pratiques culturelles

### 4.2.1. Pratiques culturelles informées

Des questions relatives aux pratiques d'entretien ont été posées aux agriculteurs durant les interviews. Les résultats sont représentés visuellement aux Figure 21, 22 et 23, relatives respectivement à l'effeuillage, au désherbage, et à l'oieilonnage. De l'examen des figures, il ressort une gestion généralement plus intensive dans les exploitations de la région de Kibungo.

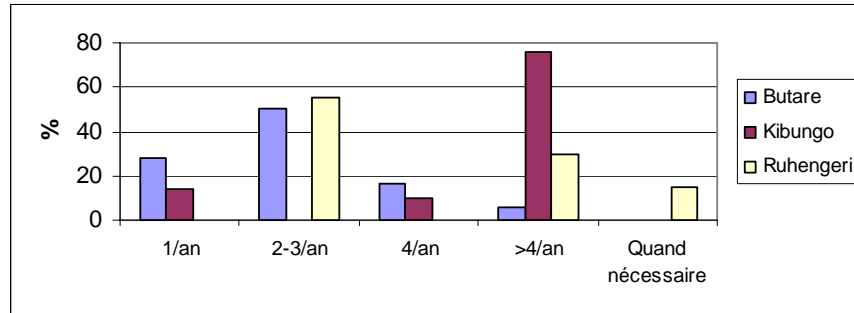


Figure 21. Fréquence d'effeuillage dans les exploitations échantillonnées, selon les interviews réalisées. Données en pourcentage de ferme par région.

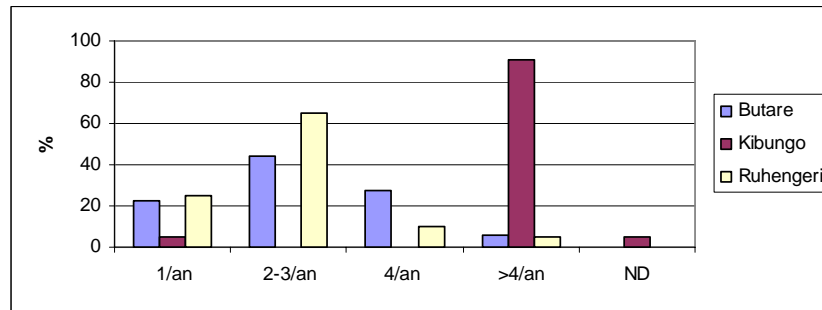


Figure 22. Fréquence de désherbage dans les exploitations échantillonnées, selon les interviews réalisées. Données en pourcentage de ferme par région. ND : donnée manquante.

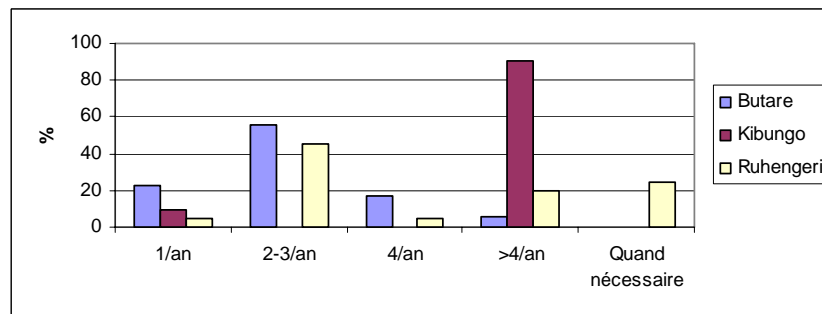


Figure 23. Fréquence d'oieilonnage dans les exploitations échantillonnées, selon les interviews réalisées. Données en pourcentage de ferme par région.

### 4.2.2. Pratiques culturales mesurées

Le Tableau 14 présente les valeurs moyennes et écart-types des données culturales mesurées par région. Bien que les différences soient non significatives, l'épaisseur moyenne de paillage la plus élevée et la surface moyenne des adventices la plus faible ont été observées à Kibungo, confirmant un niveau de gestion généralement supérieur dans cette région. Selon notre indice, l'association culturale est significativement plus intensive à Butare par rapport aux deux autres régions. En moyenne, la moitié des bananiers des parcelles échantillonnées dans cette région présentent en effet une culture associée dans leur entourage immédiat. La distance moyenne entre les plants à Kibungo est plus élevée que dans les deux autres régions (différence non significative).

**Tableau 14. Valeur, par région, des variables culturales mesurées. « Distance » est la distance entre les plants de stade/taille comparable. « Association culturale » correspond à la fraction de plant échantillonnés par parcelle présentant une culture associée dans leur entourage immédiat. (A) et (B) se réfèrent au résultat de la comparaison de moyennes 2 à 2 suivant le test de Scheffe.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Epaisseur de paillage (cm)	1.4	1.4	3.2	0.8	1.5	1.1
Surface des adventices (%)	22	21	3	9	35	18
Association culturale	0.5 (A)	0.40	0.28 (B)	0.31	0.27 (B)	0.31
Distance (cm)	195	46	250	38	169	26

## 4.3. Données pédologiques

### 4.3.1. Caractéristiques physiques

La profondeur à laquelle un horizon compact ne permettait plus la pénétration de la tarière dépasse ou égale 70 cm dans toutes les fermes échantillonnées, excepté une à Butare, où la profondeur de sol a été estimée à 30 cm. Les deux parcelles échantillonnées dans cette ferme se classent 9<sup>e</sup> et 12<sup>e</sup> sur 30 pour le PRE/S (mesure de productivité, voir 4.6.3).

Les valeurs de texture présentées au Tableau 15 sont issues de la projection des coordonnées géographique des fermes échantillonnées sur la carte pédologique du Rwanda au 1/50 000<sup>e</sup> (MINAGRI, 1992). Selon cette source, les sols correspondant à toutes les parcelles échantillonnées présentent un drainage bon à excellent.

**Tableau 15. Classe de texture des sols échantillonnés (source : MINAGRI, 1992). Valeurs en pourcentage de parcelle par région.**

Texture	Butare	Kibungo	Ruhengeri
Argileux lourd et très lourd	0%	21 %	0 %
Argileux, argilo-sableux et limono-argileux	73 %	74 %	75 %
Limono-argilo-sableux et limono-sableux	27 %	5%	25 %

### 4.3.2. Caractéristiques chimiques

#### a) Le pH

La valeur moyenne du pH du sol est significativement plus faible à Butare comparé aux deux autres régions (Tableau 16). Le  $pH_{H_2O}$  minimal est de 5.2 à Butare, 6.4 à Kibungo et 6.1 à Ruhengeri. La différence entre le  $pH_{KCl}$  et le  $pH_{H_2O}$  est systématiquement négative, très probablement en lien avec les teneurs en matière organique importantes. Il convient de rappeler ici que les résultats se réfèrent à des échantillons 0-25 cm.

**Tableau 16. Les pHs des sols mesurés dans les trois régions. (A) et (B) se réfèrent au résultat de la comparaison de moyennes 2 à 2 suivant le test de Scheffe.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>
$pH_{H_2O}$	(A) 6.1	0.5	(B) 7.2	0.5	(B) 7.1	0.6
$pH_{KCl}$	5.3	0.6	6.4	0.4	6.1	0.4
$pH_{KCl} - pH_{H_2O}$	- 0.80	0.18	- 0.8	0.18	- 1.0	0.51

#### b) Teneurs en carbone oxydable et azote total, capacité d'échange cationique (CEC)

Les teneurs moyennes en azote et en carbone oxydable sont plus faibles à Butare comparé aux deux autres régions, bien que cette différence soit non-significative (Tableau 17). Ces deux paramètres sont très fortement corrélés ( $r=0.96$ ,  $p<0.01$ ). La capacité d'échange cationique (CEC) moyenne décroît de Kibungo, à Ruhengeri et Butare. La CEC présente une corrélation positive et étroite avec la teneur en carbone ( $r=0.91$ ,  $p<0.01$ ).

**Tableau 17. Teneur en carbone oxydable (C), en azote total (N) et CEC des sols échantillonnés par région.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>
<b>C (%)</b>	1.4	0.5	3.6	0.4	3.5	1.5
<b>N (%)</b>	0.16	0.04	0.31	0.03	0.34	0.13
<b>CEC (meq/100g)</b>	12.1	2.9	31.0	3.2	23.8	10.1

#### c) Teneurs en phosphore

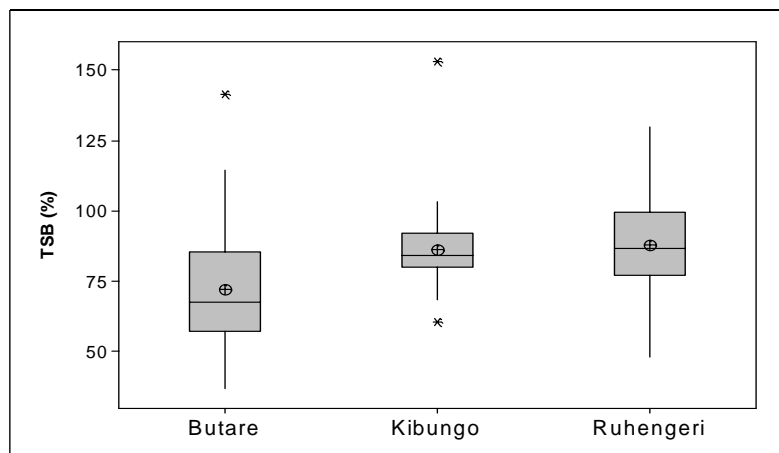
Butare et Ruhengeri présentent des variations très importantes autour de leur valeur moyenne de teneur en phosphore, rendant peu représentative cette dernière (Tableau 18). La teneur moyenne en phosphore serait moins élevée à Kibungo comparé aux deux autres régions (non significatif).

**Tableau 18. Teneur en phosphore des sols échantillonnés, donnée par région.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>
<b>P (mg/100g)</b>	6.5	9.4	1.9	1.6	6.2	6.3

## d) Les bases échangeables

**Remarque importante :** l'extraction des bases échangeables et du phosphore a été réalisée à pH 4.65 + EDTA. Les valeurs moyennes de pH des sols étant proches de la neutralité, les teneurs en cations échangeables présentées ici proviennent du stock échangeable, mais aussi partiellement de la dissolution de minéraux contenus dans le sol. Le taux de saturation en base (TSB, défini comme la somme des éléments K+Ca+Mg exprimé en milliéquivalents par 100g divisé par la CEC) dépasse en effet 100 % dans plusieurs parcelles (Figure 24). A cet égard, il est intéressant d'observer que les valeurs de TSB sont les plus élevées, en moyenne, dans les sols les plus riches en minéraux altérables (Ruhengeri), et les plus faibles dans les sols les plus pauvres (Butare). Les valeurs critiques présentées par Lassoudière (1989) ont été déterminées quant à elles par extraction à pH 7. Le pourcentage de parcelles déficientes suivant ces normes sera donc probablement sous-estimé.

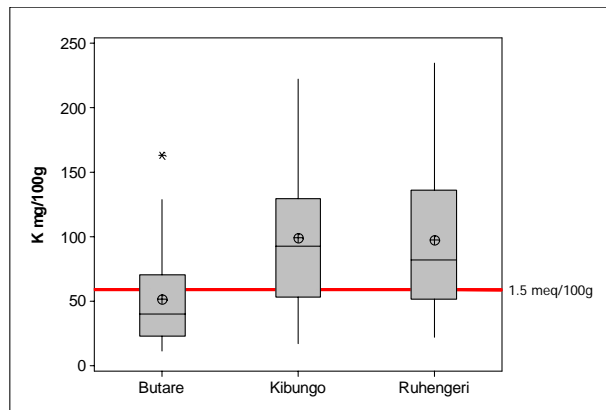


**Figure 24. Taux de saturation en base (TSB) des sols échantillonnés, par région.** Les traits horizontaux représentent le quartile inférieur, la médiane et le quartile supérieur. Les étoiles correspondent aux outliers. Les étoiles entourées d'un rond représentent les valeurs moyennes.

**Potassium.** Le potassium est un élément particulièrement important pour le bananier. Les valeurs mesurées sont très variables au sein d'une même région (Tableau 19 et Figure 25). Butare présente une teneur moyenne significativement inférieure à celles de Kibungo et Ruhengeri. A Butare, 70% des parcelles échantillonnées présentent une valeur de K inférieure à la valeur minimale critique de 58.7g/100g (1,5 meq/100g) déterminée par Lassoudière (1989) ; à Kibungo et Ruhengeri, plus du quart des parcelles seraient déficientes. Le rapport K/(Ca+Mg) critique minimal (10%) est supérieur à la valeur mesurée dans 45% des parcelles à Kibungo, et près de 25% des parcelles à Butare et Ruhengeri.

**Tableau 19. Teneur en potassium dans les sols échantillonnés, par région.** Les lettres majuscules correspondent au résultat du test de Scheffé de comparaison de moyenne.

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<b>K (mg/100g)</b>	52 (B)	38	99 (A)	52	97 (A)	57



**Figure 25. Teneurs en potassium des sols échantillonnés, par région.** Le trait horizontal traversant la figure correspond à la valeur critique minimale déterminée par Lassoudière (1989). Les autres traits horizontaux correspondent au quartile supérieur, à la médiane et au quartile inférieur. L'étoile isolée est un outlier. Les étoiles entourées d'un cercle représentent les moyennes.

*Calcium et magnésium.* Les teneurs en calcium et magnésium sont hautement variables selon dans parcelles d'une même région (Tableau 20). Elles sont en moyenne supérieures à Kibungo, puis à Ruhengeri, et finalement les plus faibles à Butare (non significatif).

**Tableau 20. Teneurs en calcium et magnésium des sols échantillonnés, par région d'enquête.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<b>Ca (mg/100g)</b>	119	72	367	81	284	109
<b>Mg (mg/100g)</b>	22.4	10.6	71.9	27.3	41.2	16.0

*Teneurs relatives en potassium, calcium et magnésium.* Les teneurs relatives en potassium, calcium et magnésium sont présentées au Tableau 21.

**Tableau 21. Teneurs relatives en potassium, calcium et magnésium dosées dans les sols des parcelles échantillonnées.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<b>K/(K+Ca+Mg) (%meq)</b>	0.15	0.08	0.095	0.05	0.12	0.04
<b>Ca/(K+Ca+Mg) (%meq)</b>	0.64	0.09	0.69	0.05	0.71	0.04
<b>Mg/(K+Ca+Mg) (%meq)</b>	0.21	0.03	0.22	0.07	0.17	0.02

*Fer, cuivre, zinc et manganèse.* Les teneurs en fer, cuivre, zinc et manganèse sont présentées au Tableau 22. Des teneurs moyennes en zinc particulièrement élevées sont retrouvées à Ruhengeri, tandis que les teneurs en manganèse y sont en moyenne inférieures à celles observées dans les deux autres régions (non significatif).

**Tableau 22. Teneurs en fer, cuivre, zinc et manganèse dans les sols échantillonnés, par région d'enquête.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<b>Fe (ppm)</b>	184	54	154	40	217	74
<b>Cu (ppm)</b>	3.3	1.1	3.2	0.6	4.0	1.8
<b>Zn (ppm)</b>	7.2	5.6	5.2	3.1	19.4	12.1
<b>Mn (ppm)</b>	235	97	407	94	43	28



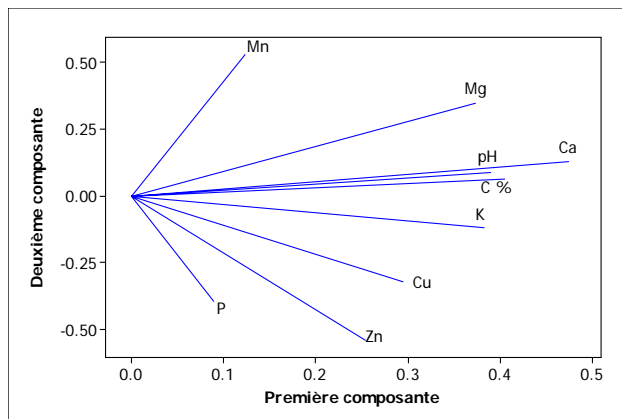
e) Analyse en composantes principales sur les propriétés chimiques du sol

Afin de visualiser les différences entre les caractéristiques chimiques des sols échantillonnés dans les trois régions, une analyse en composante principale (ACP) a été effectuée sur les variables suivantes :

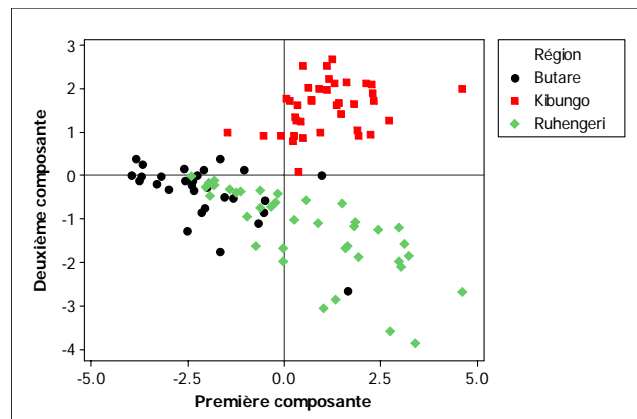
- $pH_{H_2O}$
- teneur en carbone oxydable (C%)
- teneur en phosphore (P)
- teneurs en potassium (K), en calcium (Ca), magnésium (Mg)
- teneurs en manganèse (Mn), en zinc (Zn) et en cuivre (Cu)

Toutes les teneurs sont exprimées en unité de masse d'élément par unité de masse de sol.

Les valeurs propres sont présentées en ANNEXE. Les deux premières composantes expliquent 69% de la variance totale. La Figure 26 représente la valeur des corrélations entre les variables pédologiques introduites et les deux premières composantes de l'ACP. La Figure 27 représente la projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes. Grossièrement, les sols de Butare se distinguent comparativement par de faibles teneurs en calcium, en carbone oxydable, en potassium, en magnésium, manganèse, ainsi qu'un faible pH. Ces sols présenteraient donc généralement une fertilité relativement défavorable. Les sols de Kibungo se caractérisent comparativement par des teneurs élevées en manganèse, en magnésium, en calcium, en carbone organique, en potassium, et de faibles teneurs en zinc et en phosphore. Ruhengeri se caractérise par des teneurs élevées en phosphore, en zinc, en cuivre et en potassium, ainsi que de faibles teneurs en manganèse.

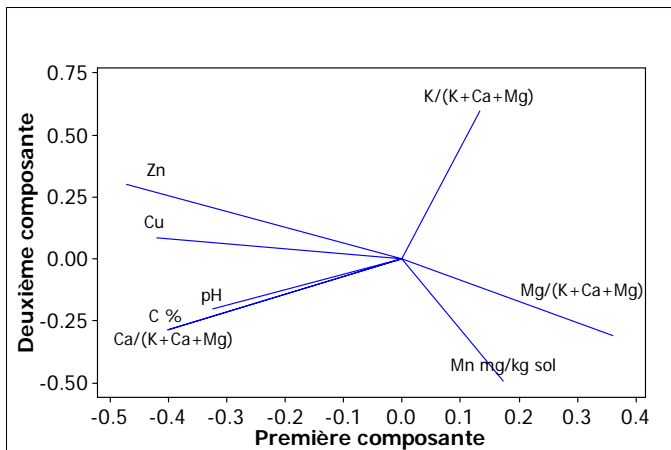


**Figure 26. ACP sur les données pédologiques : corrélation entre les variables pédologiques introduites et les deux premières composantes.** C% est la teneur du sol en carbone organique. Les l'élément chimique qu'elles symbolisent, en unité de masse par unité de masse de sol.

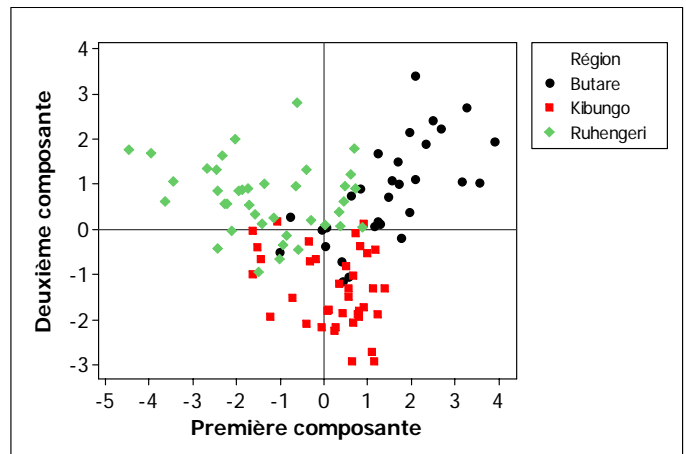


**Figure 27. ACP sur les données pédologiques : projection des parcelles dans le plan formé par les deux première composantes.**

Une seconde ACP a été réalisée en prenant en compte la valeur relative des teneurs en potassium, calcium et manganèse. Les deux premiers axes expliquent 56% de la variance totale. Les valeurs propres sont présentées en ANNEXE. La figure 28 illustre les corrélations entre les variables introduites et les deux premières composantes. La figure 29 représente la projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes. De l'examen de ces figures, il apparaît que Butare se distingue comparativement par des teneurs relatives en potassium généralement élevées et des teneurs relatives en calcium généralement faibles. Ruhengeri se distinguerait comparativement par des teneurs relatives en magnésium faibles et des teneurs relatives en potassium élevées. Finalement, Kibungo se caractériserait comparativement par des teneurs relatives faibles en potassium.



**Figure 28. ACP sur les données pédologiques : Corrélations entre les variables introduites et les deux premières composantes de l'ACP.** C% est la teneur en carbone oxydable. K, Ca et Mg sont exprimés en meq/100g. Mn, Cu, Zn et P sont exprimés en fraction de masse



**Figure 29. ACP sur les données pédologiques : Projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes.**

#### 4.4. Données relatives au statut nutritionnel des bananiers

Dans le Tableau 23 est présenté, par région, le pourcentage de parcelles dont les teneurs foliaires présentent des déficiences en différents éléments. Selon les différentes normes présentées dans le Tableau 23, toutes les parcelles, dans toutes les régions seraient déficientes en azote et en cuivre. Le phosphore, le magnésium, le calcium et le zinc seraient également largement déficients. Le potassium serait particulièrement déficient à Butare comparé aux deux autres régions.

**Tableau 23. Valeur, par région, du pourcentage de parcelles *déficientes* au niveau de statut nutritionnel en divers éléments selon les normes trouvées dans la littérature.**

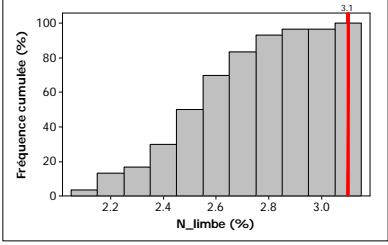
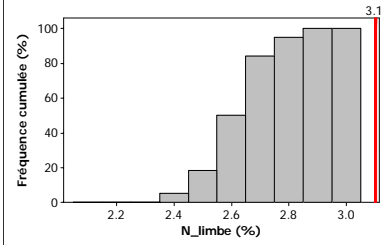
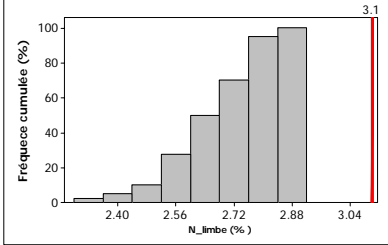
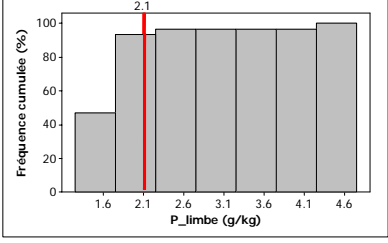
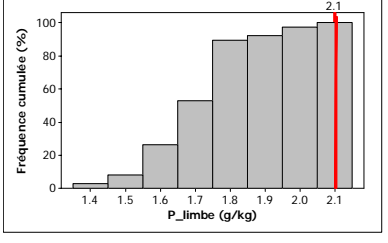
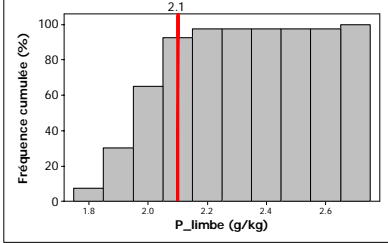
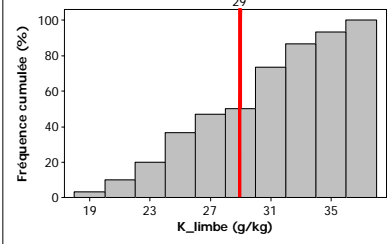
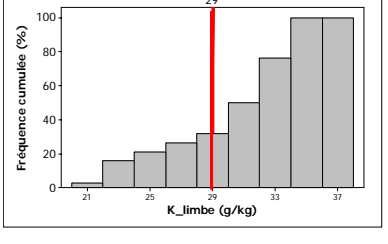
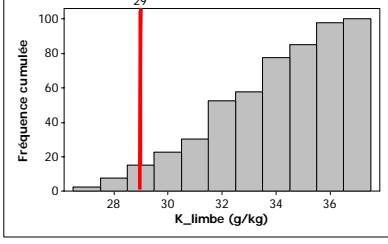
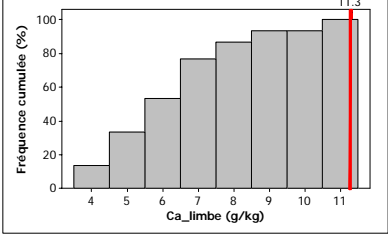
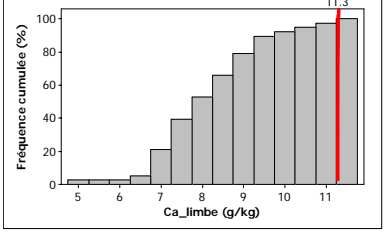
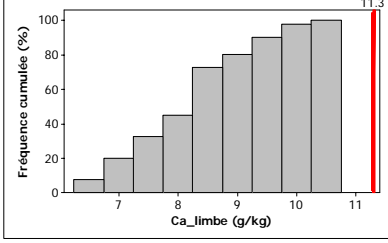
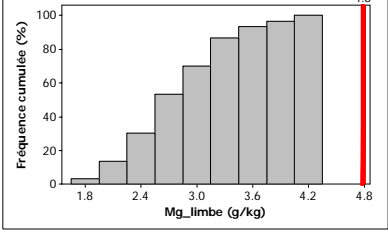
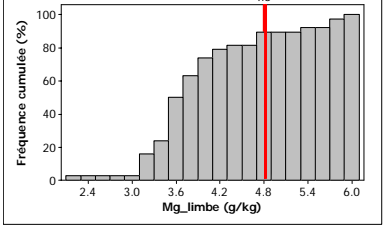
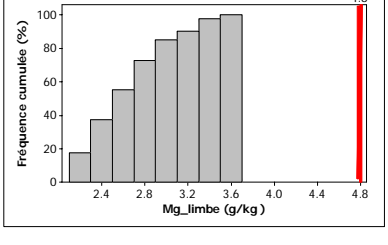
Elément	Norme	Région		
		Butare	Kibungo	Ruhengeri
<b>N</b>	> 31 g/kg <sup>(1)</sup>	100	100	100
<b>P</b>	> 2.1 g/kg <sup>(2)</sup>	93	100	85
<b>K</b>	> 29 g/kg <sup>(3)</sup>	50	29	12.5
<b>Ca</b>	> 11.3 g/kg <sup>(1)</sup>	100	98	100
<b>Mg</b>	> 4.8 g/kg <sup>(1)</sup>	100	84	100
<b>Mn</b>	> 25.0 ppm <sup>(4)</sup>	0	0	0
<b>Cu</b>	> 9 ppm <sup>(4)</sup>	100	100	100
<b>Zn</b>	> 18.4 ppm <sup>(1)</sup>	50	92	87
<b>K/(K+Ca+Mg)</b>	>0.54 et < 0.69 <sup>(1)</sup>	0 – 80 *	0 – 76 *	0 – 98 *
<b>Ca/(K+Ca+Mg)</b>	>0.22 et < 0.32 <sup>(1)</sup>	80 – 0 *	79 – 0 *	85 – 0 *
<b>Mg/(K+Ca+Mg)</b>	> 0.09 et < 0.15 <sup>(1)</sup>	80 – 0 *	66 – 5 *	98 – 0 *

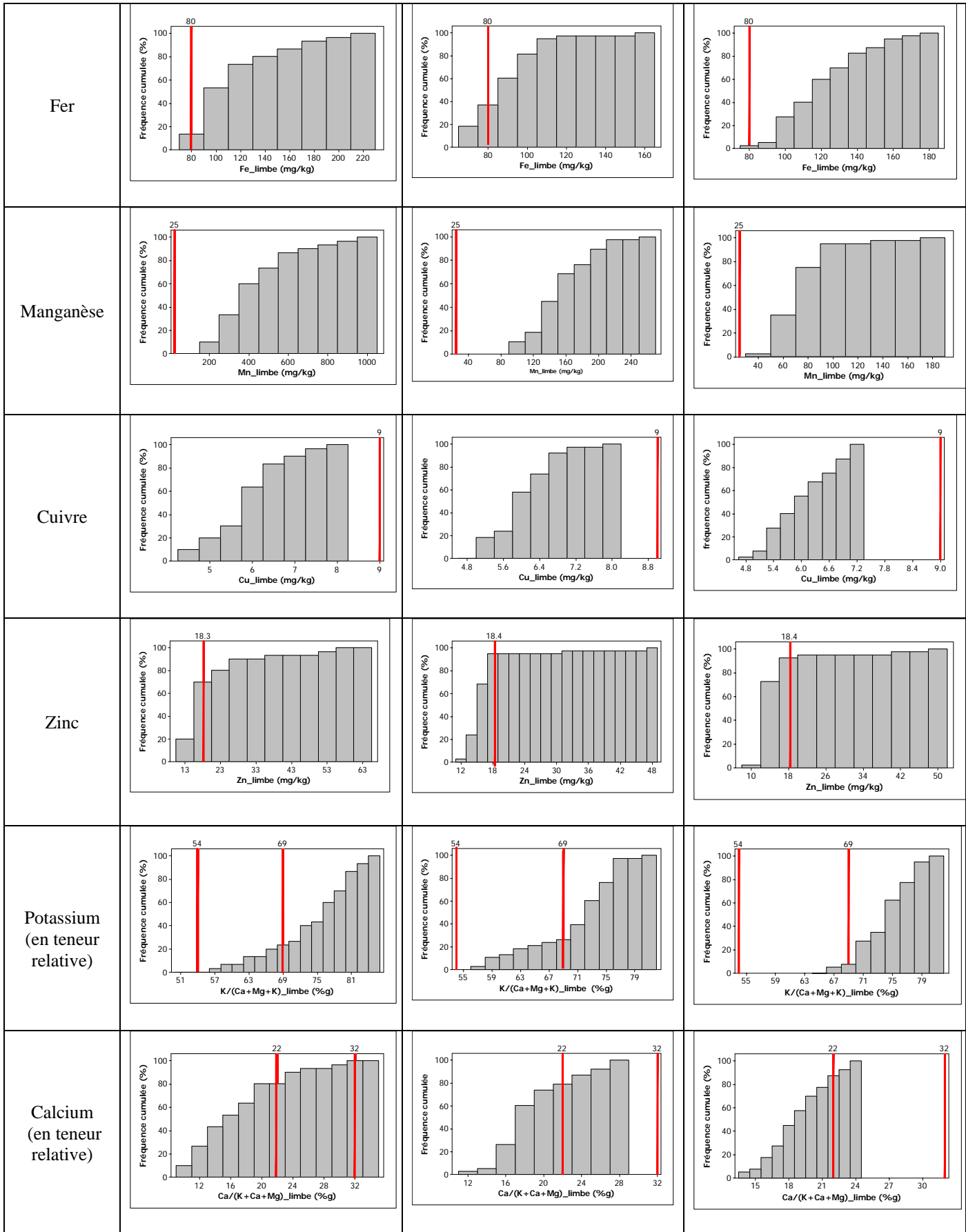
Sources : <sup>(1)</sup> Wortmann et al., 1994 <sup>(2)</sup> Bosch et al., 1996 cités par Rufino, 2003 <sup>(3)</sup> Lassoudière, 1989 <sup>(4)</sup> Renter et Robinson, 1986 cités par Bwamiki, 2004

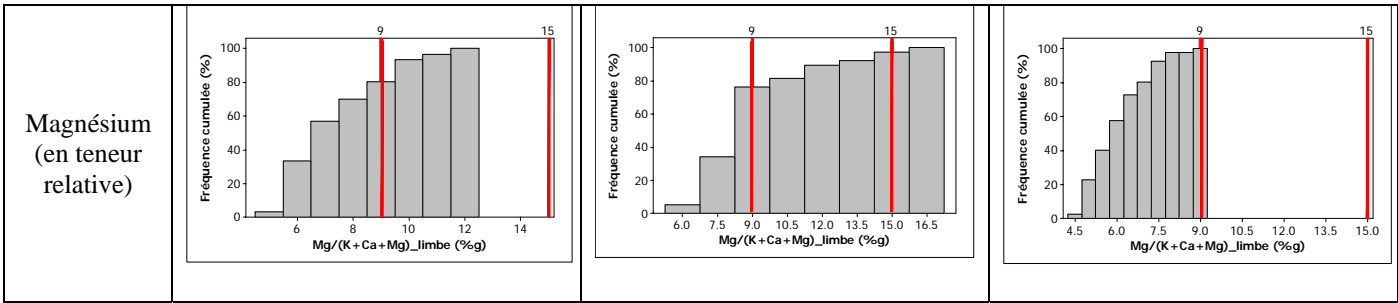
\* le premier chiffre est le pourcentage de parcelle sous la valeur inférieure optimale et le second est la valeur dépassant la valeur supérieure optimale.

Le Tableau 24 présente les fréquences cumulées des teneurs foliaires en différents éléments et ce dans les trois régions d'enquêtes. Les valeurs seuils y sont indiquées par un trait gras vertical.

**Tableau 24. Fréquence cumulée des teneurs foliaires en azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium, fer, cuivre, zinc et teneurs relatives en potassium, calcium et magnésium dans les trois régions d'enquête.** Les traits verticaux en gras correspondent au valeur seuil présentent dans la littérature. Les valeurs critiques relatives aux teneurs en azote, calcium, magnésium, zinc, ainsi qu'aux teneurs relatives en potassium, calcium et magnésium proviennent de Wortmann et al. (1994). La valeur seuil de la teneur en phosphore provient de Bosh et al. (1996, cité par Rufino, 2003). La valeur seuil de la teneur en potassium provient de Lassoudière (1989). Les valeurs seuils des teneurs en manganèse et cuivre proviennent de Renter et Robinson (1986, cité par Bwamiki, 2004).

Element	Butare	Kibungo	Ruhengeri
Azote			
Phosphore			
Potassium			
Calcium			
Magnésium			

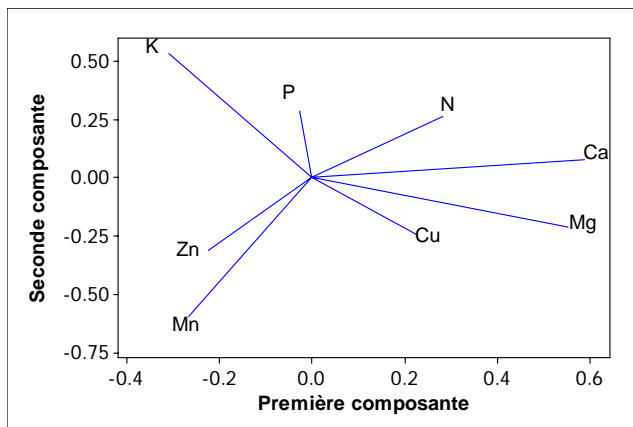




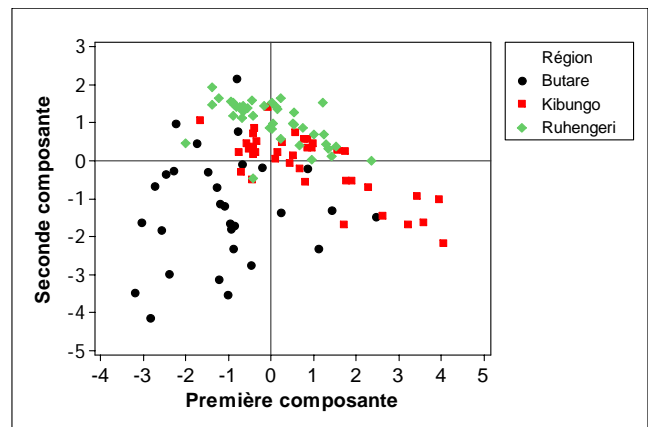
Afin de visualiser les différences entre les caractéristiques nutritionnelles des bananiers appartenant aux parcelles échantillonnées dans les trois régions, une analyse en composante principale (ACP) a été effectuée sur les teneurs foliaires en éléments suivants :

- L'azote (N)
- Le phosphore (P)
- Le potassium (K)
- Le calcium et magnésium (Ca, Mg)
- Le cuivre (Cu), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn).

Les données relatives aux valeurs propres et aux vecteurs propres sont présentées en ANNEXE. Les deux premières composantes n'expliquent que 50% de la variance totale. La Figure 30 représente la valeur des corrélations entre les variables nutritionnelles et les deux premières composantes de l'ACP. La Figure 31 représente la projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes. Remarquons tout d'abord que l'ACP réalisée sur les données relatives au statut nutritionnel du bananier ne permet pas de distinguer aussi clairement les trois régions d'enquête que l'ACP réalisées sur les données pédologiques. Butare se distinguerait comparativement par un nombre élevé de bananiers présentant des teneurs élevées en manganèse, et des teneurs faibles en potassium, calcium et magnésium. A Ruhengeri, les bananiers présenteraient généralement des teneurs élevées en potassium et faibles en manganèse. A Kibungu, les teneurs en différents éléments seraient plus variables.

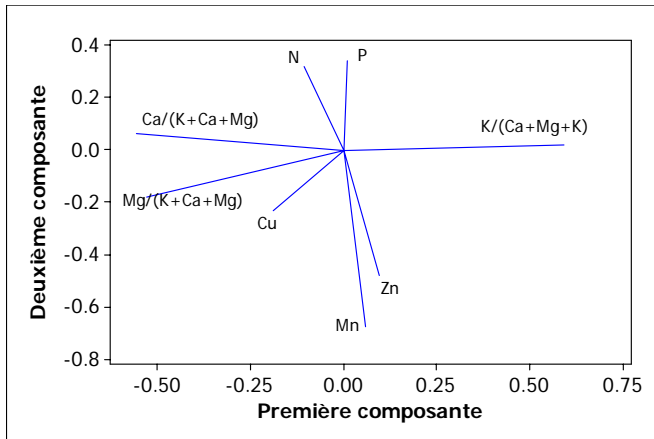


**Figure 30. ACP sur les données nutritionnelles : corrélation entre les variables introduites et les deux premières composantes.** Les éléments sont exprimés en unité de masse par unité de masse de feuille. Les teneurs sont relatives au limbe interne de la feuille 3.

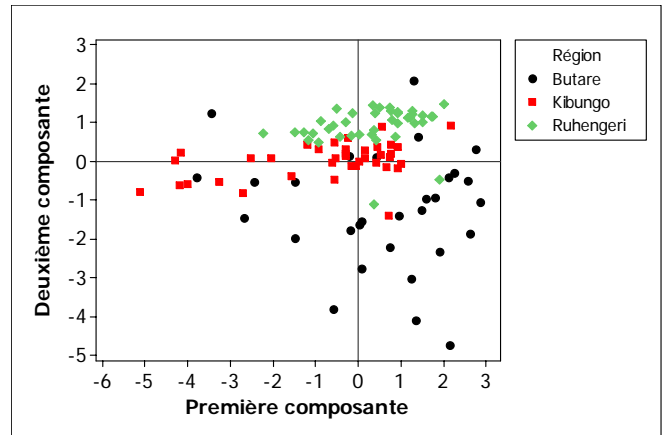


**Figure 31. ACP sur les données nutritionnelles : projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes**

Une seconde ACP a été réalisée en introduisant non plus la valeur absolue, mais relative des teneurs en potassium, calcium et manganèse. Les deux premiers axes expliquent 54% de la variance totale. Les valeurs des vecteurs propres et valeurs propres sont présentée en ANNEXE. La figure 32 illustre les corrélations entre les variables introduites et les deux premières composantes axes de l'ACP. La figure 33 représente la projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes. De l'examen de ces figures, il ressort qu'un bon nombre de bananiers échantillonnés à Butare se distinguent globalement par de faibles teneurs foliaires en azote et potassium, et des teneurs élevées en manganèse et zinc. Les teneurs relatives en potassium, magnésium et calcium sont très variables dans chacune des régions d'enquête. Kibungo se caractériserait comparativement par des bananiers aux teneurs moyennes en phosphore, azote, zinc et manganèse. Et Ruhengeri se distinguerait par des bananiers présentant des teneurs élevées en azote et phosphore, et faibles en manganèse et cuivre.



**Figure 32. ACP sur teneurs foliaires (2) : Corrélation entre les variables introduites et les deux premiers axes de l'ACP.** Les lettres représentent la teneur foliaire de l'élément chimique qu'elles symbolisent, en unité de masse par unité de masse de feuille (limbe interne de la feuille 3)



**Figure 33. ACP sur les teneurs foliaires (2) : projection des parcelles sur le plan formé par les deux premières composantes de l'ACP.**

## 4.5. Données sanitaires

### 4.5.1. Observations

Les symptômes de la mosaïque en tîret ont été observés uniquement dans la région de Kibungo, et ce dans 8 % des parcelles échantillonnées dans cette région, soit trois parcelles (Tableau 25). L'intensité des symptômes a été jugée faible. Les symptômes de la cercosporiose ont été détectés dans toutes les régions, mais dans peu de parcelles, et à faible intensité. A Butare et Kibungo, la plus jeune feuille atteinte parmi les bananiers échantillonnés était la 6<sup>e</sup>. A Ruhengeri, un bananier échantillonné présentait des dommages sur sa feuille 4, un autre sur sa feuille 5, et tout les autres sur des feuilles d'ordre supérieur. Aucun symptôme de dégâts de charançon n'a été observé, ce qui remet en doute la méthode d'évaluation (évaluation visuelle).

**Tableau 25. Pourcentages de fermes présentant des symptômes de la mosaïque en tîret et de la cercosporiose dans les trois régions d'enquête**

	Butare	Kibungo	Ruhengeri
<b>Mosaïque en tîret</b>	0	8	0
<b>Cercosporiose</b>	17	19	12

### 4.5.2. Populations de nématodes dénombrées

Le Tableau 26 ci-dessous présente la fréquence d'occurrence des différentes espèces de nématodes rencontrées par région. L'enquête a confirmé la prédominance de l'espèce *Pratylenchus goodeyi*, tant en nombre qu'en fréquence (Tableaux 26 et 27). L'espèce *Helicotylenchus multicinctus*, présente dans plus de la moitié des sites échantillonnés à Butare n'est que peu présente à Kibungo, et absente des parcelles échantillonnées à Ruhengeri. A Butare et Kibungo, elle n'est cependant présente qu'en faible nombre (maximum 9000 et 1500 individus par 100g de racine, respectivement). *Meloidogyne spp* est dénombrée dans toutes les régions, mais en faible quantité (maximum de 2 700 individus par 100g de racine à Ruhengeri), sur moins de la moitié des parcelles à Ruhengeri, et sur moins du quart des parcelles échantillonnées à Butare et Kibungo. *Hoplolaimus spp* n'a été dénombré qu'à Ruhengeri, et dans une seule parcelle (200 individus / 100g racines). L'espèce *Radopholus similis* n'a été dénombrée dans aucune parcelle.

**Tableau 26. Fréquence d'occurrence (pourcentage de parcelle), par région, des différentes espèces de nématodes.**

Espèce	Région		
	Butare	Kibungo	Ruhengeri
<i>Pratylenchus goodeyi</i>	100	100	100
<i>Helicotylenchus multicinctus</i>	53	11	0
<i>Meloidogyne spp.</i>	20	16	40
<i>Hoplolaimus spp.</i>	0	0	3
<i>Radopholus similis</i>	0	0	0



Tableau 27. Valeurs des populations de nématodes dénombrées par espèce et par région

<i>Pratylenchus goodeyi</i> / 100g racines				<i>Meloidogyne</i> spp. / 100g racines			
	Butare	Kibungo	Ruhengeri		Butare	Kibungo	Ruhengeri
Moyenne	44 700	26 500	42 500	Moyenne	223	116	228
Max	138 000	69 000	142 200	Max	3 300	1 600	2700
Min	1 400	200	1 300	Min	0	0	0
Quartile inférieur	13 400	12 400	22 600	Quartile inférieur	0	0	0
Médiane	34 200	24 500	34 200	Médiane	0	0	0
Quartile supérieur	72 900	37 800	56 400	Quartile supérieur	0	0	200
<i>Helicotylenchus multicinctus</i> /100g racines				Nématodes total/100g racines			
	Butare	Kibungo	Ruhengeri		Butare	Kibungo	Ruhengeri
Moyenne	1 000	58	0	Moyenne	46 000	26 700	42 700
Max	9 000	1 500	0	Max	141 000	69 000	142 200
Min	0	0	0	Min	1 800	600	1 300
Quartile inférieur	0	0	0	Quartile inférieur	14 400	13 200	22 600
Médiane	116	0	0	Médiane	34 000	24 600	35 250
Quartile supérieur	800	0	0	Quartile supérieur	73 000	37 800	56 550

### 4.5.3. Etat sanitaire des racines

La distribution des valeurs de pourcentage de racines mortes (RM%) est très semblable entre les différentes régions (Figure 34.1). Toutes régions confondues, il varie entre 7 % (à Butare) et 34% (Ruhengeri). Les moyennes sont de 18, 18 et 17% respectivement à Butare, Kibungo et Ruhengeri. Le taux de nécrose racinaire varie entre 18 et 71% à Ruhengeri et Kibungo respectivement (Figure 34.2). Il est en moyenne significativement plus faible à Ruhengeri (36%) qu'à Butare (44%) et Kibungo (48%).

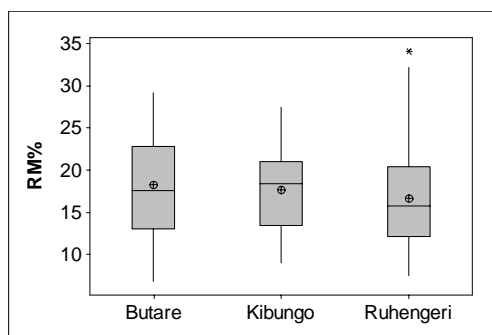


Figure 34.1

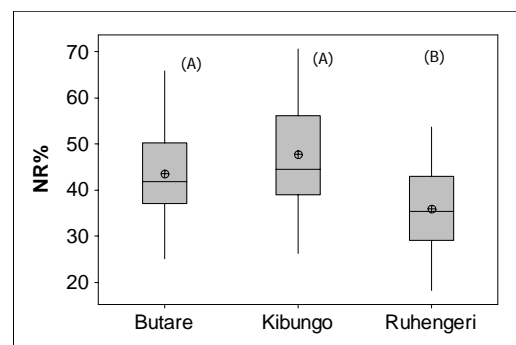
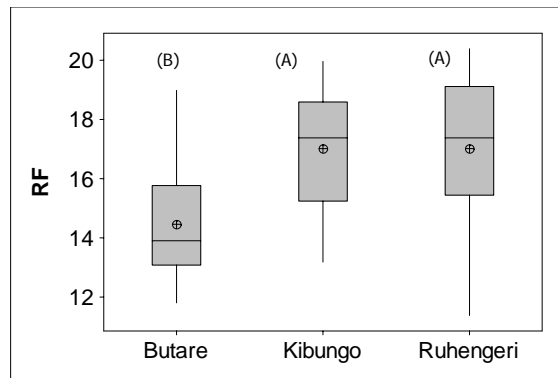


Figure 34.2

**Figures 34. Valeur des pourcentages de racines mortes (RM%) et taux de nécrose racinaire (NR%) dans les trois régions d'enquête.** Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, les médianes et les quartiles inférieurs. L'étoile isolée est un *outlier*. Les étoiles encadrées représentent les valeurs moyennes. Les lettres majuscules correspondent au résultat du test de Scheffe de comparaison des moyennes deux à deux.

Le nombre moyen parcellaire de racines fonctionnelles dénombrées par plants (RF) est significativement plus faible à Butare comparé à Kibungo et Ruhengeri (Figure 35). La moyenne y est de 14.5 racines fonctionnelles par plant, contre 17.0 à Kibungo et Ruhengeri.



**Figure 35. Valeurs du nombre de racines fonctionnelles (RF) dénombrées dans les trois régions d'enquête.**  
 Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, les médianes et les quartiles inférieurs. Les étoiles encadrées représentent les valeurs moyennes. Les lettres majuscules correspondent au résultat du test de Scheffe de comparaison des moyennes deux à deux.

## 4.6. Données morphologiques

### 4.6.1. Présentation des données et comparaison entre les régions

Le Tableau 28 présente les valeurs des moyennes et écart-types des paramètres morphologiques mesurés dans les trois régions échantillonnées. Les valeurs moyennes de hauteur et circonférence augmentent de Butare à Kibungo à Ruhengeri. La surface foliaire totale (SFT) est plus faible à Ruhengeri qu'à Kibungo, en lien avec un nombre moyenne de feuilles fonctionnelles (NFF) moindre à Ruhengeri. Le nombre moyen de doigts de l'inflorescence est significativement plus faible à Butare que dans les deux autres régions.

**Tableau 28. Valeurs des données morphologiques mesurées, par région d'enquête.**

	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Hauteur (cm)	340	63	368	39	432	29
Circonférence (cm)	48	10	55	8	64	6
SFT (m <sup>2</sup> )	5.3	1.8	7.4	2.2	6.0	1.2
NFF	7.6	1.1	8.6	1.2	6.6	0.7
LF3	204	28	225	24	242	15
IF3	63	5	70	7	71	4
Nombre de doigts	(B) 87	22	(A) 114	31	(A) 111	25

SFT est la surface foliaire totale calculée à partir du nombre de feuilles fonctionnelles (NFF), de la longueur de la feuille 3 (LF3) et de la largeur de la feuille 3 (IF3) (voir point 3.3.4 b). « Nombre de doigts » est le nombre de doigts de l'inflorescence.  
 (A) et (B) correspondent au résultat du test de Scheffe de comparaison des moyennes deux à deux.

### 4.6.2. Choix de l'estimateur de productivité

Une comparaison entre les valeurs des paramètres morphologiques provenant des expériences « antérieures » (germoplasme de Butare et essai de Kibuye) avec les valeurs mesurées durant notre enquête sont présentées au Tableau 29. Le nombre minimal de doigts et la circonférence minimale mesurés durant l'enquête sortent du domaine de variation des données antérieures. Nous utiliserons toutefois, faute de mieux, ces données.

**Tableau 29. Comparaison des valeurs des données morphologiques mesurées durant l'enquête et celles provenant d'études antérieures.**

Variable	Données antérieures (N=65) <sup>1</sup>			Enquête (N=108)		
	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max	Min
<b>circonférence</b>	75	92	<b>53</b>	56	76.6	<b>31.4</b>
<b>NFF<sup>2</sup></b>	9.4	15	5	7.6	10.5	5.4
<b>N_doigts<sup>3</sup></b>	148	206	<b>99</b>	105	183	<b>48</b>

<sup>1</sup> Les données antérieures proviennent du germoplasme de Butare, et de l'essai réalisé à Kibuye. <sup>2</sup>NFF est le nombre de feuilles fonctionnelles, et <sup>3</sup> N\_doigts est le nombre de doigts de l'inflorescence.

Les corrélations entre les mesures morphologiques à la floraison et les données de récolte des expériences antérieures sont disponibles dans le Tableau 30. On y constate une corrélation positive importante entre le poids de régime d'une part et le nombre de doigts et la circonférence d'autre part ( $r=0.67$  et  $0.51$  respectivement). On constate également une corrélation positive entre la durée espaçant deux récoltes successives et le nombre de feuilles fonctionnelles à la floraison. Le paramètre « E » est égal au poids du régime (kg) divisé par la durée (en jour) entre la récolte et la récolte précédente du même plant. Bien que le nombre de doigts soit mieux corrélé au poids de régime que la circonférence, il est moins bien corrélé au paramètre E. Les valeurs du coefficient de corrélation sont cependant faibles ( $r<0.34$ ). Une représentation graphique des variations de valeurs du poids de régime et du paramètre E en fonction de la circonférence et du nombre de doigts est présentée aux Figure 36.1 et 36.2.

**Tableau 30. Coefficients de corrélations entre les données morphologiques et les données de production provenant des expériences antérieures.**

	Poids de Régime	R-R <sup>2</sup>	E <sup>3</sup>
<b>Hauteur</b>	0.35 **	-0.29 *	0.25 *
<b>Circonférence</b>	<b>0.51 **</b>	-0.39 **	<b>0.34 **</b>
<b>NFF<sup>1</sup></b>	0.064(NS)	0.38 **	-0.051 (NS)
<b>Nombre de doigts</b>	<b>0.67 **</b>	-0.27 *	0.24 (NS)

\* Probabilité de Pearson  $<0.05$  ; \*\*Probabilité de Pearson  $<0.01$  ; NS : test non significatif. <sup>1</sup>NFF est le nombre de feuilles fonctionnelles ; <sup>2</sup> R-R est la durée, en jour, espaçant la récolte du plant de sa récolte précédente ; <sup>3</sup> E = poids du régime/(R-R).

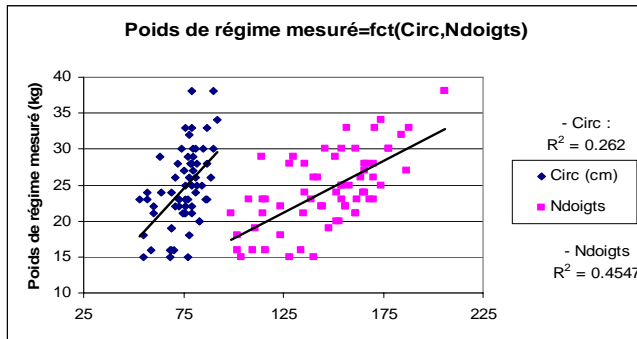


Figure 36.1

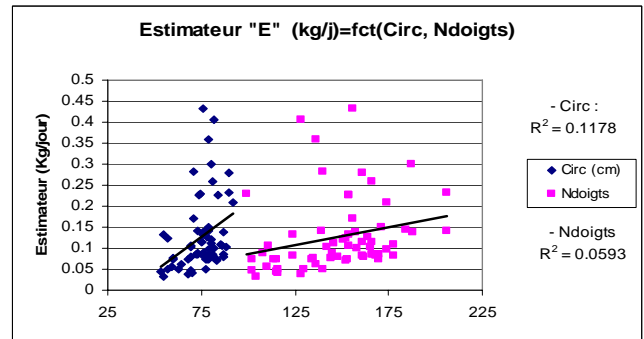


Figure 36.2

**Figure 36.** Régression linéaire effectuée sur les données de poids de régime mesurés, et sur l'estimateur « E » en fonction de la circonférence du pseudo-tronc (circ) et du nombre de doigts de l'inflorescence (Ndoigts). Ces données proviennent d'essais antérieurs. L'estimateur « E » est égal au poids de régime mesuré et divisé par la durée en jour séparant la récolte du plant de la récolte précédente du même plant (kg/jour).

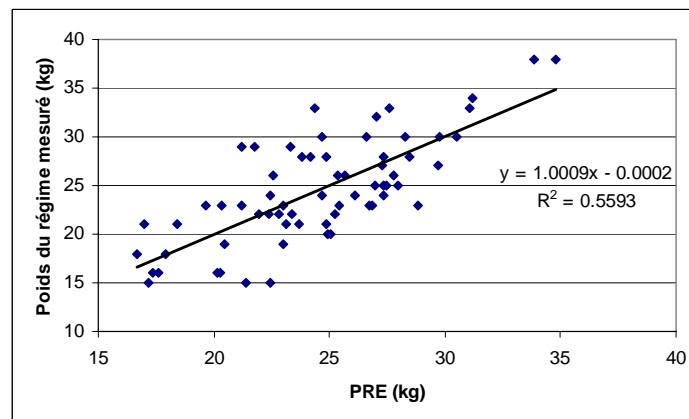
Vu la faible variation totale expliquée par les différents modèles, une régression linéaire a été effectuée afin de vérifier si une combinaison des données morphologiques ne constituait pas un estimateur plus précis. Le résultat est le suivant :

$$PRE = 0.173 * Circ. + 0.995 * NFF + 0.123 * Ndoigts - 16.1 \quad (r^2=0.56)$$

Où :

- PRE est le Poids de Régime Estimé (kg)
- Circ. est la circonférence mesurée à un mètre
- NFF est le nombre de feuilles fonctionnelles
- Ndoigts est le nombre de doigts de l'inflorescence.

L'estimateur PRE explique plus de 55% de la variance totale du poids de régime. La Figure 37 représente graphiquement la relation entre l'estimateur du poids de régime (PRE) et le poids de régime mesuré.



**Figure 37.** Représentation graphique de la relation entre le poids de régime mesuré et le poids de régime estimé (PRE) par régression linéaire multiple. Ces données proviennent d'expériences antérieures.

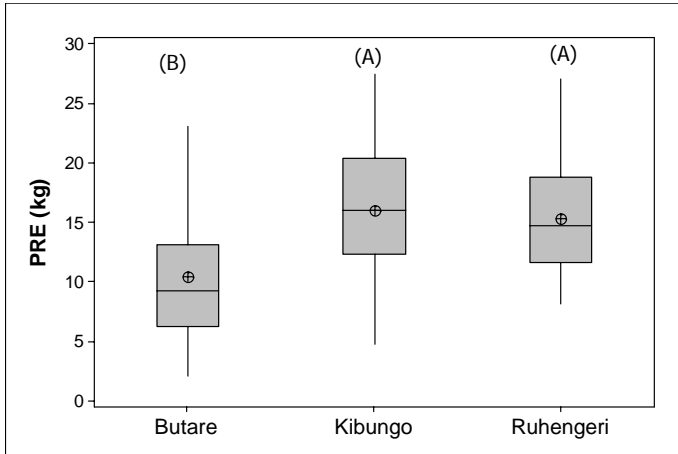
La régression linéaire effectuée en prenant comme variable à expliquer l'estimateur E (correspondant au poids de régime mesuré divisé par la durée en jour entre la récolte du plant et la récolte précédente du même plant, kg/j), a donné un  $R^2$  inférieur à 0.12 (non représenté). L'estimateur de productivité que nous utiliserons par la suite sera donc le PRE (poids de régime estimé).

### 4.6.3. Les rendements estimés

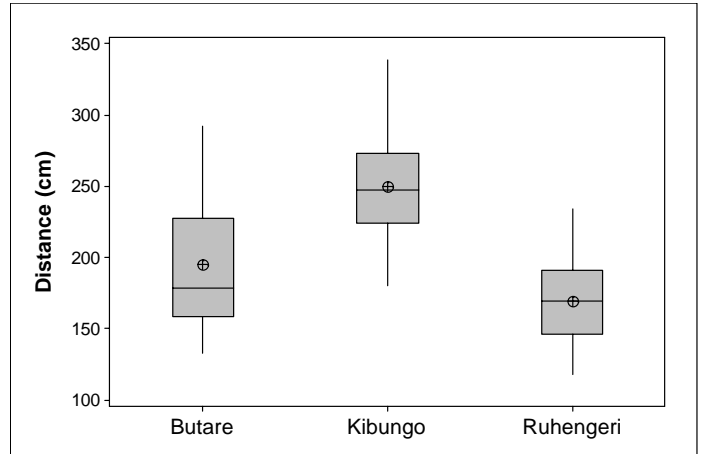
Le poids de régime estimé (PRE) est en moyenne significativement plus faible à Butare comparé aux deux autres régions d'enquête (Tableau 31, Figure 38). Afin d'obtenir, pour chaque parcelle, un estimateur de performance par unité de surface, le PRE est divisé par le carré de la distance moyenne séparant les plants dans cette parcelle. Comme nous l'avons vu précédemment, Kibungo présente les distances moyennes les plus élevées (Figure 39). Ces distances importantes font chuter fortement la productivité moyenne lorsqu'exprimée par unité de surface ( $3.5 \text{ kg/m}^2$ ) (Figure 40). La productivité par unité de surface  $y$  est peu variable. A Ruhengeri, où les distances sont en moyenne faibles et les poids de régime en moyenne élevés, la productivité moyenne estimée exprimée par unité de surface (PRE/S) atteint les  $5.5 \text{ kg/m}^2$ , soit  $55 \text{ t/ha}$ . La productivité moyenne des exploitations échantillonnées à Butare est estimée à  $35 \text{ t/ha}$ . Elle est, dans cette dernière région, particulièrement variable.

**Tableau 31. Valeur de la distance entre les plant, du poids de régime estimé (PRE) et du poids de régime estimé par unité de surface (PRE/S) dans les trois régions d'enquête.** (A) et (B) correspondent au résultat du test de Scheffe de comparaison de moyennes deux à deux.

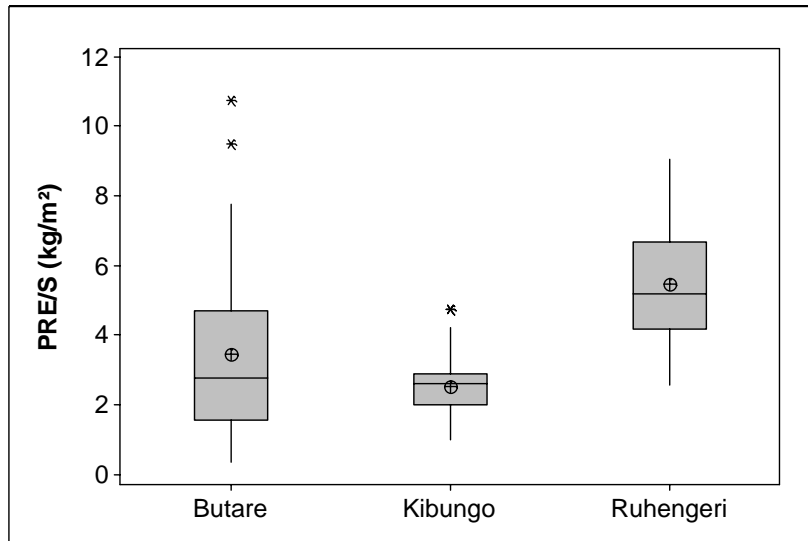
	Butare		Kibungo		Ruhengeri	
	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>	Moyenne	<i>Ecart-type</i>
<b>Distance (cm)</b>	195	46	250	38	169	26
<b>PRE (kg)</b>	10.4 (B)	5.2	16.0 (A)	6.1	15.3 (A)	4.4
<b>PRE/S (<math>\text{kg/m}^2</math>)</b>	3.5	2.6	2.5	0.8	5.5	1.6



**Figure 38. Poids de régime estimé (PRE) par région** Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, les médianes et les quartiles inférieurs. Les étoiles encadrées représentent les valeurs moyennes. Les lettres (A) et (B) correspondent au résultat du test de Scheffe de comparaison de moyennes deux à deux.



**Figure 39. Distances par région** Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, les médianes et les quartiles inférieurs. Les étoiles encadrées représentent les valeurs moyennes.



**Figure 40. Poids de régime par surface (PRE/S), présenté par région.** Les traits horizontaux représentent les quartiles supérieurs, les médianes et les quartiles inférieurs. Les étoiles isolées sont des *outliers*. Les étoiles encadrées représentent les valeurs moyennes.

#### 4.7. Comparaison générale entre les trois régions d'enquête.

Une comparaison qualitative des sites *échantillonnés* selon les principales variables mesurées et informées durant l'enquête est présentée au Tableau 32. Butare se caractérise globalement par une altitude élevée, un taux d'association culturale important, des sols présentant des valeurs de pH et de CEC relativement faibles, ainsi que de faibles teneurs en potassium, calcium et magnésium. Le statut nutritionnel des bananiers se caractériserait par de faibles teneurs en azote, en potassium, calcium et magnésium, et des teneurs élevées en manganèse et en zinc. Le nombre de racines fonctionnelles y serait comparativement faible, de même que le poids de régime estimé. Les distances y étant peu importantes, la productivité par unité de surface y serait en moyenne relativement élevée.

Kibungo se caractérise par sa faible altitude et un niveau de gestion plus intensif (plus de paillage, moins d'adventice). La surface des exploitations pourrait y être en moyenne supérieure. La région ne se distingue pas particulièrement par ses propriétés pédologiques. Les teneurs relatives du sol en potassium et calcium y seraient cependant comparativement faibles. Le statut nutritionnel des bananiers y serait caractérisé par des valeurs généralement moyennes. Les teneurs foliaires en calcium et magnésium y seraient cependant plus élevées que dans les autres régions. Kibungo serait la seule région où sévit la mosaïque en tiret. Les productivités par pied y seraient élevées, mais la faible densité y impliquerait une productivité par unité de surface relativement faible.

Ruhengeri présente une altitude moyenne. Une baisse de rendement y est fréquemment reportée par les agriculteurs. Les sols y présenteraient généralement des teneurs en phosphore, en zinc, et des teneurs relatives en potassium et calcium importantes. Le statut nutritionnel des bananiers y serait caractérisé par des teneurs élevées en potassium, et faibles en zinc et manganèse. Les poids de régimes estimés y sont élevés, et les distances relativement faibles, impliquant une productivité par unité de surface importante

**Tableau 32. Comparaison qualitative des parcelles échantillonnées dans les trois régions d'enquête selon les valeurs prises par les différents paramètres mesurés et informés.**

	<b>Butare</b>	<b>Kibungo</b>	<b>Ruhengeri</b>
<b>Données générales</b>			
Altitude	Elevée	Faible	Moyenne
Pentes	Faibles-élevées	Faibles-moyennes	Faibles-nulles
Surface totale des exploitations	Moyenne-faible	Elevée-moyenne	Moyenne-faible
Age de la bananeraie	Moyen	Moyen	Elevé
Evolution des rendements	Hausse-baisse	Hausse-baisse	Baisse
Gestion (interviews)	Moyenne	Intensive	Moyenne
<b>Paramètres culturaux</b>			
Paillage	Moyen-élevé	Élevé	Moyen-élevé
Désherbage	Moyen-élevé	Élevé	Moyen-élevé
Association culturale	Elevé	Moyen	Moyen
Distances	Moyennes	Elevées	Moyennes
<b>Paramètres pédologiques</b>			
Profondeur de sol	Importante	Importante	Importante
pH	Faible	Moyen	Moyen
Teneur en carbone oxydable	Faible-moyen	Moyen	Moyen
CEC	Faible-moyen	Moyen	Moyen
Teneur en K	Faible	Moyen	Moyen
Teneur en Ca	Faible	Élevée	Élevée-faible
Teneur en Mg	Faible	Élevée	Moyen
Teneur en Mn	Faible	Élevée	Faible
Teneur en Zn	Moyenne	Faible	Élevée
Teneur en P	Moyenne	Faible	Élevée-moyenne
Teneur en Cu			Elevée
Teneur en K/(Ca+Mg+K)	Élevée	Faible	Élevée-moyenne
Teneur en Ca/(Ca+Mg+K)	Faible	Faible	Élevée-moyenne
Teneur en Mg/(Ca+Mg+K)	Élevée	Élevée	Faible
<b>Paramètres nutritionnels</b>			
Teneur en N	Faible	Moyenne	
Teneur en P		Moyenne	
Teneur en K	Faible	Moyenne-faible	Elevée
Teneur en Ca	Faible	Elevée-moyenne	Moyenne-faible
Teneur en Mg	Faible	Élevée-moyenne	Moyenne-faible
Teneur en Cu			
Teneur en Zn	Moyenne-élevée	Moyenne	Faible
Teneur en Mn	Élevée	Moyenne	Faible
Teneur en K/(K+Ca+Mg)	Variable	Variable	Variable
Teneur en Ca/(K+Ca+Mg)	Variable	Variable	Variable
Teneur en Mg/(K+Ca+Mg)	Variable	Variable	Variable
<b>Paramètres sanitaires</b>			
Mosaïque en tîret	Absente	Observée	Absente
Cercosporiose	Faible	Faible	Faible
<i>Pratylenchus goodeyi</i>	Elevée-moyenne	Moyenne	Elevée-moyenne
<i>Meloidogyne</i>	Faible	Faible	Faible
<i>Helocotylenchus multincinctus</i>	Faible	Faible	Absent
Racine mortes (RM, %)	Variable	Variable	Variable
Nécrose racinaire (NR, %)	Moyen	Moyen-élevé	Moyen-faible
Racines fonctionnelles (RF)	Faible	Moyen	Moyen
<b>Paramètres de productivité</b>			
Poids de régime estimé (PRE)	Faible	Élevé	Élevé
Distance	Moyenne-faible	Moyenne-élevé	Faible
Poids de régime estimé par unité de surface au sol (PRE/S)	Elevé	Moyen-élevé	Elevé



## 5. Discussion

### 5.1. La nutrition minérale du bananier

De nombreuses déficiences minérales ont été diagnostiquées sur base des teneurs critiques trouvées dans la littérature. Nous tenterons à présent de d'identifier les facteurs déterminant l'absorption par le bananier de deux éléments majeurs, à savoir l'azote et le potassium. Le cadre conceptuel suivant est proposé :

**Cadre conceptuel :** L'absorption par la racine d'un élément X donné, reflété par l'analyse foliaire est potentiellement fonction de :

- *L'état sanitaire du système racinaire*, évalué par le pourcentage de racines mortes dénombrées dans le carré 20\*20\*20 (RM%), et le taux de nécrose racinaire (NR%).
- *L'association culturale*, susceptible d'exercer une compétition pour l'eau et les éléments échangeables, est également associée à un labour profond (30 cm) pouvant affecter l'état du système racinaire.
- *Le volume de sol potentiellement exploré par le système racinaire*. En considérant une profondeur non limitante, celui-ci sera estimé par le carré de la distance séparant les plants ( $d^2$ ). Cette donnée est en lien direct avec la compétition pour l'eau et la lumière entre les plants de bananiers.
- *La teneur en eau du sol*, en lien avec la structure du sol, évaluée par l'épaisseur du paillage et la teneur en carbone oxydable du sol (C%).
- *La quantité de l'élément X disponible dans le sol*, ainsi que d'autres éléments ayant été rapportés comme ayant un impact sur la nutrition en X. Nous nous référerons au Tableau 33 pour déterminer les interactions soupçonnées.
- *Le pH*. Le pH du sol peut influencer l'efficacité du système racinaire.

$$X_{\text{limbe}} = f(\text{RM}\%, \text{NR}\%, \text{association}, d^2, \text{paillage}, \text{C}\%, X_{\text{sol}}, \text{pH})$$

Où  $X_{\text{limbe}}$  est la teneur de l'élément X dosée dans le limbe interne de la feuille 3.

**Tableau 33. Effet de déficiences minérales en N, P, K, Ca, Mg, Zn, S sur la concentration foliaire d'autres nutriments (source : Lahav, 1995)**

	Elément déficient							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	S
N	-		-		+0			+0
P	+	-	-	+	-	0	+	+
K	+		-	+	+0	0	-	
Ca	-		+	-	+0	+-		+
Mg	+	-	+	+	-	+		0
Mn			-		+	-		
Cu			+		0			
Zn			0-		0		0	

- : Effet négatif ; + : effet positif ; 0 : absence d'effet

### 5.1.1. L'azote

L'azote total dosé dans le sol est essentiellement de l'azote organique. Nous n'avons aucune information concernant la teneur en azote minérale. La corrélation entre les teneurs en azote total et en carbone organique (C%) dosés dans le sol est positive et très étroite ( $r=0.96$ ). Nous considérerons donc par la suite que la teneur en carbone organique reflète également celle en azote total. Il a été reporté que des déficiences en azote et potassium soient susceptibles de réduire la concentration foliaire en azote (Tableau 31). Le modèle proposé pour expliquer la teneur en azote dosée dans le limbe interne de la feuille 3 est le suivant :

$$N_{\text{limbe}} = f(\text{RM}\%, \text{NR}\%, \text{association}, d^2, \text{paillage}, \text{C}\%, K_{\text{sol}}, \text{pH})$$

Où :

- $N_{\text{limbe}}$  est la teneur en azote dosé dans le limbe interne de la feuille 3, exprimé en % de masse ;
- RM % est le pourcentage de racines mortes (%)
- NR% est le taux de nécrose racinaire (%)
- association correspond à la fraction de bananier échantillonnés sur la parcelle présentant une culture associée dans leur entourage immédiat.
- $d^2$  est le carré de la distance entre les plants de taille/stade comparable, en  $m^2$  ;
- paillage est l'épaisseur moyenne de paillis (cm) ;
- $K_{\text{sol}}$  est la teneur en potassium dosé dans le sol, exprimé en  $mg/100g_{\text{sol}}$

Toutes régions confondues, il apparaît qu'aucune variable ne soit significativement en lien avec la teneur foliaire en azote (Tableau 34).

A Butare, des teneurs élevées en potassium dans le sol augmenteraient très significativement la nutrition azotée (l'incertitude concernant le coefficient multiplicateur est cependant importante), tandis que le pourcentage de racines mortes aurait un impact négatif, bien que non significatif (impact également très faible et entaché d'une incertitude très élevée).

A Kibungo, une élévation de pH aurait un effet néfaste sur la teneur en azote du limbe (effet en moyenne faible et entaché d'une incertitude importante), tandis que le paillage aurait un effet favorable (également très faible et entaché d'une incertitude importante). Le taux d'azote du limbe serait également influencé par la surface disponible, mais non significativement. A Ruhengeri, aucun de ces facteurs potentiels ne semble influencer significativement la teneur en azote du limbe.

**Tableau 34. Variables explicatives du taux d'azote dosé dans le limbe interne de la feuille 3.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Global	0.057	0.14	Association	0.08	-0.08	0.05
Butare	0.03	0.51	K <sub>sol</sub> (mg/100g)	0.034	0.0033	0.0015
Kibungo	0.017	0.44	RM% (%)	0.097	-0.012	0.007
			pH	0.04	-0.15	0.07
			Paillage (cm)	0.051	0.050	0.025
			d <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	0.078	0.021	0.012
Ruhengeri	0.27	0.26	/	/	/	/

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. Association est la fraction de bananier sur la parcelle présentant une culture associée dans son entourage immédiat. RM% est le pourcentage de racines mortes dans le carré 20\*20\*20 cm creusé au pied du plant. Paillage est l'épaisseur moyenne de paillage sur la parcelle. d<sup>2</sup> est le carré de la distance moyenne séparant les plants de la parcelle.

### 5.1.2. Le potassium

Il a été reporté un effet des déficiences en potassium, en azote, en calcium, et en zinc sur la concentration foliaire en potassium. Le modèle proposé est le suivant :

$$K_{\text{limbe}} = f(\text{RM}\%, \text{NR}\%, \text{association}, \text{d}^2, \text{paillage}, \text{C}\%, \text{K}_{\text{sol}}, \text{Ca}_{\text{sol}}, \text{Zn}_{\text{sol}}, \text{pH})$$

Où :

- RM% est le pourcentage de racine morte (%)
- NR% est le taux de nécrose racinaire (%)
- K<sub>limbe</sub> est la teneur en potassium dosée dans le limbe interne de la feuille 3 (g/Kg) ;
- d<sup>2</sup> est le carré de la distance séparant les plants, soit la surface au sol occupé par un plant (m<sup>2</sup>) ;
- paillage est l'épaisseur de paillis (cm) ;
- K<sub>sol</sub>, Ca<sub>sol</sub> sont les teneurs en potassium et calcium dosées dans le sol (mg/100g) ;
- et Zn<sub>sol</sub> est la teneur en zinc dosée dans le sol (mg/kg).

Selon ce modèle, le taux de potassium dans le limbe serait principalement déterminé, dans notre échantillon, par la teneur en potassium dosée dans le sol (Tableau 35). L'association culturale et le pH auraient un impact respectivement négatif et positif, mais non significatif (et donc très incertain). Les éléments dosés dans le sol - autres que le potassium - n'ont pas été inclus dans l'analyse par régions. Celle-ci fait également ressortir, à Butare et Kibungo, une teneur foliaire en potassium essentiellement en lien avec la teneur de cet élément dans le sol. Cette relation n'est cependant pas vérifiée significativement à Ruhengeri où les teneurs dosées dans le sol sont les plus élevées. Cette observation suggère une réponse de type « valeurs seuil » ; la teneur en potassium dans le sol n'étant plus limitante à partir d'une certaine valeur au-dessus de laquelle aucune réponse n'est observée. Un examen graphique de la relation K<sub>sol</sub>-K<sub>limbe</sub> semble confirmer cette hypothèse (Figure 42.1 et 42.2). La valeur seuil se situerait approximativement à 60mg/100g, soit 1.5 meq/100g. La surface au sol aurait un impact positif (non significatif) à Kibungo sur le taux de potassium dans le limbe.

**Tableau 35. Variables explicatives du taux de potassium dosé dans le limbe interne de la feuille 3.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d’une part, et la variable d’autre part que sont sans effet sur la réponse.

<b>K</b>	<b>Pr&gt;F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Variables<sup>(1)</sup></b>	<b>Pr&gt; t </b>	<b>Coefficient</b>	<b>Ecart-type</b>
Global	<0.0001	0.46	K <sub>sol</sub> (mg/100g)	<0.0001	0.047	0.009
			Association	0.0815	-1.77	1.01
			pH	0.084	1.55	0.85
Butare	0.0024	0.64	K <sub>sol</sub> (mg/100g)	0.0005	0.11	0.03
Kibungo	<0.0001	0.66	K <sub>sol</sub> (mg/100g)	0.0022	0.060	0.018
			d <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	0.074	0.62	0.34
Ruhengeri	0.0046	0.49	K <sub>sol</sub> (mg/100g)	0.10	0.021	0.012

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. Association est la fraction de bananier sur la parcelle présentant une culture associée dans son entourage immédiat. d<sup>2</sup> est le carré de la distance moyenne séparant les plants de la parcelle.

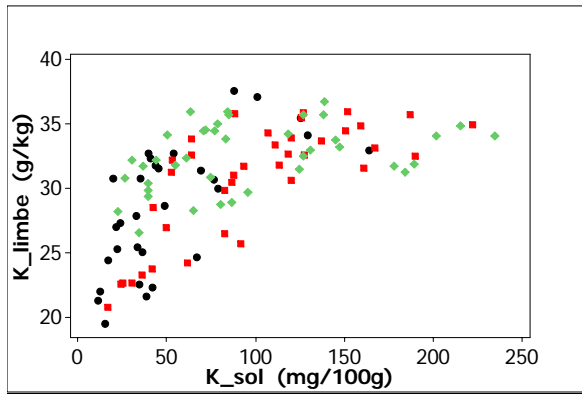


Figure 41.1. Variation des teneurs en potassium dosées dans le limbe (K<sub>limbe</sub>) en fonction de la teneur en potassium dosée dans le sol (K<sub>sol</sub>).

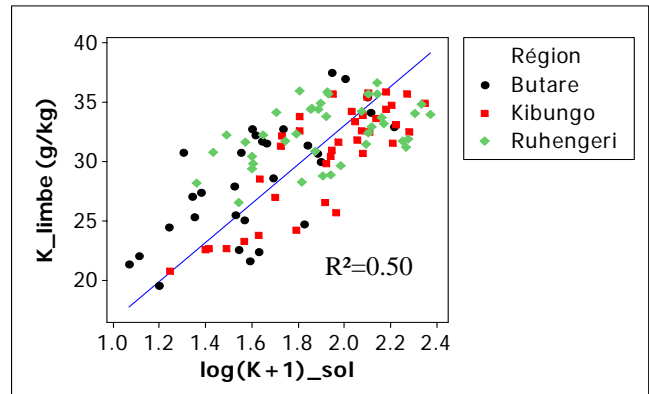


Figure 41.2. Variation des teneurs en potassium dosées dans le limbe (K<sub>limbe</sub>) en fonction du logarithme de la teneur en potassium dosée dans le sol +1 (log(K+1)<sub>sol</sub>). Les unités de la teneur en potassium dans le limbe sont des mg par 100g de sol.

Figure 41. Variation des teneurs en potassium dosées dans le limbe de la feuille 3 en fonction des teneur en potassium dosées dans le sol.

Un autre modèle, prenant en compte les teneurs relatives –et non plus absolues- en potassium et calcium a été testé. Le modèle est le suivant :

$$K_{limbe} = f(RM\%, NR\%, association, d^2, paillage, C\%, K_{sol}/(K_{sol}+Ca_{sol}+Mg_{sol}), Ca_{sol}/(K_{sol}+Ca_{sol}+Mg_{sol}), pH)$$

Où :

- RM% est le pourcentage de racine morte (%)
- NR% est le taux de nécrose racinaire (%)
- K<sub>limbe</sub> est la teneur en potassium dosée dans le limbe interne de la feuille 3 (g/Kg) ;
- d<sup>2</sup> est le carré de la distance séparant les plants d’une parcelle (m<sup>2</sup>) ;
- paillage est l’épaisseur de paillis (cm) ;
- K<sub>sol</sub>, Ca<sub>sol</sub>, Mg<sub>sol</sub> sont les teneurs en potassium et calcium dosées dans le sol (meq/100g) ;

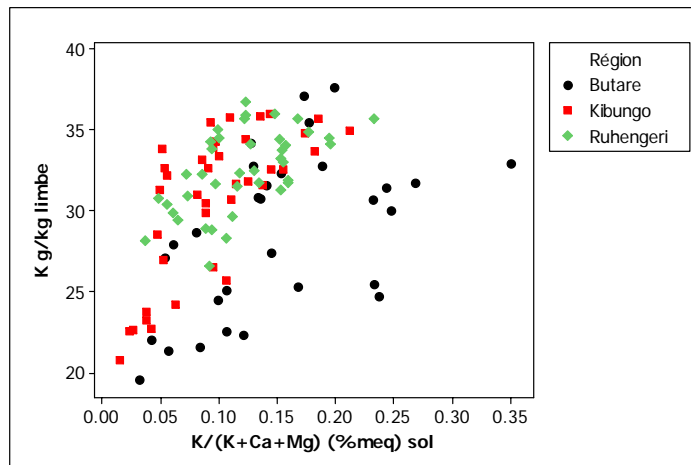
Les résultats de ce modèle (Tableau 36) font ressortir un effet particulièrement important de la teneur relative en potassium, ainsi que du pH dans la nutrition potassique des plants échantillonnés. La valeur relative de la teneur en calcium pourrait avoir un impact positif, mais l'incertitude concernant ce résultat est importante.

**Tableau 36. Variables explicatives du taux de potassium dosé dans le limbe interne de la feuille 3.**  $Pr>F$  et  $Pr>|t|$  correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

<b>K</b>	<b>Pr&gt;F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Variables<sup>(1)</sup></b>	<b>Pr&gt; t </b>	<b>Coefficient</b>	<b>Ecart-type</b>
Global	<0.0001	0.49	$K_{sol}/(K_{sol}+Ca_{sol}+Mg_{sol})$	<0.0001	44.6	7.7
			$Ca_{sol}/(K_{sol}+Ca_{sol}+Mg_{sol})$	0.077	12.8	7.1
			Association	0.076	-1.7	0.9
			pH	<0.0001	2.5	0.6

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un  $Pr>|t|$  inférieur à 0.1. Association est la fraction de bananier sur la parcelle présentant une culture associée dans son entourage immédiat.

La variation de la teneur en potassium dosée dans le limbe interne de la feuille 3 en fonction de la teneur relative du sol en potassium est présentée à la Figure 42. Des différences importantes de réponse semblent exister suivant les régions. Il n'est pas impossible que cette différence soit en lien avec le pH d'extraction des bases échangeables. Nous avons vu précédemment que la teneur en base échangeable avait été surestimée. De plus, on s'attend à ce que la teneur en ferro-magnésiens soit particulièrement surestimée dans les régions de Ruhengeri et de Kibungu (où les pH sont plus élevés et la quantité de minéraux altérable supérieure), une telle surestimation ayant comme corollaire une sous-estimation de la teneur relative en potassium.



**Figure 42. Variation de la teneur en potassium dosée dans le limbe interne de la feuille 3 en fonction de la teneur relative en potassium dosée dans le sol.**

## 5.2. Populations de nématodes dénombrées et état sanitaire du système racinaire

### 5.2.1. Facteurs affectant la présence de nématodes

Comme nous l'avons vu, l'enquête a confirmé la prédominance de l'espèce *Pratylenchus goodeyi* dans les sites d'enquête. Les populations dénombrées (individus par 100g de racine) sont très variables selon les parcelles. Toutes régions confondues, il existe une corrélation hautement significative (quoique relativement faible) entre les populations de *Pratylenchus goodeyi* et *Helicotylenchus multicinctus*, et l'altitude (Tableau 37).

**Tableau 37. Valeur du coefficient de corrélation entre les populations de nématodes dénombrées et l'altitude, tous sites confondus.** (\* probabilité associée au test de Pearson <0.05 ; \*\*<0.01 ; (NS) >0.05.). Les nématodes sont exprimées en nombre d'individus par 100g de racine.

	<i>Pratylenchus goodeyi</i>	<i>Meloidogyne spp</i>	<i>Helicotylenchus multicinctus</i>	<i>Hoplolaimus spp.</i>	Total nématodes
altitude	0.28 **	0.03 (NS)	0.23 *	0.04 (NS)	0.29 **

Outre l'altitude, d'autres facteurs sont susceptibles d'influencer la présence de nématodes. Nous essayerons par la suite de les dégager. Le cadre conceptuel suivant est proposé :

#### Cadre conceptuel :

Les facteurs susceptibles d'influencer la présence de nématodes (en nombre d'individus par 100g de racine) sont les suivants :

- la température du sol, cette dernière étant en lien avec l'altitude et l'épaisseur de paillage, la teneur en carbone du sol (C%) ;
- la présence d'antagonistes, en lien avec un milieu plus riche en matière organique (C%) ;
- le pH du sol ;
- La nutrition en potassium, calcium, manganèse et zinc ainsi que rapporté par Bwamiki (2004) ( $K_{\text{limbe}}$ ,  $Ca_{\text{limbe}}$ ,  $Mn_{\text{limbe}}$ ,  $Zn_{\text{limbe}}$ )
- Des antagonismes entre les différentes espèces de nématodes ont également été suggérés (Luc et Vilardebo, 1961) (autres nématodes).

$$\text{Nématodes} = f(\text{altitude, paillage, C\%, pH, } K_{\text{limbe}}, Ca_{\text{limbe}}, Mn_{\text{limbe}}, Zn_{\text{limbe}}, \text{ autres nématodes})$$

#### a) *Pratylenchus goodeyi*

La régression, toutes régions confondues, fait ressortir un effet stimulant de l'altitude sur les populations de *Pratylenchus goodeyi* (nombre d'individus / 100g de racine) (Tableau 38). L'effet est probablement dû à la température. D'autres facteurs non introduits pourraient cependant intervenir étant donné que les régions se distinguent par des altitudes différentes (Figure 43).

Le taux de paillage pourrait également avoir effet stimulant, mais l'incertitude concernant ce résultat est importante. La nutrition en calcium pourrait avoir un effet répressif important (une augmentation de la teneur en calcium de 1 g/kg augmenterait en moyenne le nombre d'individu

dénombrés de 4500), mais l'incertitude ici encore est élevée. L'effet de la nutrition en zinc semble par contre important et de nature stimulante. Les Figures 44.1 et 44.2 représentent les populations de *Pratylenchus goodeyi* en fonction de la teneur en zinc dosée dans le limbe et dans le sol. Les teneurs foliaires élevées en zinc étant peu nombreuses, un faible nombre d'échantillons est susceptible d'avoir généré un biais dans la relation entre ces deux variables. Signalons au passage une corrélation non significative entre la teneur en zinc dans le sol et celle dans le limbe ( $r=-0.07$  ;  $p=0.44$ ).

**Tableau 38. Variables « explicatives » des populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées dans les racines échantillonnées.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
global	<0.0001	0.36	Altitude (m)	0.0016	143	44
			Paillage (cm)	0.086	3880	2236
			Zn <sub>limbe</sub> (ppm)	<0.0001	1406	319
			Ca <sub>limbe</sub> (g/kg)	0.044	- 4590	2248
			Mn <sub>limbe</sub> (g/kg)	0.063	- 48	26

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. Paillage est l'épaisseur de paillage. X<sub>limbe</sub> correspond à la teneur de l'élément X dosé dans le limbe interne de la feuille 3.

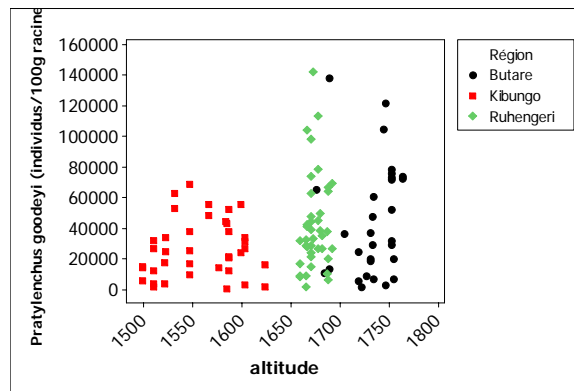


Figure 43. Variation des populations de *Pratylenchus goodeyi* en fonction de l'altitude.

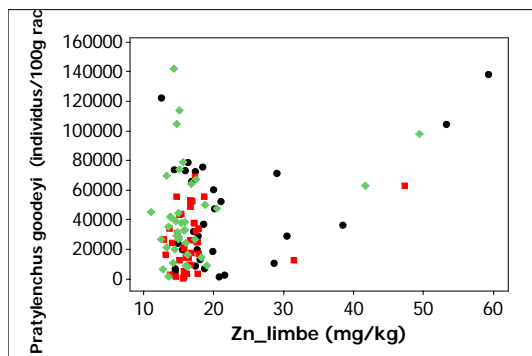


Figure 44.1. Variation de la population de *Pratylenchus goodeyi* en fonction de la teneur foliaire en zinc (Zn<sub>limbe</sub>)

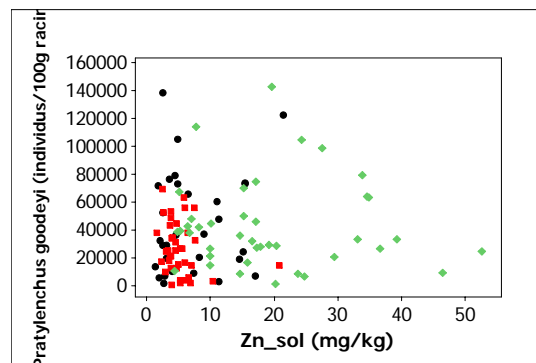


Figure 44.2. Variation de la population de *Pratylenchus goodeyi* en fonction de la teneur en zinc dans le sol (Zn<sub>sol</sub>).

Figure 44. Variation des populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées en fonction des teneurs en Zn dans le limbe interne de la feuille 3 et en fonction des teneurs en Zn dosées dans le sol. Les carrés rouges correspondent à la région de Kibungo, les ronds noirs à la région de Butare, et les losanges verts à la région de Ruhengeri.

L'analyse par région a été effectuée sans prendre en compte les populations d'espèces différentes, et ce dans le but de ne pas multiplier le nombre de facteurs explicatifs. Lorsqu'examinées par région, les populations de *Pratylenchus goodeyi* ne semblent plus influencées par l'altitude, ni le taux de paillage ou la nutrition en calcium et manganèse (Tableau 39). Seule la nutrition en zinc interviendrait dans la détermination du nombre de *Pratylenchus* dénombré à Butare. A Kibungo et Ruhengeri, le modèle s'avère non significatif. A nouveau, l'effet de la nutrition en zinc est probablement induit par un faible nombre d'individus.

**Tableau 39. Variables explicatives, par région, des populations de *Pratylenchus* dénombrées.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Butare	0.0008	0.64	Zn <sub>limbe</sub> (ppm)	0.0007	1930	492
Kibungo	0.48	0.18	/	/	/	/
Ruhengeri	0.34	0.21	/	/	/	/

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. Zn<sub>limbe</sub> est la teneur foliaire en zinc dosée dans le limbe interne de la feuille 3.

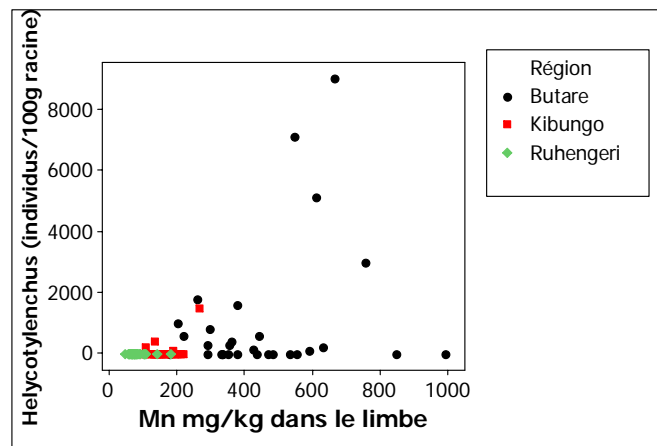
b) *Helicotylenchus*

Le même modèle évalué sur les populations de *Helicotylenchus* fait ressortir un effet très significatif de la nutrition en manganèse (Tableau 40). L'effet est probablement dû à un faible nombre d'individus « tirant » fortement la relation, comme le suggère la Figure 45. L'étude par région, en retirant les populations d'autres nématodes, n'indique aucune variable entrant significativement dans la détermination des populations de *Helicotylenchus* (résultat non présenté).

**Tableau 40. Variables explicatives des populations de *Helicotylenchus multicinctus* dénombrées.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

<i>Helicotylenchus multicinctus</i>	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Global	0.0006	0.24	Mn <sub>limbe</sub> (ppm)	0.0006	3.6	1.0

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. Mn<sub>limbe</sub> est la teneur en Mn dosée dans le limbe interne de la feuille 3.



**Figure 45. Variation de la population de *Helicotylenchus multicinctus* en fonction du taux de manganèse dosé dans le limbe**



### 5.2.2. L'état sanitaire du système racinaire

Les nématodes occasionnent des dégâts racinaires sensés traduire leur présence et leur action. Outre les nématodes, d'autres facteurs interviennent dans la détermination de l'état sanitaire du système racinaire. Le cadre conceptuel suivant est proposé :

Le taux de nécrose racinaire (NR%) et le pourcentage de racines mortes (RM%) sont potentiellement déterminés par :

- Les populations de nématodes *Pratylenchus goodeyi* dénombrées.
- La sénescence « naturelle », en lien avec l'aération et la température du sol ; c'est à dire le paillage et le taux de carbone organique du sol (C%), l'altitude.
- Le pH du sol est susceptible d'influencer la présence d'autres organismes pathogènes responsables de la pourriture des racines.
- L'association culturale est également susceptible d'avoir un impact de par le labour qu'elle implique généralement. D'un autre côté, l'association culturale pourrait diminuer la pression parasitaire.

$NR\%, RM\% = f(\textit{Pratylenchus goodeyi}, \text{paillage}, C\%, \text{altitude}, \text{pH}, \text{association})$

#### a) Le taux de nécrose racinaire (NR%)

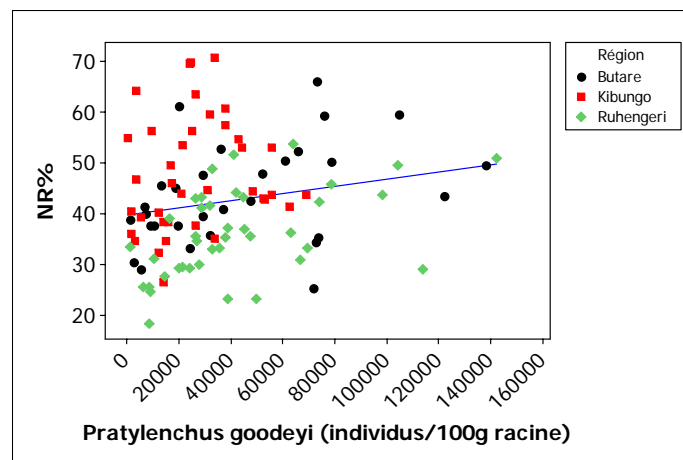
Toutes régions confondues, les populations de *Pratylenchus goodeyi* influenceraient significativement le taux de nécrose racinaire (Tableau 41) Cet effet est cependant en moyenne relativement faible : une augmentation de 10 000 individus par 100g de racine n'augmenterait en moyenne le taux de nécrose racinaire que de un pourcent. La figure 46 représente la variation du taux de nécrose racinaire en fonction des populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrés, toutes régions confondues.

L'altitude aurait un effet négatif (dans le sens d'une diminution) sur le taux de nécrose racinaire probablement en lien avec la distribution des températures. L'altitude pourrait cependant cacher des différences entre les sites n'ayant pas été contrôlées. Le paillage influencerait positivement et significativement (quoique faiblement en moyenne) le taux de nécrose, peut-être en lien avec d'autres parasites ou des différences d'humidité du sol. La teneur du sol en carbone oxydable aurait par contre une influence positive sur l'état sanitaire (faible et non significative). Finalement le pH aurait un effet très marqué, le taux de nécroses diminuant en moyenne de six pourcent par unité de pH additionnelle. Il n'est pas ressorti d'effet de l'association culturale.

**Tableau 41. Facteurs intervenant dans la « détermination » du taux de nécrose racinaire, toutes régions confondues.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

NR	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Global	<0.0001	0.30	<i>Pratylenchus goodeyi</i> (individus /100g racine)	0.0017	0.00011	0.00003
			Paillage (cm)	0.0215	1.91	0.82
			Altitude (m)	<0.001	-0.076	0.018
			C% (%)	0.078	-1.5	0.85
			pH	0.0017	-6.1	1.89

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. C% est la teneur du sol en carbone oxydable (%). Paillage est l'épaisseur de paillage.



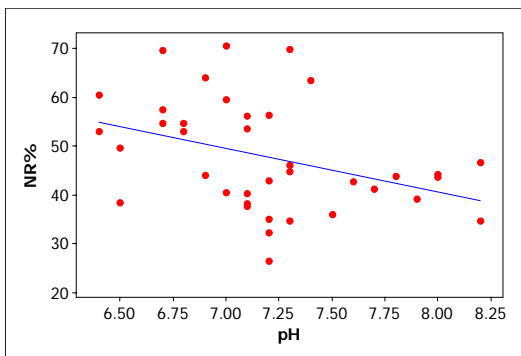
**Figure 46. Variation du taux de nécrose racinaire (NR%, en pourcent) en fonction des populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées.**

Lorsqu'examiné par région, le taux de nécrose serait influencé à Butare principalement par le taux de carbone oxydable dans le sol (Tableau 42). L'effet serait important : en moyenne, une augmentation de la teneur en carbone oxydable de un pourcent augmenterait le taux de nécrose de neuf pourcent. L'incertitude concernant le coefficient multiplicateur est cependant importante. Alors que toutes régions confondues la matière organique du sol aurait un impact réducteur sur le taux de nécrose, à Butare l'inverse se produit ; le taux de matière organique du sol augmenterait le pourcentage de nécrose racinaire. Ce résultat est difficilement interprétable. L'association culturale y diminuerait fortement le taux de nécrose racinaire, bien que non significativement. A Kibungo, ce serait le pH qui interviendrait, le taux de nécrose augmentant avec l'acidité. L'effet serait important : en moyenne une augmentation d'une unité de pH pourrait diminuer le taux de nécrose de dix pourcent. L'incertitude est cependant une fois de plus élevée. Il est d'ailleurs possible que ce résultat soit induit par des variables non prises en compte dans l'analyse. La Figure 46 présente la variation du taux de nécrose racinaire en fonction du pH dans les exploitations de Kibungo. Ce n'est finalement qu'à Ruhengeri que les populations de *Pratylenchus* interviendraient dans la détermination du taux de nécrose racinaire (Tableau 42 et Figure 47).

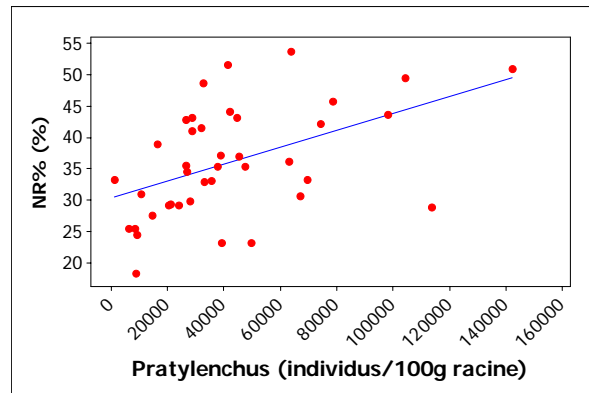
**Tableau 42. Facteurs intervenant dans la détermination du taux de nécrose racinaire, région par région.**  
 $Pr>F$  et  $Pr>|t|$  correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse. C% est la teneur du sol en carbone oxydable (%).

	$Pr>F$	$R^2$	Variables <sup>(1)</sup>	$Pr> t $	Coefficient	Ecart-type
Butare	0.014	0.47	C%	0.021	9.9	4.0
			Association	0.095	-7.5	4.3
Kibungo	0.094	0.28	pH	0.017	-9.9	3.9
Ruhengeri	0.032	0.33	<i>Pratylenchus</i> (individus/100g de racine)	0.0056	0.00013	0.00004

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un  $Pr>|t|$  inférieur à 0.



**Figure 47. Variation du taux de nécrose racinaire (NR%, en pourcent) en fonction du pH dans les parcelles échantillonnées à Kibungo.**



**Figure 48. Variation du taux de nécrose racinaire (NR%) en fonction des populations de *Pratylenchus goodeyi* (Pratylenchus) dans les parcelles échantillonnées à Ruhengeri.**

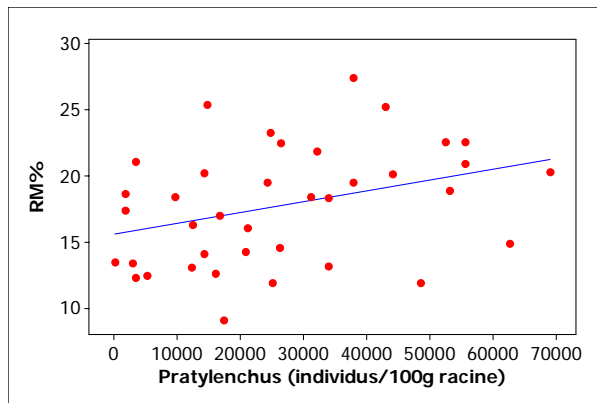
b) Pourcentage de racines mortes (RM%)

Toutes régions confondues, aucune cause parmi celles proposées ne semble intervenir dans la détermination du pourcentage de racines mortes (Tableau 43). Ce n'est qu'à Kibungo que *Pratylenchus goodeyi* serait en lien avec le pourcentage de racines mortes dénombré (Tableau 43 et Figure 49), le coefficient multiplicateur serait cependant relativement faible. Dans cette même région, une augmentation du paillage pourrait diminuer le pourcentage de racines mortes de manière significative, l'incertitude est cependant élevée et le coefficient faible. Une augmentation du pH y serait également susceptible de diminuer le pourcentage de racines mortes (Tableau 43 et Figure 50), mais une fois de plus l'interprétation s'avère malaisée.

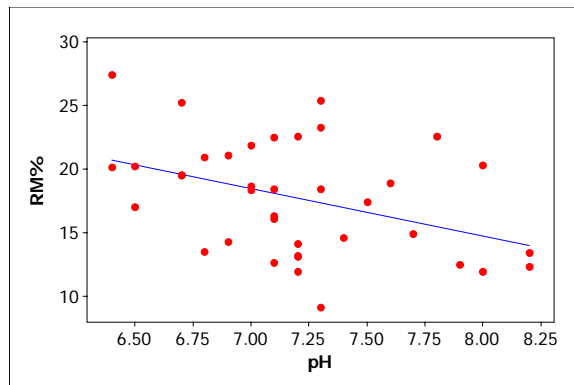
**Tableau 43. Facteurs intervenant dans la détermination du pourcentage de racines mortes**  $Pr>F$  et  $Pr>|t|$  correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

	$Pr>F$	$R^2$	Variables <sup>(1)</sup>	$Pr> t $	Coefficient	Ecart-type
Global	0.60	0.04	/	/	/	/
Butare	0.83	0.11	/	/	/	/
Kibungo	0.0066	0.42	<i>Pratylenchus</i> (individus/100g de racine)	0.017	0.000092	0.000036
			Paillage(cm)	0.044	-2.0	0.9
			pH	0.008	-4.0	1.4
Ruhengeri	0.37	0.17	/	/	/	/

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un  $Pr>|t|$  inférieur à 0. Paillage est l'épaisseur de paillis.



**Figure 49. Variation du pourcentage de racines mortes (RM%) en fonction des populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées (Pratylenchus) dans les parcelles échantillonnées à Kibungo**



**Figure 50. Variation du pourcentage de racines mortes (RM%) en fonction du pH mesuré dans les sols des parcelles échantillonnées à Kibungo.**

Finalement, toutes régions confondues, aucun facteur parmi ceux proposés ne semble être en lien avec le pourcentage de racines mortes observé. Le pH, l'altitude et les populations de *Pratylenchus goodeyi* seraient les principales variables en lien avec le taux de nécrose racinaire. Une augmentation du pH et de l'altitude diminuerait en moyenne le taux de nécrose, tandis que les populations de *Pratylenchus goodeyi* entraîneraient en moyenne une augmentation de celui-ci. Une augmentation de l'altitude diminuera en moyenne la température, et pourrait ainsi diminuer la vitesse de dégradation racinaire. L'effet du pH est difficile à interpréter et est probablement le reflet de variables non contrôlées. Le nombre de *Pratylenchus goodeyi* dénombré dans les racines aurait un impact faible. Les populations de *Pratylenchus goodeyi* seraient influencées favorablement par l'altitude, probablement en lien avec la distribution altitudinale des températures. La nutrition en zinc pourrait favoriser ces nématodes, mais cet effet est très incertain. Il de plus est possible que la nutrition en calcium ait un effet négatif sur ce nématode, mais l'incertitude concernant l'impact de cette variable est importante. Il est de plus difficile de déterminer dans ce cas un lien de causalité unidirectionnel.

A Butare l'état sanitaire du système racinaire ne serait pas en lien direct avec les populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées. L'association culturale pourrait avoir un impact négatif sur le taux de nécrose racinaire, tandis que la teneur en carbone oxydable aurait un impact positif (augmentation du taux de nécrose). Ces effets sont entachés d'une incertitude importante. Les populations de *Pratylenchus* pourraient être affectées par la nutrition en zinc, l'effet étant cependant probablement induit par un faible nombre d'individu et donc peu concluant.

A Kibungo, *Pratylenchus goodeyi* pourrait être en lien avec le pourcentage de racine morte, l'effet étant cependant relativement faible. Des augmentations de l'épaisseur de paillage et du pH pourraient être en lien avec une diminution du pourcentage de racines mortes. L'acidité pourrait de plus avoir un effet positif (dans le sens d'une augmentation) sur le taux de nécrose racinaire. L'incertitude est une fois de plus importante et tous ces résultats sont à prendre avec beaucoup de réserve étant donné le faible nombre d'individus considérés.

A Ruhengeri, les populations de *Pratylenchus goodeyi* pourraient intervenir dans la détermination du taux de nécroses racinaire, mais n'influenceraient pas significativement le pourcentage de racines mortes.

### 5.3. Les rendements

#### 5.3.1. Discussion sur les valeurs obtenues

Nous avons constaté au point 4.6.3 des valeurs moyennes de productivité estimée par unité de surface étonnement élevées dans toutes les régions, bien supérieures à celle estimée, à l'échelle du pays, par la FAO ( $<8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

Les productivités moyennes estimées sont particulièrement étonnantes à Butare (35 t/ha), où des rendements très faibles étaient attendus. Il a été clairement indiqué, au point 3.2.2 que l'échantillonnage n'avait pas comme but premier d'être représentatif du pays ou d'une région. Durant la phase d'échantillonnage, le souci principal au sein d'une même région, outre les considérations pratiques, était la recherche d'une variabilité maximale de performance – c'est la raison de la recherche de zone de type «A», aux bananiers bien portants et de type «B», aux bananiers chétifs -. A Butare, Il est certain que la surface, à l'échelle d'une colline ou de la région, des parcelles de type «A» est nettement moindre que celle des parcelles de type «B». De manière plus réaliste, on pourrait estimer la productivité à l'échelle de la région, *pour la variété considérée*, comme la productivité moyenne des parcelles de type B qui y ont été échantillonnées, soit 21 t/ha. Cette estimation reste cependant très surprenante.

Des incertitudes liées à l'estimation ne sont certes pas à exclure. En particulier la distance qui, mesurée entre des plants de taille comparables et non de stades strictement identiques, a pu être sensiblement sous-estimée. D'autre part le poids de régime pourrait avoir été surestimé ; remarquons à ce titre que l'incertitude concernant son estimation est importante. Cependant, les poids de régimes estimés à Butare, en moyenne de 10.4 kg, ne semblent ni irréalistes, ni exagérés.

Une particularité de Butare vaut la peine d'être mentionnée ici : contrairement au deux autres régions, on y observe un coefficient de corrélation négatif ( $r=-0.44$  ;  $p<0.05$ ) entre le poids de régime estimé (PRE) et la distance (Figure 51). Ce résultat, très surprenant de prime abord, est vraisemblablement le fruit de pratiques culturales ou d'environnements pédologiques distincts selon la densité de plantation. Les distances y sont effectivement corrélées positivement avec l'association culturale ( $r=0.40$  ;  $p<0.05$ ) et négativement avec le paillage ( $r=-0.35$  ;  $p=0.058$ ). On y observe de plus un coefficient de corrélation positif entre la densité de plantation et les caractéristiques chimiques du sol suivantes : pH (0.39 ;  $p<0.05$ ), le potassium (0.32 ; non significatif), le calcium (0.33 ; non significatif), le magnésium (0.46 ;  $p<0.05$ ), le zinc (0.46 ;  $p<0.05$ ). La distance n'y est toutefois pas corrélée significativement à la quantité de carbone oxydable du sol ( $r=-0.17$  ;  $p=0.36$ ). A Butare, il est possible que les bananiers cultivés en densité plus élevée soient généralement mieux paillés avec un taux d'association culturale moindre, probablement des parcelles plus proches de l'habitat, présentant un pH plus élevé ainsi que des teneurs en potassium supérieures. Cette hypothèse est toutefois grossière et ne se confirme que peu au vu des Figures 52 à 55 représentant respectivement les variations du poids de régime estimé à Butare en fonction de la distance entre les plants, et selon les types de parcelles, les classes de paillage, le taux d'association culturale, et le pH des sols.

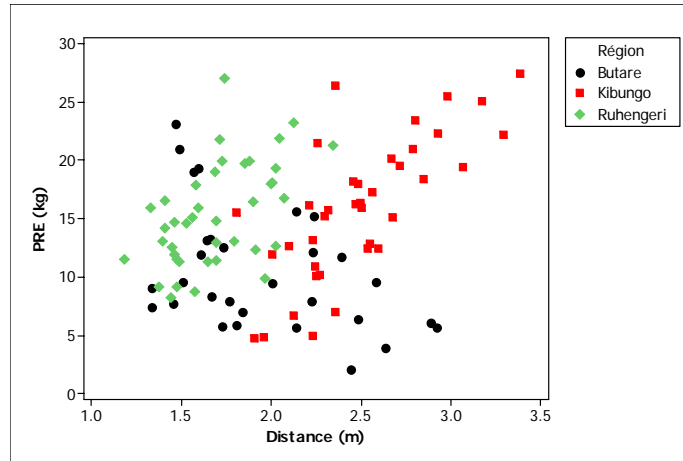


Figure 51. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la distance entre les plants, dans les trois régions d'enquête.

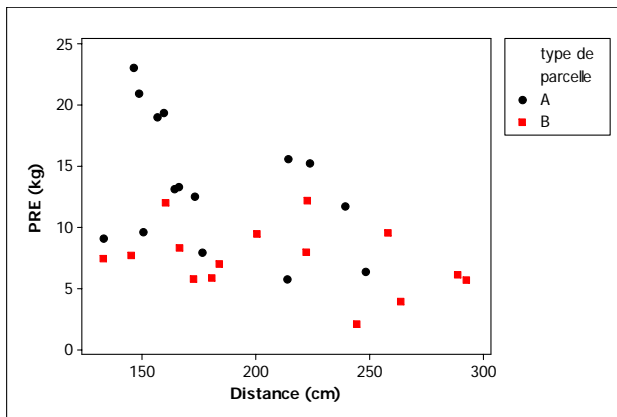


Figure 52. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la distance, selon les deux types de parcelles échantillonnées à Butare. Les parcelles A sont visuellement bien portantes ; les parcelles B sont visuellement chétives.

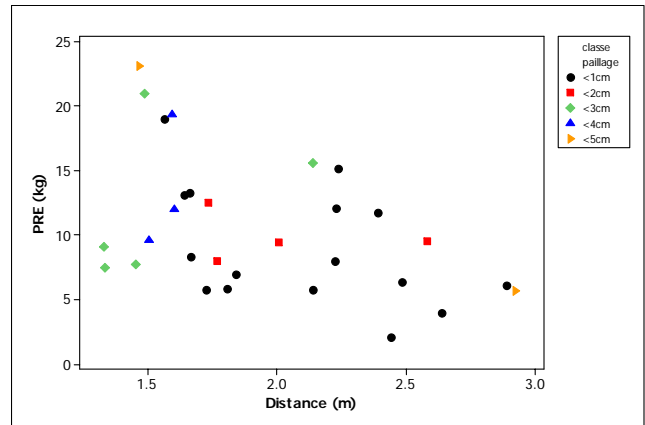


Figure 53. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la distance entre les plants, selon des classes de paillage mesurées à Butare.

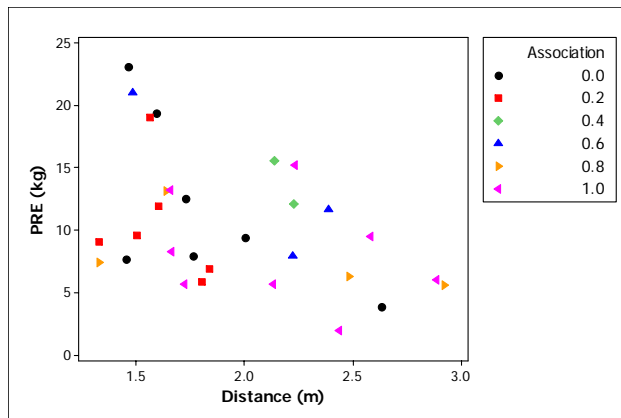


Figure 54. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la distance entre les plants, selon le niveau d'association culturelle à Butare. (Le niveau d'association est la fraction de plants présentant une culture associée dans leur entourage immédiat).

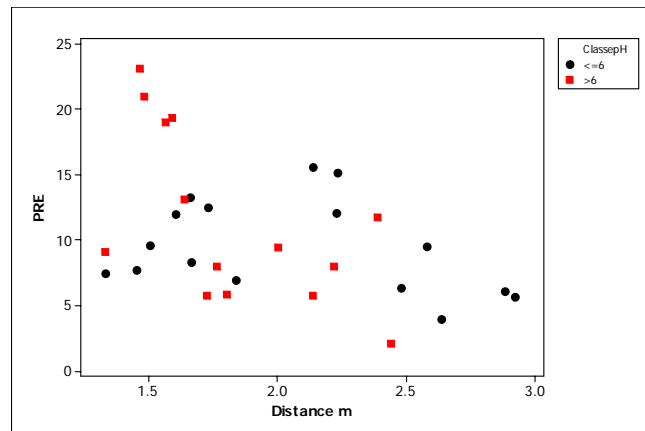


Figure 55. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la distance entre les plants, selon le pH des sols à Butare.

### 5.3.2. Facteurs déterminant la productivité

Afin de dégager les facteurs principaux affectant la productivité (poids de régime estimé et poids de régime estimé par unité de surface), une régression linéaire a été effectuée globalement, toutes régions confondues. Les variables explicatives introduites sont les suivantes :

- L'altitude
- Les pratiques culturales :
  - $d^2$  (carré de la distance séparant les plants, en  $m^2$ ) ;
  - paillage (épaisseur de paillis, en cm) ;
  - association (fraction de bananiers échantillonnés sur la parcelle présentant une culture associée dans leur environnement immédiat)
- Les données relatives au système racinaire :
  - pourcentage de racines mortes (RM%) ;
  - taux de nécrose racinaire (NR%, en %) ;
  - populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées (individus/100g racines)
- Les données pédologiques :
  - pH ;
  - teneur en carbone oxydable (C%, en %),
- Les données nutritionnelles : teneurs foliaires en :
  - azote ( $N_{\text{limbe}}$  (%)) ;
  - phosphore ( $P_{\text{limbe}}$  ( $g.kg^{-1}$ )) ;
  - potassium ( $K_{\text{limbe}}$  ( $g.kg^{-1}$ )) ;
  - calcium ( $Ca_{\text{limbe}}$  ( $g.kg^{-1}$ )) ;
  - magnésium ( $Mg_{\text{limbe}}$  ( $g.kg^{-1}$ )) ;
  - cuivre ( $Cu_{\text{limbe}}$  (ppm)) ;
  - zinc ( $Zn_{\text{limbe}}$  (ppm)) ;
  - manganèse ( $Mn_{\text{limbe}}$  (ppm)).

#### a) Facteurs déterminant le poids de régime estimé (PRE)

Les variables entrant dans la détermination du poids de régime selon le modèle présenté ci-dessus sont présentées au Tableau 44. Parmi les variables relatives aux pratiques culturales, seule la surface au sol interviendrait significativement. Le poids du régime augmenterait (faiblement) à mesure qu'augmente la surface. Le paillage aurait en moyenne un effet positif, mais non significatif et faible. Les populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées ne seraient pas linéairement liées à la production, alors que le pourcentage de racine morte (RM%) serait significativement influent. Une augmentation du pourcentage de racines morte d'un pourcent diminuerait en moyenne le poids de régime de 0.26 kg.

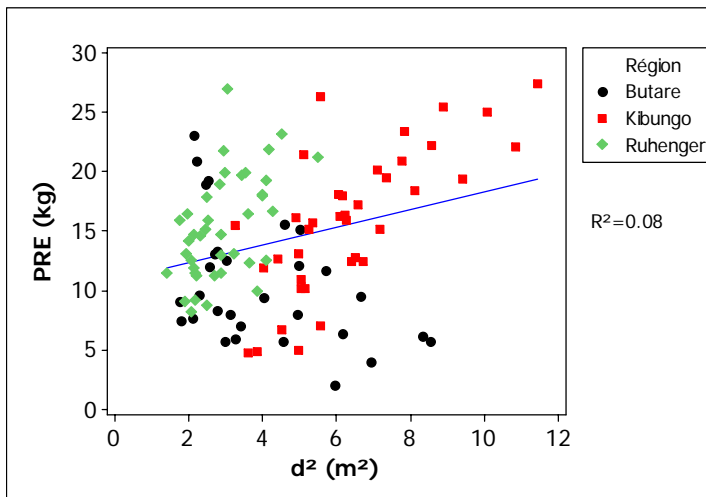
Les teneurs en potassium et en azote dosés dans le limbe interne de la feuille 3 interviendraient très significativement dans la détermination du poids de régime. Une augmentation de la teneur foliaire en potassium de cinq g/kg augmenterait en moyenne, dans l'intervalle de valeurs considéré, le poids de régime de 2.5 kg. La nutrition en cuivre serait également un facteur significatif, à impact potentiel important. Ce résultat pourrait être en lien avec des déficiences importantes en cuivre, ainsi que suggéré par la confrontation des teneurs dosées avec les valeurs critiques se référant à cet élément. Finalement, une augmentation du pH favoriserait des productivités par pieds élevées, bien que non significativement. L'impact

pourrait toutefois être important. On s’attend à ce que l’impact potentiel d’une augmentation de pH soit particulièrement important à Butare où les sols les plus acides ont été échantillonnés. Remarquons que le modèle présenté ne met en évidence que des liens de types linéaires. Les figures 56 à 62 présentent les variations de PRE en fonction de la surface au sol occupée par les bananiers, de l’épaisseur de paillage, du pourcentage de racines mortes, de la teneur en potassium, azote et cuivre dosée dans le limbe interne de la feuille 3, ainsi qu’en fonction du pH du sol.

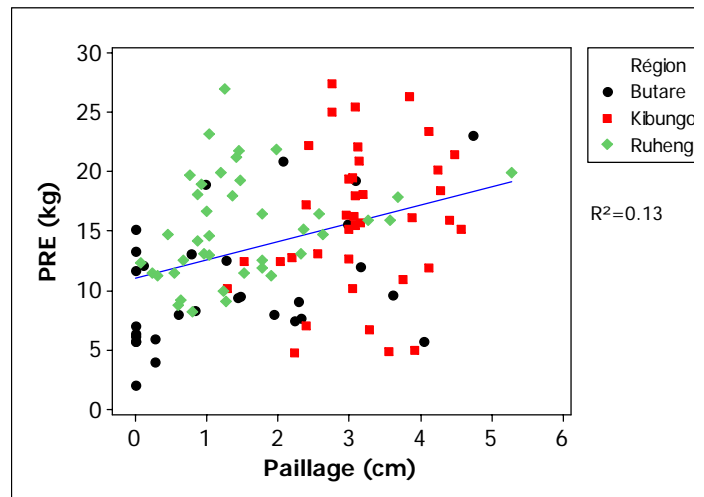
**Tableau 44. Variables explicatives du poids de régime estimé (PRE), toutes régions confondues** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l’hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d’une part, et la variable d’autre part que sont sans effet sur la réponse.

PRE	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Global	<0.0001	0.69	d <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	<0.0001	1.00	0.24
			Paillage (cm)	0.074	0.64	0.36
			RM% (%)	0.0004	- 0.26	0.07
			K <sub>limbe</sub> (g/kg)	0.001	0.50	0.15
			N <sub>limbe</sub> (%)	0.002	7.6	2.4
			Cu <sub>limbe</sub> (ppm)	0.030	1.2	0.5
			pH	0.070	2.0	1.1

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. d<sup>2</sup> est le carré de la distance séparant les plants ; paillage est l’épaisseur de paillage ; RM% est le pourcentage de racines mortes ; X<sub>limbe</sub> est la teneur de l’élément X dosée dans le limbe interne de la feuille 3. pH est le pH du sol.



**Figure 56. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction du carré de la distance séparant les plants (d<sup>2</sup>) dans les trois régions d’enquête.**



**Figure 57. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de l’épaisseur de paillage dans les trois régions d’enquête.**



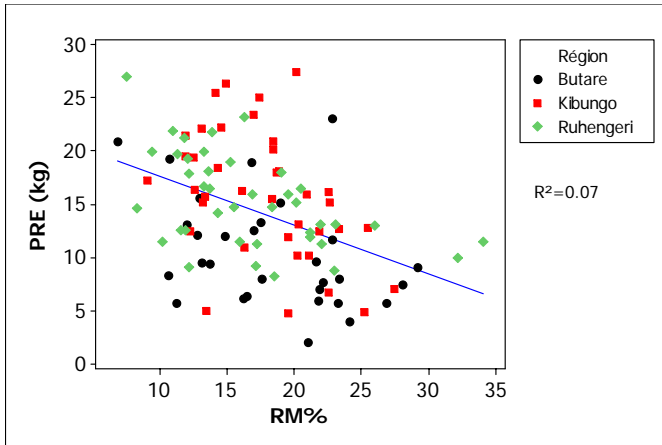


Figure 58. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction du pourcentage de racines mortes (RM%)

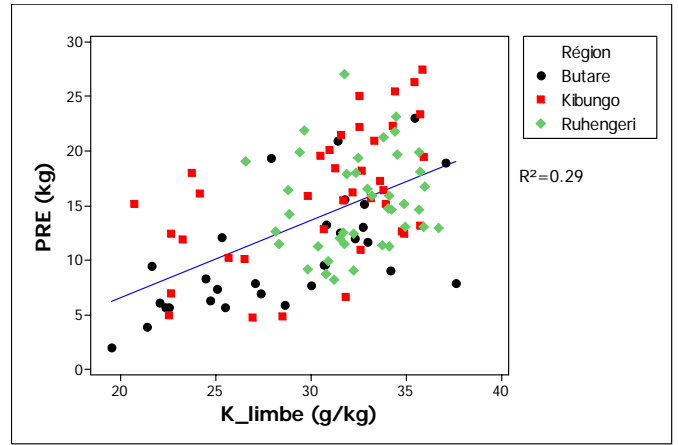


Figure 59. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la teneur en potassium dans le limbe interne de la feuille 3 (K\_limbe).

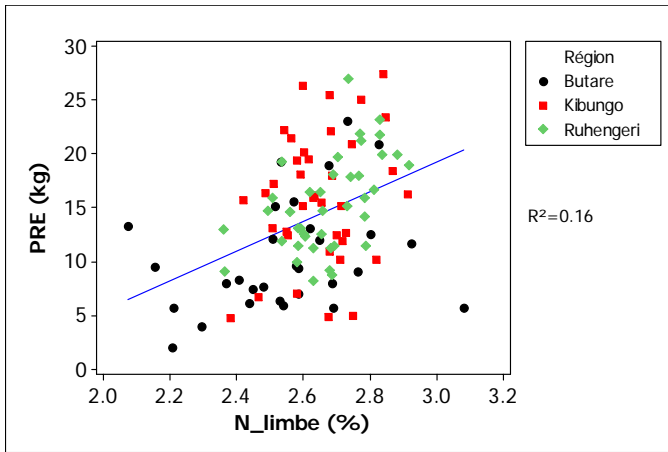


Figure 60. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la teneur en azote dosée dans le limbe interne de la feuille 3 (N\_limbe).

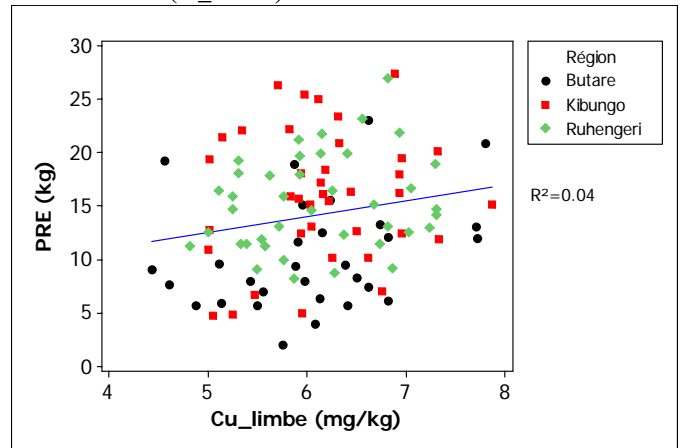


Figure 61. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction de la teneur en cuivre dosé dans le limbe interne de la feuille 3 (Cu\_limbe).

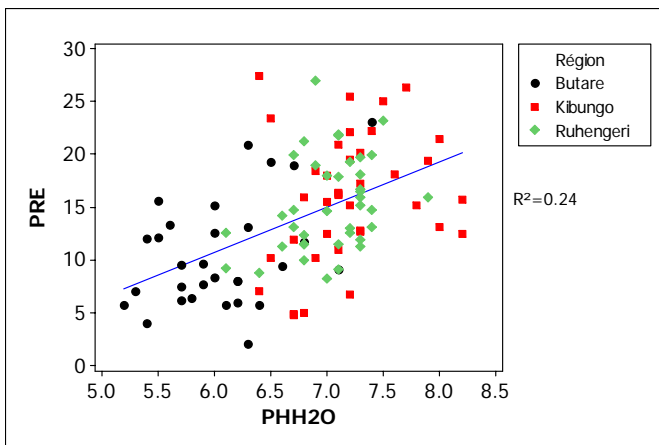


Figure 62. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction du pH du sol.

b) Facteurs déterminant le poids de régime estimé par unité de surface (PRE/S)

Lorsqu'exprimé par unité de surface, l'estimateur de performance serait également influencé significativement par la surface au sol occupée par les bananiers (Tableau 45). Cependant, alors qu'une augmentation de la surface au sol aurait un effet favorable sur le poids de régime estimé (PRE), elle aurait un impact néfaste sur la productivité par unité de surface (PRE/S). Nous reviendrons sur ce point ultérieurement. Le paillage aurait ici un impact favorable significatif : une augmentation de l'épaisseur de paillage de 1 cm augmenterait en moyenne la productivité de 0.3 kg/m<sup>2</sup> soit 3t/ha. L'incertitude sur le coefficient multiplicateur est cependant élevée. Le pourcentage de racines mortes (RM%) aurait quant à lui un impact négatif significatif sur le PRE/S. L'effet pourrait être important ; en moyenne, une augmentation de dix pourcent de racine morte pourrait avoir pour conséquence une diminution de 0.6 kg/m<sup>2</sup>, soit 6t/ha. L'incertitude concernant le coefficient multiplicateur est cependant une fois de plus importante.

La nutrition en azote serait un facteur important et significatif. Curieusement, la nutrition en potassium n'interviendrait plus significativement. La nutrition en magnésium, qui n'entraîne pas significativement dans la détermination du PRE aurait ici un impact significativement néfaste. La différence entre les variables affectant le PRE et le PRE/S est très probablement en lien avec une répartition non aléatoire de ces variables selon la distance entre les plants (Figure 63-65).

Les faibles valeurs de pH auraient un impact négatif et significatif sur la productivité. L'effet serait potentiellement très important.

**Tableau 45. Variables explicatives du poids de régime estimé par unité de surface (PRE/S), toutes régions confondues.** Pr>F et Pr>|t| correspondent à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle ; les hypothèses nulles étant que le modèle d'une part, et la variable d'autre part que sont sans effet sur la réponse.

PRE/S	Pr>F	R <sup>2</sup>	Variables <sup>(1)</sup>	Pr> t	Coefficient	Ecart-type
Global	<0.0001	0.71	d <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	<0.0001	- 0.53	0.09
			Paillage (cm)	0.0281	0.29	0.13
			RM%	0.032	- 0.058	0.026
			N <sub>limbe</sub> (%)	0.015	2.2	0.9
			Cu <sub>limbe</sub> (ppm)	0.025	0.46	0.20
			Mg <sub>limbe</sub> (g/kg)	0.060	- 0.58	0.30
			pH	0.032	0.90	0.41

<sup>(1)</sup>Ne sont présentées ici que les variables présentant un Pr>|t| inférieur à 0.1. . d<sup>2</sup> est le carré de la distance séparant les plants ; paillage est l'épaisseur de paillage ; RM% est le pourcentage de racines mortes ; X<sub>limbe</sub> est la teneur de l'élément X dosée dans le limbe interne de la feuille 3. pH est le pH du sol.

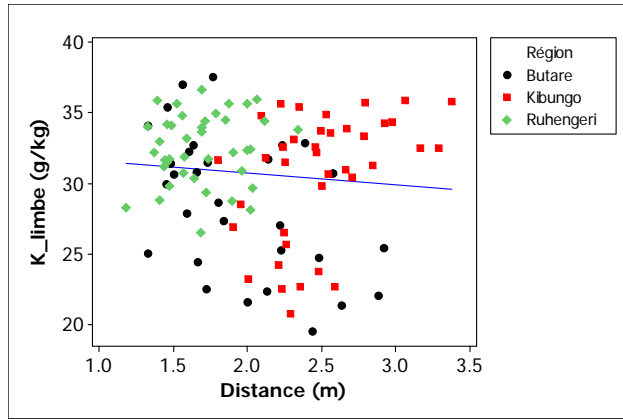


Figure 63. Variation de la teneur en potassium dosée dans le limbe interne de la feuille 3 (K\_limbe) en fonction de la distance entre les plants de bananiers

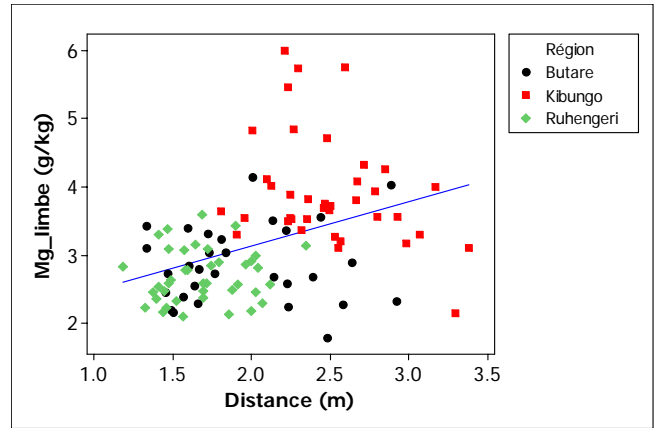


Figure 64. Variation de la teneur en magnésium (Mg\_limbe) dosée dans le limbe interne de la feuille 3 en fonction de la distance entre les plants.

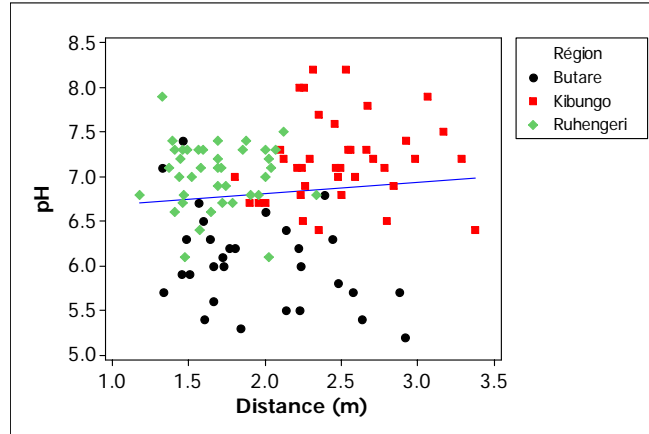


Figure 65. Evolution du pH du sol en fonction de la distance entre les plants de bananiers.

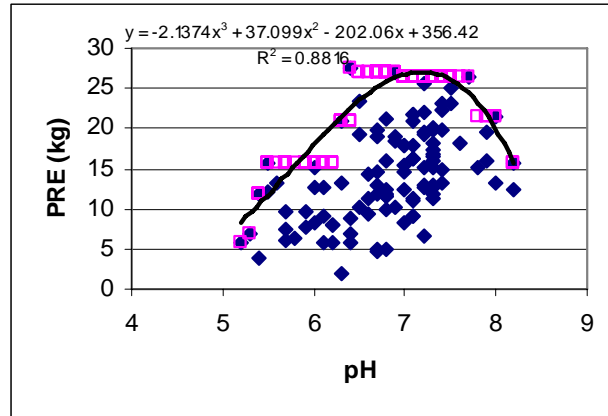
### 5.4. Détection des facteurs limitants la productivité

Une explication de la méthode utilisée a été présentée au point 3.6.3. Les variables introduites dans l'analyse en courbe limite (« *Boundary lines analysis* ») sont les suivantes :

- Les pratiques culturales :
  - Association : fraction des plants échantillonnés sur une parcelle présentant une culture associée dans leur entourage immédiat ;
  - $d^2$  (carré de la distance séparant les plants, en  $m^2$ ) ;
  - Epaisseur de paillis ;
  - Surface des adventices (%)
- Les données relatives au système racinaire :
  - pourcentage de racines mortes;
  - taux de nécrose racinaire ;
  - populations de *Pratylenchus goodeyi* dénombrées (individus/100g racines) ;
- Les données pédologiques :
  - pH ;
  - teneur en carbone oxydable;
  - teneurs en potassium, calcium, magnésium, phosphore ;
  - teneur relative en potassium ( $K/(Ca+Mg+K)$ , exprimés en milliéquivalent par 100g de sol) ;
- Les données nutritionnelles : teneurs foliaires en :
  - Azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, cuivre, zinc et manganèse ;
  - Teneur relative en potassium ( $K/(Ca+Mg+K)$ )

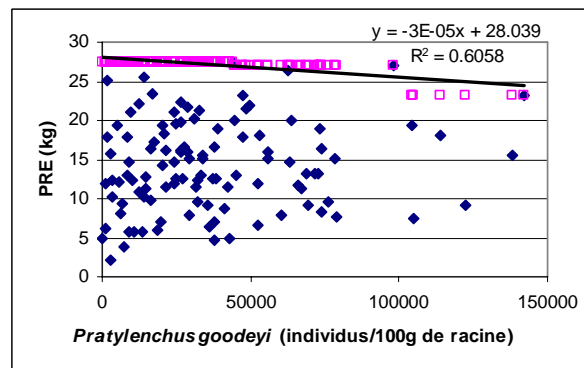
Toutes les fonctions utilisées, ainsi que les graphiques représentant les « courbes limites » sont consultable dans la feuille excel « Analyse en courbes limites » présente en Annexe. Nous nous contenterons ici d'en présenter les plus intéressantes.

La figure 66 représente la courbe limite définie pour la variable pH. La fonction choisie est polynomiale d'ordre trois. Cette courbe suggère que l'effet favorable du pH sur la productivité soit valable jusqu'au pH avoisinant 7 ou 7.5, mais qu'au-delà, une élévation de pH puisse être défavorable. Le nombre de parcelles présentant un pH supérieur à 7.5 est cependant faible.



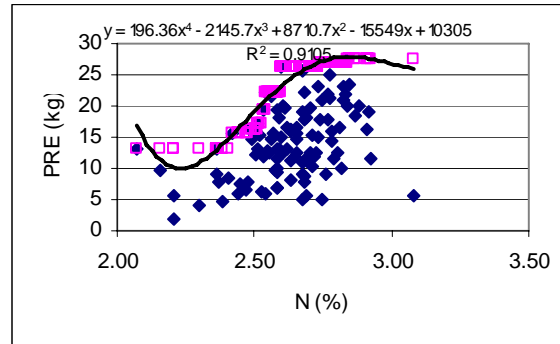
**Figure 66.** Courbe limite de la variable pH du sol. PRE est le poids de régime estimé. Les losanges représentent les parcelles échantillonnées. Les carrés correspondent aux points limites. La courbe est la courbe limite ou « *boundary line* ».

La « courbe limite » de la variable *Pratylenchus* (Figure 67) présente une pente très faible. Des poids de régimes estimés (PRE) élevés sont effectivement observés malgré un nombre important de *Pratylenchus* dénombrés.



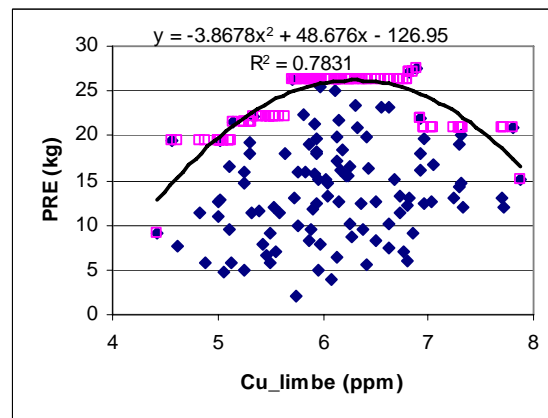
**Figure 67.** Courbe limite de la variable « *Pratylenchus goodeyi* ». PRE est le poids de régime estimé. Les losanges représentent les parcelles échantillonnées. Les carrés correspondent aux points limites. La courbe est la courbe limite ou « *boundary line* ».

La Figure 68 représente la courbe limite de la variable « teneur foliaire en azote » qui a été utilisée dans l'analyse. L'approximation linéaire de degré trois induit une diminution de poids de régime (PRE) lorsque la teneur en azote augmente entre 2.1 et 2.2 %. Cette diminution est non-réaliste. Dans ce type de cas, la fonction de la courbe limite a été restreinte à l'intervalle de valeur dans laquelle la réponse était réaliste. Dans ce cas-ci, nous avons défini la valeur réponse du modèle comme étant constante et égale à 13.3 lorsque la valeur de la teneur en azote était inférieure à 2.4%. La valeur réponse étant à calculer par la fonction lorsque la teneur en azote excède 2.4%.



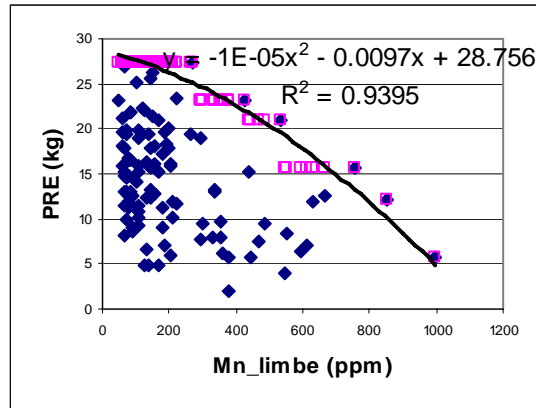
**Figure 68.** Courbe limite de la variable « N » (teneur foliaire en azote dosée dans le limbe interne de la feuille 3). Les losanges représentent les parcelles échantillonnées. PRE est le poids de régime estimé. Les carrés correspondent aux points limites. La courbe est la courbe limite ou « *boundary line* ».

La courbe limite de la teneur foliaire en cuivre est présentée à la Figure 69. Alors que la nutrition en cuivre aurait un impact général positif sur la productivité, l'examen de la courbe limite de cette variable suggère que des teneurs en cuivre élevées puissent être toxiques.



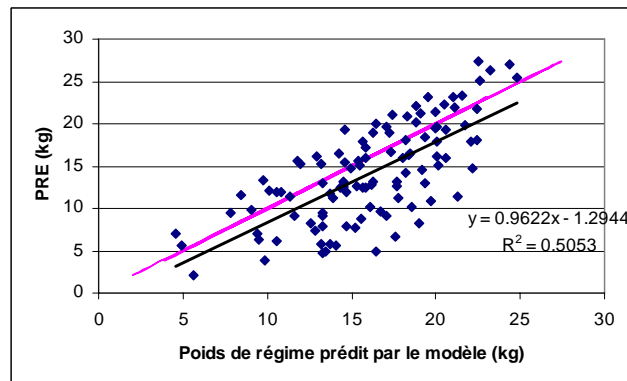
**Figure 69.** Courbe limite de la variable "Cu\_limbe" (teneur foliaire en cuivre, dosée dans le limbe interne de la feuille 3). PRE est le poids de régime estimé. Les losanges représentent les parcelles échantillonnées. Les carrés correspondent aux points limites. La courbe est la courbe limite ou « *boundary line* ».

La courbe limite de la teneur foliaire en manganèse suggère que cet élément puisse être toxique (Figure 70). Toutes les parcelles présentant une teneur foliaire en manganèse supérieure à 270 ppm proviennent cependant de la région de Butare où les poids de régimes estimés étaient en moyenne plus faibles que dans les autres régions. La courbe pourrait dès lors être le résultat d'autres variables. Signalons ici un coefficient de corrélation élevée et significativement négatif entre le pH et la teneur foliaire en manganèse (dosée dans le limbe interne de la feuille 3) dans la région de Butare ( $r=-0.67$  ;  $p<0.0001$ ) de Kibungo ( $r=-0.51$  ;  $p=0.0011$ ), ainsi que dans la région de Ruhengeri ( $r=-0.42$  ;  $p=0.0075$ ). La corrélation entre la teneur en manganèse dosée dans le sol est cependant positive ( $r=0.64$  ;  $p=0.0002$ ) à Butare, et à Kibungo ( $r=0.50$  ;  $p=0.0015$ ). La corrélation entre ces variables n'est pas significative à Ruhengeri. Ces relations sont difficilement interprétables. La nutrition en potassium ne semble pas avoir un lien, car le coefficient entre les teneurs foliaires en potassium et manganèses est significativement négatif dans la régions de Ruhengeri ( $r=-0.67$  ;  $p=0.002$ ) et non significatifs dans les autres régions.



**Figure 70. Courbe limite de la teneur foliaire en manganèse dosée dans le limbe interne de la feuille 3 (Mn\_limbe). PRE est le poids de régime estimé. Les losanges représentent les parcelles échantillonnées. Les carrés correspondent aux points limites. La courbe est la courbe limite ou « *boundary line* ».**

La confrontation entre les valeurs de poids de régime estimées (PRE) et les valeurs prédites par le modèle est présentée graphiquement à la figure 71. La dispersion des individus autour de la droite 1:1 est importante : le modèle présente une précision assez faible. Les résultats présentés par la suite seront à considérer avec réserve.



**Figure 71. Variation du poids de régime estimé (PRE) en fonction du poids de régime prédit par l'analyse BLA. La droite de couleur rose est la droite 1 : 1 ; la droite de couleur noire correspond à l'approximation linéaire du nuage de point.**

Le Tableau 46 présente le nombre de parcelles limitées, selon l'analyse BLA, par les différentes variables introduites. Les cinq parcelles présentant les PRE les plus élevés ont été retirées à cette étape de l'analyse. Parmi ces cinq parcelles, quatre font partie de la région de Kibungo, et une de la région de Ruhengeri.

Selon l'analyse BLA, les variables nutritionnelles et pédologiques seraient, toutes régions confondues, les variables limitantes principales (Tableau 46). Les pratiques culturales ne seraient généralement pas déficitaires, excepté à Ruhengeri où la surface des adventices pourrait constituer une contrainte limitante. Les surfaces occupées par les bananiers y limiteraient également la performance individuelle dans plusieurs parcelles.

L'espèce *Pratylenchus* ne serait un facteur limitant directement la production dans aucune des parcelles échantillonnées. L'état sanitaire des racines ne serait d'ailleurs une contrainte que dans de rares parcelles à Butare (10% des parcelles) et à Ruhengeri (5% des sites). A Kibungo

cependant, dix-huit pourcent des parcelles échantillonnées seraient affectés par un état sanitaire limitant.

Soulignons encore une fois que ces résultats sont à prendre avec énormément de réserve. Le modèle ne s'est effectivement avéré que relativement peu précis. De plus, l'analyse considère que l'impact d'une variable est indépendant de la valeur prise par les autres variables introduites. Finalement, à supposer qu'une variable  $x$  limite la productivité à 2, rien ne dit qu'une autre variable  $y$  ne la limite pas à 2,0001. L'analyse conclura alors qu'il est possible d'augmenter la productivité en réduisant l'impact de  $x$  sans tenir compte de la variable  $y$ .



**Tableau 46. Nombre de parcelles, globalement et par région, limitées - par déficience ou par excès – par différentes variables selon l'analyse en « boundary line » (BLA).** Les indices «<sub>s</sub>» et «<sub>f</sub>» se réfèrent respectivement aux variables pédologiques et nutritives. C<sub>s</sub> est une mesure de la quantité de carbone oxydable par poids de sol. Toutes les lettres majuscules pourvues de l'indice «<sub>s</sub>» représente une masse (de l'élément dont la lettre majuscule est le symbole international) dosée par unité de masse de sol, excepté (K<sub>s</sub>/Ca<sub>s</sub>+Mg<sub>s</sub>) pour lequel toutes les quantités sont exprimées en milliéquivalent-charge par unité de masse de sol. Sadventice correspond à une mesure de la surface des adventices (%), paillage est une mesure de l'épaisseur de paillage, association est une mesure de la fréquence d'association culturale au sein d'une parcelle, d<sup>2</sup> est une mesure de la distance entre les plants d'une parcelle. RM% est le pourcentage de racines mortes, NR% est le taux de nécrose racinaire, Pratylenchus est une mesure du nombre de nématodes de cette espèce dénombrés dans les racines des bananiers. Toutes les lettres majuscules pourvues de l'indice «<sub>f</sub>» représente une masse (de l'élément dont la lettre majuscule est le symbole international) dosée par unité de masse de feuille.

	Global N = 103	Butare N=30		Kibungo N=34		Ruhengeri N=39	
		Déficience	Excès	Déficience	Excès	Déficience	Excès
<b>Données pédologiques</b>	<b>29</b>	<b>10</b>		<b>11</b>		<b>8</b>	
pH	6	4	0	0	2	0	0
C <sub>s</sub>	4	2	0	0	0	2	0
N <sub>s</sub>	2	0	0	1	0	1	0
K <sub>s</sub>	8	3	0	1	0	4	0
K <sub>s</sub> /(Ca <sub>s</sub> +Mg <sub>s</sub> ) (%meq)	1	0	0	1	0	0	0
P <sub>s</sub>	5	0	0	5	0	0	0
Ca <sub>s</sub>	1	0	0	0	0	1	0
Mg <sub>s</sub>	2	1	0	1	0	0	0
<b>Pratiques culturales</b>	<b>21</b>	<b>4</b>		<b>0</b>		<b>17</b>	
Sadventices	7	0	1	0	0	0	6
Paillage	6	2	0	0	0	4	0
Association	0	0	0	0	0	0	0
d <sup>2</sup>	8	1	0	0	0	7	0
<b>Sanitaire</b>	<b>11</b>	<b>3</b>		<b>6</b>		<b>2</b>	
RM%	8	0	3	0	3	0	2
NR%	3	0	0	0	3	0	0
Pratylenchus	0	0	0	0	0	0	0
<b>Données nutritionnelles</b>	<b>42</b>	<b>13</b>		<b>17</b>		<b>12</b>	
N <sub>f</sub>	9	2	0	4	0	3	0
P <sub>f</sub>	3	1	0	2	0	0	0
K <sub>f</sub>	3	1	0	2	0	0	0
K <sub>f</sub> /(Ca <sub>f</sub> +Mg <sub>f</sub> +K <sub>f</sub> )	2	0	0	0	2	0	0
Ca <sub>f</sub>	2	1	0	0	0	0	1
Ca <sub>f</sub> /(Ca <sub>f</sub> +Mg <sub>f</sub> +K <sub>f</sub> )	7	1	2	0	3	0	1
Mg <sub>f</sub>	2	0	0	1	1	0	0
Mg <sub>f</sub> /(Ca <sub>f</sub> +Mg <sub>f</sub> +K <sub>f</sub> )	5	0	0	0	0	5	0
Cu <sub>f</sub>	7	2	1	2	0	1	1
Mn <sub>f</sub>	2	0	2	0	0	0	0
Zn <sub>f</sub>	0	0	0	0	0	0	0

### 5.5. Discussion générale sur la densité de plantation

Nous avons vu précédemment la relation apparente, dans la région de Butare, entre la distance et le poids de régime estimé : lorsque seuls ces paramètres étaient considérés, le poids de régimes semblait diminuer lorsqu'augmentait la distance. Nous avons alors tenté d'expliquer cet effet par d'autres facteurs de production, pédologiques et culturaux. La régression linéaire, effectuée toutes régions confondues, a fourni un résultat attendu à savoir un effet positif de la distance sur le poids de régime estimé. On s'attend en effet logiquement à une relation de type croissante, toutes autres variables étant égales et dans une large gamme de valeur, entre la distance séparant les plants et la productivité par pied (Figure 72). L'effet positif de la distance sur la productivité exprimée par plant peut cependant cacher une relation décroissante entre cette distance et la productivité exprimée par unité de surface (Figure 73). Un tel effet ressort en effet de la régression multiple effectuée sur la productivité par unité de surface (PRE/S). Une gestion rationnelle de la densité de plantation se doit de tenir compte, en monoculture bananière, de son effet sur la productivité par unité de surface. De nombreux facteurs sont susceptibles d'intervenir dans la détermination d'une valeur optimale de densité. Parmi ceux-ci les variables pédologiques et sanitaires sont à priori déterminantes. On s'attend à ce que la densité optimale de plantation diminue à mesure qu'augmente la fertilité chimique du sol (particulièrement en potassium) et que diminue la pression parasitaire.

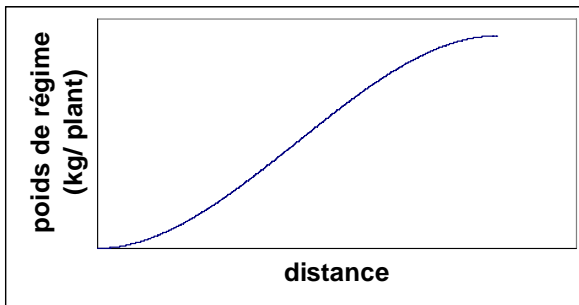


Figure 72. Effet attendu d'une augmentation de la distance entre les plants sur le poids de régime des bananiers, tout autre paramètre étant égal (comparable).

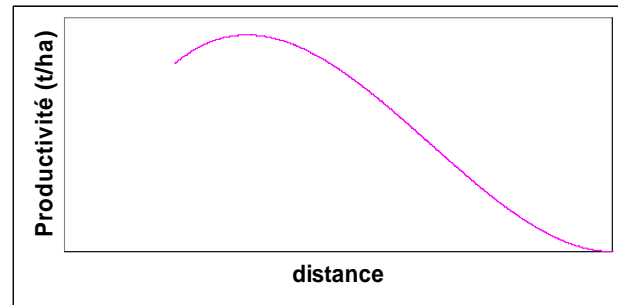


Figure 73. Effet attendu d'une augmentation de la distance entre les plants sur la productivité par unité de surface des bananiers, tout autre paramètre étant égal (comparable).

Sur le terrain, ainsi que nous avons pu nous en rendre compte jusqu'ici, les paramètres de production sont hautement variables, notamment selon les distances mesurées entre plants. Cependant, toute réserve prise, l'examen de la Figure 74 semble suggérer que la densité optimale de plantation puisse être inférieure à Ruhengeri (où les sols sont plus fertiles) qu'à Kibungo. Nous n'aurons pas le temps ici malheureusement de pousser plus loin le raisonnement, mais une étude complémentaire à ce propos pourrait avoir un impact pratique considérable. Le calcul sera évidemment bien plus complexe dans le cas de polyculture. Lorsque des cultures associées sont pratiquées, la densité optimale de plantation se doit de tenir compte de l'augmentation de productivité associée à la (les) culture(s) supplémentaire(s). Nous avons vu que l'association culturale était une pratique particulièrement courante à Butare ; l'évaluation de la productivité dans cette région pourrait en conséquence être sous-estimée.

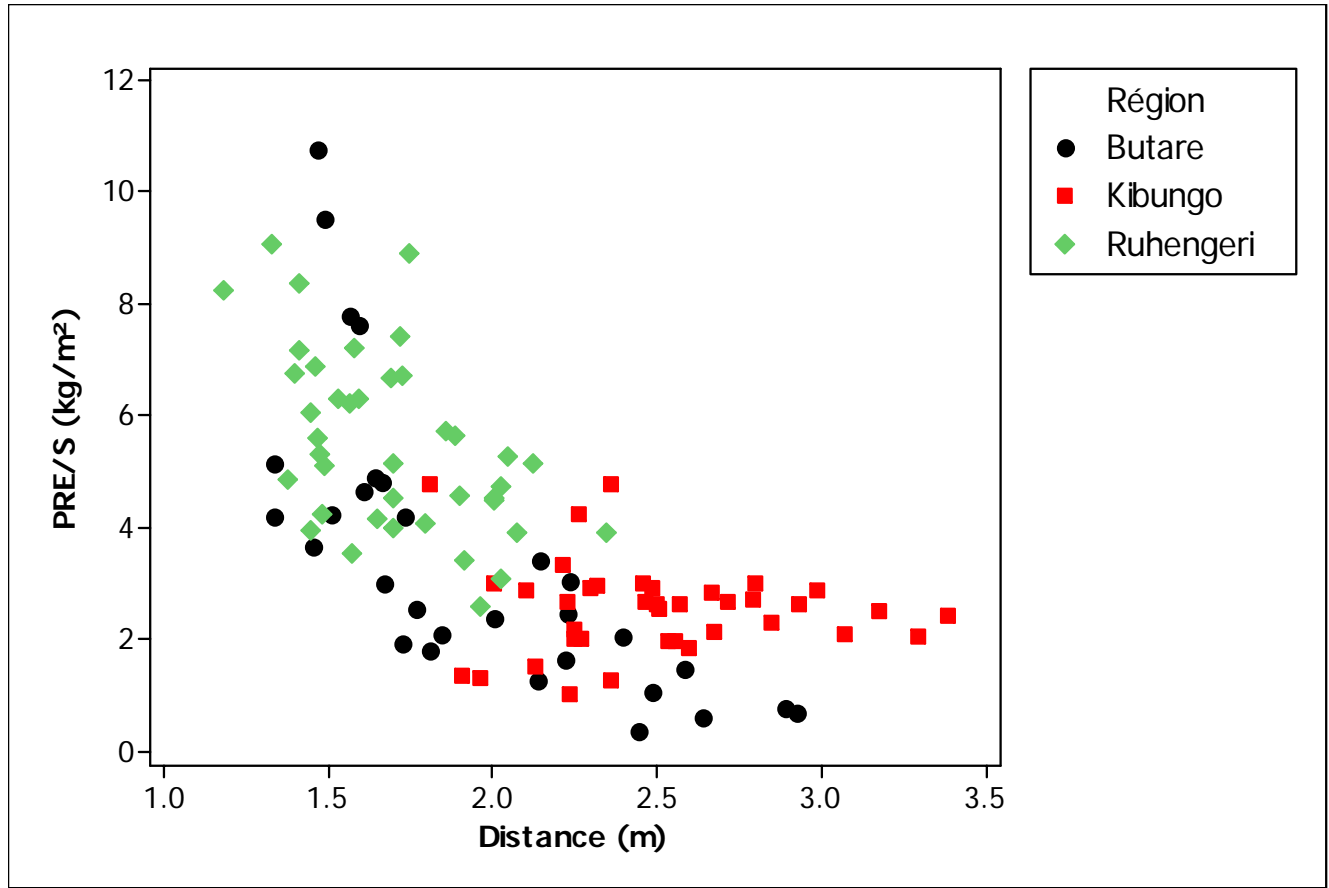


Figure 74. Variation du poids de régime estimé par unité de surface (PRE/S) en fonction de la distance entre les plants, et dans les trois régions d'enquête.

## Conclusion

L'enquête que nous avons réalisée, sur la variété *Intuntu*, a confirmé la prédominance du nématode *Pratylenchus goodeyi* dans les exploitations appartenant aux trois régions d'enquête échantillonnées. L'altitude serait la variable principale déterminant l'importance de l'infection, probablement en lien avec la répartition altitudinale des températures. La nutrition en calcium et en zinc pourrait également avoir un impact sur les populations de ce nématode dénombrées dans les racines. Cet effet demeure cependant à confirmer, de même que le sens du lien hypothétique de causalité.

La responsabilité de *Pratylenchus goodeyi* dans la détermination de l'état sanitaire des racines n'a pas été démontrée de manière claire : les mécanismes impliqués sont probablement complexes, répondant à des dynamiques spatiales et temporelles qu'il ne nous a pas été possible d'appréhender durant notre étude. Il est de plus probable que d'autres pathogènes soient impliqués. L'enquête a toutefois mis en évidence un lien probable entre le pourcentage de racines mortes dénombré et les populations de *Pratylenchus goodeyi*, mais uniquement dans la région de Kibungo, le lien n'étant pas vérifié ni dans les autres régions, ni globalement. Le traitement statistique a également mis en évidence un lien entre le taux de nécrose racinaire observé et les populations de *Pratylenchus goodeyi* toutes régions confondues.

D'autres variables sont également susceptibles d'être en lien avec l'état sanitaire du système racinaire. Parmi celles-ci, le pH et l'altitude semblent, toutes régions confondues, avoir un impact réducteur sur le taux de nécrose. D'autres variables non contrôlées sont toutefois probablement impliquées. L'association culturale pourrait également diminuer le taux de nécrose, ainsi que suggéré par les données collectées dans la région de Butare. Dans cette même région, la teneur en carbone est corrélée positivement avec le taux de nécrose racinaire. Ces effets sont cependant entachés d'une incertitude importante, et restent à vérifier. A Kibungo, les faibles valeurs de pH seraient associées à un pourcentage de racines mortes ainsi qu'à un taux de nécrose racinaire élevé. L'incertitude est une fois de plus importante. Tous ces résultats sont à prendre avec beaucoup de réserve étant donné le faible nombre d'individus considérés. De plus, l'enquête diagnostic est une photographie instantanée d'un système de culture et ne tient que difficilement compte de phénomènes présentant une dynamique temporelle tels que ceux déterminant l'état sanitaire du système racinaire.

Les deux méthodes statistiques appliquées dans ce travail (régressions et analyse en courbe limite) n'ont pas permis de mettre en évidence d'impact direct des populations de *Pratylenchus goodeyi* sur le poids de régime. Par contre, le pourcentage de racines mortes pourrait avoir un impact négatif important sur la productivité : une augmentation du pourcentage de racines mortes de cinq pourcent (dans l'intervalle de valeurs considéré) pourrait diminuer en moyenne le poids du régime de plus d'un kg.

Nos résultats mettent en évidence de fortes contraintes nutritionnelles. Celles-ci sont probablement moindres à Ruhengeri, où les sols, volcaniques récents, présentent une fertilité élevée. Butare se distingue des deux autres régions par des contraintes nutritionnelles particulièrement fortes (acidité du sol, déficiences en N, K). Ces contraintes sont à mettre en parallèle avec la faible fertilité des sols de cette zone.

La nutrition en azote et en potassium serait un facteur déterminant à l'obtention de productions élevées. La nutrition en cuivre pourrait également être un facteur bénéfique ; l'analyse des courbes limites suggère cependant que des teneurs foliaires en cuivre élevées puissent être toxiques. La nutrition en potassium serait en lien direct avec la teneur de cet élément dans le sol, suggérant qu'un apport minéral ou organique de cet élément puisse avoir un impact positif sur la productivité des systèmes de cultures bananières. La réponse à une augmentation de potassium disponible, lorsque celui-ci est présent en quantité importante (>1.5meq environ), ne serait plus généralement attendue. D'autres facteurs interviennent cependant, et des teneurs foliaires faibles en potassium ont pu être observées sur des sols présentant un niveau élevé de cet élément. Ainsi qu'attendu, la nutrition en azote répondrait à des mécanismes plus complexes.

L'effet d'une augmentation de pH ressort globalement comme influençant positivement la productivité par pied, bien que non significativement. On peut toutefois s'attendre à une réponse plus significative sur les sols à pH faibles, notamment dans la région de Butare où les pH les plus faibles ont été mesurés. L'analyse en courbe limite suggère que des valeurs de pH supérieures à 7.5 environs puissent être néfastes.

Le paillage pourrait avoir un effet positif sur l'état sanitaire du système racinaire, ainsi que le suggère l'analyse réalisée sur les parcelles de la région de Kibungo. La caractérisation de l'étendue du système racinaire n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail, mais il est probable que le paillage ait également une influence positive sur le développement racinaire du bananier, ainsi qu'observé dans d'autres études. Dans notre étude, l'épaisseur de paillage ressort comme un facteur influençant globalement et positivement le poids de régime, bien que non significativement. La caractérisation du taux de paillage telle que réalisée dans notre étude est cependant peu précise, et on s'attend à ce qu'une augmentation de la précision de la mesure puisse améliorer la signification statistique de son impact.

Il n'a pas été mis en évidence dans ce travail d'effet néfaste de l'association culturale sur la production bananière. Au contraire, l'association culturale pourrait avoir un impact positif sur l'état sanitaire du système racinaire (diminution du taux de nécrose), ainsi qu'observé à Butaré, bien que l'incertitude concernant cet effet soit importante.

Des densités de plantation élevées auraient un impact négatif sur la productivité par pied, alors que l'effet sur la productivité par unité de surface serait généralement positif.

Les productivités estimées dans les exploitations échantillonnées, de 20t/ha en moyenne, sont étonnamment élevées en comparaison de celles estimées à l'échelle du pays par la FAO (<8t/ha). Notre enquête ne saurait toutefois prétendre à une représentativité à l'échelle du pays.

## Recherches ultérieures

Dans le cadre de notre enquête, certaines variables ont fait l'objet d'une caractérisation peu précise. L'extraction des bases échangeables à pH 4.65 a pu biaiser la caractérisation des nutriments disponibles dans le sol. Une extraction à pH 7 aurait été plus appropriée, et est à conseiller pour les enquêtes ultérieures sur sols peu acides. De plus, le dosage de l'azote minéral aurait été et serait à l'avenir préférable à celui de l'azote total. L'évaluation de la quantité de paillis appliquée pourrait être sensiblement améliorée en pesant la litière (éventuellement après séchage) plutôt qu'en estimant son épaisseur. L'évaluation de la présence de cultures associées est également peu précise, mais cette variable est difficilement caractérisable avec précision étant donné la complexité des systèmes de production

Une estimation quantitative de l'étendue du système racinaire aurait pu être réalisée par extraction d'un cylindre de 25cm de rayon et 80cm de profondeur, méthode proposée par Blomme et al. (2005) s'étant révélée assez précise. Cependant cette caractérisation est fastidieuse et aurait été coûteuse en temps. Un compromis pourrait être atteint à l'avenir en n'effectuant cette extraction que dans un nombre limité de parcelles.

L'estimation de la productivité telle que réalisée dans ce travail se base sur un nombre relativement faible (65) d'individus de la variété *Intuntu* cultivés en densité homogène. La vérification de la validité de l'estimateur proposé en cas de densités variables, mais également de climats et variétés distincts pourrait être entreprise. Les agriculteurs pourraient être aisément impliqués dans de telles recherches les rendant ainsi peu onéreuses.

Bien que ce nématode soit omniprésent dans les exploitations échantillonnées, le présent travail n'a pas mis en évidence d'impact direct de *Pratylenchus goodeyi* sur la productivité des bananeraies de haute altitude. Ce dernier a toutefois un impact très probable sur l'état sanitaire du système racinaire. Une étude réalisée par le Programme Banane de l'ISAR, en condition contrôlée, est en cours et permettra une meilleure évaluation des impacts de ce nématode sur les bananiers de haute altitude.

Les caractéristiques sanitaires du système racinaire se sont avérées importantes dans la détermination de la productivité. Des recherches portant sur les facteurs influençant l'état sanitaire du système racinaire, notamment sur l'impact du pH et de l'association culturale seraient intéressantes. En plus des nématodes, d'autres organismes sont susceptibles d'avoir un impact important sur le système racinaire. La détection et l'évaluation de l'impact des champignons pathogènes et mycorhiziens présent au Rwanda pourraient être réalisées.

Le potassium dosé dans le limbe interne de la feuille trois s'est révélé avoir un effet très significatif sur la productivité par pied. Une augmentation de la productivité des bananeraies suite à l'application de potassium minéral est attendue dans les sites présentant un faible taux de potassium échangeable. Il revient à la recherche de démontrer la rentabilité économique de telles pratiques, ainsi que de préconiser des taux d'application. Il serait également important d'identifier les facteurs, autre que sa disponibilité dans le sol, affectant l'absorption de potassium par la plante.

Finalemant, la recherche des facteurs déterminant la densité de plantation optimale a un impact potentiel très important sur la productivité des systèmes de culture bananière à moyen et long terme.

## **ANNEXES**

Les annexes suivantes sont disponibles sur le CD fourni avec le présent document :

- ANNEXE 1 : Données brutes
- ANNEXE 2 : Données des tests ACP
- ANNEXE 3 : Courbes et fonctions limites
- ANNEXE 4 : Régressions multiples
- ANNEXE 5 : Questionnaire d'interview et fiche de terrain



## Bibliographie

### Livres et articles :

Akhtar M. et Malik A., 2000

Roles of organic soil amendments and soil organisms in the biological control of plant-parasitic nematodes: a review.

Bioresource Technology 74, 35-47

Angeles D.E., Sumner M.E., et Lahav E., 1993

Preliminary dris norms for banana

Journal of Plant Nutrition 16 (6), 1059-1070.

Araya M. et 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

Crop protection 24, 667-676

Back M.A, Haydock P., et Jenkinson P., 2002

Disease complexes involving plant parasitic nematodes and soilborne pathogens. Review article.

Plant Pathology 51, 683-697

Bananuka J.A, Rubaihayo P.R., et Zake J.Y.K., 2000.

Effect of organic mulches on growth, yield components and yield of East African Highland bananas.

Acta Hort. (ISHS) 540, 293-300

Battle-Viera A., et Perez-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 (1), 23-25

Bekunda, M.A., Wortmann, C.S., Bwamiki, D.P., Okwakol, M., 2003.

Potentials and challenges of soil fertility management in the banana-based cropping systems of Eastern Africa. In: Gichuri, M.P.; Bationo, André; Bekunda, M.A.; Goma, H.C.; Mafongoya, P.L.; Mugendi, D.N.; Murwura, H.K.; Nandwa, S.M.; Nyathi, P.; 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. 123-147.

Blomme G., Swennen R. et Tenkouano A., 2003

Evaluation de la profondeur d'enracinement chez le bananier dans deux systèmes de culture

MusAfrica 1 (1) 2-3

Blomme G., Teugels K., Blanckaert I., Sebuwufu G., Swennen R. and Tenkouano A., 2005

Methodologies for root system assessment in bananas and plantains (*Musa* spp.). In : Banana root system: Towards a better understanding for its productive management - Turner, D.W. (ed.); Rosales, F.E. (ed.), p. 43-57

Bridge J., Fogain R., et Speijer P., 1997

Les nematodes parasites des bananiers

Parasites et ravageurs des Musa : fiche technique n°2 (INIBAP) pp 4

Bwamiki, 2004

Role of plant nutrition on growth parameters of banana and the suppression of populations and damage of *Radopholus similis*.

Dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

Carlier J., De Waele D., et Escalant J.-V., 2002

Evaluation globale de la résistance des bananiers à la fusariose, aux maladies foliaires causes par les *Mycosphaerella* spp. et aux nématodes

Guide techniques INIBAP 7, pp 62.

Declercq S., Laloux S., Sarah J.-L. et Delvaux B., 1998

Application of a flowing solution culture technique to study the parasitic fitness of the nematode *R. similis* on banana plantlets under two different nitrogen nutrient regimes.

Plant pathology 47, 580-585

Delvaux G., Lassoudière A., Perrier X. et Marchal J., 1986

Une méthode d'étude des relations sol-plante-techniques culturales par enquête diagnostic. Application à la culture bananière au Cameroun. Synthèse des résultats.

Fruits 41 (6), 359-370

Delvaux B., et Guyot Ph., 1989

Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique.

Fruits 44 (12), 663-647

Delvaux B., Perrier X., et Guyot P., 1990

Diagnostic de la fertilité de systèmes culturaux intensifs en bananeraies à la Martinique.

Fruits 45 (3), 223-236

Delvaux B., 1995

Soils.

In "Bananas and Plantains", S.R. Gowen ed., Chapman and Hall, London, p. 230-257

De Waele D., and Speijer P.R., 1998

Nematode resistance in *Musa*.

In : Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa. Proceedings of a workshop on banana IPM held in Nelspruit, South Africa – 23-28 Novembre 1998, p. 119-126.

Donovan C., Mpysi E., Loveridge S., 2002

Commentaires sur les forces motrices des changements dans l'agriculture paysanne rwandaise 1990-2001 : agriculture et élevage. Note de Synthèse Agro-Economique. Rwanda Food Research

Project/MINAGRI. Août 2002. Numéro 4 F. pp 4.

Dorel M. et Perrier X., 1990

Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. Enquête-diagnostic.

Fruits, 45 (3), 237-244

Dosselaere N., Araya M. and De Waele D., 2003.

Effect of pot volume on root growth, *Radopholus similis* reproductive potential and its damage on bananas. Infomusa 12(1):17-21.

FAO, 2003.

Cadre stratégique général des interventions dans le secteur agricole. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, FAO. Kigali, Avril 2003. pp 90.

Gaidashova S.V., Okech S., van den Berg E., Marais M., Gatarayiha C. M., Ragama P.E., 2004a  
Plant-parasitic nematodes in banana-based farming systems in Rwanda: species profile, distribution and abundance.

African Plant Protection 10 (1), 27-33.

Gaidashova S.V., Gatarayiha C.M., et Uwimpuhwe B., 2004 b

Effect of clean planting material on agronomic parameters and nematode damage.

In : Abstract guide. 1<sup>st</sup> International Congress on Musa: harnessing research to improve livelihoods. 6-9 July 2004, Penang, Malaysia, pp. 193-194.

Godefroy J., 1969.

Le développement des racines du bananier dans divers sols : relation avec la fertilité.

Fruits 24 (2). 101-104

Godefroy J., 1990

Evolution des recherches à l'IRFA/CIRAD sur la fertilité en culture bananière intensive : groupes Cavendish et Gros Michel.

Fruits N° spécial, pp 77-88

Gold C.S., Speijer P.R., and Karamura E.B., 1994

Survey methodologies for banana weevil and nematode damage assesement in Uganda.

African Crop Science Journal 2 (3), 309-321

Gowen S., 1995.

Pests. In : Bananas and plantains. Gowen S. (ed). Chapman and Hall, London. 282-402.

Hugon R., et Picard H., 1988

Relation spatiale entre taches et nécroses racinaires et nématodes endoparasites chez le bananier.

Fruits 43 (9), 491-498

Kangasniemi, J, 1998.

People and bananas on steep slopes: Agricultural intensification and food security under demographic pressure and environmental degradation in Rwanda. Policy Synthesis for MINAGRI and USAID. pp10.

Kashaija I.N., Speijer P.R., Gold C.S, and Gowen S.R., 1994

Occurrence, distribution and abundance of plant parasitic nematodes of Banana in Uganda.

African Crop Science Journal, 2 (1) 99-104.

Kashaija I.N., Fogain R., Speijer P.R., 1998

Habitat management for control of banana nematodes

In : Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa. Proceedings of a workshop on banana IPM held in Nelspruit. Frison, E.A. (ed.); Gold, C.S. (ed.); Karamura, E.B. (ed.); Sikora, R.A. (ed.), pp 109-118

Kelly V., Mpyisi E., Shingiro E., Nyarwaya J.B., 2001

Agricultural Intensification in Rwanda. An Elusive Goal. Fertilizer Use and Conservation Investments. FSRP/DSA Publication No 3E. pp15.

- Kumar N., Krishnamoorthy V., Nalina L., Soorianathasundharam K., 2002  
Un nouveau facteur pour estimer la surface foliaire totale chez le bananier  
Infomusa 11 (2), 42-43
- Lahav, 1995  
Banana nutrition.  
In " Bananas and Plantains", S.R. Gowen ed., Chapman and Hall, London, p. 230-257
- Lassoudière A., 1987  
Enquête diagnostic banane. Préfecture de Kibungo, mission préparatoire.  
ISAR/IRFA-CIRAD 19p.+annexes.
- Lassoudière A., 1989  
Enquête diagnostic sur la culture bananière. Préfecture de Kibungo.  
IRFA-CIRAD, ISAR. 154p.+annexes.
- Loridat Ph., 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 (1), 587-598
- Lossois P., 1963  
Le mécanisme des essais sol-plante. Dans : Journées d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales.  
Fruits 18 (10), 462-463.
- Luc M., et Vilardebo A., 1961  
Les nématodes associés aux bananiers cultivés dans l'Ouest Africain. Première partie.  
Fruits 16 (5), 205-219.
- Martin-Prével P., Montagut G., Godefroy J., et Lacoeyille J., 1965  
Essais sol-plante sur bananiers. Une méthode d'étude de la fertilité.  
Fruits 20 (4), 157-169.
- Martin-Prével P., 1980  
La nutrition minérale du bananier dans le monde. Première partie  
Fruits, 35 (9), 503-518
- McIntyre B.D., Spejjer P.R., Riha S.J., and Kizito F., 2000  
Effects of mulching on biomass, nutrients, and soil water in banana inoculated with nematodes.  
Agronomical Journal 92, 1081-1085
- McIntyre B.D, Gold C.S., Kashaija I.N., 2001  
Effects of legume intercrops on soil-borne pest, biomass, nutrients and soil water in banana.  
Biology and Fertility of Soils 34, 342-348.  
MINAGRI, 1992.
- Carte d'Aptitude des sols du Rwanda à l'échelle 1/250.000. Administration Générale de la Coopération au Développement (Belgique) et Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage (Rwanda).

- MINITERE : Ministère des Terres, de l'Environnement, des Forêts, de l'Eau et des Mines, 2005  
Communication nationale initiale relative à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. pp 120.
- Montagut G., Martin-Prével P., Lacoeyuilhe, J.J., 1965  
Essais sol-plante. Nutrition minérale comparée dans six essais.  
Fruits 20 (8), 398-410
- Mpyisi E., Weber M., Shingiro E., Loveridge S., 2003  
Changes in allocation of land holdings, production and farm size in the Rwandan smallholder sector over the period 1984/1990 to 2002. Rwanda Food Security Research Project/MINAGRI. No 6E. pp 8.
- Musabyimana T., 1988  
Les principaux ravageurs du bananier au Rwanda. Perspectives pour leur contrôle  
In : Nematodes and the Borer Weevil in Banans : Present status and outlook (INIBAP), pp 52-53.
- Namaganda, J.M., Karamura E.B., Namanya P., Gowen S., Bridge J., 2000  
Studies on host range of the banana lesion nematode, *Pratylenchus goodeyi*.  
Acta Hort. (ISSH) 540, 419-425
- Okech S.H.O., Gold C.S., Speijer P., Ssali H., and Karamura E. et al., 2000  
Relationship between soil fertility, banana weevil and nematodes in the east African high land cooking banana in Ntugamo, south western Uganda.  
Acta Hort. (ISHS) 540:505-514
- Okech S.H., Gaidashova S.V., Gold, C.S., Gatarayiha C., Ragama P., 2002  
Banana pests and disease in Rwanda : Observations from a Participatory Rural Appraisal and a Diagnostic Survey. In : Proceedings of Integrated Pest Management symposium, 8-12 September 2002, Kampala, Uganda. Akipala et al. (Eds), NARO/Makerere University, Kampala, pp. 162-170.
- Okech S.H., Gaidashova S.V., Gold C.S., Nyagahungu I., et Musumbu T.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.
- Perrier X. et Delvaux B., 1991  
Une méthodologie de détection et de hiérarchie des facteurs limitant la production à l'échelle régionale. Application à la culture bananière.  
Fruits 46 (3), 213-226.
- Price N.S., 1995  
Banana morphology – part I: roots and rhizomes.  
In " Bananas and Plantains", S.R. Gowen ed., Chapman and Hall, London, p. 179-189.
- Rotimi M.O., 2003  
Incidence des nematodes parasites sur le bananier plantain (*Musa* spp. AAB) au Nigeria et leur effet sur l'état des racines, la croissance des plantes et le rendement.  
InfoMusa 12 (2), p 41

Rufino M., 2003.

On-farm analysis of nematode infestation and soil fertility as constraints to the productivity of banana-based production systems in Uganda. MSc thesis submitted to Wageningen University, Netherlands. Pp 91.

Sikora R.A, et Pocasangre L.E., 2004

Nouvelles technologies pour améliorer la santé des racines et augmenter la production.  
Infomusa 13 (2), 25-29

Smithson, P.C., B.D. McIntyre, C.S. Gold, H. Ssali and I.N. Kashajja. 2001. Nitrogen and potassium fertilizer vs. nematode and weevil effects on yield and foliar nutrient status of banana in Uganda. Nutrient Cycling in Agroecosystem 59, 239-250.

Smithson P.C., McIntyre B.D., Gold C.S., Ssali H., Night G., Okech S., 2004

Potassium and magnesium fertilizers on banana in Uganda : yield, weevil damage, foliar nutrient status and DRIS analysis.

Nutrient cycling in agroecosystems 69, pp 43-49.

Speijer P.R., and Bosch C.H., 1996

Susceptibility of *Musa* cultivars to nematodes in Kagera Region, Tanzania.  
Fruits 51 (4), 217-222

Speijer P.R. and De Waele D., 1997

Screening of *Musa* germplasm for resistance and tolerance to nematodes. Inibap Technical Guides 1. pp 47.

Speijer P.R., and Fogain R., 1998

*Musa* and *Ensete* nematode pest status in selected African countries. In: Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa. Proceedings of a workshop on banana IPM held in Nelspuit, Sout Africa-23-28 Novembre 1998 pp99-108

Speijer P.R., Ssango F., Kajumba C., and Gold C.S., 1998

Optimum sample size for *Pratylenchus goodeyi* (Cobb) density and damage assessment in highland banana (*Musa* AAA) in Uganda  
African Crop Science Journal, 6 (3), 283-291

Speijer P.R., Kajumba C., Ssango F., 1999

East African highland banana production as influenced by nematodes and crop management in Uganda.  
International journal of pest management, 45 (1).

Speijer P.R., and Ssango, 1999

Evaluation of *MUSA* host plant response using nematode densities and damage indices.  
Nematropica 29 (2), 185-192

Speijer P.R. and Kajumba, 2000

Yield loss from parasitic nematodes in East African Highland Banana (*MUSA* spp. AAA).  
Acta. Hort. 540 (ISHS) 453-459

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 (6). 535-541

- Ssali H., McIntyre B.D, Gold C.S., Kashaija I.N., and Kizito F. 2003  
Effects of mulch and mineral fertilizer on crop, weevil and soil quality parameters in highland banana  
Nutrient cycling in Agroecosystem, 65, 141-150
- Ssango F., Speijer P.R., Coyne D.L., De Waele D., 2004  
Path analysis : a novel approach to determine the contribution of nematode damage to East African  
Highland banana (*Musa* spp., AAA) yield loss under two crop management practices in Uganda.  
Field Crops Research 90, 177-187.
- Sundararaju P., 2002  
Variations saisonnières de *Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae* chez certains cultivars de bananier  
Infomusa 11 (1) pp16-18.
- Sys C., van Ranst E., Debaveye J., Bernaert F., 1993  
International Training Centre for Post-Graduate Soil  
Scientists (ITC) University Ghent. Agricultural Publications No. 7, General Administration for  
Development Cooperation, Brussels, Belgium.
- Talwana H.A.L., Speijer P.R., Gold C.S., Swennen R.L., De Waele D., 2003  
A comparison of the effects of nematodes *Radopholus similis* and *Pratylenchus goodeyi* on growth, root  
health and yield of an East African highland cooking banana (*Musa* AAA-group)  
International Journal of Pest Management 49 (3), 199-204.
- Talwana 2003  
Distribution spatiale et effet des nématodes sur le système racinaire et le statut nutritionnel de bananiers en  
Ouganda.  
Infomus 12 (2) p 40
- Turner D.W., Korawis C., Robson A.D., 1989  
Soil analysis and its relationship with leaf analysis and banana yield with special reference of a study at  
Carnarvon, Western Australia.  
Fruits 44(4), 193-203.
- Turner D.W., 1995  
The response of the plant to the environment  
In " Bananas and Plantains", S.R. Gowen ed., Chapman and Hall, London, p.207-230.
- Turner D.W., 2003  
Méthode par intégration pour estimer la surface foliaire totale du bananier  
InfoMusa 12 (2), pp15-17
- Van Asten P.J.A, Gold C.S., Okech S.H., Gaidashova S.V., Tushemereirwe W.K., De Waele D., 2004  
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 (2) pp20-25
- Wortmann C.S., Sengooba T., et Kyamanywa S., 1992  
Banana and bean intercropping : factors affecting bean yield and land use efficiency.  
Expl. Agric. 28, 287-294

Wortmann C.S., Bosch C., Mukandala L., 1993

The banana-bean intercropping system in Kagera region of Tanzania- Results of a diagnostic survey.  
Occasional Publications Series (TZA), 6

Wortmann C.S., Bosch C.H. and Mukandala L., 1994

Foliar nutrient analysis in banana grown in the highland of Eastern Africa.  
Journal of Agronomy and Crop Sciences 172, 223-226.

Yamaguchi Y. and Araki S., 2004

Biomass production of banana plants in the indigenous farming system of the East African Highland. A case of study on the Kamachumu Plateau in northwest Tanzania.  
Agriculture, Ecosystems and Environment 102, 90-111.

Zake Y.K., Bwamiki D.P., Nkwiine C., 2000

Soil management requirement for banana production on the heavy soils around lake Victoria in Uganda  
Acta Hort. (ISSH) 540 pp 285-292



**Sources électroniques (visitées le 15 juillet 2006)**

Aquastat : Monographie sur le Rwanda datant de 2005 :

<http://www.fao.org/AG/AGL/aglw/aquastat/countries/rwanda/indexfra.stm>

Eusoil : Archivage de cartes de sols en Afrique :

[http://eusoiils.jrc.it/esdb\\_archive/EuDASM/Africa/indexes/idx\\_country.htm](http://eusoiils.jrc.it/esdb_archive/EuDASM/Africa/indexes/idx_country.htm)

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ; source de l'image représentant le bananier :

<http://www.fao.org/docrep/X5024F/x5024F01.GIF>

FAOSTAT : Banque de données statistique de la FAO :

<http://faostat.fao.org>

ISAR, Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda : Présentation du programme Banane :

<http://www.isar.cgiar.org/Isarprog/Banana.htm>

René Gomes (1996) : Climat et crise rwandaise par René Gomme (SD dimension)

<http://www.fao.org/sd/frdirect/eian0006.htm>

WIKIPEDIA : l'encyclopédie libre du net :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>

XLSTAT (Addinsoft) : produit d'analyse de données pour Excel :

<http://www.ritme.com/tech/xlstat/t15f.html>