

Université Catholique de Louvain
Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale

Earth and Life Institute
Environmental Sciences

Evaluation agronomique de l'association bananiers- caféiers : Application au Burundi

Thèse présentée par Anaclet Nibasumba en vue de l'obtention du grade de
Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Prof. C. Bielders (UCL, Belgique)
Dr. L. Jassogne (IITA, Ouganda)

Membres du Jury

Président Prof. J. Mahillon (UCL, Belgique)

Lecteurs Prof. P. Baret (UCL, Belgique)
Prof. X. Draye (UCL, Belgique)
Prof. J. Dufey (UCL, Belgique)
Prof. S. Kaboneka (Université du Burundi, Burundi)
Dr. P. van Asten (IITA, Ouganda)

Louvain-la-Neuve, juin 2013

A tous ces petits producteurs qui travaillent dur pour de maigres récoltes...

REMERCIEMENTS

L'aboutissement du présent travail a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes. Il m'est difficile de trouver des mots justes pour exprimer ma reconnaissance et mes sentiments. Mes premiers remerciements vont à l'endroit du professeur Charles Bielders et de Madame Laurence Jassogne, encadreurs de cette thèse. Leur disponibilité et leurs conseils ont orienté positivement mes recherches. Je salue l'enthousiasme avec lequel ils lisaient mes manuscrits et le temps investi particulièrement pendant la phase de finalisation. Je ne pourrais pas oublier le professeur Bruno Delvaux avec qui nous avons commencé ce projet ensemble. Après m'avoir encadré au cours de mon DEA il a été spontané pour m'accompagner dans mon aventure de recherche doctorale. La confiance qu'il a eue en moi m'a permis de m'engager et de changer radicalement l'orientation de ma vie professionnelle et je reste convaincu que le choix que j'ai fait est le meilleur. Je voudrais aussi exprimer mes sincères reconnaissances à l'endroit du professeur Philippe Baret qui m'a encadré pendant la première moitié de mes recherches jusqu'à l'épreuve de confirmation. Son apport a été la fondation de ce travail. Je voudrais ensuite remercier Piet van Asten, chercheur à l'IITA et co-responsable du CIALCA. Il a été mon coach de proximité pendant les visites de terrain au Burundi, lors des différents exposés et les différentes visites en l'Ouganda. Ses conseils, ses discussions ont ouvert grandement mes horizons et m'ont permis d'avancer. Je remercie Philippe Baret, Xavier Draye, Joseph Dufey, Salvator Kaboneka et Piet van Asten, lecteurs de cette thèse. Leurs critiques, leurs conseils et leurs remarques ont permis d'améliorer la version finale de cette thèse. Je remercie infiniment tous les agriculteurs qui m'ont accueilli chez eux et tous ceux que j'ai rencontré pendant mes visites de terrain.

Pendant mon premier séjour pour le DEA, j'ai été accueilli dans l'unité Sol. Je salue le climat humain qui y régnait et qui permettait l'épanouissement scientifique. Je remercie le professeur Joseph Dufey qui m'a reçu le premier jour et qui a confectionné pour moi le programme de cours. A Bruno Delvaux et à Joseph Dufey pour leur encadrement du mémoire de DEA qui a servi de ferment pour la continuation. A toute l'équipe de l'unité sol ; à Françoise,

Séverine, Hugues, Jean Thomas, Anne, Claudine, Patrick je dis grand merci. Aux gens de l'unité GENA en particulier Julie Vandamme et Zion, et de l'unité GERU en particulier Carine, Soter et Jean Baptiste et à mes collègues de bureau Hekkel et shiavash pour leur amitié. Je remercie du fond du cœur Carine et Françoise pour leur investissement au cours des différentes échéances de défense de cette thèse.

Je voudrais remercier sincèrement feu Ambassadeur Salvator Ntihabose qui a soutenu mon projet de thèse au moment où l'association bananiers-caféiers était encore presque taboue. Je remercie également Monsieur Nduwayo Gilbert pour sa bonne collaboration pendant la période d'installation et de suivi des essais. Je remercie aussi Armelle Copus qui a travaillé avec moi pour son mémoire et dont une partie de ses données a été utilisée dans cette thèse. Ma sincère reconnaissance va également à l'endroit de l'équipe qui m'a aidé à collecter les données. Je pense particulièrement à David Mukasa et Elvis Mbiru de l'IITA Ouganda, à Kamana Angélo et Raphael de l'ISABU. Je pense également à François, Edouard, Wilson, Syslvestre, Jeanne Marie et Marc de l'ISABU. Je remercie Soter pour son aide à l'élaboration des cartes, à Léonard pour les dessins, Evariste et Ferdinand pour la saisie des données et à Bachir pour le nettoyage des images.

Mes remerciements vont aussi à Ghislaine, Beatrice, Janet, Marhiam, Antony, tout le staff de l'IITA-Ouganda pour leur accueil pendant mon séjour en Ouganda. A tout le staff de l'ISABU, à tout les burundais de l'UCL et à tous mes amis de l'ISABU et d'ailleurs je dis grandement merci. A toute l'équipe qui a travaillé sur l'étude des causes profondes de cyclicité de production de café au Burundi, Baranyizigiye Oscar, Nduwayo Gilbert, Niyongabo Léopold, Simbashizubwoba Cyriaque et l'équipe de supervision constituée par feu Ambassadeur Salvator Ntihabose et Evariste Ngayempore je dis aussi merci. Je remercie Emmanuel Jukwe, Emily Ouma, Georges Sakwah, Prosper Kanyaruguru, Prosper Niyonkuru, Françoise et Laurene tous de l'équipe CIALCA-Burundi pour l'appui logistique. A Syldie et Tony avec qui j'ai tout partagé je les souhaite plein succès et bonne finalisation.

Cette thèse n'aurait pas été possible sans l'apport des différents bailleurs. Je remercie, l'IITA qui a financé les activités de terrain et l'UCL qui a financé les séjours à Louvain-la-Neuve. Je remercie aussi l'OCIBU qui a aidé dans la collecte des données sur les systèmes de production de café et l'ISABU pour l'appui logistique dans les descentes de terrain.

Enfin, je remercie infiniment ma famille pour son soutien moral. A mon épouse Adèle et nos enfants Donel, Paul, Carel et Chandelle je vous remercie de votre patience.

Les chapitres de cette thèse sont structurés en unités autonomes pour une publication ultérieure. Nous voudrions nous excuser auprès des lecteurs pour le désagrément qui sera causé par la redondance entre les différents chapitres.

SIGLES ET ABREVIATIONS

BRB : Banque de la République du Burundi ;

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

CND: Compositional nutrients diagnosis

CNAC : Confédération Nationale des Associations des Caféiculteurs ;

FAO : Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture

FAOSTAT : Division des statistiques de l’Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture

IGEBU : Institut Géographique du Burundi ;

INTERCAFE : Interprofession de la filière Café ;

IPGRI : International Plant Genetic Ressources Institute

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi ;

ISTEEBU : Institut des statistiques et des Etudes Economiques du Burundi ;

IITA : International Institute of Tropical Agriculture ;

OCIBU : Office du Café du Burundi ;

PAGE : Projet d’Appui à la Gestion Economique ;

PIB : Production Intérieure Brute ;

SOGESTAL : Société de Gestion des Stations de Lavage de café.

TABLE DES MATIERES

SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
RESUME	xiv
0. INTRODUCTION GENERALE.....	1
0.1 Situation générale et problématique	1
0.2 Intérêt de la thèse	4
0.3 Objectifs et hypothèses de travail	6
0.4 Méthodologie	6
0.5 Subdivision du travail.....	9
CHAPITRE 1: CONTEXTE.....	13
1.1 La culture du café	13
1.1.1 Historique de la culture du café	13
1.1.2 Importance économique du café	14
1.1.3 Le système de culture et ses contradictions	15
1.1.4 Les grandes causes de la faible productivité du caféier	17
1.2 La culture du bananier.....	20
1.3 L'association des caféiers avec des bananiers.....	24
CHAPITRE 2 : LES SYSTEMES DE CULTURE DU BANANIER ET DU CAFEIER AU BURUNDI.....	27
2.1 Introduction.....	28
2.2 Matériel et méthodes	32
2.2.1 Choix des sites et des exploitations.....	32
2.2.2 Détermination de l'âge des caféiers et des bananiers et les pratiques culturales	35
2.2.3 Analyse du sol et des feuilles des caféiers et des bananiers.....	37
2.2.4 Détermination du rendement de café et de banane	39
2.2.5 Analyses statistiques des résultats	40
2.3 Résultats	41
2.3.1 Age des caféiers et des bananiers.....	41
2.3.2 Les pratiques culturales réalisées dans les parcelles de caféiers et de bananiers.....	43
2.3.3 Association des cultures avec les caféiers et les bananiers.....	50

2.3.4 Résultats d'analyse du sol dans les parcelles de caféiers et de bananiers.....	54
2.3.5 Analyses CND des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de caféiers et de bananiers.....	56
2.3.6 Le rendement de café et de banane	61
2.4 Discussion des résultats.....	64
2.4.1 Age des caféiers et des bananiers.....	64
2.4.2 Les pratiques culturales	65
2.4.3 Résultats d'analyse de sol et de feuilles des caféiers et des bananiers	68
2.4.4 Production de café et de banane	71
2.5 Conclusions	73
CHAPITRE 3 : INTERACTIONS SOL-PLANTES DANS DES PARCELLES	
ADJACENTES DE BANANIERS ET DE CAFEIERS AU BURUNDI	75
3.1 Introduction.....	76
3.2 Matériel et méthode	80
3.2.1 Choix des sites, des exploitations et des variétés de bananiers et de caféiers	80
3.2.2 Mesures des caractéristiques morphologiques.....	83
3.2.3 Estimation des rendements de bananiers et de caféiers.....	84
3.2.4 Détermination de la biomasse aérienne du plant de bananier.....	87
3.2.5 Echantillonnage des feuilles de bananiers et de caféiers, analyse foliaires et détermination des indices CND (Compositional Nutrient Diagnosis)	87
3.2.6 Mesure des paramètres de gestion des bananiers et des caféiers ...	88
3.2.7 Echantillonnage et analyse de sol.....	89
3.2.8 Analyse des courbes limites et détermination des facteurs limitants	90
3.2.9 Analyse statistique des résultats.....	92
3.3 Résultats	93
3.3.1 Caractéristiques morphologiques des bananiers et des caféiers	93
3.3.2 Résultats d'analyse foliaire et indices CND.....	94
3.3.3 Techniques culturales.....	96
3.3.4 Résultats d'analyse du sol	99
3.3.5 Rendement de café et de banane	100

3.3.6 Les courbes limites et les facteurs limitants.....	101
3.4 Discussion des résultats.....	108
3.4.1 Conduites culturales et leurs impacts sur les teneurs en éléments nutritifs dans le sol et dans les feuilles.....	108
3.4.2 Caractéristiques morphologiques et rendement des bananiers et de caféiers	112
3.4.3 Les facteurs limitant.....	115
3.5 Conclusion.....	116
CHAPITRE 4 : PREDICTION DU POIDS DE CERISES PAR PLANT DANS LES CONDITIONS SOUS-OPTIMALES DE PRODUCTION DE CAFE DU BURUNDI119	
4.1 Introduction.....	120
4.2 Matériel et méthode	124
4.2.1 Description des sites.....	124
4.2.2 Gestion des caféiers.....	125
4.2.3 Collecte des données	126
4.2.4 Approches pour le choix des variables du modèle.....	128
4.2.5 Développement des modèles d'estimation de la production de cerises par plant.....	136
4.2.6 La validation des modèles.....	138
4.3 Les résultats	139
4.3.1 Description statistique du rendement et de ses composantes sur les rameaux, les.....	139
tiges et les plants.....	139
4.3.2 Distribution des cerises sur les nœuds des rameaux et sur les rameaux des tiges	142
4.3.3 Relations et choix des variables des modèles.....	143
4.3.4 Détermination des paramètres des modèle allométrique pour estimer le rendement par plant	148
4.3.6 Validation des modèles	151
4.4 Discussion des résultats.....	153
4.4.1 Les modèles et ses variables	153
4.4.2 Validation des modèles	155
4.4.3 Utilisation des modèles	156
4.5 Conclusion.....	157

CHAPITRE 5 : ETUDE AGRONOMIQUE ET ECONOMIQUE DE	
L'ASSOCIATION BANANIER/JEUNES CAFEIERS	159
5.1 Introduction.....	160
5.2 Méthodologie.....	164
5.2.1 Description des sites.....	164
5.2.2 Installation et entretien des essais.....	166
5.2.3 Mesure des rendements et des caractéristiques de croissance des caféiers et des bananiers.....	170
5.2.4 Détermination de l'ombrage exercé par les bananiers à partir de l'indice de surface foliaire par parcelle	171
5.2.5 Détermination des biomasses et estimation de la répartition des nutriments majeurs dans le compartiment végétal.....	173
5.2.6 Détermination des caractéristiques physico-chimiques du sol et des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles.....	175
5.2.7 Détermination de la rentabilité de l'association bananiers-caféiers.	177
5.2.8 Analyses statistiques	181
5.3 Résultats.....	181
5.3.1 Les caractéristiques de croissance des caféiers et des bananiers..	181
5.3.2 Interaction sol-plante dans l'association des bananiers et des caféiers	190
5.3.3 Rendement de café et de banane.....	193
5.3.4 Répartition des éléments nutritifs majeurs dans le compartiment végétal en fonction de la densité de bananiers et de caféiers.....	197
5.3.5 Productivité de l'association bananiers-caféiers.....	199
5.4.1 Croissance des caféiers en fonction de la densité des bananiers...	203
5.4.2 Teneurs en éléments nutritifs dans le sol et dans les feuilles de caféiers	204
5.4.3 Production de café et de banane	205
5.4.4 Répartition des éléments majeurs dans le compartiment végétal ...	209
5.4.5 Rentabilité de l'association des bananiers avec les caféiers.....	211
5.5 Conclusion.....	212
CHAPITRE 6 : LES EFFETS AGRONOMIQUES ET LA RENTABILITE DE	
L'ASSOCIATION DES CAFEIERS MATURES AVEC DES JEUNESANIERS.	215
6.1 Introduction.....	216

6.2 Méthodologie.....	219
6.2.1 Description des sites.....	219
6.2.2 Installation et entretien des essais.....	221
6.2.3 Détermination des rendements et des caractéristiques morphologiques des caféiers et des bananiers.....	224
6.2.4 Détermination des biomasses et de la répartition des nutriments majeurs dans le compartiment végétal.....	226
6.2.5 Détermination des caractéristiques physico-chimiques du sol et des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles.....	228
6.2.6 Détermination de la rentabilité de l'association bananiers-caféiers.....	230
6.2.7 Analyse statistique des résultats.....	233
6.3 Résultats.....	234
6.3.1 Caractéristiques morphologiques et les biomasses des bananiers et des caféiers.....	234
6.3.2 Biomasse totale aérienne (bananiers + caféiers) et la biomasse de bananier recyclée dans les sites de Gitega et Kayanza.....	238
6.3.3 Caractéristiques physico-chimique du sol et les teneurs en éléments majeurs dans les feuilles de bananiers et de caféiers.....	240
6.3.4 Effet des densités de bananiers et de caféiers sur les rendements et ses composantes.....	241
6.3.5 Répartition des éléments nutritifs majeurs dans le compartiment végétal en fonction de la densité de bananiers et de caféiers.....	243
6.3.6 Rentabilité de l'association des bananiers avec les caféiers.....	246
6.4 Discussions des résultats.....	248
6.4.1 Caractéristiques de croissance.....	248
6.4.2 Caractéristiques physico-chimiques du sol et teneurs en éléments majeurs dans les feuilles des bananiers et des Caféiers.....	249
6.4.3 Rendement de banane et de café.....	251
6.4.4 Répartition des éléments majeurs dans le compartiment végétal ...	252
6.4.5 Rentabilité de l'association bananiers-caféiers.....	253
6.5 Conclusion.....	255
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	257
7.1 Situation de la caféiculture au Burundi	257
7.2 Système de culture et de production de banane et de café	257

7.3 Prédiction de la production des cerises de café par plant.....	259
7.4 Association bananiers-caféiers.....	260
7.5 Réalisation des objectifs et vérification des hypothèses.....	265
7.6 La problématique de diffusion et transférabilité de la technologie.....	266
7.7 Perspectives de recherche.....	269
ANNEXES.....	271
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	295

RESUME

Au Burundi, le café est très important pour l'économie nationale car il procure plus de 80 % des rentrées en devises. Cependant, la culture de caféier présente plusieurs contraintes qui affectent sa production et sa rentabilité. La première contrainte est la faiblesse du rendement de café et sa forte variation bisannuelle. Le paillage recommandé dans la caféiculture est très exigeant en main d'œuvre et en biomasse. Or, la biomasse de paillage est de plus en plus rare. De plus, l'application d'insecticides pour lutter contre la punaise du caféier doit être réalisée pour éviter une chute de rendement et la dépréciation de la qualité du café. Malgré tous ces investissements, le prix octroyé aux caféiculteurs reste peu incitatif et ne couvre pas toujours les dépenses engagées. Pire, ce prix ne permet pas de rémunérer les efforts fournis par les caféiculteurs. Contrairement au caféier, le bananier est une culture moins exigeante en termes de main d'œuvre et d'intrants. La banane est la première production vivrière et la première source de revenus des ménages ruraux. De plus, les résidus de bananiers sont souvent utilisés pour le paillage des caféiers. L'association de ces deux cultures, qui est déjà appliquée dans les systèmes traditionnels en Ouganda et en Tanzanie, pourrait permettre d'augmenter la rentabilité des parcelles de caféiers et de palier en partie au manque de biomasse disponible pour le paillage.

Des analyses des systèmes de production de café et de banane et des essais d'association bananiers-caféiers ont été réalisés avec pour objectifs i) d'étudier les effets réciproques de chaque culture en termes d'ombrage et de prélèvement d'éléments nutritifs sur les performances des caféiers et des bananiers ; ii) d'analyser les effets de ces interactions sur le rendement des caféiers et des bananiers pour des caféiers d'âges différents et iii) d'étudier la rentabilité de l'association des caféiers avec les bananiers par rapport aux monocultures.

Le caféier et le bananier sont des cultures qui sont maintenues parfois pendant plusieurs décennies dans une même parcelle. Une analyse des systèmes de production de café et de banane a été réalisée. Dans la zone d'étude, le caféier

et le bananier sont âgés de plus de 20 ans dans plus de 75 % des exploitations. En plus, la taille de régénération des caféiers, qui doit idéalement être réalisées tous les 7 ans afin de renouveler les tiges, n'est pas régulièrement appliquée dans plus de 50 % des caféières. L'application de pesticides est réalisée uniquement dans les parcelles de caféiers. Le paillage des caféiers est l'opération la mieux respectée par les caféiculteurs mais les quantités de paille apportées sont souvent insuffisantes. De plus, la période d'application est souvent inadéquate car réalisée au milieu de la saison sèche, alors qu'un des objectifs du paillage est de conserver l'eau. Le paillage des bananiers n'a été observé que dans la région naturelle de Mumirwa (zone écologique) sur les trois zones enquêtées. Les caféiers sont principalement associés (par ordre d'importance) avec le taro, le haricot et le bananier. Les bananiers sont associés avec le haricot, le maïs et le manioc loin des habitations, et avec le taro, le haricot et la patate douce près des habitations. Les teneurs en éléments nutritifs dans les parcelles de caféiers dépendent principalement de la région naturelle, alors que pour les bananiers les teneurs en certains éléments nutritifs dépend à la fois de la région naturelle et de la localisation par rapport à l'habitation (surtout à Buyenzi). Ainsi, les teneurs en Mg et K sont statistiquement plus élevées dans les parcelles proches des habitations à Buyenzi. Des carences en N et en Zn chez le caféier sont observées dans toutes les régions mais sont particulièrement prononcées dans la région de Kirimiro. Un antagonisme entre le K et Ca est observé chez les bananiers et les caféiers. Le rendement de café présente une forte cyclicité avec des rendements en café-cerises compris entre 0,8 et 1,3 T/ha en 2005 et entre 2,7 et 3,1 T/ha en 2006 dans les régions de Buyenzi et Kirimiro. Le rendement de banane est plus élevé dans les parcelles proches des habitations et faible dans les parcelles éloignées des habitations.

L'analyse du système « bananiers près des caféiers » permet de montrer des interactions entre le bananier et le caféier dans ce système. Les bananiers bénéficient de la présence des caféiers. En effet, avec les mêmes conditions de sol, les bananiers proches des caféiers ont des caractéristiques morphologiques, des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles, un poids de régime et un rendement plus élevés par rapport aux bananiers éloignés des

caféiers. Le poids du régime était de 8 kg loin des caféiers contre 15 kg près des caféiers ; le rendement de banane était de 10 T/ha loin des caféiers et de 29 T/ha près des caféiers. Les caféiers proches des bananiers bénéficient également de la présence des bananiers car ils sont mieux paillés, principalement au moyen de résidus de bananiers. Cela entraîne une augmentation des valeurs des caractéristiques physico-chimiques dans les sous parcelles de caféiers proches des bananiers par rapport aux caféiers plus éloignés. De plus, le poids de 100 cerises est plus élevé chez les caféiers proches des bananiers, avec une moyenne de 152 g loin des bananiers et 162 g près des bananiers.

La production de café s'échelonne sur plusieurs mois. Ceci rend la détermination du rendement de café fastidieuse, surtout pour des études scientifiques ou du travail d'enquête. Afin de pouvoir estimer la production de cerises par plant avant la récolte de café, trois modèles ont été proposés. Ils utilisent tous 4 composantes de rendement à savoir : le nombre de cerises par nœud fructifère, le nombre de nœuds fructifères par rameau, le nombre de rameaux fructifères par tige et le nombre de tiges fructifères par plant. Tous ces modèles ont été validés avec des données différentes de celles utilisées pour leur élaboration. La qualité de l'estimation dépend du degré de précision avec lequel les 4 composantes de rendement sont déterminées. Le modèle le plus efficace est celui qui utilise le nombre de cerises sur 5 rameaux choisis le long de la tige. Selon les exigences du travail (qualité de l'estimation, temps disponible), on choisira donc l'un ou l'autre modèle. Dans les conditions du Burundi, les modèles proposés sont plus performants que les modèles proposés dans la littérature. Par exemple, les valeurs de R^2 ajusté des modèles proposés sont supérieures à 0,93 alors que ceux de la littérature ont les valeurs de R^2 ajusté inférieures à 0,47

L'étude de l'association des bananiers-caféiers a été réalisée sur des caféiers d'âges différents sur deux sites (Gitega et Kayanza). Pour les jeunes caféiers, l'association avec le bananier permet d'accroître significativement le poids de 100 cerises. Par contre, les bananiers affectent négativement la croissance et le rendement de caféiers. A Gitega, le rendement de café était par exemple de

171 kg/ha dans les parcelles avec forte densité de bananiers contre 675 kg/ha dans les parcelles de caféiers en monoculture. La biomasse aérienne totale (caféier + bananier) est la plus élevée dans les parcelles avec forte densité de bananier. Les teneurs en Mg et en N dans les feuilles de caféiers augmentent avec l'augmentation de l'ombrage, donc, avec l'augmentation de la densité de bananiers. Cependant, la teneur de K diminue avec l'augmentation de l'ombrage. La présence de caféiers n'affecte pas la croissance et le rendement des bananiers. Les quantités d'éléments nutritifs immobilisés, exportés ou recyclés augmentent avec l'augmentation de la densité de bananiers. A Kayanza, l'exportation de K était de 476 kg/ha dans les parcelles avec forte densité de bananiers et de caféiers contre seulement 2,7 kg/ha dans les parcelles avec forte densité de caféiers. Du point de vue des rendements, l'association des bananiers avec les jeunes caféiers est bénéfique car le LER (land equivalent ratio) était toujours supérieur à 1, le LRE étant le plus élevé quand les caféiers sont associés aux bananiers à faible densité. Les parcelles avec bananiers conduisent à des revenus, de la valeur ajoutée et des résultats bruts d'exploitation élevés. A Kayanza, le résultat brut de l'exploitation moyen était de +7393 \$ pour les parcelles avec forte densité de bananiers et de caféiers, contre -3140 \$ pour les parcelles avec forte densité de caféiers sans bananiers.

Quand les bananiers sont associés avec des caféiers matures, l'effet sur la croissance et le rendement de l'un dépend du stade de l'état de développement de l'autre. Quand les caféiers présentent une forte biomasse, ils affectent la croissance et le rendement des bananiers. Par contre, quand les caféiers sont relativement jeunes, les bananiers affectent leur croissance et leur rendement. L'effet des caféiers sur le rendement de banane est cependant faible. Par contre, l'effet des bananiers sur le rendement des caféiers est fort. Ainsi, la chute de rendement de banane dans les parcelles avec forte densité de caféiers est de 7 % à Gitega alors que la chute de rendement de café dans les parcelles avec forte densité de bananiers est de 23 %. Chez les caféiers en production mais de faible hauteur, l'augmentation de la densité des bananiers conduit à une augmentation des teneurs en N et Mg dans les feuilles de caféiers. Par contre, la teneur en K dans les feuilles de caféiers diminue avec

l'augmentation de la densité des bananiers, quel que soit l'âge des caféiers. Dans des sols pauvres en P, l'augmentation de la densité de bananiers affecte négativement la teneur en P dans les feuilles des caféiers. Les quantités d'éléments nutritifs immobilisés ou exportés sont élevées dans les parcelles en association et augmentent avec l'accroissement de la densité de l'une des deux cultures. Les revenus, les valeurs ajoutées et les résultats bruts d'exploitation sont plus élevés dans les parcelles de caféiers en association.

Au Burundi, le café est produit dans des conditions sous-optimales. Sur base des résultats obtenus, l'association avec les bananiers permet d'augmenter les revenus des producteurs et d'apporter du paillis par le recyclage de ses résidus, tout en assurant la pérennité de la caféière du Burundi. Pour assurer la durabilité du système associé, il faudra cependant compenser les éléments nutritifs immobilisés ou exportés par les bananiers. Un suivi à plus long terme sera cependant nécessaire pour confirmer les présents résultats.

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1 Situation générale et problématique

Le caféier et le bananier sont des cultures très importantes pour le Burundi. Le café est la première source de devises (Gaie et Flémal, 1988 ; Ngayempore, 2007 ; Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2008) et la banane la première source d'aliments et de revenus pour les ménages (Ndimurirwo, 1992 ; Faostat, 2012). Cependant, ces deux cultures sont produites dans un environnement socio-économique fragile. La population burundaise augmente rapidement avec un accroissement annuel de 2,8 % (Ministère de l'Intérieur, 2009). En 2008, la densité de population moyenne était de 320 habitants/km² avec des densités pouvant aller jusqu'à 500 habitants/km² dans certaines régions (Ministère de l'Intérieur, 2009). De plus, ce sont les régions caféicoles qui enregistrent la densité démographique la plus élevée (Gaie et Flémal, 1988 ; Drion, 1992 ; Ministère de l'Intérieur, 2009). Cette croissance démographique a conduit à la réduction drastique de la taille des exploitations. La taille moyenne des exploitations est ainsi passée de plus de 1 hectare par ménage en 1973, à 0,7 hectare en 1989 et seulement 0,5 hectare en 2009 (Gouvernement du Burundi, 2011).

Avec cette réduction des terres cultivables, des inquiétudes sur le maintien de la productivité du système café ont été soulevées depuis le début des années 1990 (Drion, 1992). En effet, la réduction de la taille des exploitations agricoles peut atteindre un point critique de non viabilité économique du système. La production vivrière ne permettant plus de nourrir les membres du ménage, les exploitations sont abandonnées en faveur d'une recherche de revenus extérieurs à la ferme (Rugalema et al., 1994). L'insécurité alimentaire est omniprésente au Burundi. Même en prenant un seuil de sécurité alimentaire de 1400 kcal/jour, l'incidence de l'insécurité alimentaire sur toute l'année est comprise entre 16 % et 34%, avec une alimentation composée essentiellement de haricots et de pâte de manioc (Zoyem et al., 2008). L'insécurité alimentaire, qui affecte principalement les enfants, conduit à l'augmentation du nombre d'enfants admis dans des centres nutritionnels (FAO, 2011). Certaines régions

de production de café connaissent des famines récurrentes à cause de la faible production vivrière (Fews net, 2010).

Dans ces conditions, l'extension des parcelles de caféier n'est plus possible au sein des exploitations car toute la superficie est déjà occupée et il est inconcevable que les cultures vivrières soient arrachées au profit du caféier. Par ailleurs, l'extension des superficies emblavées en caféiers réalisée au cours des années 80 avec de gros investissements de l'Etat burundais n'a pas permis d'augmenter la production de café car, en partie, elle s'est faite sur des terres marginales moins productives, les bonnes terres étant déjà occupées par d'autres cultures (Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008 ; Hatungimana, 2008).

Dans un contexte d'agriculture de subsistance, le système de caféier en monoculture n'est possible que quand il a assez d'espace au sein des exploitations pour les cultures vivrières et produire du paillis nécessaire aux caféiers (Hatungimana, 2008). La rentabilité du caféier, qui peut être négative dans certaines conditions selon la région et la taille de l'exploitation (Gahungu, 2008), n'est pas encourageante pour les caféiculteurs. Le déficit de rentabilité est encore plus élevé quand on retranche les subventions de l'Etat, qui concernent principalement les pesticides, les pulvérisateurs, l'encadrement et la fourniture des plants (Gahungu, 2008). Or, avec la privatisation en cours, les subventions données par le gouvernement risquent de diminuer considérablement. En effet, la privatisation de la filière café est avancée, plusieurs stations de lavage et les sociétés de dépalchage de café ont déjà été cédées au secteur privé. L'objectif poursuivi est de permettre la concurrence dans la filière et ainsi d'augmenter le prix octroyé aux producteurs (PAGE, 2008). De plus, le gouvernement n'aura plus à supporter les déficits de la filière, qui se répercutaient sur le trésor public (Ngendakumana, 2008). Cependant, le café restera la culture stratégique pour le Burundi tant qu'il n'y aura pas une autre source de devises pour le remplacer. Ainsi, des efforts supplémentaires sont prévus pour augmenter sa production dans les 5 ans à venir (Gouvernement du Burundi, 2011). La privatisation n'est pas encore complètement achevée et ses retombées positives ne sont pas encore perceptibles par le producteur. Au contraire, en 2010, le prix d'achat du café-

cerise chez les nouveaux acquéreurs privés des stations de lavage était 40 % plus bas que dans les stations de lavage non encore privatisées (Ired, 2011). Par ailleurs, la privatisation n'a pas satisfait les caféiculteurs qui voulaient être impliqués dans l'achat des stations de lavages (CNAC, 2011), et ces derniers ont fait savoir que la production de café ne pourra pas augmenter tant que leurs doléances ne sont pas prises en compte.

Au niveau de la ferme, il existe une compétition entre le caféier et les cultures vivrières en général, et entre le caféier et le bananier en particulier. La première compétition concerne l'espace, comme expliqué ci-dessus. En effet, suite au faible niveau de sécurité alimentaire, l'agriculteur privilégie l'extension des cultures vivrières dont le bananier. La deuxième compétition concerne les soins apportés aux cultures. Actuellement, le caféier fait l'objet de moins de soins par rapport aux autres cultures vivrières car le caféier, qui fut la culture la plus monétarisée au Burundi, l'est maintenant moins suite à la chute du prix du café et à l'augmentation du prix des denrées alimentaires due à la réduction de la production vivrière (Faostat, 2012). Il y a aussi la compétition pour la biomasse morte (résidus de culture). Auparavant, elle était recyclée préférentiellement dans les parcelles caféicoles sous forme de paillis (Cochet, 1996), mais actuellement elle est aussi compostée pour fertiliser les cultures vivrières (Rishirumuhirwa, 2002). Déjà, vers la fin des années 80, une défection des caféiculteurs au profit des cultures vivrières était pressentie (Nyamoya et al., 1986). Pour le paysan burundais, le caféier n'a de valeur que s'il rapporte de l'argent (Nyamoya et al., 1986). En effet, il n'est pas intégré dans la vie socio-culturelle et dans les consommations nationales comme l'est, par exemple, le bananier (Kabonyi, 1985).

Dans ce contexte de faible productivité du caféier, d'exiguïté des exploitations et de compétition entre le caféier et les cultures vivrières, l'étude de l'association du caféier avec d'autres cultures vivrières semble vraiment opportune. Cependant, les recherches ont beaucoup favorisé les cultures non alimentaires comme le *Mucuna*, le *Desmodium* (Gaie et Flémal, 1988 ; Snoek et al., 1993) et le *Leucaena* ssp. (Snoeck, 1995) comme cultures intercalaires. Des recherches sur l'association avec le haricot et la tomate ont été initiées

(Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007), sans que la diffusion s'en suive. L'introduction du bananier dans les parcelles caféicoles était quant à elle interdite (Gaie et Flémal, 1988) car les bananiers étaient jugés trop compétitifs pour les nutriments, l'eau et la lumière (Robinson, 1961 ; Gaie et Flémal, 1988), ce qui aurait eu un effet néfaste sur la production nationale de café.

Par le passé, l'Etat a beaucoup pesé de son poids pour orienter la filière. Le café était alors perçu par les producteurs comme une « culture du gouvernement » (Hatungimana, 2008). L'Etat s'est mis dans un engrenage dont il était difficile de se retirer sans risquer des réductions énormes de production et donc de devises étrangères (Bidou, 1994). Malgré ces contradictions, le désengagement de l'Etat est actuellement bien réel sur le terrain, comme mentionné ci-dessus. Avec ce désengagement, le café est officiellement entre les mains des caféiculteurs et du secteur privé, l'Etat jouant que le rôle de régulateur (Kimonyo et Ntiranyibagira, 2007). Cela devrait permettre à l'agriculteur de faire un libre choix quant à l'utilisation de sa terre, y compris la partie occupée par le caféier. Ainsi, pourra-t-il choisir de cultiver le caféier uniquement, l'associer aux cultures vivrières, voire abandonner totalement la culture de café au profit des cultures vivrières. La situation actuelle de la caféiculture est donc transitoire avec une forte incertitude quant à son avenir.

0.2 Intérêt de la thèse

Comme tout le monde s'accorde sur la faible rentabilité du caféier en monoculture, la tendance actuelle, bien que non officielle, est de trouver des cultures qui peuvent s'associer avec le caféier. Ces cultures peuvent être par exemple le taro, le haricot, le maïs ou le bananier. Comme il n'y a pas de recommandations en la matière, sauf pour le haricot, ces associations risquent de se faire d'une manière incontrôlée et d'affecter négativement la production de café. D'une façon générale, les bananiers gagnent du terrain dans le paysage caféicole burundais. Dans les conditions du Burundi, le bananier pourrait procurer des revenus substantiels à l'agriculteur s'il était associé avec les caféiers (Faostat, 2013 ; van Asten et al., 2011). Le secteur café mise aussi sur une amélioration de la qualité du café pour obtenir un meilleur prix sur le

marché international. Ainsi, toute association doit augmenter ou, au minimum, préserver la qualité de café produit. Or, dans les associations avec ombrage, la qualité du café est souvent meilleure (Muschler, 2001 ; Bosselmann et al., 2009 ; Siles et al., 2010). Ainsi, associer le café avec le bananier pourrait donc lui être favorable au niveau de la qualité.

Dans les pays où l'association caféiers-bananiers existe, cela a été l'initiative des agriculteurs souvent sans recommandations de la recherche (Oduol, 1990 ; Bart, 2007 ; van Asten et al., 2011). Peu d'études agronomiques ont été réalisées sur ce système. Les rares études qui existent n'ont pas été réalisées en conditions contrôlées. Etudier cette association, en faisant une confrontation des résultats du milieu contrôlé et ceux du milieu réel, permettrait donc d'analyser les performances agronomiques des deux cultures et de proposer un compromis entre d'une part les agriculteurs qui veulent introduire toutes sortes de cultures associées dans les parcelles de caféier (voire arracher les caféiers), et d'autre part les acteurs de la filière café et le gouvernement qui penchent toujours en faveur de la monoculture.

L'introduction des bananiers dans les parcelles de caféier fait craindre aux acteurs de la filière café et au gouvernement que les caféiculteurs ne favorisent progressivement le bananier au détriment du caféier. Cependant, si l'association bananier-caféier s'avère rentable, les agriculteurs pourraient maintenir le caféier, ou même introduire du caféier dans leurs parcelles de bananier. Pour ne pas affecter significativement le rendement de café, une bonne gestion du bananier devra être proposée, principalement en matière de densité, de nombre de rejets à garder par plant et d'ombrage exercé par les feuilles de bananier sur le caféier.

0.3 Objectifs et hypothèses de travail

La présente étude est réalisée en prenant le caféier comme culture principale, c'est-à-dire la culture pour laquelle la durabilité doit être assurée. Les principaux objectifs de la thèse sont :

- Etudier les effets réciproques de chaque culture en termes d'ombrage et de prélèvement d'éléments nutritifs sur les performances des caféiers et des bananiers en association dans les conditions du Burundi ;
- Analyser les effets de ces interactions sur le rendement des caféiers et des bananiers pour des caféiers d'âges différents ;
- Etudier la rentabilité de l'association des caféiers avec les bananiers par rapport aux monocultures ;

Les hypothèses de travail sont :

- 1) La présence des bananiers affecte négativement la croissance et les rendements des plants de caféiers, en raison d'une forte compétition pour la lumière et les éléments nutritifs ;
- 2) La qualité de café-cerise est positivement affectée par l'association avec les bananiers.
- 3) L'association du caféier avec le bananier est économiquement plus rentable que le caféier en monoculture dans les conditions du Burundi.

0.4 Méthodologie

Dans ce travail, deux approches ont été utilisées. La première a consisté à faire des enquêtes dans des exploitations agricoles dans les régions de production de café et de banane dans le but de mieux caractériser les systèmes bananier-caféier. Les régions naturelles privilégiées étaient la région naturelle (= zone écologique) de Buyenzi et Kirimiro, les plus productrices de café (Gaie et Flémal, 1988 ; OCIBU, 2008). Cependant, des exploitations ont aussi été choisies dans la région naturelle de Mumirwa (annexe 0.1) pour avoir une vue générale des systèmes de culture dans les principales zones de production de

café et de bananes. Pendant ces enquêtes, des questions ont été posées aux agriculteurs et d'autres paramètres ont été mesurés sur les exploitations. De plus, des échantillons de sol et de feuilles de caféiers et de bananiers ont été prélevés pour des analyses au laboratoire. Cette approche a aussi été utilisée pour l'analyse de l'interaction des bananiers et des caféiers dans les parcelles adjacentes de bananiers et de caféiers par des enquêtes.

La deuxième approche a consisté à installer et assurer le suivi d'essais dans les régions de Buyenzi et Kiriromo où les deux cultures sont les plus pratiquées (Gaie et Flémal, 1988 ; Davis 1995). Plus spécifiquement, les essais ont été installés à Gitega et Kayanza (figure 0.1).

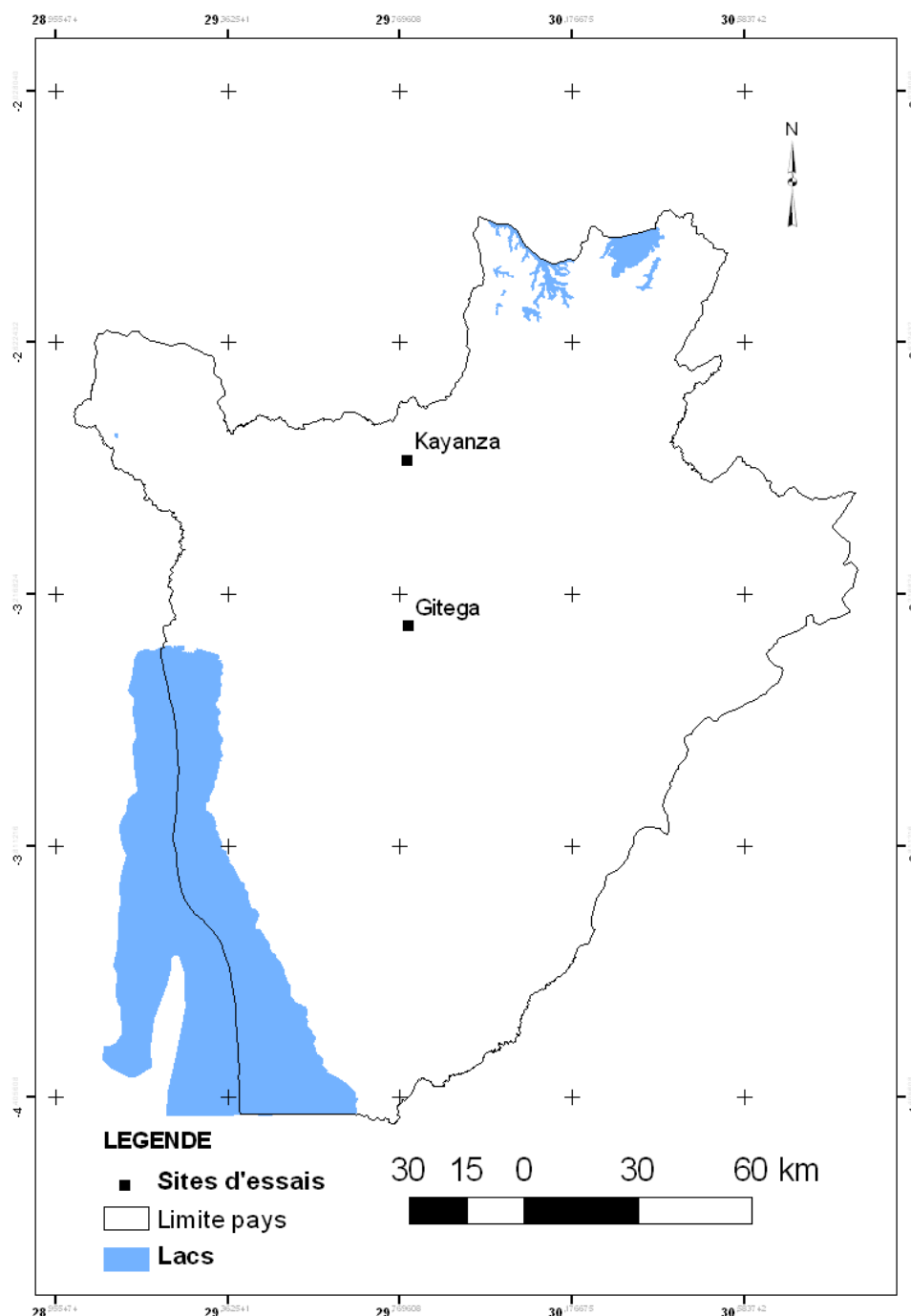


Figure 0.1 : Localisation des sites d'essais.

Deux types d'essais ont été réalisés dans chacun des deux sites dans le but de caractériser la productivité et la rentabilité des associations banane-café en fonction de la densité de plantation des caféiers et des bananiers. Les associations de deux cultures ont été comparées aux monocultures de café ou de bananiers. La productivité et la rentabilité pouvant varier en fonction de l'âge des plants de café, les essais ont été conduits avec des jeunes plants de

café et avec des plants de caféiers matures. Ces essais ont été installés en 2009. Les données récoltées dans les essais étaient les données de croissance, d'état nutritionnel et de rendement de banane et de café, ainsi que les données physico-chimiques du sol.

Comme la mesure du rendement de café est une activité longue et fastidieuse en raison de son étalement dans le temps, des plants de caféiers ont été choisis dans ces deux sites pour développer un modèle de rendement permettant d'estimer le rendement de café en un seul passage, avant la récolte. La validation du modèle développé a été réalisée dans 4 sites, dont deux n'avaient pas été utilisés pour l'élaboration du modèle.

0.5 Subdivision du travail

La thèse est subdivisée en 7 chapitres. Le **premier chapitre** parle du contexte de la culture du caféier et du bananier au Burundi. Il montre l'importance des deux cultures dans l'économie de l'exploitation et au niveau national, fait un état des lieux de la culture du café et de la banane et discute des contraintes de chacune des deux cultures. Ce chapitre analyse aussi l'intérêt de l'association du bananier avec le caféier en faisant référence aux pays qui pratiquent ce système depuis plusieurs années. Le **deuxième chapitre** décrit les pratiques culturelles appliquées dans la culture du café et de la banane au Burundi. L'impact de ces pratiques sur les carences en éléments nutritifs et sur le rendement des deux cultures est aussi discuté dans ce chapitre. Le **troisième chapitre** traite de l'interaction des bananiers et des caféiers avec une étude sur les parcelles de caféiers et de bananiers adjacentes. Ce chapitre s'intéresse aux variations des rendements, des pratiques culturelles, des caractéristiques morphologiques des bananiers et des caféiers et des caractéristiques physico-chimiques du sol et des feuilles en fonction de la localisation par rapport à la limite parcellaire entre les deux cultures. Vu que la récolte de café s'étale sur plusieurs mois, le **quatrième chapitre** propose un modèle de calcul du rendement de café par plant en un seul passage. Le **cinquième chapitre** analyse les compétitions entre des bananiers et des jeunes caféiers dans l'association bananiers-caféiers. L'effet de l'ombrage des bananiers sur la

croissance et le rendement des jeunes caféiers est analysé. En plus, une analyse économique a été réalisée pour guider le choix des agriculteurs et des décideurs. Le **sixième chapitre** étudie le même système, mais cette fois dans le cadre l'association de jeunes bananiers entre des caféiers adultes. Les rendements et les caractéristiques de croissance des bananiers et des caféiers ont été analysés. De même, l'évolution des caractéristiques du sol a été suivie par des analyses de sol au début et à la fin du suivi des essais. Comme pour le chapitre 5, une analyse économique a été faite. Le **dernier chapitre** concerne la conclusion générale. Dans ce chapitre des recommandations à l'endroit de tous les acteurs de la filière café sont formulées et des perspectives de recherche proposées. La représentation schématique des différents chapitres est reprise dans la figure 0.2.

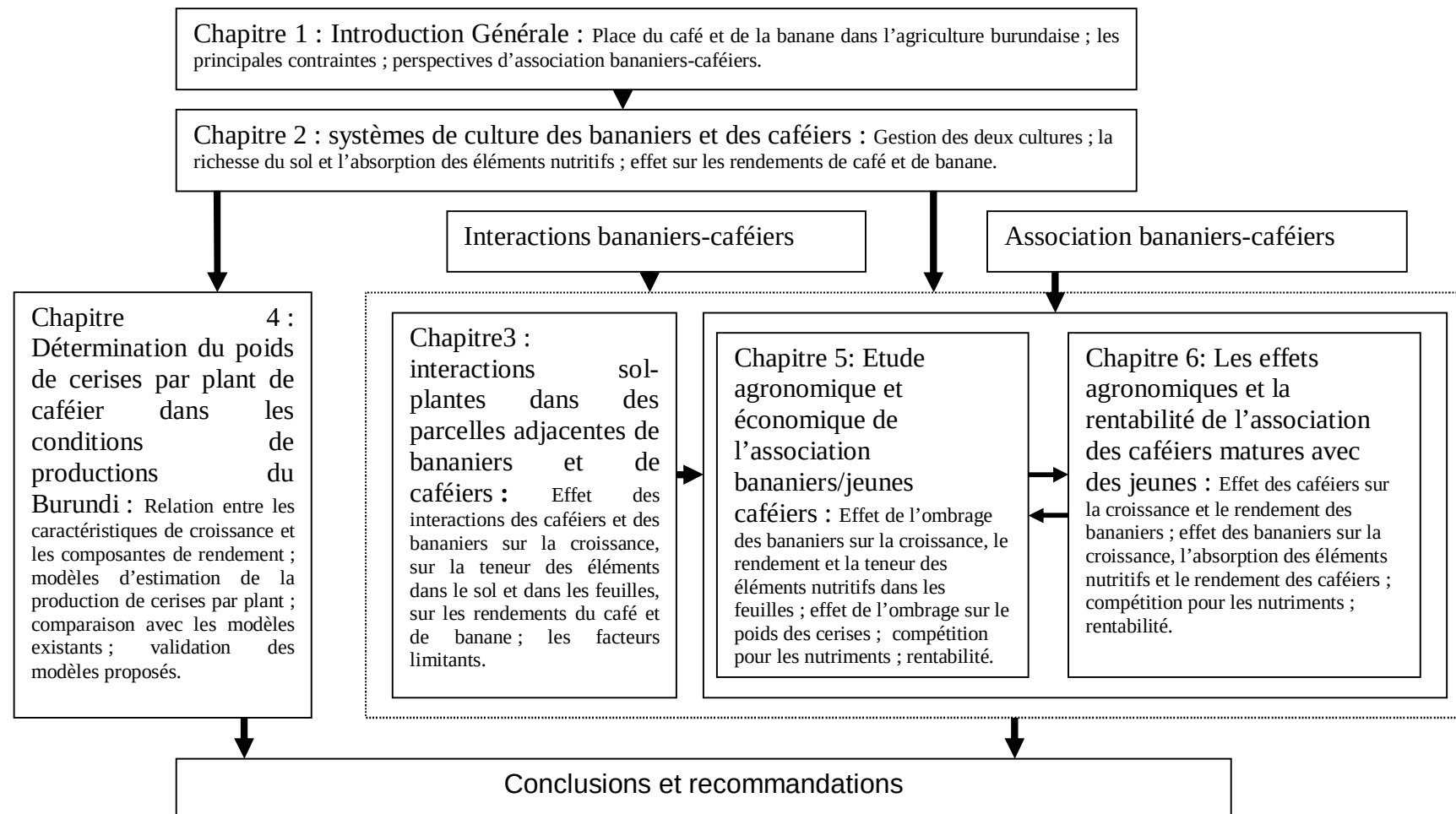


Figure 0.2 : Représentation schématique des chapitres

CHAPITRE 1: CONTEXTE

1.1 La culture du café

1.1.1 Historique de la culture du café

La culture du café a été introduite au Burundi dans les années 1930, pendant la période coloniale (Ndayiragije, 2007). A cette époque, les recherches étaient menées dans les stations de Mulungu au Congo et de Rubona au Rwanda. C'est surtout la station de Rubona, proche du Burundi, qui a permis de développer des variétés adaptées aux conditions du Burundi (Bitoga et Flémal, 1992). Au Burundi, le caféier est cultivé principalement dans quatre régions naturelles (voir annexe 0.1) : le Buyenzi avec 37% de la production, le Kirimiro avec 16%, le Bweru avec 13% et le Mumirwa avec 12% (Flémal, 1985 ; Barampama et Flémal, 1986 ; OCIBU, 2008). Cependant, on trouve également des caféiers dans la région de Buragane, une partie de Buyogoma, de Bututsi et de Bugesera (Gaie et Flémal, 1998). Le café *Robusta*, qui était produit dans la région naturelle de l'Imbo, n'est plus produit actuellement (Ngayempore, 2007). La culture du café est pratiquée par près de 850 mille ménages sur une superficie moyenne de 1 à 3 ares (Ngayempore, 2007). Les premiers cultivars de café *Arabica* à avoir été introduits au Burundi étaient des Jacksons, des Bourbons, BM 139 et des Mibirizi (Bitoga et Flémal, 1992). Ces cultivars constituent, même actuellement, plus de 65% des semences diffusées (ISABU, 2008).

En 1959, le verger caféicole du Burundi était estimé à 38 millions de plants avec une production annuelle pouvant atteindre 38.000 tonnes de café vert (Ngayempore, 2007). Le verger caféicole a continué à augmenter après la colonisation. L'expansion de la caféiculture a atteint son apogée entre 1980 et 1990 où le verger caféicole est passé de 92 millions de plants à 181 millions de plants de caféiers (Figure 1.1 ; OCIBU, 2008). L'augmentation du verger caféicole n'a cependant pas été accompagnée par une augmentation de la production. En effet, la production nationale en café vert n'a jamais dépassé 40.000 tonnes, une production qui avait déjà été atteinte dès 1981

(Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008). La crise qu'a connue le Burundi a affecté la culture du caféier avec une forte réduction du nombre de plants de caféiers en 1997.

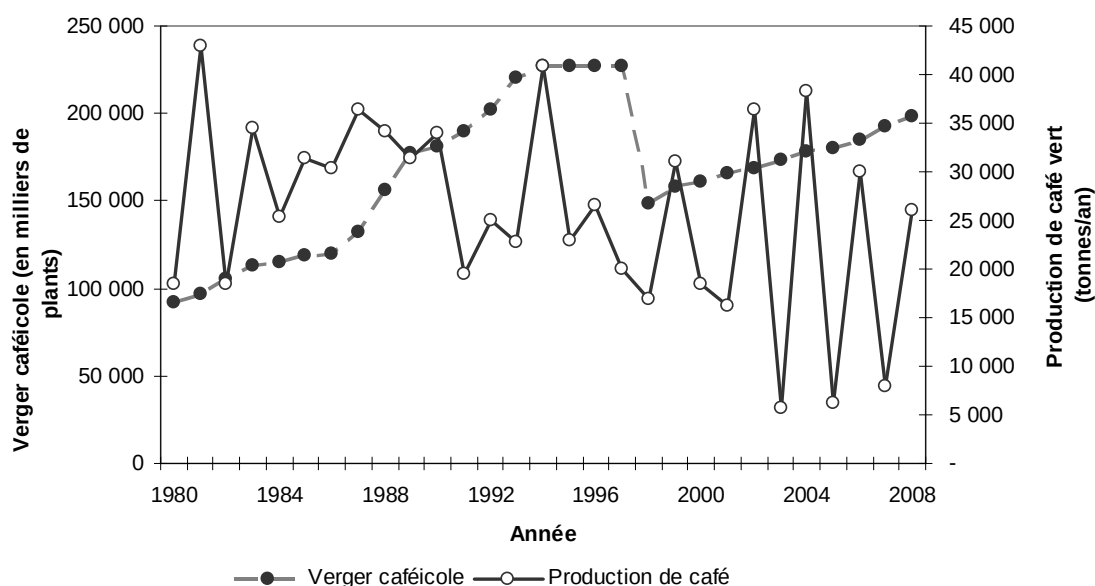


Figure 1.1 : Evolution de la production de café et du verger caféicole de 1980 à 2008.

Source : A partir des données de l'OCIBU (2008)

1.1.2 Importance économique du café

Le café est la première source de devises pour le Burundi. Pendant les années de bonne production, le café assure à lui seul plus de 80% des rentrées de devises du pays alors que pendant les années de mauvaise production le café représente 50% des rentrées de devises (BRB, 2007 ; BRB, 2008 ; BRB, 2009). En 2006 par exemple, le café a fourni à lui seul 86 % des rentrées de devises et représentait 11% du PIB du Burundi (Ministère de l'Agriculture et de l'élevage, 2008). Selon Kimonyo et Ntiranyibagira (2007), le café est aussi une source importante de revenus pour les agriculteurs. En 2006, la vente des cerises a permis d'injecter plus de 20 milliards de francs burundais ($\pm$ 20 millions de \$) dans le milieu rural. Les revenus provenant du café permettraient de subvenir aux besoins et surtout d'opérer un certain investissement au niveau des ménages car, ces revenus sont concentrés sur une courte période. Dans sa politique de croissance et de lutte contre la pauvreté (période 2013-2017), le

gouvernement du Burundi prévoit d'augmenter la quantité et la qualité du café produit (Gouvernement du Burundi, 2011), signe que le café continuera à être considéré, à moyen terme, comme la base de la croissance économique et la première source de devises du pays.

La filière café domine l'industrie agro-alimentaire au Burundi. Ainsi, 4 usines de dépalchage de café existent au niveau national, dont 2 privées et 2 à capitaux mixtes. Cinq sociétés de gestion des stations de lavage (SOGESTALS) sont chargées de gérer 133 stations de dépulpage-lavage disséminées sur tout le territoire Burundais (Kimonyo et Ntiranyibagira, 2007). La part du café dans l'économie nationale est si importante que les administrations centrale et locales étaient, antérieurement, mobilisées pour assurer son encadrement (Hatungimana, 2008). La journée du jeudi était consacrée à l'entretien des caféiers sur tout le territoire national (Ndekatubane, B. ; Communication personnelle). Avec la privatisation, de nouvelles stations de lavage et de nouvelles usines de dépalchage de café sont en cours de construction, augmentant plus encore la part du café dans le secteur agro-alimentaire burundais.

1.1.3 Le système de culture et ses contradictions

Depuis longtemps, le caféier a été considéré comme une culture stratégique pour le pays, à protéger contre toute concurrence. Les caféiculteurs devaient respecter les normes de gestion vulgarisées par les services publics (Hatungimana, 2008). Au Burundi, il est recommandé de cultiver le caféier en monoculture, sans ombrage. Pourtant, des essais sur l'association du caféier avec des cultures annuelles ont été réalisés dès les années 1980, sans que les résultats ne soient vulgarisés. C'est le cas de l'association du caféier avec les légumineuses annuelles comme le haricot et le soja pendant les 3 premières années d'installation du caféier (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007), et l'association des jeunes caféiers avec la tomate (Nduwayo, 2007). Si l'association du caféier avec ces cultures n'a pas été vulgarisée, ce n'est pas parce qu'elle n'offrait pas d'avantages comparativement au café en monoculture. Par exemple, la croissance des caféiers n'était pas affectée par la

présence du haricot ; on observait même une tendance à avoir des plants de caféier plus vigoureux chez le caféier associé avec le haricot. En plus, le haricot rapportait près de 400\$ par hectare et par saison (Nduwayo, 2007). Les caféiers sont aussi plantés sans ombrage (Gaie et Flémal, 1988). Pourtant, des essais réalisés dans plusieurs sites du pays ont montré que les arbres d'ombrage comme *Albizzia stipulata* ne concurrençaient pas les caféiers (ISABU, 1996). Ces deux exemples montrent en suffisance le niveau avec lequel le café était protégé pour éviter toute forme de concurrence, même minime.

La conduite du caféier en monoculture a été accompagnée par plusieurs recommandations de pratiques culturales visant à augmenter la production et assurer la qualité de café. La première pratique est le paillage. Il est recommandé de pailler les caféières, particulièrement entre fin avril et début mai, avec une épaisseur de paillis de 10-12 cm (Gaie et Flémal, 1988). Avec le manque chronique de paillis, des techniques permettant la réduction de la quantité de paillis appliqué ont été développées par la recherche (Gaie et Flémal, 1988 ; Bitoga et Lambot, 1992 ; Snoeck et al., 1993 ; Nduwayo, 2007). Ces techniques étaient entre autres le paillage alterné des lignes de caféiers et l'installation de cultures de couvertures (*Mucuna spp*, *Desmodium spp*) dans les parcelles de caféiers qui étaient par la suite fauchées et appliquées comme paillis. Cependant, ces techniques n'ont pas été suffisamment vulgarisées car seul le paillage intégral reste appliqué en milieu rural (ISABU-OCIBU, 2009). Suite à la pression démographique, les matériaux de paillage proviennent presque exclusivement des exploitations agricoles. Ils sont constitués par les résidus de bananiers et des autres cultures vivrières comme les fanes de haricot et les chaumes de maïs et de sorgho (Gaie et Flémal, 1988, Cochet, 1996). Ainsi, le paillage du caféier appauvrit continuellement les parcelles sous cultures vivrières et contribue à la perte de la fertilité et à la réduction de la production des autres cultures (Cochet, 1996).

La fertilisation minérale peut être une technique pour améliorer la fertilité du sol. La dose recommandée par la vulgarisation est faible. Il est recommandé d'appliquer 50 g d'urée par plant et par an (ISABU, 2009), alors que la

recherche propose 132 g d'urée par plant (Gaie et Flémal, 1988). Malgré cela, une étude réalisée par Hubert et Maganda (1992) a montré que cette technique était faiblement suivie par les caféiculteurs même si les engrais étaient octroyés à crédits remboursables après la vente des cerises. Bien que la carence en Zn soit fréquente, surtout dans la région naturelle de Kirimiro (Lambot et Snoeck, 1992 ; ISABU, 1996), aucune application de cet élément n'est réalisée.

Le caféier est attaqué par plusieurs maladies et ravageurs. Parmi les maladies, la rouille et l'antracnose sont les plus importantes. La rouille est particulière sévère dans la région naturelle de Kirimiro, alors que l'antracnose l'est dans la région de Buyenzi (Mussche et al., 1992). Un protocole de traitement de ces deux maladies aux fongicides a été développé (Autrique, 1992). Mais, à cause du coût des fongicides, l'application du produit n'est pas réalisé régulièrement (ISABU, 2009). Les ressources du gouvernement ne permettent pas de financer annuellement l'achat de ces fongicides et les caféiculteurs ne peuvent pas prendre la relève car ils ne sont pas sûrs de recouvrir les dépenses par la vente des cerises. La punaise du caféier (*Antestiopsis orbitalis ghesquierei* Carr.) est le plus important des ravageurs du caféier (Gaie et Flémal, 1988 ; Bouyjou, 1992 ; Ndayiragije, 2007). Elle réduit le rendement et déprécie la qualité du café (Buyckx, 1962 ; Gaie et Flémal, 1988). La lutte se fait avec des insecticides en émulsion concentrée avec deux applications au mois de novembre et deux applications en janvier (Ndayiragije, 2007). Les insecticides et le matériel de pulvérisation sont subventionnés par les pouvoirs publics et donnés gratuitement aux caféiculteurs (OCIBU, 2008). La campagne nationale d'application des insecticides est réalisée entre novembre et février sur toute l'étendue du pays sous la supervision des associations de producteurs de café. Cela fait que l'opération d'application d'insecticides est très largement suivie par les caféiculteurs (CNAC, 2011).

1.1.4 Les grandes causes de la faible productivité du caféier

Le rendement de café obtenu par les agriculteurs est faible. Plus grave encore, cette production n'est pas régulière. Il existe une grande fluctuation de la production entre deux années consécutives (Ngayempore, 2007 ; OCIBU,

2008). Au cours d'une bonne année, la production nationale tourne autour de 30.000 tonnes de café marchand, alors qu'au cours d'une mauvaise année la production nationale peut descendre jusqu'à 5.000 tonnes de café marchand (OCIBU, 2008). Cela correspond approximativement à un rendement de 0,5 tonnes de café marchand par hectare l'année de bonne production et de 0,08 tonnes l'année de mauvaise production (OCIBU, 2008). Cette grande cyclicité de production fait que les caféiculteurs produisent pratiquement une année sur deux. La synchronisation de la cyclicité de production de café sur tout le territoire pourrait être due à la forte production de 2002 sur des caféiers mal entretenus durant la période de guerre.

L'état général du verger caféicole au Burundi ne présage pas de bonnes productions dans le futur. La plupart des caféiers sont vieux avec un âge supérieur à 22 ans (Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008). Ces dernières années, il n'y a pas eu d'extension des caféiers, ni de renouvellement de plantations existantes, de telle sorte que plus de 76 % des plants de caféier ont dépassé ou sont proches de la fin de la vie productive, qui est de 30 ans (Tibaijuka, 1984 ; OCIBU, 2008). En plus, certaines pratiques culturales comme la taille ne sont pas bien appliquées, laissant des plants de caféiers avec une mauvaise architecture, sous forme arbustives avec des rameaux déchassés, anticipant de ce fait le vieillissement de la souche.

Le paillage des caféiers a été depuis longtemps une pratique difficile à mettre en œuvre suite au manque de paillis et, dans les rares régions où il existait encore, par des difficultés de transport. Déjà en 1993, des études faites par Snoeck et al. (1993) insistaient sur les différentes alternatives de paillages permettant de réduire la quantité de paillis appliquée tout en conservant au maximum les avantages apportés par le paillis. Le paillage des caféiers est l'activité qui prend le plus de temps aux agriculteurs dans l'entretien d'une caféière déjà mise en place (Gaie et Flémal, 1988).

Le prix accordé aux caféiculteurs par les acheteurs de café-cerises a sensiblement diminué et n'est plus incitatif. Le prix du kilo de cerises, qui était de 120 BIF ($\pm$ 0,8\$) en 1990, était en mai 2012 de 460 BIF ($\pm$ 0,3\$) (BRB,

1991 ; InterCafé, 2012). Or, le coût des intrants comme les engrais a sensiblement augmenté. Ainsi, le prix d'un kg d'engrais (urée ou DAP) variait entre 1400 BIF ($\pm 1,1\$$) et 2000 ($\pm 1,6\$$) BIF en 2009 (ISTEBU, 2010). Ce prix élevé des engrais et la faiblesse du prix des cerises ne permettent pas aux caféiculteurs d'investir dans ces intrants. Cela a un impact sur la production de café, et il est difficile de l'augmenter dans les conditions actuelles. Vu les exigences élevées des caféiers en termes d'intrants et de main d'œuvre, et vu le faible revenu tiré de la vente des cerises, la culture de café n'est pas rentable (Ngayempore, 2007 ; Gahungu, 2008). Les autres cultures vivrières comme le haricot par exemple, sont plus rentables que le café. Avec un prix de 1200 BIF ($\pm 1,1\$$) par kg (ISTEBU, 2010), des rendements de 0,8 T/ha et deux cycles de culture par an, les agriculteurs sont prêts à remplacer les caféiers par le haricot ou par d'autres cultures vivrières plus productives.

Le prix octroyé aux caféiculteurs dépend des cours mondiaux. Les prix au marché international sont très variables avec des prix particulièrement faibles entre 1990 et 1994, et de 1999 à 2006 (Ndayikengurutse, 2000 ; Lipchitz et Pouch, 2007). Ces variations de prix aux marchés mondiaux affectent le marché local. Pendant la période où le café était sous la responsabilité du gouvernement, le prix promis aux agriculteurs était maintenu mais souvent accompagné d'une dévaluation de la monnaie, ce qui faisait que le prix réel donné au producteur était en nette réduction au fil des années (Ndayikengurutse, 2000). Avec la libéralisation, les prix aux marchés mondiaux affectent directement et presque simultanément le prix octroyé par les acheteurs locaux. Au cours de l'année 2012, le prix de café-cerises octroyé aux producteurs a été changé à 4 reprises, passant de 630 FBU ($\pm 0,5 \$$) à 400 FBU ($\pm 0,3\$$) pour une campagne de production de café de 5 mois (InterCafé, 2012). Pour cette année (2013), le prix octroyé aux agriculteurs pour le mois d'avril était de 400 FBU ($\pm 0,24 \$$). Cela est en contradiction avec le prix des denrées alimentaires qui, elles, continuent à augmenter.

En plus de ces contraintes agronomiques et économiques, le caféier fait face à la menace des changements climatiques. Le caféier est actuellement cultivé dans des zones avec une pluviométrie comprises entre 1100 mm et 1400 mm

par an. Ces zones correspondent à une gamme d'altitude comprise entre 1300 et 1900 m (Gaie et Flémal, 1988). A part deux régions naturelles (Buyenzi et Mumirwa), le reste des zones de culture de caféier ont une aptitude modérée ou même marginale pour le café. Dans ces zones, la pluviométrie est souvent déficiente et la température légèrement plus élevée que ne l'exige le caféier (Gaie et Flémal, 1988 ; Ngayempore, 2007). La température est un facteur qui affecte beaucoup la caféiculture (Gay et al., 2006). Avec le réchauffement de la planète, les températures vont augmenter d'ici à 2050. Cette augmentation de température aura un effet négatif sur le rendement de café dans les zones actuelles de production de café. En effet, le poids de cerises récoltées augmente avec l'augmentation de l'altitude, donc avec la diminution de la température (Avelino et al., 2005). D'ici à 2050, la plupart des zones caféicoles actuelles du Burundi seront donc dans des conditions marginales ou impropres à cette culture (Laderach et van Asten, 2011) et les nouvelles zones aptes à la caféiculture seront comprises entre 1700 et 2300 m d'altitude. Dans les zones actuelles de production de café, l'accroissement de la température augmentera l'incidence des maladies et des ravageurs. Parmi les maladies, la rouille est la plus sensible à l'augmentation de la température. Une température comprise entre 22 et 28°C est optimale pour son cycle d'infection (Avelino et al., 2004). L'augmentation de la température a un effet positif sur le développement de cette maladie, quelle que soit la pratique culturale utilisée, y compris l'ombrage (Avelino et al., 2004). Ainsi, cette maladie, qui est maintenant sévère dans les zones marginales comme le Kirimiro (Mussche, 1992), pourra s'étendre dans d'autres zones. Les ravageurs du caféier comme la pyrale et la punaise du caféier, qui ont une croissance rapide quand la température se trouve dans une gamme de 20 à 30°C, causeront des dommages plus importants (Jaramillo et al., 2009). Un autre effet négatif des changements climatiques va s'observer au niveau de la qualité du café car la meilleure qualité du café *Arabica* est obtenue en-dessous de 22°C (Vaast, 2004).

1.2 La culture du bananier

La production de banane et la superficie cultivée en banane ont augmenté dans le temps. En 1988, ces deux indicateurs semblaient s'être stabilisés. La crise de

1993 a réduit sensiblement la production et la superficie mais la reprise a été rapide, surtout pour la superficie emblavée (Figure 1.2). Actuellement, le bananier occupe la première place parmi les cultures vivrières, avec près de 40% de la production nationale (Faostat, 2011). En 2010, la production totale de banane était de 1,9 millions de tonnes (Faostat, 2012). En 1992, la production de la banane en valeur était estimée à 22 % de la production agricole totale (Ndimurirwo, 1992) contre 37 % en 2010 (Faostat, 2012), confirmant l'augmentation de la part de la banane dans la production vivrière nationale.

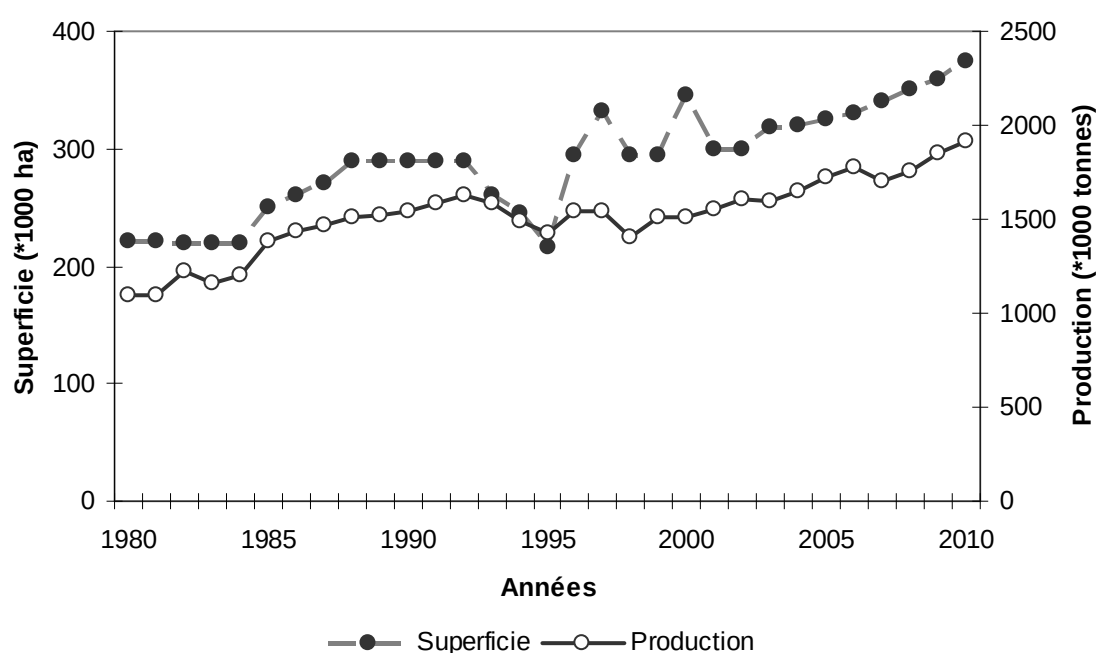


Figure 1.2 : Evolution de la production /de la superficie occupée par le bananier au Burundi.

Source : A partir des données de Faostat 2012

La consommation de banane, qui était de 90 kg par personne par an en 1998 (Frison & Sharrock, 1998), est actuellement estimée à 210-235 kg par personne (Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage-FAO, 2012). La banane couvre près de 17% des besoins caloriques de la population burundaise, même si la plus grande partie de la production est transformée en boissons alcoolisées (Nations Unies, 1992). L'économie des agriculteurs est dépendante de la production de la banane. Dans les zones à faible production, les revenus des ménages sont

faibles alors que dans les régions à forte production, les revenus sont plus élevés (Loveridge 1992 ; Davies 1995). Les taxes provenant de la vente de la banane et de sa bière constituent une source importante de recettes pour les collectivités locales. Au Burundi, ces taxes représentent 24 % du budget des collectivités locales (Davies, 1995). Le bananier est aussi la première source de biomasse au niveau d'une exploitation burundaise (Rishirumuhirwa, 1993). Si l'agriculteur décide de laisser les résidus de bananier sur place, ceux-ci peuvent couvrir à eux seuls 25% de la surface de l'exploitation par an (Rishirumuhirwa, 1993 ; Rishirumuhirwa, 1998). En plus de son utilisation dans le paillage des caféiers (Cochet, 1996), les résidus de bananiers sont utilisés i) dans la production du compost, ii) dans la couverture des maisons (Rishirumuhirwa, 1997) et iii) dans l'alimentation du bétail avec des apports élevés en protéines et en sels minéraux (Pozy et Dehareng, 1996).

La banane est produite dans des conditions de culture traditionnelle. Les bananeraies burundaises sont constituées à plus de 80 % par des variétés à bière. De plus, il n'y a pas de rotation dans les parcelles de bananiers, avec plus de 40 % des bananeraies ayant plus de 40 ans (Niyongere et al., 2012). Au niveau des exploitations, il y a deux types de parcelles de bananiers : i) les bananiers proches de l'habitation et ii) les bananiers éloignés (Kabonyi, 1985 ; Drion, 1993 ; Rishirumuhirwa, 1997). Tout près de l'habitation, le bananier peut être associé avec certaines cultures comme le haricot et le taro, mais la densité de ces cultures est très faible (Drion, 1993 ; Rishirumuhirwa, 1997). Les bananiers qui sont dans ces parcelles ont un bon rendement avec un bon statut nutritionnel. Ils bénéficient des déchets ménagers contenant des déchets organiques, du charbon de bois et des cendres qui améliorent la fertilité de ces parcelles (Nibasumba, 2008). Dans les parcelles éloignées des habitations, les bananiers sont associés avec des cultures vivrières. La densité des bananiers diminue au profit des cultures vivrières. La fertilité et le rendement de banane sont faibles (Rishirumuhirwa, 1997). Les agriculteurs n'accordent pas beaucoup de soins aux bananiers. A part les bananiers proches des habitations qui reçoivent les déchets ménagers, les autres ne reçoivent ni fumier, ni compost, ni engrais minéral. Le nombre de rejets n'est pas contrôlé et souvent un plant

de bananier qui est installé se transforme après quelques années en une touffe composée par plusieurs plants de bananiers collés les uns contre les autres.

Ces dernières années, la culture du bananier a dû faire face à plusieurs maladies et ravageurs. Dans la plaine de l'Imbo, une maladie virale (BBTD : banana bunchy top disease) a décimé les bananiers, particulièrement au nord-ouest du pays depuis une décennie (Niyongere, 2012). Très récemment, une maladie bactérienne à expansion rapide (BXW : Banana Xanthomonas Wilt) a été observée au Burundi. En 2011, onze provinces sur seize étaient attaquées par la maladie (Niko et al., 2012) et en 2012 quatorze provinces étaient attaquées avec une incidence pouvant atteindre 56 % (FAO-ISABU, 2012). Cette maladie entraîne des pertes pouvant atteindre 90% du rendement (Smith et al., 2008). La transmission de ces maladies est accentuée par le fait que les bananiers sont laissés en touffes avec un matériel de plantation constitué presque exclusivement par des rejets provenant des champs (Niko et al., 2012).

Le développement de la culture du bananier est aussi entravé par la non transformation et le non conditionnement de la banane récoltée. La transformation concerne presque uniquement l'extraction et la fermentation du jus de banane pour produire de la bière de banane (Davies, 1995). Ce non conditionnement de la banane oblige les agriculteurs à vendre immédiatement après la récolte, entraînant des prix faibles pendant la campagne de grande production (ISTEEBU, 2010, ISTEEBU, 2011). La production de la banane à cuire exige un marché proche et des moyens de transport relativement développés. De ce fait, la fluctuation du prix de la banane à cuire est forte (ISTEEBU, 2006 ; ISTEEBU, 2007). La banane à cuire est surtout consommée dans les milieux urbains. Par contre, la bière de banane est consommée dans les villages-mêmes où elle est produite (Davies, 1995). En outre, la transformation de la banane en bière de banane permet de conserver le produit pendant une période de quelques semaines. Ainsi, la banane à bière procure une petite marge de manœuvre à l'agriculteur pour s'assurer du marché.

1.3 L'association des caféiers avec des bananiers

Au Burundi, le bananier et le caféier sont cultivés dans les mêmes régions (Gaie et Flémal, 19988 ; Davies, 1995). De plus, il existe une forte interaction entre les bananiers et les caféiers car les résidus de bananiers sont les plus utilisés dans le paillage du caféier (Cochet 1996). La plantation de cultures de paillage dans des parcelles séparées des parcelles de caféier, technique qui a été vulgarisée dans les régions caféicoles du Burundi, n'a pas été adoptée. La raison principale était le manque de terre car, pour la seule production de paillis, il fallait emblaver une superficie égale à celle occupée par les caféiers (Hubert et Maganda, 1992). En plus, c'était un travail complémentaire, destiné au final au seul entretien des caféiers. Les agriculteurs ont dès lors continué à utiliser les résidus de récolte, principalement les résidus de bananiers produits sur d'autres parcelles (Gaie et Flémal, 1988 ; Hubert et Maganda, 1992). La biomasse de bananiers produite peut atteindre plus de 10 tonnes de matières sèches par hectare et par cycle (Yamaguchi et Araki, 2004) et ainsi permet de fournir le paillage (Cochet, 1996 ; Nduwayo, 2007 ; Ngayempore, 2007) et les éléments nutritifs dont les caféiers ont besoin (Soares et al., 2008). Mais, l'association des bananiers avec les caféiers a depuis longtemps été déconseillée, que ce soit au Burundi (Gaie et Flémal, 1988), au Rwanda (Deraeck, 2011) ou en Tanzanie (Robinson, 1961). Dans la région de l'Afrique de l'est, seules les associations avec des cultures annuelles ont fait objet de recherche régulière (Njoroge, 1993 ; Nduwayo, 2007). La principale crainte avancée contre l'association banane-café était la compétition entre les deux cultures au profit du bananier. En effet, le bananier et le caféier ont tous les deux une exigence élevée en N et en K (Carvajal, 1984 ; Lahav, 1995). En plus, les racines des bananiers et des caféiers sont en grande partie situées dans la couche superficielle du sol (Nutman, 1933 ; Fogain et Gowen, 2005). Le bananier étant plus vivace que le caféier, il peut lui faire ombrage et absorber l'essentiel de l'eau et des nutriments disponibles (Gaie et Flémal, 1988).

Pourtant, dans certains pays, il existe une belle expérience de l'association du bananier avec le caféier dans des systèmes traditionnels. En Ouganda cette association existe, que ce soit pour le caféier *arabica* ou *robusta* (Oduol et al.,

1990 ; Van Asten et al., 2011 ; Jassogne et al., 2012). Cette association existe aussi en jardin de case où le caféier est associé avec le bananier et les autres cultures vivrières comme le haricot, mais aussi avec des arbres d'ombrage (Oduol, 1990). En Tanzanie, cette pratique se retrouve dans plusieurs zones du pays comme au mont Kilimandjaro (Hemp, 2006 ; Bart, 2007), à Bukoba et à Kagera (Rugalema et al., 1994 ; Baijukya et al., 2006 ; Chipungahelo, 2006). Des essais de démonstration de l'association bananier-caféier ont été installés au Malawi (Hillocks et al., 2002) et cette association existe aussi au Kenya (Bart, 2007). Dans le système bananier-caféier associé, les revenus des ménages sont plus élevés (Chipungahelo, 2006 ; Van Asten et al., 2011). L'association bananiers-caféiers permettrait aux agriculteurs d'investir dans les intrants comme les engrais. En effet, avec un revenu supérieur en association qu'en monoculture (Chipungahelo, 2006 ; Van Asten et al., 2011), le retour de l'investissement est assuré dans le cas de l'association, car l'utilisation des engrais ou tout autre intrant est motivée par la réponse du rendement à l'application de l'engrais et le prix des produits de la récolte (Kelly, 2006 ; Gahungu, 2008). En plus, l'association permet la réduction des risques de manque de production ou de revenu faibles pendant les mauvaises années de production de café ou pendant les années de faibles prix de café sur le marché mondial. Dans les pays où les caféiculteurs ont la liberté de choisir entre la monoculture et la polyculture, ce ne sont pas tous les caféiculteurs qui appliquent l'association, malgré sa rentabilité (Bart et al., 2007 ; Van Asten et al., 2011 ; Jassogne et al., 2012). Dans une étude menée en Ouganda, certains caféiculteurs préféreraient produire le café en monoculture pour maximiser la production de café, bien que l'association soit économiquement plus rentable (Jassogne et al., 2012). Cela peut être le cas par exemple pour des caféiculteurs Burundais ayant des exploitations vastes car, même dans les conditions actuelles, ils peuvent investir dans les intrants (Gahungu, 2008).

CHAPITRE 2 : LES SYSTEMES DE CULTURE DU BANANIER ET DU CAFEIER AU BURUNDI

Résumé

Pour étudier les systèmes de culture et établir un état des lieux de la culture du caféier et du bananier, deux enquêtes, l'une sur le caféier et l'autre sur le bananier, ont été réalisées dans trois régions naturelles du Burundi : Buyenzi, Kirimiro et Mumirwa. Des données sur l'âge et les techniques culturales, des échantillons de sol ainsi que des échantillons de feuilles pour le calcul des indices CND (compositional nutrient diagnosis) ont été récoltés. Les rendements de café et de banane ont été déterminés. Les résultats montrent que les caféiers et les bananiers sont âgés de plus de 20 ans dans plus de 70 % des exploitations. Aussi, plus de 42 % des caféières sont âgées de plus de 7 ans après la taille de régénération. La fertilisation minérale ou organique est régulièrement pratiquée par moins de 7 % des caféiculteurs. Cette fertilisation est pratiquée dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations au profit des cultures associées, particulièrement le haricot. L'application d'insecticides est uniquement observée dans les parcelles de caféiers. Le paillage des caféiers est réalisé par plus de 70 % des caféiculteurs. Cependant, le paillis est appliqué au milieu de la saison sèche plutôt qu'en saison des pluies, avec plus de 46% de parcelles paillées au mois de juillet et août. La quantité de paillis est suffisante uniquement dans 22 % des parcelles. Les bananiers sont paillés uniquement dans la région naturelle de Mumirwa. Les caféiers sont préférentiellement associés, par ordre décroissant d'importance, avec le taro, le haricot et le bananier. Les bananiers sont préférentiellement associés avec le haricot, le maïs et le manioc loin des habitations, et avec le taro, le haricot et la patate douce près des habitations. Les teneurs en éléments nutritifs dans les sols des parcelles de caféiers diffèrent principalement en fonction de la région naturelle, alors que pour les bananiers les teneurs en certains éléments nutritifs dépendent à la fois de la région naturelle et de la localisation par rapport à l'habitation. Ainsi, les teneurs en Mg et K sont statistiquement plus élevées dans les parcelles proches des habitations à Buyenzi. Une carence en N et en Zn a été observée chez le caféier dans toutes

les régions, particulièrement dans la région de Kirimiro. Un antagonisme entre le K et Ca a été observé chez les bananiers et les caféiers. Le rendement de café par an est cyclique, avec des rendements en cerises compris entre 0,8 et 1,3 T/ha en 2005 et compris entre 2,7 et 3,1 T/ha en 2006 dans les régions de Buyenzi et Kirimiro. En moyenne, le rendement de banane est 2,9 fois plus élevé dans les parcelles proches des habitations que dans les parcelles éloignées des habitations. A Mumirwa, où le paillage des bananiers était appliqué, le rapport de rendement entre les parcelles proches et éloignées de l'habitation n'était que de 1,5. Les techniques culturales recommandées pour la caféiculture n'étaient pas bien suivies, conduisant à une carence en N et en Zn et une cyclicité de production. Le rendement de banane était élevé près des habitations.

2.1 Introduction

La culture du café *Arabica* a été introduite au Burundi à partir des années 1930 (Gaie et Flémal, 1988). L'introduction du café a été accompagnée par un paquet de techniques culturales proposé aux caféiculteurs pour permettre une bonne production. Ce paquet technologique concernait la conduite des différents types de taille, la fertilisation, le paillage, la lutte contre les maladies et les ravageurs ainsi que l'association des caféiers avec d'autres cultures. Concernant la taille, quatre types de taille étaient proposés (Gaie et Flémal, 1988) : i) la taille de formation, ii) la taille d'entretien, iii) la taille de production et iv) la taille de régénération. La taille de formation est réalisée après la reprise des plants de caféiers nouvellement plantés. Au Burundi, les caféiers sont conduits en tricaulie, c'est-à-dire que trois rejets sont retenus après arcure pour former trois futures tiges de caféier. La taille d'entretien permet d'enlever les gourmands qui partent de la souche en-dessous des rameaux primaires. Elle est pratiquée chaque fois que ces gourmands sont observés. La taille de production a pour objectif de maintenir la morphologie de la plante et de permettre l'aération pour stimuler l'induction florale au niveau de tous les rameaux de la tige et éviter la prolifération des maladies (Lambot et Bouharmont, 2009). En particulier, la taille de production permet de réduire l'infection par l'antracnose (Mouen Bedimo et al., 2007) et la rouille du caféier

(Avelino et al., 2004). Au Burundi, elle est pratiquée après la récolte et consiste à sectionner les rameaux du bas qui sont plus âgés et moins productifs ainsi que les autres rameaux desséchés (Gaie et Flémal, 1988). La taille de régénération permet de renouveler les vieilles tiges devenues moins productives et difficiles à récolter (Lambot et Bouharmont, 2009). Gaie et Flémal (1988) recommandent de faire cette taille de régénération à la 5^{ème} récolte quand le plant de caféier a une hauteur de 3 m. Lambot et Bouharmont (2009) recommandent de faire la taille de régénération à la 7^{ème} année du cycle du caféier. C'est cette dernière technique qui est vulgarisée au Burundi (ISABU, 2009).

Pour la fertilisation des caféiers, les recherches menées au Burundi proposent d'appliquer 132 g d'urée par plant et par an. Cet engrais est à fractionner en 3 ou 4 applications réparties d'octobre à mars (Gaie et Flémal, 1988). Cette dose d'engrais ne contient pas de potassium alors que les caféiers sont très exigeants en cet élément (Carvajal, 1984 ; Silva, 2001). La fertilisation potassique n'agit pas uniquement sur l'augmentation du rendement. Elle permet aussi d'améliorer la qualité du café car elle permet par exemple d'augmenter la taille des cerises et la proportion de sucres dans le café (Cong et al., 2001). Le K et P étaient supposés être apportés par le paillis. Plusieurs cas de carence en Zn ont été observés dans les caféières burundaises (Lambot et al., 1990 ; ISABU, 1996) mais aucune correction n'a été proposée pour le moment.

Le paillage a été recommandé aux caféiculteurs parce qu'il présente plusieurs avantages. Il permet de maintenir l'humidité du sol, d'apporter des éléments nutritifs et de contrôler les adventices et l'érosion (Wintgens et Descroix, 2009). Au Burundi, le paillage a été encouragé par les services de vulgarisation dans l'objectif d'apporter des éléments nutritifs, en particulier le K et P, et de maintenir l'humidité du sol pendant la longue saison sèche qui s'étend de juin à septembre (Gaie et Flémal, 1988). Il est recommandé de pailler les caféiers avec un paillage de 10-12 cm d'épaisseur avant la saison sèche, c'est-à-dire vers mi-avril et début-mai (Gaie et Flémal, 1988). Le paillis apporté aux caféiers peut atteindre facilement plus de 40 T de matière sèche/ha et par an (Cochet, 1996). Or, dans les conditions actuelles de surpopulation, près de 300

personnes/km² (Ministère de l'Intérieur, 2009), le paillis est de moins en moins disponible. Pour réduire la quantité de paillis appliquée, plusieurs études ont été réalisées et ont abouti à des résultats satisfaisants. C'est entre autre le paillage alterné, c'est-à-dire qu'une ligne de caféiers sur deux est paillée, ou l'installation de plantes de couverture comme *le Desmodium intortum* (Snoeck et al., 1993). Mais, le paillage intégral reste la technique recommandée (ISABU, 2009).

La rouille et l'antracnose sont les principales maladies des caféiers. Ces maladies sont surtout présentes dans les régions marginales de production de café avec faibles précipitations, des sols pauvres et des températures élevées (Lambot, 1990). L'antracnose s'attaque aux drupes tandis que la rouille s'attaque aux feuilles. Le traitement proposé pour lutter contre ces maladies consiste en 5 pulvérisations à intervalle d'un mois après chaque traitement, la première pulvérisation débutant 3 semaines après la fin de la floraison (Autrique, 1992). Ce traitement est différent de celui proposé par Muller et al. (2009) qui est de 7 pulvérisations étalées entre l'après floraison et 18 semaines après la floraison. Pour lutter contre la rouille du caféier, trois pulvérisations par an à intervalle d'un mois sont proposés par ces mêmes auteurs. Le traitement utilisé contre l'antracnose est aussi efficace contre la rouille (Muller et al., 2009). Le produit proposé pour ces deux maladies est l'oxychlorure de cuivre. Parmi les ravageurs, la punaise du caféier (*Antestiopsis orbitalis ghesquierei* Carr.) est la plus importante (Gaie et Flémal, 1988). Avec seulement 5 individus par arbuste, la chute des drupes peut atteindre 20% et le taux de mauvaises graines 23% (Buyckx, 1962). La lutte chimique proposée pour ce ravageur est de deux applications d'insecticide en émulsion concentrée au mois de novembre et deux passages au mois de janvier (Bouyjou, 1992).

Les pratiques culturales proposées dans la culture de caféiers par les services d'encadrement et les services de recherche sont laborieuses et difficiles à mettre en œuvre. Hubert et Maganda (1992) ont montré que dans la région de Buyenzi, le paillage, la fertilisation minérale et la rénovation des vieilles caféières n'étaient pas pratiqués selon les recommandations. Cela a été constaté entre 1987 et 1992, années au cours desquelles le prix octroyé aux caféiculteurs était encore incitatif (Ndayikengurutse, 2000). Or, avec les

contraintes de cyclicité de production (OCIBU, 2009) et de faible prix octroyé aux agriculteurs (CNAC, 2011), le pourcentage de caféiculteurs respectant ces pratiques a certainement sensiblement baissé depuis lors. En plus, certaines pratiques comme la fertilisation minérale ne peuvent avoir un effet positif sur le rendement que quand les autres pratiques sont respectées. Ainsi, pour avoir un bon rendement de café, il faut donc préalablement pailler, tailler, sarcler et appliquer rationnellement les pesticides avant d'appliquer les engrais. Il est donc important d'étudier le niveau d'application des différents volets de conduite de la caféiculture en milieu réel avant de les lier au rendement.

L'association des caféiers avec les cultures vivrières est de deux types (Wintgens, 2009) : une association temporaire avec des cultures annuelles avant la première production des caféiers, et une association permanente avec des cultures pérennes. Au Burundi, des recherches sur l'association des jeunes caféiers avec des cultures annuelles comme le haricot, le soja et l'arachide ont été réalisées (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007). Cependant, l'association avec des cultures pérennes comme le bananier était, dans le temps, interdite au Burundi (Gaie et Flémal, 1988) et même dans les pays à écologie similaire comme la Tanzanie (Robinson, 1961).

Contrairement au caféier, le bananier est une culture qui est ancrée dans l'agriculture burundaise. Il est présent dans près de 80 % des exploitations (Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, 2008). Les variétés à bière sont dominantes au Burundi, tout comme au Rwanda (Gaidashova, 2005). Le bananier n'a pas bénéficié de l'intérêt de la recherche comme ce fut le cas pour le caféier. Pour cette raison, aucune technique de culture n'a été proposée aux agriculteurs. Ce n'est que récemment que le bananier a commencé à attirer l'attention des décideurs et des chercheurs (Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2008 ; Gouvernement du Burundi, 2011). Les pratiques culturelles sont donc traditionnelles (Rishirumuhirwa, 1997).

Pour la culture des bananiers, il est important de décrire les systèmes couramment rencontrés dans les exploitations, les pratiques culturelles appliquées et leurs impacts sur le rendement de banane. Des résultats récents

sur les teneurs en éléments nutritifs et le rendement de bananiers dans la région des Grands Lacs Africains ont été obtenus (Bouwmeester et al., 2009). Ces résultats ne font pas référence à la position des parcelles de bananiers par rapport aux habitations alors que les différences de gestion entre ces deux types de parcelles de bananiers (parcelles proches des habitations et parcelles éloignées des habitations) sont réelles (Drion, 1992 ; Rishirumuhirwa, 1997).

Compte tenu du fait que les données relatives aux pratiques réellement mise en œuvre par les caféiculteurs sont souvent assez anciennes (années '80 et '90), et vu la méconnaissance des pratiques culturelles traditionnelles dans les parcelles de bananiers, l'objectif de ce chapitre est de i) faire un état des lieux de la culture du bananier et du caféier au Burundi et ii) analyser l'impact des pratiques culturelles sur le rendement des caféiers et des bananiers dans les principales zones de production.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Choix des sites et des exploitations

Pour connaître les systèmes de culture des caféiers et des bananiers, deux enquêtes différentes ont été menées, l'une sur le café et l'autre sur la banane. L'enquête sur le café a été réalisée au mois de décembre 2008 et celle sur la banane au mois de mars 2010. Ces enquêtes ont été réalisées dans trois régions naturelles du Burundi : Mimirwa, Buyenzi et Kirimiro. Dans chacune des trois régions, 4 communes ont été sélectionnées pour l'enquête café et une seule commune pour l'enquête banane. Pour l'enquête café, les communes sélectionnées étaient Bukinanyana, Mubimbi, Isale et Buyengero dans la région naturelle de Mimirwa, Mwumba, Ruhororo, Kayanza et Muhanga dans la région naturelle de Buyenzi, et les communes de Rutegama, Nyabihanga, Bugendana et Makabuko dans la région naturelle de Kirimiro. Pour l'enquête banane, la commune de Bukinanyana a été sélectionnée dans la région naturelle de Mimirwa, la commune de Busiga dans la région naturelle de Buyenzi et la commune de Rutegama dans la région naturelle de Kirimiro.

(figure 2.1). Les régions naturelles et les communes ont été choisies pour l'importance de la production de café et de banane.

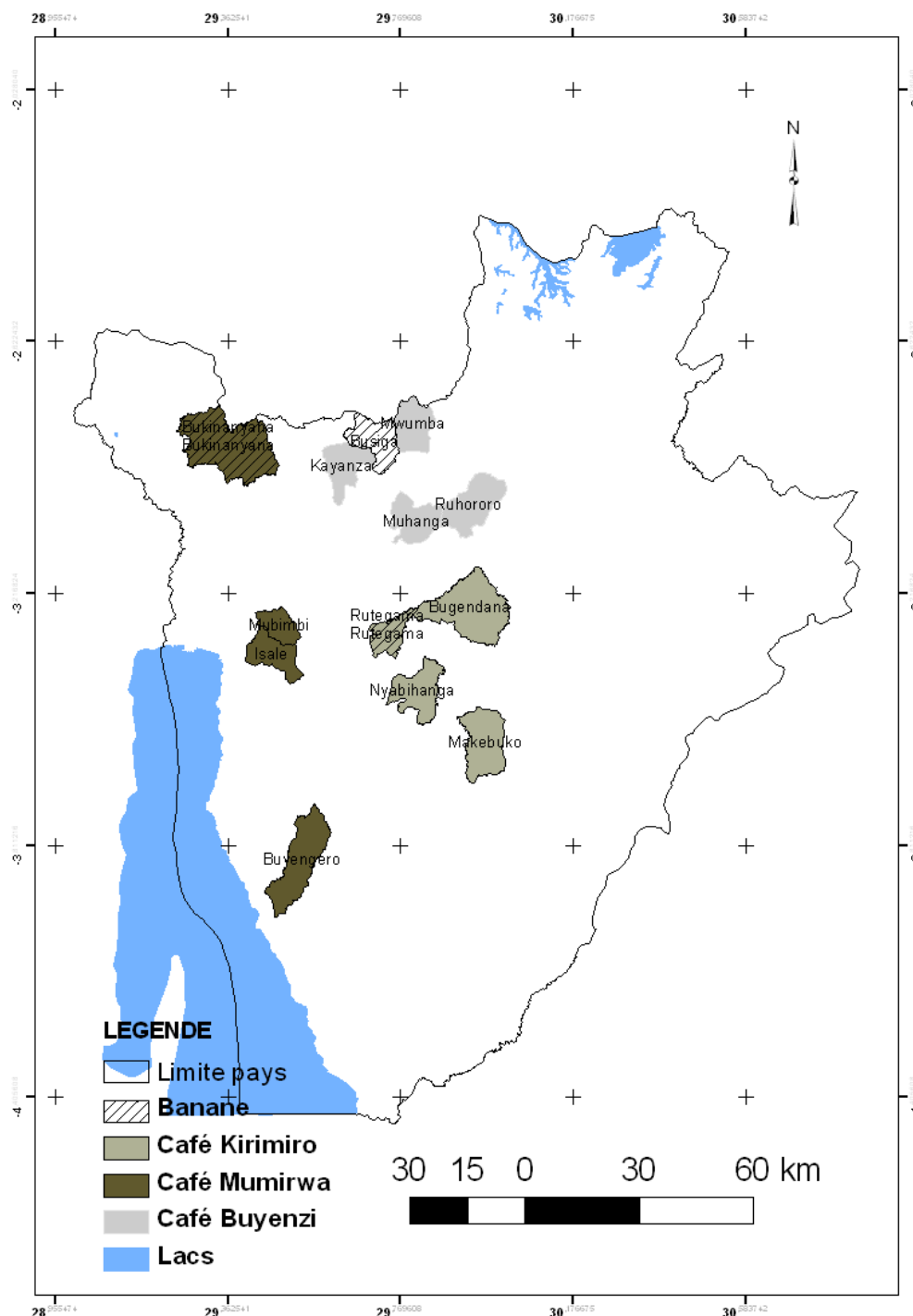


Figure 2.1 : Localisation des communes sélectionnées pour les enquêtes banane et café.

Dans chaque commune, 10 exploitations ont été choisies pour l'enquête café, soit 40 parcelles par région. Les parcelles des caféiers étaient indifféremment

réparties sur toute l'exploitation avec une part importante des parcelles sur les collines et sur les routes, loin des habitations. Pour les bananiers, 7 exploitations ont été sélectionnées dans chacune des trois communes choisies. Dans chaque commune les exploitations ont été choisies en respectant une distance minimale de 5 km entre deux exploitations. Dans le souci de couvrir toute la commune au plus 2 exploitations étaient sélectionnées sur une même colline¹ Les champs de bananiers ont été subdivisés en deux types de parcelles : les parcelles proches des habitations (PH) et les parcelles éloignées des habitations (LH). La séparation entre ces deux types de parcelles était basée sur le gradient de l'aspect végétatif des bananiers (photo 2.1).



Photo 2.1 : Le gradient de fertilité dans les parcelles de bananiers en fonction de leur localisation par rapport à l'habitation (photo C. Biolders)

Dans les exploitations où ce gradient n'était pas visible, les parcelles éloignées des habitations étaient celles qui étaient au-delà de 25 m à partir des premiers bananiers près de l'habitation. En plus des parcelles de bananiers et de caféiers, 7 parcelles où les bananiers et les caféiers étaient associés (ABC) ont été choisies dans les trois communes de l'enquête banane. Le rendement de banane dans les parcelles de caféiers associées avec les bananiers (ABC) a également été mesuré dans 7 parcelles par chacune des trois communes et dans les mêmes communes que pour les autres données sur la banane.

Des données météorologiques (pluviométrie) par région naturelle ont été obtenues à partir d'une station météorologique existante dans la région ou

¹ Une colline est une sous-division de la commune. Chaque commune en compte au moins une dizaine

proche de la région concernée. Ces stations météorologiques étaient Nyamuswaga pour la région de Buyenzi, Gitega pour la région de Kirimiro. Pour la région de Mimirwa, les données climatiques utilisées étaient la moyenne des données observées à Butara et Mubimbi pour la période allant de 1973 à 1988. De 1989 à 2008, les données climatiques de la station de Rwegura ont été utilisées. Les données climatiques ont été fournies par l'IGEBU (2009) et couvraient la période allant de 1973 à 2008.

2.2.2 Détermination de l'âge des caféiers et des bananiers et les pratiques culturales

L'âge des bananiers et des caféiers a été fourni par les agriculteurs. Pour les guider, une échelle de temps sur laquelle étaient inscrits les grands événements qui ont eu lieu au Burundi a été montrée aux agriculteurs. A partir d'un événement bien connu, l'agriculteur pouvait déterminer combien d'année avant ou après cet événement il avait planté ses caféiers ou ses bananiers. L'âge des caféiers après la taille de régénération a été obtenu en demandant à l'agriculteur l'année au cours de laquelle il a effectué la dernière taille de régénération.

Une interview avec l'agriculteur sur la mise en pratique des techniques culturales a été réalisée. Pour les caféiers, les données récoltées concernaient les 4 dernières années alors que pour les bananiers ces données concernaient que l'année en cours. Ceci a été fait parce que la forte variabilité des pratiques observée dans les caféiers n'est pas connue chez les bananiers. Les données sur la pratique de la fertilisation ont été données par l'agriculteur. Ces données permettaient de savoir si oui ou non, l'agriculteur fertilisait ses caféiers, avec quel type de fertilisant (fumure organique (fumier et compost ; FO), engrais minéral (FM), engrais minéral et organique (FOM), déchets ménagers non compostés (DM), chaux), la source d'approvisionnement et la quantité. Pour les bananiers, l'agriculteur donnait des précisions sur le type de fertilisants utilisés dans chacune des deux parcelles (LH et PH) et la quantité apportée. Sur la technique du paillage, l'agriculteur avait à répondre si oui ou non, il avait fait le paillage intensif pendant l'année 2008. Si oui, il avait à préciser le mois pendant

lequel ce paillage avait été réalisé. De plus, l'agriculteur fournissait des informations qualitatives sur la quantité de paillis apportée : 1 = absence de paillis, 2 = paillis insuffisant quand plus de la moitié du sol était découvert au niveau de la parcelle, 3 = paillage moyen quand plus de la moitié du sol de la parcelle était couvert et 4 = paillage intégral de la parcelle. La régularité du paillage a été estimée sur une période de 4 ans, de 2005 à 2008, et pour chaque année, l'agriculteur avait à répondre si oui ou non il avait paillé ses caféiers. Le type de paillis utilisé dans le paillage a aussi été fourni par l'agriculteur. Les données sur le paillage des bananiers ont été collectées par l'enquêteur par mesures directes dans la parcelle. Ainsi, trois transects de 10 m chacun ont été tirés au hasard dans chaque parcelle de bananiers. Pour chaque transect, à 1 m de distance, les mesures suivantes ont été prises : i) présence de paillis (1 = paillé, 0 = non paillé) ; ii) le type de paillis dominant et iii) la profondeur du paillis, mesurée à l'aide d'une règle graduée.

Pour la lutte contre les maladies, l'agriculteur a répondu aux questions relatives à l'application de pesticides sur les caféiers et les bananiers, c'est-à-dire si oui ou non, il avait appliqué les pesticides pour l'année en cours, en quelle quantité et quelle était la source d'approvisionnement. Pour connaître la régularité dans l'application des pesticides chez les caféiers, le caféiculteur a répondu s'il avait appliqué ces produits en 2007, en 2006 et en 2005. Comme l'enquête avait révélé que les traitements réalisés étaient uniquement destinés à lutter contre la punaise de caféier (*Antestiopsis orbitalis ghesquierei* Carr), seuls les insecticides ont été considérés.

L'analyse de l'association avec les autres cultures a été faite par appréciation de l'enquêteur. Toutes les cultures associées aux caféiers et aux bananiers ont été inventoriées. Pour chaque culture, l'intensité de l'association a été déterminée avec i) la cote 1 quand l'intensité était faible, c'est-à-dire quand la culture ne couvrait qu'une partie de la surface de la parcelle avec une faible densité, ii) cote 2 quand l'intensité de la culture était moyenne, c'est-à-dire que toute la parcelle était occupée par la culture mais à faible densité et iii) la cote 3 pour l'intensité élevée, c'est-à-dire que toute la parcelle était occupée par la culture avec une densité proche de celle en culture pure.

2.2.3 Analyse du sol et des feuilles des caféiers et des bananiers

Des échantillons de sol et de feuilles de caféiers ont été prélevés en novembre 2008 dans 4 exploitations par commune, soit un total de 16 exploitations par région naturelle. Dans chaque parcelle de caféiers, 10 échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0-30 cm avec une tarière, puis mélangés pour avoir un échantillon composite par parcelle. Après mélange, 500 g de sol ont été séchés à l'air libre sous ombrage, emballés et labélisés. L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été fait sur la troisième ou la quatrième paire de feuilles comptées à partir de la dernière paire de feuilles récemment épanouie (Wrigley, 1988). Dans chaque parcelle de caféiers, 10 pieds ont été choisis au hasard et, sur chaque pied, 5 paires de feuilles ont été récoltées sur 5 parties différentes du plant : en bas, quart inférieur, milieu, quart supérieur et la partie supérieure. Les feuilles provenant de la même parcelle ont été mélangées pour avoir un échantillon composite. L'échantillon composite ainsi obtenu a été séché dans une étuve pendant 96 heures à 65°C. Les analyses de feuilles et de sols ont été réalisées au laboratoire de chimie agricole de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre dans une suspension de sol d'eau distillée dans le rapport 1 :5. La matière organique (MO) du sol a été déterminée à l'aide de la méthode Walkley et Black (1934). L'azote total a été déterminé en utilisant la solution de digestion de Kjeldahl et le dosage a été fait par colorimétrie. Les cations échangeables ont été mesurés avec la méthode Metson: les sites d'échange du sol ont été saturés par l'ion ammonium provenant de l'acétate d'ammonium 1M à pH 7. Les cations échangeables ainsi déplacés ont été récoltés et dosés avec un spectromètre à absorption atomique. Le phosphore assimilable a été déterminé avec la méthode Olsen-Dabin. Dans les feuilles, les teneurs en phosphore et en cations ont été obtenues par minéralisation avec de l'acide nitrique après broyage et calcination à 450°C. Le dosage du phosphore a été réalisé par colorimétrie et les cations par spectrométrie à absorption atomique. Pour l'azote, la minéralisation a été réalisée avec la méthode Kjeldahl et le dosage par colorimétrie.

Pour les bananiers, 10 échantillons de sol à la tarière ont été pris en mars 2010 à une profondeur de 0-30 cm, puis mélangés pour avoir un échantillon composite par parcelle (PH et LH). Après le mélange et séchage à l'air, 500 g de sol ont été emballés et labélisés. L'échantillonnage des feuilles de bananiers a été fait en utilisant la Méthode d'Echantillonnage Internationale de Référence (MEIR) proposée par Martin-Prével (1969). La troisième feuille comptée à partir de la feuille récemment épanouie a été sélectionnée sur un plant en floraison au stade des mains femelles découvertes. Une bande de 10 cm se trouvant au milieu du limbe et de part et d'autre de la nervure centrale a été sectionnée et divisée en deux parties égales. La partie interne a été conservée pour les analyses au laboratoire. Un échantillon composite par parcelle était constitué des échantillons de feuilles provenant de 10 plants différents. Les analyses de feuilles et de sols ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre dans une suspension de sol et de l'eau déionisée dans le rapport 1 :2,5. La matière organique (MO) du sol a été déterminée à l'aide de la méthode Walkley et Black (1934). L'azote a été déterminé en utilisant la solution de digestion de Kjeldahl et la mesure a été faite par spectrophotométrie. Le P, Ca, Mg, K et Zn extractibles ont été extraits avec la solution Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Le P a été déterminé par colorimétrie alors que K, Ca, Mg, et Zn ont été dosés à l'aide d'un spectromètre à absorption atomique. Les feuilles ont été séchées à l'étuve pendant 48-96 heures, puis broyées et tamisées. Le produit obtenu a été digéré dans une solution d'acide sulfurique et sélénique. Les teneurs en N et en P ont été obtenues par colorimétrie et les teneurs en K, Ca, Mg et Zn par spectrométrie à absorption atomique.

Les indices Compositional Nutrient Diagnosis (CND) ont été déterminés en utilisant les normes de Wairegi et al. (2009) pour les bananiers et Wairegi et al. (2012) pour les caféiers (annexe 2.3). L'analyse des CND permet de détecter les déficits ou les excès pour un élément en fonction de la concentration des autres éléments. Un élément est déficient quand son indice est inférieur à 0, excédent quand il est supérieur à 0 et en équilibre quand il est égal à 0. Pour le Zn, la valeur relative de Zn (RZn) a été utilisée. Cette valeur correspond à la différence entre la valeur de Zn obtenue par analyse foliaire moins la norme

proposée par Snoeck et Lambot (2009). Ces auteurs proposent une teneur normale de Zn comprise entre 10 et 15 ppm. Pour cette étude, la valeur de 10 a été utilisée. La valeur de RZn était négative quand il y avait une carence et positive quand il y avait excédent. Ces analyses ont été réalisées pour montrer les éléments à apporter (quand les valeurs étaient négatives) dans les différents contextes de production de café et de banane. Les indices CND ont été déterminés à partir des indices de références permettant d'avoir le plus grand rendement (Parent et Dafir, 1992 ; García-Fernández et al., 2005). Ainsi, des valeurs de CND négatives entraînent une diminution du rendement qui est d'autant plus importante que les valeurs de CND sont plus négatives (Parent et Dafir, 1992 ; Khiari et al., 2001).

2.2.4 Détermination du rendement de café et de banane

Le rendement de café a été donné par l'agriculteur. Le premier rendement à être estimé était le rendement de 2008, c'est-à-dire le plus récent. Il a été estimé à partir de la quantité de cerises vendue aux stations de lavage et/ou la quantité de café palche vendue au marché local. Pour obtenir le poids de cerises à partir du café palche vendu au marché local, ce dernier a été multiplié par 4,75 (Gaie et Flémal, 1988). Après l'estimation de la production de 2008, l'agriculteur a fourni une estimation de la production de 2007, de 2006 et de 2005 en comparant ces productions avec la production de 2008. Ceci a été fait dans l'objectif de déterminer l'amplitude de la cyclicité de production entre les années. Avec le nombre total de plants et la superficie de la parcelle déterminés par l'enquêteur, le rendement de cerises a été calculé par hectare sur les 4 années, de 2005 à 2008. La densité de plantation des caféiers a été déterminée en faisant la moyenne de 5 distances mesurées entre les lignes et 5 distances entre les plants dans les lignes. Avec ces valeurs moyennes entre les lignes et dans les lignes, la densité de caféiers a été calculée par hectare.

Le rendement de banane (T/ha) par cycle a été obtenu en multipliant le poids moyen du régime par la densité des bananiers de chaque parcelle. Le poids moyen du régime par parcelle a été déterminé par la moyenne du poids de 5 régimes sélectionnés au hasard. Le poids de chaque régime a été déterminé

avec l'équation 2.1 proposée par Wairegi et al. (2010), avec un R^2 de 0,73. Cette formule a été utilisée parce qu'elle a été développée dans des conditions proches de celles du Burundi et sur les variétés de bananiers d'altitudes, les mêmes que celles cultivées au Burundi.

$$\ln(\text{PR}) = - 6,795 + 0,755 \ln(\text{CRBB}) + 1,059 \ln(\text{CR1mB}) + 0,569 \ln(\text{NM}) + 0,478 \ln(\text{ND}) \quad (2.1)$$

Avec PR : poids du régime (kg), CRBB : circonférence à la base (cm) ; CR1mB: circonférence à 1 m (cm) ; NM : nombre de mains ; ND : nombre de doigts de la 2^{ème} rangée de l'avant dernière main.

La densité des bananiers a été déterminée en délimitant dans chaque parcelle de bananiers trois carrés de 5 m de côté choisis aléatoirement dans la parcelle de bananiers. Le nombre moyen de plants de bananiers obtenu dans les 3 carrés a été extrapolé à l'hectare. Dans les parcelles de bananiers associés aux caféiers, la superficie de la parcelle et le nombre de bananiers dans la parcelle ont été déterminés, puis extrapolés à l'hectare.

2.2.5 Analyses statistiques des résultats

Pour les pratiques culturales, les pourcentages d'exploitations qui appliquaient les techniques ont été déterminés sans analyses de la variance parce qu'il n'y avait qu'un seul pourcentage par région naturelle et par pratique culturale. Les données sur les caféiers (les résultats d'analyse du sol, les indices CND et le rendement) ont été analysées avec l'ANOVA I, où le seul facteur était la région naturelle. Pour les données de bananiers (la quantité de fumure organique, les résultats d'analyse du sol, les indice CND et le rendement), l'analyse de la variance à un facteur (ANOVA I) a été utilisée d'abord pour comparer les régions naturelles et, dans chaque région naturelle, l'ANOVA I a été utilisé pour comparer les moyennes en fonction de la localisation des parcelles de bananiers (LH et PH). Particulièrement pour le rendement de banane, il y avait 3 types de parcelles de bananiers (LH, PH et ABC). Les graphiques et les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Excel 2003 et les analyses de la

variance par le logiciel R 2.13.1. La classification des moyennes a été faite avec le test de Tukey.

2.3 Résultats

2.3.1 Age des caféiers et des bananiers

Dans les trois régions, plus de 42 % des parcelles de caféiers avaient un âge compris entre 21 et 30 ans, c'est-à-dire qu'elles ont été installées entre 1978 et 1988 (figure 2.2a). Le pourcentage était particulièrement élevé à Kirimiro avec une valeur de 62 %. Les parcelles de jeunes caféiers (moins de 10 ans) représentaient moins de 10 % et cela dans les trois régions. Dans la région naturelle de Buyenzi, 18 % des parcelles de caféiers avaient un âge compris entre 11 et 20 ans alors que le pourcentage observé dans les autres régions pour la même tranche d'âge était inférieur à 10 %. Le pourcentage le plus élevé de vieux caféiers a été enregistré à Mumirwa où les caféiers âgés de plus de 40 ans représentaient 27 % et ceux âgés de plus de 30 ans, 43 %.

Le pourcentage de caféiers âgés de moins de 7 ans après la taille de régénération était plus élevé à Kirimiro comparativement aux autres régions. Dans cette région, 59 % des caféiers avaient un âge après la taille de régénération inférieur ou égal à 7 ans (figure 2.2b). A Buyenzi, 74 % des caféiers étaient âgés de plus de 7 ans après la taille de régénération, contre 55% à Mumirwa et 41% à Kirimiro. L'âge moyen des caféiers et l'âge moyen après la taille de régénération n'étaient pas statistiquement différents ($p \leq 0,05$) entre les régions.

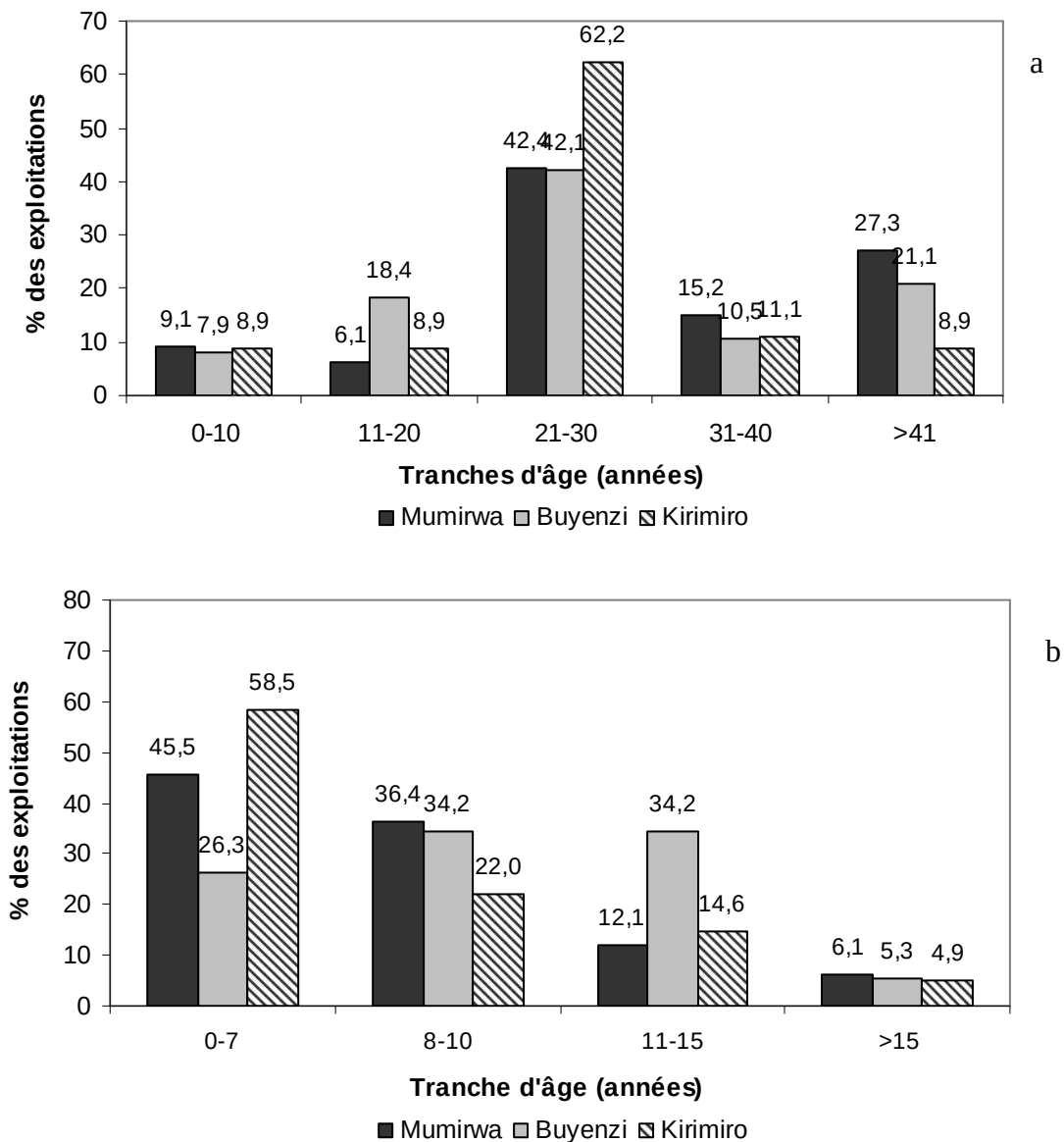


Figure 2.2 : L'âge des caféiers (a) et l'âge après la taille de régénération des caféiers (b) dans les régions naturelles de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro.

Les bananiers étaient âgés dans les trois régions naturelles. Plus de 71 % des bananeraies avaient plus de 20 ans à Mumirwa, contre 86 % à Buyenzi et Kirimiro. Des bananeraies jeunes, âgées de moins de 10 ans, ont été rencontrées uniquement à Mumirwa dans 14 % des exploitations. En comparant les trois régions naturelles entre elles, l'âge des bananiers n'étaient pas statistiquement différents ($p \leq 0,05$). L'âge moyen était de 26 ans à Mumirwa et de 29 ans à Buyenzi et à Kirimiro (données non montrées). Les bananiers plantés dans les caféiers étaient en moyenne âgés de 3 ans à Kirimiro, 4 ans à Buyenzi et 6 ans à Mumirwa.

2.3.2 Les pratiques culturelles réalisées dans les parcelles de caféiers et de bananiers

a) Le café

La fertilisation minérale était la pratique la moins réalisée dans les caféières burundaises. Le plus grand pourcentage d'agriculteurs appliquant les engrais minéraux a été observé en 2007 à Mumirwa. Ce pourcentage était de 24 % (tableau 2.1). La région de Buyenzi était celle où l'application des engrais minéraux était la moins fréquente, avec un pourcentage de parcelles fertilisées ne dépassant pas 10 %. La région de Kirimiro se situait entre ces deux régions. L'année 2008 a été l'année avec la plus faible fréquence d'application d'engrais, avec un pourcentage qui ne dépassait pas 10 % dans les trois régions et avec un pourcentage de 0 % à Buyenzi. Le pourcentage de caféiculteurs qui appliquaient régulièrement (3 ou 4 ans sur 4) les engrais minéraux était faible. Ce pourcentage était de 19 % à Mumirwa, 16 % à Kirimiro et 3 % à Buyenzi. La quantité d'engrais appliquée était élevée à Buyenzi, intermédiaire à Mumirwa et faible à Kirimiro. Les quantités respectives d'engrais appliqués par plant étaient de 52 g, 37 g et 24 g. L'urée était le seul type d'engrais apporté aux caféiers. Aucun caféiculteur n'a affirmé avoir apporté du fumier ou du compost aux caféiers. La source d'approvisionnement en engrais était les avances du gouvernement, remboursables après la vente du café.

L'application d'insecticide était largement suivie par les caféiculteurs dans les trois régions naturelles au cours des années 2007, 2006 et 2005. Pour ces trois années, le pourcentage de caféiculteurs qui avaient appliqué un insecticide chaque année était supérieur à 66 % dans toutes les régions naturelles (tableau 2.1). Par année, la région naturelle de Buyenzi a enregistré les pourcentages les plus élevés sur la période 2005-2007, avec des valeurs qui étaient toujours supérieures à 80 %. Les plus faibles pourcentages de caféiculteurs ayant appliqué des insecticides ont été observés en 2008. L'application d'insecticide était plus régulière (4 ans sur 4) à Kirimiro, avec 37 % des caféiculteurs. Le nombre d'agriculteurs qui appliquaient régulièrement (4 ans sur 4) ou souvent

(3 ans sur 4) des insecticides dans leurs caféiers étaient de 53,8 % à Mumirwa, de 74,3 % à Buyenzi et de 52,5 % à Kirimiro. La dose d'insecticide appliquée était de 20 ml d'insecticide dans 15 l d'eau pour traiter 60 plants de caféiers. Ces insecticides étaient octroyés par le gouvernement et ne devaient pas être remboursés.

Le paillage des caféiers était la technique culturale la plus appliquée par les caféiculteurs dans les trois régions naturelles. Le pourcentage de caféiculteurs ayant appliqué cette technique dépassait 70 %, quelque soit l'année et la région (tableau 2.1). Cette pratique était plus régulière dans la région naturelle de Mumirwa, puis dans la région de Kirimiro et moins régulière dans la région naturelle de Buyenzi. Les parcelles de caféiers qui recevaient régulièrement ou souvent du paillis représentaient 81 % à Mumirwa, 83 % à Buyenzi et de 88 % à Kirimiro.

Tableau 2.1 : Application des pratiques culturales dans les caféiers par région naturelle (Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro). Les données sont des pourcentages de caféiculteurs

	2008	2007	2006	2005	Sur 4 ans ¹	Sur 3 ans ²	Dose ¹ (g plant ⁻¹)
Fertilisation							
Mumirwa	9,1	24,2	18,2	21,2	6,1	13,2	37,4
Buyenzi	0,0	2,6	7,9	7,9	0,0	2,6	52,1
Kirimiro	9,8	19,5	12,2	19,5	4,9	10,6	23,9
Insecticide							
Mumirwa	42,4	74,3	65,7	66,7	25,7	53,8	-
Buyenzi	31,4	97,4	88,6	80,0	28,6	74,3	-
Kirimiro	41,5	70,7	73,2	75,6	37,1	52,5	-
Paillage							
Mumirwa	87,5	90,6	84,4	87,5	74,2	80,7	-
Buyenzi	82,9	85,7	82,9	74,3	57,1	82,9	-
Kirimiro	70,0	75,0	71,8	82,1	66,7	87,5	-

¹ Sur 4 ans : le pourcentage d'agriculteurs ayant appliqué la technique sur tous les 4 ans de l'étude ; ² sur 3 ans : pourcentage d'agriculteurs ayant appliqué la technique pendant 3 ans sur les 4 ans de l'étude ; ³ dose : Quantité d'engrais appliquée par plant de caféiers.

L'analyse de la technique de paillage a montré que dans les parcelles de caféiers, le paillage intégral était le plus courant. A Mumirwa, c'étaient 94 % des caféiculteurs qui avaient appliqué le paillage intégral, contre 100 % à Buyenzi et 93 % à Kirimiro. L'analyse qualitative de la quantité de paillis a montré que les pourcentages de parcelles paillées suffisamment ou moyennement étaient supérieurs à 53 % (figure 2.3). La région de Kirimiro avait le pourcentage le plus élevé de parcelles suffisamment paillées, suivi par la région de Mumirwa. Les parcelles non paillées ou insuffisamment paillées représentaient entre 35 et 47 %. La région de Buyenzi avait le plus grand pourcentage de parcelles insuffisamment paillées. Le pourcentage de parcelles non paillées était le plus

élevé dans la région de Mumirwa avec une valeur maximale de 12,5 % observée.

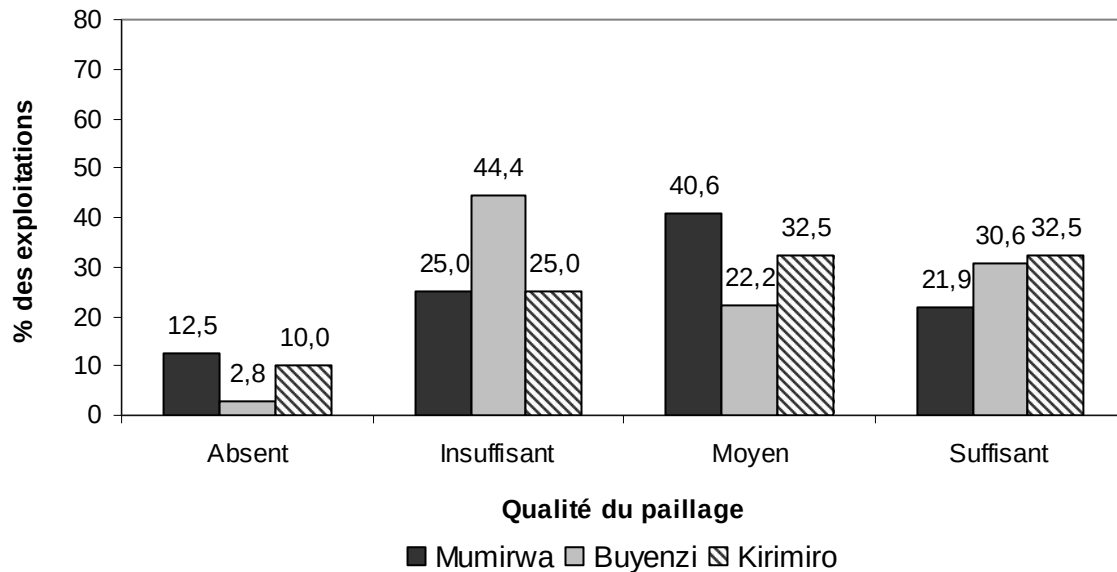


Figure 2.3 : Estimation qualitative de la quantité de paillis dans les parcelles de caféiers pour les régions naturelles de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro.

Dans les parcelles de caféiers, le paillage intensif était surtout appliqué dans le courant de la saison sèche, pendant les mois de juin, juillet et août (figure 2.4a, 2.4b et 2.4c). Les parcelles paillées pendant cette période représentaient 70 % des parcelles de caféiers à Mumirwa, 69 % à Buyenzi et 73 % à Kirimiro. Dans les régions naturelles de Mumirwa et de Buyenzi, un pic de paillage a été observé au mois d'août avec des pourcentages de 27 à Mumirwa et 31 à Buyenzi. Ce pic a été observé au mois de juin à Kirimiro avec un pourcentage de 27. Les pourcentages de parcelles paillées avant le début de la saison sèche (avril-mai) étaient faibles avec des valeurs inférieures à 15 % dans les 3 sites. A Buyenzi et Kirimiro, le type de paillis prédominant dans les parcelles de caféiers était constitué par des résidus de bananiers, avec des pourcentages respectifs de 76 et 69. A Mumirwa, les graminées sauvages constituaient le type de paillis dominant dans 95 % des parcelles de caféiers.

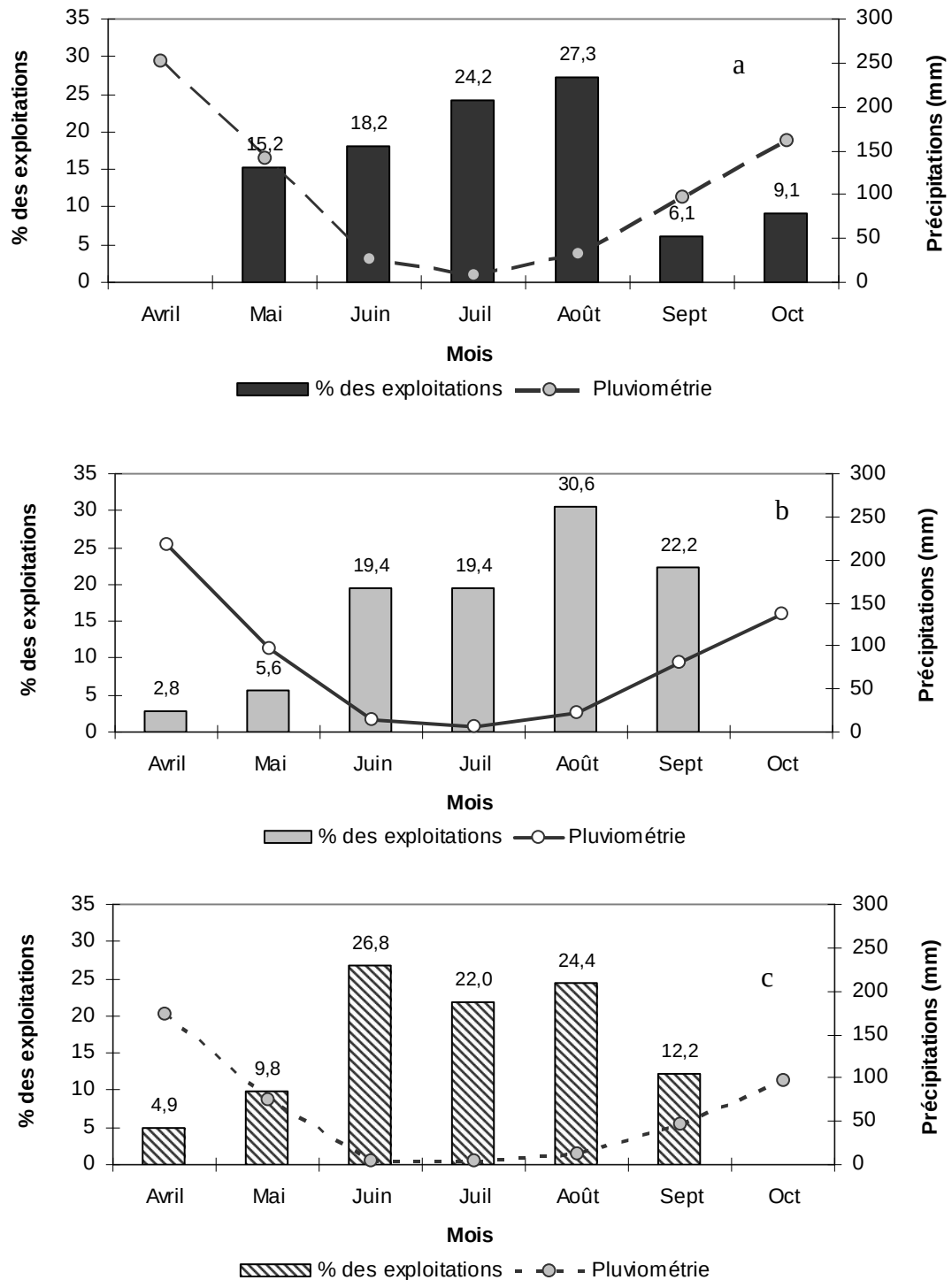


Figure 2.4 : Les périodes d'application du paillis et la pluviométrie moyenne mensuelle (1973-2008) correspondante dans les parcelles de caféiers pour les régions naturelles de Mimirwa (a), de Buyenzi (b) et de Kiriromo (c).

b) Banane

Dans les parcelles proches des habitations (PH), la fertilisation se faisait principalement au moyen de déchets ménagers et secondairement avec de la fumure organique (fumier ou compost) (tableau 2.2). Aucun engrais minéral n'était utilisé dans les parcelles PH. Dans les parcelles éloignées des habitations, la fertilisation était majoritairement réalisée avec de la fumure organique (fumier ou compost) à Mumirwa, et des engrais minéraux à Buyenzi et Kirimiro. L'engrais utilisé était du DAP, qui était appliqué par plus de 87 % des agriculteurs qui avaient utilisé des engrais minéraux. Le reste était constitué par de l'urée. Le pourcentage d'exploitations appliquant des engrais minéraux dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations était le plus élevé à Kirimiro, mais la quantité appliquée était significativement ($p \leq 0,05$) plus faible que dans les deux autres régions (tableau 2.2). Le pourcentage d'exploitations combinant la fertilisation minérale et la fertilisation organique était faible (14 % à Mumirwa et Kirimiro). La quantité d'engrais minéral appliquée était significativement plus élevée à Mumirwa où les engrais étaient combinés avec la FO. Dans les trois régions, la quantité de FO appliquée dans les parcelles LH était significative plus élevée que dans les parcelles PH.

Tableau 2.2: Les types de fertilisants utilisés dans les parcelles de bananiers selon la localisation loin des habitations (LB) et près des habitations (PB) dans les régions naturelles de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro. Les données sont en % de parcelles. Pour les quantités, les valeurs données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

	Mumirwa		Buyenzi		Kirimiro	
	LH	PH	LH	PH	LH	PH
Type de fertilisants						
FM ¹ (%)	0	0	57,1	0	71,4	0
FO ² (%)	57,1	14,3	28,6	28,6	14,3	42,9
FOM ³ (%)	14,3	0	0	0	14,3	0
DM ⁴ (%)	0	57,1	0	71,4	0	57,1
NF ⁵ (%)	28,6	28,6	14,3	0	0	0
Estimations des quantités						
QFM ⁶ (kg/ha)	50,0c	N/A	38,1b	N/A	22,9a	N/A
QFO ⁷ (T/ha)	2,9 b	0,4a	2,0b	0,7a	1,3b	0,6a

¹FM : fertilisation minérale ; ²FO : fertilisation organique (fumier ou compost) ; ³FOM : fertilisation minérale et organique combinée ; ⁴DM : déchets ménagers ; ⁵NF : parcelles non fertilisées ; ⁶QFM : quantité moyenne d'engrais appliquée dans les parcelles fertilisées. La comparaison statistique a été réalisée entre les régions naturelles ; ⁷QFO : quantité moyenne de fumier ou de compost appliquée dans les parcelles fertilisées. La comparaison a été réalisée entre type de parcelles dans chaque région naturelle. Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à $p \leq 0,05$.

Le paillage des bananiers était uniquement pratiqué dans le Mumirwa, avec 100 % de parcelles paillées dans les deux types de parcelles à savoir près des habitations et loin des habitations. Il n'y avait pas de différences significatives entre les valeurs observées loin des habitations (LH) et près des habitations (PH). Le paillis couvrait en moyenne 70 % de la surface avec une épaisseur de 3 cm, et était exclusivement constitué de résidus de bananier.

2.3.3 Association des cultures avec les caféiers et les bananiers

L'association des caféiers avec d'autres cultures était pratiquée dans les trois régions naturelles de l'étude (figure 2.5). A Mumirwa, 53 % des caféiers étaient associés avec d'autres cultures. Ce pourcentage était de 45 à Buyenzi et 52 à Kirimiro. Le taro était la culture la plus souvent associée avec les caféiers dans les trois régions. Les pourcentages respectifs à Mumirwa, à Buyenzi et à Kirimiro étaient de 33, 25 et 24. Le haricot était la deuxième culture la plus souvent associée avec le caféier à Buyenzi et Kirimiro alors qu'à Mumirwa, la deuxième culture la plus souvent associée avec le caféier était le bananier. A Mumirwa, le pourcentage de parcelles de caféiers avec bananiers était de 15, contre 10 à Buyenzi et 5 à Kirimiro. L'association avec le haricot et la tomate a été observée chez les caféiers âgés, avec une moyenne d'âge après la taille de régénération de 8 ans pour le haricot et 10 ans pour la tomate. Outre les trois cultures principales, les caféiers étaient aussi associés avec d'autres cultures comme le maïs, la patate douce, l'ananas, la tomate, les courgettes, la pomme de terre et le tournesol. L'intensité de l'association était forte pour les parcelles avec haricot et maïs, moyenne pour les parcelles avec taro et faible pour les parcelles avec bananier. Dans les parcelles de caféiers en association, les principaux systèmes caféier étaient le caféier et taro observé dans 30 % des exploitations ; le caféier et haricot dans 15 % des exploitations ; caféier et bananier dans 10 % d'exploitation ; le caféier, taro et banane dans 6 % des exploitations.

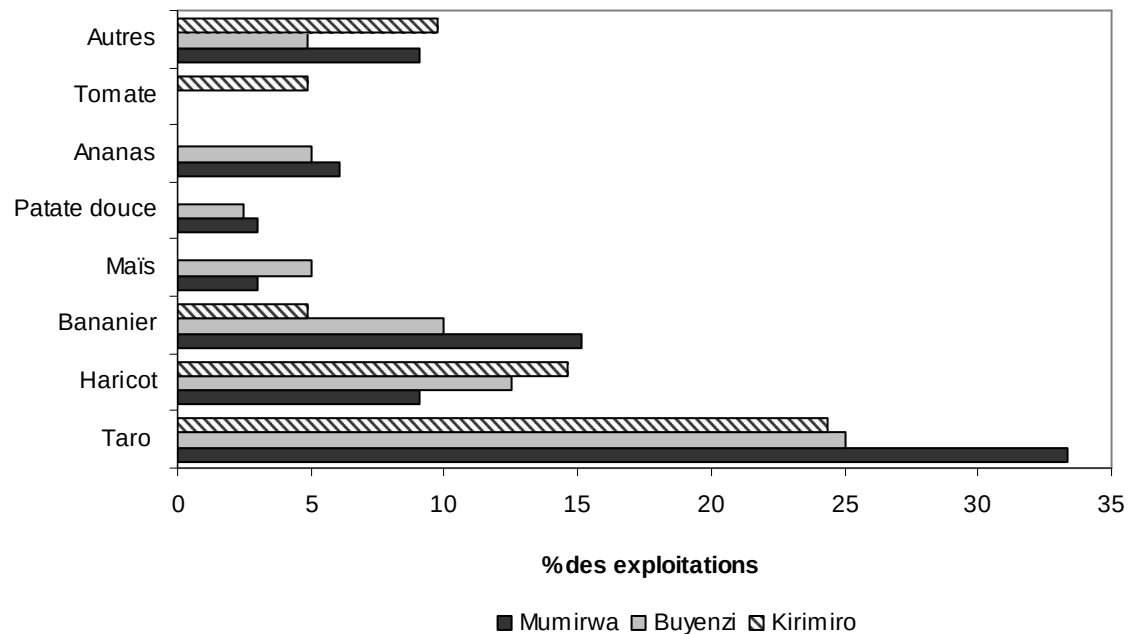


Figure 2.5 : Association des caféiers avec les cultures vivrières par région naturelle. La somme des pourcentages des différentes cultures associées aux caféiers était supérieure au pourcentage des parcelles de caféiers avec cultures associées car plusieurs cultures pouvaient se retrouver dans une même parcelle de caféiers.

L'association des bananiers avec d'autres cultures était fréquente (figure 2.6). A Mumirwa, 86 % des parcelles de bananiers éloignés de l'habitation avaient aussi d'autres cultures vivrières, contre 71 % dans les parcelles proches de l'habitation. A Buyenzi, 100 % des parcelles de bananiers éloignées des habitations étaient en association avec d'autres cultures, contre 43 % dans les parcelles proches des habitations. A Kiri-miro, 100 % des parcelles éloignées étaient associées avec d'autres cultures, contre 57 % près de l'habitation.

Dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations, la culture dominante dans les régions de Buyenzi et de Mumirwa était le haricot, présent dans 100 % des exploitations. Dans la région naturelle de Mumirwa, les cultures dominantes étaient le manioc et le taro, présents dans 43 % des exploitations. Le haricot quant à lui était présent dans 29 % des exploitations de Mumirwa (figure 2.6a). A Buyenzi, la deuxième culture rencontrée dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations était le maïs, suivi par l'arachide. L'arachide a été

uniquement enregistrée à Buyenzi dans les parcelles éloignées des habitations. A Kirimiro, la deuxième place dans l'ordre de culture associée était occupée par le maïs, puis la patate douce et les légumes. Dans la région de Mumirwa, le taro était rencontré près des habitations et loin des habitations. A Kirimiro, il n'y avait pas de taro dans les bananiers, alors qu'à Buyenzi le taro existait uniquement près des habitations. Parmi les cultures associées, il y avait la dominance du taro à Mumirwa et à Buyenzi dans les parcelles proches des habitations. A Kirimiro, les cultures dominantes dans ces parcelles étaient le haricot et les arbres fruitiers (figure 2.6b).

Les parcelles proches des habitations avaient moins de cultures associées que les parcelles éloignées des habitations. Dans les parcelles proches des habitations, les densités de plantations des cultures associées étaient faibles, alors que dans les parcelles éloignées les densités de plantations étaient fortes. Les systèmes dominants étaient, bananier-haricot et bananier-haricot-maïs dans les parcelles éloignées des habitations, et bananier-taro et bananier-taro-fruits-légumes près des habitations.

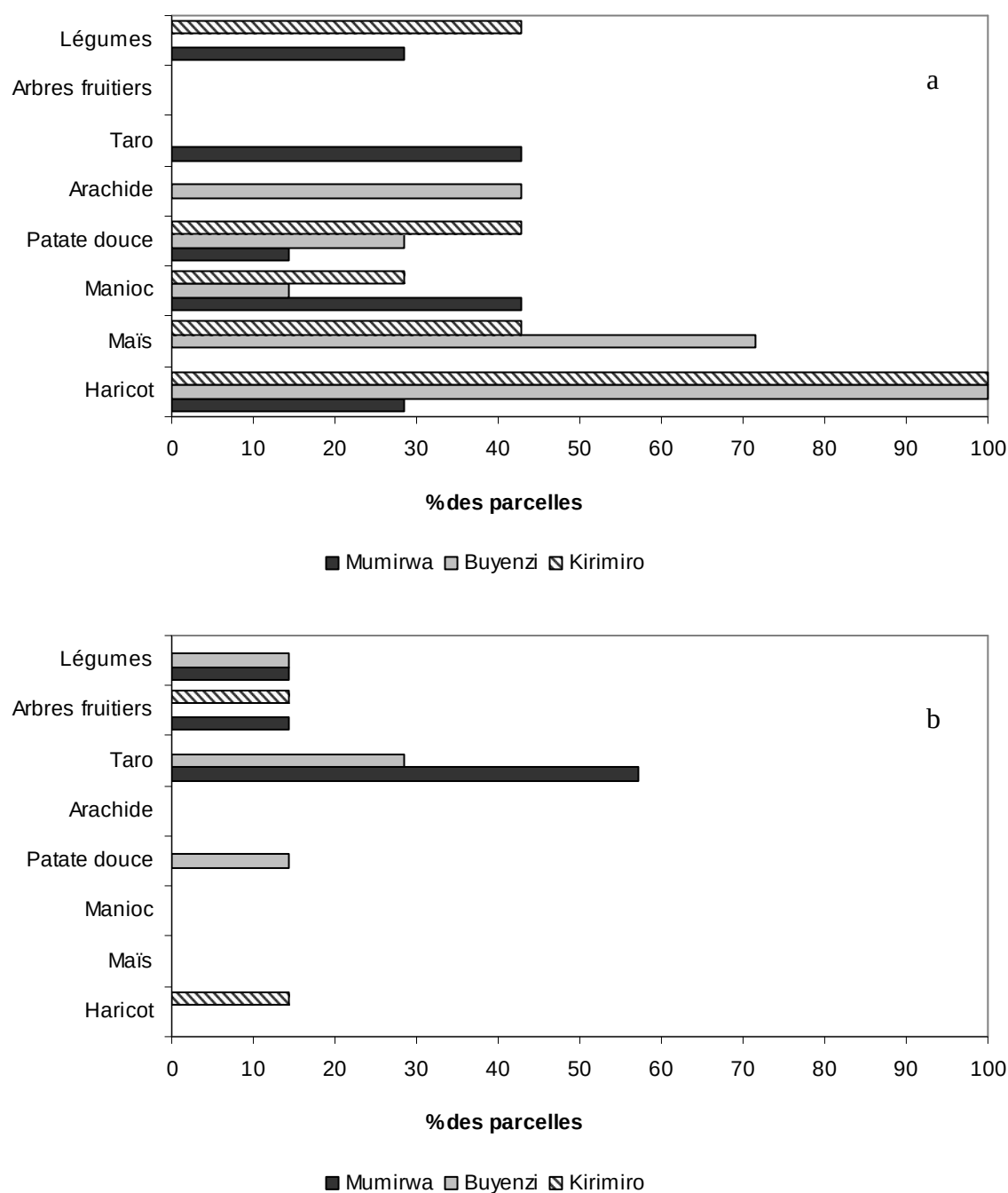


Figure 2.6 : Association des bananiers avec d'autres cultures vivrières par région naturelle dans les parcelles loin des habitations (LH) (a) et près des habitations (PH) (b). La somme des pourcentages des différentes cultures associées aux bananiers était supérieure au pourcentage des parcelles de bananiers avec cultures associées car plusieurs cultures pouvaient se retrouver dans une même parcelle de bananiers.

2.3.4 Résultats d'analyse du sol dans les parcelles de caféiers et de bananiers

Les résultats d'analyse de sol ont montré que les valeurs des caractéristiques du sol étaient généralement plus faibles dans la région naturelle de Mumirwa. Des valeurs significativement plus basses ont été enregistrées pour le pH, le N, le Ca, le Mg et le K comparativement aux deux autres régions (tableau 2.3). A Buyenzi, des valeurs statistiquement plus élevées ont été enregistrées pour le N. A Kirimiro, les valeurs de pH, de Mg et de K étaient statistiquement plus élevées par rapport aux valeurs des deux autres régions naturelles. Les valeurs de C, P et Zn ne différaient pas selon les régions.

Tableau 2.3 : Les caractéristiques du sol (0-30 cm) sous caféiers dans les régions de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro. Les valeurs données sont des moyennes $\pm$ écart-types (n = 16).

Caractéristiques	Mumirwa	Buyenzi	Kirimiro
pH	4,6 $\pm$ 0,5 a	5,2 $\pm$ 0,5 b	5,7 $\pm$ 0,3 c*
Corg (%)	1,7 $\pm$ 0,6 a	2,0 $\pm$ 0,9 a	1,8 $\pm$ 0,4 a
N (%)	0,2 $\pm$ 0,1 a	0,3 $\pm$ 0,1 b	0,2 $\pm$ 0,04 a
P (mg/kg)	12,3 $\pm$ 9,5 a	17,6 $\pm$ 11,5 a	13,3 $\pm$ 8,0 a
Ca (cmol _c /kg)	1,5 $\pm$ 1,7 a	3,6 $\pm$ 1,7 b	3,9 $\pm$ 2,9 b
Mg (cmol _c /kg)	1,0 $\pm$ 0,08 a	1,2 $\pm$ 1,0 b	1,3 $\pm$ 0,7 b
K (cmol _c /kg)	0,5 $\pm$ 0,3 a	0,7 $\pm$ 0,5 a	1,2 $\pm$ 0,6 b
Zn (mg/kg)	3,2 $\pm$ 2,7 a	2,6 $\pm$ 1,8 a	2,7 $\pm$ 1,8 a

* les valeurs avec les mêmes lettres dans les lignes n'étaient pas significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Par l'ANOVA II (Régions et localisation des parcelles de bananiers), on a mis en évidence des différences significatives ($p < 0,001$) entre les régions naturelles. Des différences significatives entre les deux types de parcelles ont été observées uniquement pour le pH ($p = 0,004$) et le Zn ($p = 0,012$). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les parcelles de bananiers

proches des habitations (PH). Ainsi, les valeurs de pH étaient de 5,2 dans les parcelles proches des habitations et de 4,7 dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations (LH) et les valeurs de Zn de 4,3 ppm PH et de 1,1 ppm LH. L'interaction régions-localisation des parcelles n'était pas significative.

La comparaison des parcelles de bananiers proches des habitations (PH) et des parcelles éloignées (LH) dans chaque région naturelle a montré que des différences significatives pour le P dans le Mumirwa, le Mg et le K dans le Buyenzi (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques du sol (0-30 cm) sous bananiers dans les régions de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro en fonction de la localisation des parcelles par rapport à l'habitation : près des habitations (PH) et loin des habitations (LH). Les valeurs données sont des moyennes $\pm$ écart-types (n = 7).

	Mumirwa		Buyenzi		Kirimiro	
	LH	PH	LH	PH	LH	PH
pH	4,1 $\pm$ 0,5	4,5 $\pm$ 0,4 NS	4,5 $\pm$ 0,6	5,1 $\pm$ 0,6 NS	5,6 $\pm$ 0,5	6,0 $\pm$ 0,6 NS
Corg (%)	1,8 $\pm$ 0,2	1,7 $\pm$ 0,5 NS	2,8 $\pm$ 0,5	2,9 $\pm$ 0,3 NS	2,0 $\pm$ 0,5	2,1 $\pm$ 0,8 NS
N (%)	0,2 $\pm$ 0,0	0,2 $\pm$ 0,1 NS	0,3 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,1 NS	0,3 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1 NS
P (mg/kg)	16,8 $\pm$ 4,2	26,4 $\pm$ 5,9 **	19,9 $\pm$ 17,5	26,3 $\pm$ 20,5 NS	1,2 $\pm$ 1,3	2,9 $\pm$ 3,0 NS
Ca (cmol _c /kg)	5,5 $\pm$ 2,2	4,2 $\pm$ 2,2 NS	7,1 $\pm$ 1,9	9,2 $\pm$ 3,2 NS	4,4 $\pm$ 2,0	5,1 $\pm$ 3,1 NS
Mg (cmol _c /kg)	1,1 $\pm$ 0,4	0,7 $\pm$ 0,4 NS	1,1 $\pm$ 0,2	1,7 $\pm$ 0,6*	0,85 $\pm$ 0,4	1,0 $\pm$ 0,3 NS
K (cmol _c /kg)	0,6 $\pm$ 0,3	0,8 $\pm$ 0,4 NS	0,9 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 1,3*	0,9 $\pm$ 0,5	1,2 $\pm$ 0,8 NS
Zn (mg/kg)	1,1 $\pm$ 0,4	7,7 $\pm$ 8,0 NS	2,0 $\pm$ 0,6	2,4 $\pm$ 2,1 NS	0,2 $\pm$ 0,2	2,6 $\pm$ 5,1 NS

* : significatif à $p \leq 0,05$; ** : significatif à $p \leq 0,01$ et $p < 0,001$; NS : non significatif à $p \leq 0,05$. Les comparaisons ont été réalisées entre les deux types de parcelles de bananiers de chaque région.

2.3.5 Analyses CND des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de caféiers et de bananiers

Dans les feuilles des caféiers, l'analyse des indices CND a montré que les caféiers étaient carencés en N et en Zn dans les trois régions naturelles étudiées. Pour l'azote, il n'y avait pas de différences significatives mais, pour le Zn, des valeurs significativement plus faibles ont été enregistrées à Kirimiro (figure 2.7). Dans la région naturelle de Mumirwa, 72,7 % des parcelles avaient une carence en N, contre 94 % à Buyenzi et 100 % à Kirimiro. Pour le Zn, 82 % des parcelles étaient carencées à Mumirwa et 100 % des parcelles à Buyenzi et Kirimiro. Par contre, le K était excédentaire en moyenne dans les trois régions naturelles. Des valeurs significativement plus élevées ont été observées à Mumirwa et Kirimiro comparativement à Buyenzi. Aucune parcelle de caféiers n'a enregistré de déficience en K. Les indices de Ca et de Mg étaient significativement plus élevées à Buyenzi, où ils étaient positifs. Par contre, ces indices étaient négatifs à Mumirwa et à Kirimiro. A Buyenzi, les parcelles de caféiers avec carence en Ca représentaient 38 % et celles carencées en Mg 44 %. A Kirimiro, les parcelles carencées en Ca représentaient 63 % et celles carencées en Mg 88 %. A Mumirwa, les carences en Ca et en Mg ont été observées dans 82 % des parcelles. Les indices de P étaient proches de 0 avec des différences non significatives entre les régions naturelles.

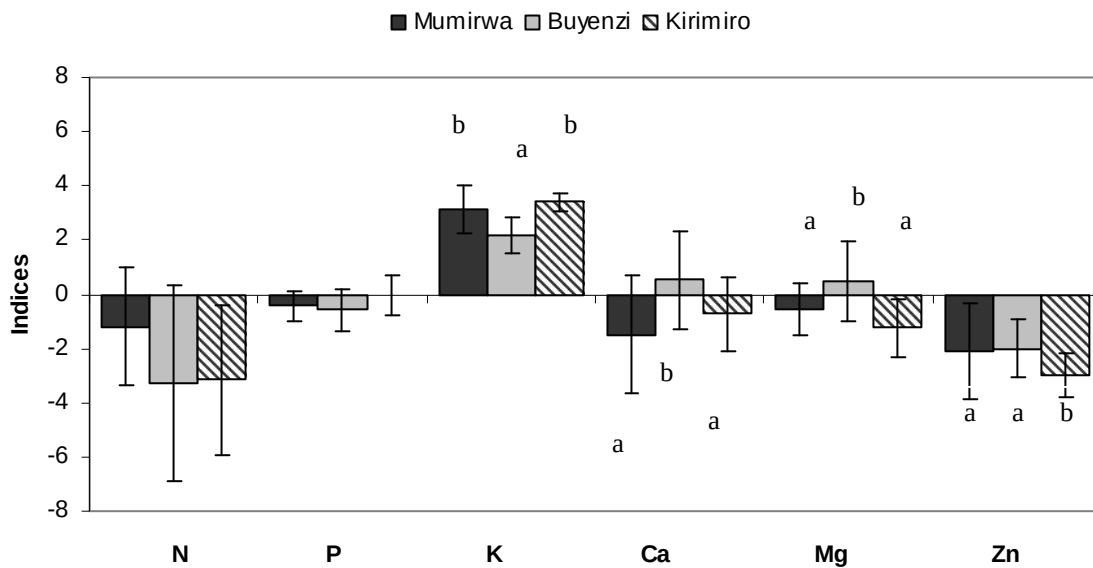


Figure 2.7 : Les indices CND de N, P, K, Ca, Mg et la teneur relative RZn dans les feuilles de caféiers par région naturelle. Les barres représentent les écart-types. Les valeurs avec des lettres différentes étaient statistiquement différentes à $p \leq 0,05$. Il y a absence de lettre pour les valeurs non significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Dans les feuilles de bananiers, la comparaison entre les régions naturelles a montré des différences significatives pour les indices CND de N, de K, de Ca, de Mg et de Zn (figure 2.8). La carence en N était observée dans toutes les régions, avec une forte carence à Mumirwa. Dans cette région, il y avait aussi une forte carence en Mg. Des excédents importants ont été observés pour le K à Mumirwa et pour le Mg à Kirimiro.

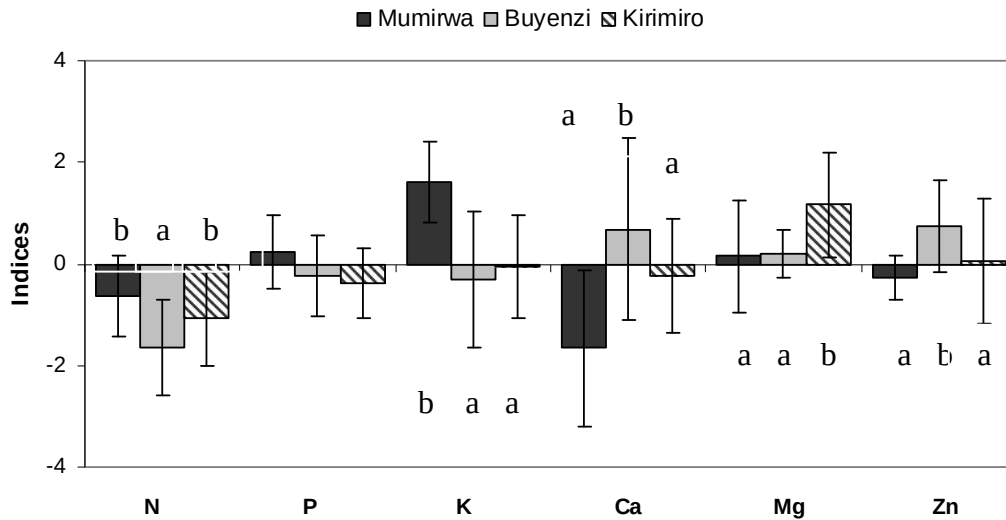


Figure 2.8 : Les indices CND de N, P, K, Ca, Mg et la teneur relative RZn dans les feuilles de bananiers par région naturelle. Moyennes des parcelles proches et éloignées des habitations. Les barres représentent les écart-types. Les valeurs avec des lettres différentes étaient statistiquement différentes à $p \leq 0,05$. Il y a absence de lettre pour les valeurs non significativement différentes à $p \leq 0,05$.

En comparant les deux types de parcelles de bananiers, il y avait déficience du bananier en N et surtout en Ca dans les deux types de parcelles dans la région naturelle de Mumirwa (figure 2.9a). La déficience en N a été enregistrée dans 79 % des parcelles et celle de Ca dans 86 % des cas. Pour ces deux éléments, il n'y avait pas de différences significatives entre les types de parcelles. Dans cette même région, la déficience en Zn a été observée uniquement dans les parcelles éloignées des habitations avec des valeurs significativement plus élevées enregistrées dans les parcelles proches des habitations. Les indices de K étaient positifs dans les deux types de parcelles, avec des valeurs significativement plus élevées dans les parcelles proches des habitations. Dans cette région de Mumirwa, 100 % des parcelles de bananiers étaient excédentaires en K. Dans la région de Buyenzi, les analyses foliaires n'ont pas mis en évidence de différences significatives en fonction de la localisation des parcelles (figure 2.9b). Par contre, dans la région naturelle de Kirimiro, les parcelles de bananiers proches des habitations avaient des indices statistiquement plus élevés pour le N, le P, le K et le Zn, et plus faibles pour le

Ca et le Mg (figure 2.9c). Dans les parcelles proches des habitations, des carences ont été observées pour le N et surtout le Ca, alors que les parcelles éloignées des habitations avaient des carences pour le N, le P, le K et le Zn.

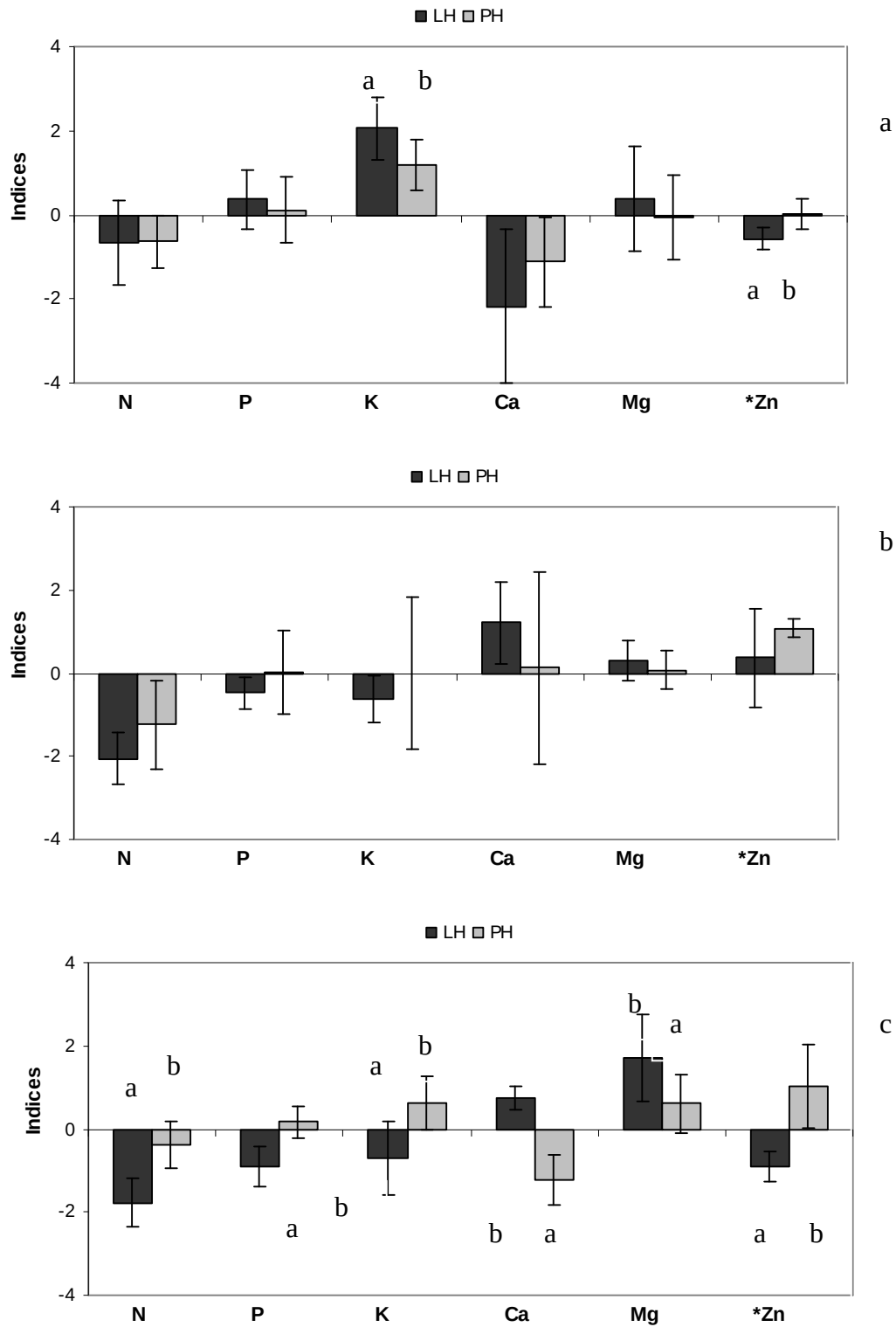


Figure 2.9: Les indices CND de N, P, K, Ca et Mg et la valeur relative de Zn selon la localisation des parcelles de bananiers à Mumirwa (a), à Buyenzi (b) et à Kirimiro (c). * Valeurs de Zn observées multipliées par 10^{-1} . Les valeurs avec des lettres différentes étaient significativement différentes à $p \leq 0,05$. Pas de lettre pour les valeurs non significativement différentes à $p \leq 0,05$. Les barres sont les écart-types. LH : loin des habitations, pH = près des habitations.

2.3.6 Le rendement de café et de banane

Le rendement de café cerise était très variable entre les années dans les trois régions naturelles, mais les plus grandes fluctuations ont été observées dans les régions naturelles de Buyenzi et Kirimiro. Les maxima de rendement étaient de 3,1 T/ha à Buyenzi et 2,6 T/ha à Kirimiro. Les minima de rendement respectifs étaient de 1,2 T/ha et de 0,8 T/ha (figure 2.10). A Mumirwa, les variations de rendement entre deux années consécutives étaient plus faibles, avec un maximum de rendement de 3,2 T/ha et un minimum de 2,0 T/ha. Dans les régions naturelles de Buyenzi et Kirimiro, l'évolution du rendement en dents de scie était régulière et bien marquée sur la période d'étude, c'est-à-dire qu'une année de bonne production était suivie par une année de mauvaise production, alors que pour la région de Mumirwa, la production de 2005 et celle de 2006 étaient proches.

En moyenne, le rendement de café cerise était le plus élevé à Mumirwa, suivi par Buyenzi. Le rendement observé à Kirimiro était le plus faible. Des différences significatives entre les rendements des trois régions naturelles ont été observées uniquement pour l'année 2005. Le rendement le plus élevé a été enregistré à Mumirwa. La densité moyenne de caféiers était de 2468 plants/ha à Buyenzi, de 2636 plants/ha à Kirimiro et de 2317 plants/ha à Mumirwa. Ces densités n'étaient pas significativement différentes à $p \leq 0,05$. Le poids de cerises récoltées par plant était compris entre 1,3 kg et 0,5 kg à Buyenzi, entre 1,0 kg et 0,3 kg à Kirimiro, et entre 1,4 kg et 0,9 kg à Mumirwa.

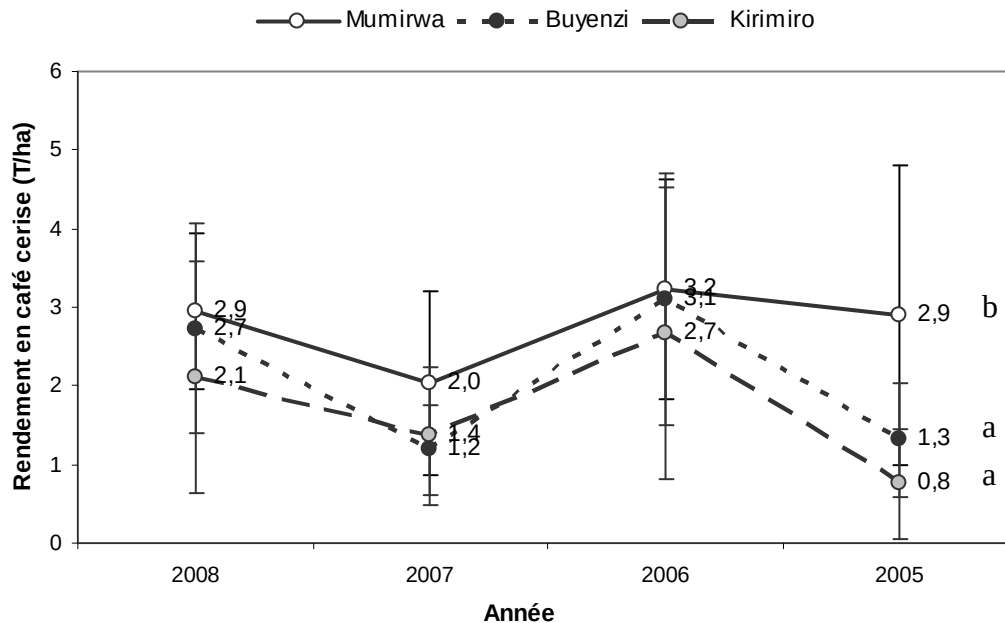


Figure 2.10 : Rendement de café cerise dans les régions naturelles de Buyenzi, Kirimiro et Mumirwa sur une période de 4 ans allant de 2005 à 2008. Les barres représentent les écart-types.

Des différences significatives ont été observées entre les régions pour le rendement de banane par cycle (RDTB) et le poids du régime (PR). Des rendements par cycle et un poids du régime significativement plus élevés ont été enregistrés à Mumirwa et Buyenzi. Les valeurs de rendement par cycle étaient de 18,7 T/ha, 16,1 T/ha et 11,7 T/ha pour le RDTB, de 17,2 kg, 15,0 kg et 11,8 kg pour le poids du régime respectivement à Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro.

Quelle que soit la région, un rendement statistiquement plus élevé a été observé dans les parcelles proches de l'habitation (tableau 2.5). Les plus faibles rendements ont été observés dans les parcelles de caféiers et dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations à Buyenzi et Kirimiro. Dans la région de Mumirwa, le plus faible rendement de banane a été observé dans les parcelles de caféiers. Les différences entre les rendements des parcelles proches des habitations et celles éloignées des habitations étaient plus élevées dans les régions de Buyenzi et Kirimiro. Dans ces régions, les rendements des parcelles éloignées des habitations représentaient 20 % et 19 % des rendements observés près des habitations respectivement pour la région

naturelle de Buyenzi et Kirimiro. Pour la région naturelle de Mumirwa, le rendement de banane observé loin des habitations représentait 68 % du rendement observé près des habitations. Le rendement enregistré dans les parcelles de caféiers représentait 18 %, 14 % et 16 % du rendement des parcelles proches des habitations respectivement à Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro.

Dans les trois régions naturelles, le poids du régime était significativement plus élevé dans les parcelles de bananiers proches des habitations et dans les parcelles de caféiers. La valeur du poids du régime était faible dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations. La densité des bananiers était la plus faible dans les parcelles de caféiers mais la plus forte dans les parcelles de bananiers proches des habitations ($p \leq 0,05$). Contrairement aux deux autres régions, la différence de densité entre les parcelles de bananiers loin et près des habitations n'était pas significative à Mumirwa (tableau 2.5).

La comparaison entre les régions naturelles n'a révélé des différences significatives qu'entre les parcelles éloignées des habitations. Dans ces parcelles, le rendement, le poids du régime et la densité de plantation des bananiers étaient statistiquement plus élevés dans la région naturelle de Mumirwa, comparativement aux deux autres régions.

Tableau 2.5: Le poids du régime (PR), la densité de plantation des bananiers et le rendement de banane par cycle (RDTB), dans les régions naturelles de Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro en fonction de la localisation des parcelles. Les valeurs données sont des moyennes $\pm$ écart-types ($n = 7$).

Caractéristiques	LH ¹	PH ²	ABC ³
Mumirwa			
			18,9 $\pm$ 3,4 b
PR (kg)	14,3 $\pm$ 3,6 a	18,4 $\pm$ 2,7 b	*
Densité (plants/ha)	1427 $\pm$ 275 b	1672 $\pm$ 451 b	286 $\pm$ 99 a
RDTB (T/ha)	20,4 $\pm$ 6,4 b	30,1 $\pm$ 8,0 c	5,5 $\pm$ 2,1 a
Buyenzi			
PR (kg)	6,9 $\pm$ 1,6 a	20,2 $\pm$ 7,7 b	17,7 $\pm$ 4,4 b
Densité (plants/ha)	1017 $\pm$ 241 b	1809 $\pm$ 197 c	278 $\pm$ 129 a
RDTB (T/ha)	7,1 $\pm$ 2,3 a	36,0 $\pm$ 12,8 b	5,2 $\pm$ 3,3 a
Kirimiro			
PR (kg)	6,0 $\pm$ 1,8 a	15,3 $\pm$ 6,8 b	14,2 $\pm$ 4,0 b
Densité (plants/ha)	847 $\pm$ 72 b	1756 $\pm$ 170 c	314 $\pm$ 180 a
RDTB (T/ha)	5,0 $\pm$ 1,5 a	25,9 $\pm$ 9,4 b	4,3 $\pm$ 2,4 a

¹LH : parcelles de bananiers loin des habitations ; ²PH : parcelles de bananiers loin des habitations ; ³ABC : association bananiers caféiers en milieu rural ; * les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significatives à $p \leq 0,05$

2.4 Discussion des résultats

2.4.1 Age des caféiers et des bananiers

Le verger caféicole burundais était à plus de 70 % âgé de plus de 20 ans (figure 2.2a) avec un pic pour les caféiers âgés entre 21 et 30 ans, c'est-à-dire des caféiers installés entre 1978 et 1988. Ces années correspondent à la période de grande extension des caféiers qui a eu lieu dans les années 80 (Nyamoya et al., 1986 ; Hatungimana, 2008), qui s'est traduit par le doublement du verger caféicole burundais (figure 1.1). Or, l'âge des caféiers a une influence sur la

vitalité de la souche. Bien que la taille de régénération permette la régénération des tiges jusqu'à plus de 40 ans, la vie productive des caféiers est en moyenne de 30 ans (Tibaijuka, 1983) et des signes de fatigue peuvent apparaître au-delà de 20 ans, surtout quand les caféiers sont mal entretenus (Coste, 1989). Les jeunes plantations ayant moins de 10 ans représentaient moins de 10% (figure 2.2a). Le vieillissement devrait donc se poursuivre puisque il n'y a pas de renouvellement des plantations.

En plus de l'âge, une autre caractéristique essentielle est la durée depuis la dernière taille de régénération. La périodicité de la taille de régénération de 7 ans (Lambot et Bouharmont, 2009) n'était pas respectée (figure 2.2b). Il y avait un faible retard à Mumirwa et Kirimiro et un grand retard de taille de régénération à Buyenzi (figure 2.2b). Or, la taille de régénération permet de revitaliser les tiges de caféiers et de relancer la production qui diminue avec l'âge (Gaie et Flémal, 1988). Cette taille de régénération permet d'éviter la compétition entre l'appareil végétatif et l'appareil reproductif (DaMatta et al., 2008, DaMatta et al., 2002). Ainsi, les caféiers burundais étaient « doublement plus âgés », de par leur âge et de par la durée depuis la taille de régénération (figure 2.2a ; figure 2.2b).

Les bananiers étaient également âgés, avec une moyenne de 25 ans. Les exploitations visitées avaient cependant un âge moyen un peu plus faible que la moyenne nationale. En effet, dans une enquête nationale réalisée par Niyongere et al. (2012), l'âge moyen des bananeraies burundaises était de 31 ans. Les données sur les bananiers sont à prendre avec une certaine prudence car elles ont été récoltées sur un nombre limité d'exploitations (7 par région naturelle au lieu de 40 pour les caféiers).

2.4.2 Les pratiques culturelles

La fertilisation des caféiers était très faiblement suivie par les caféiculteurs (tableau 1.1). La quantité d'engrais appliquée était très inférieure à la dose recommandée par la recherche, qui est de 132 g d'urée par plant et par an (Gaie et Flémal, 1988). Les résultats ont montré que la fertilisation des caféiers

était presque inexistante au Burundi. Pourtant, les engrais à appliquer dans les caféiers sont octroyés à crédit sans intérêt par le gouvernement et souvent à un prix inférieur à celui du marché (OCIBU, 2008 ; CNAC, 2010 ; BRB, 2011). Ce manque d'intérêt des caféiculteurs pour les engrais a déjà été rapporté. Des stocks restent non utilisés, faute de preneurs (CNAC, 2010). La cyclicité de la production (figure 1.1, figure 2.10) et l'incertitude du retour de l'investissement à cause du faible prix de cerises (OCIBU, 2008) seraient les principales causes de cette réticence à investir dans les engrais.

Pour les bananiers, les types de fertilisants utilisés dépendaient de la localisation des parcelles. Dans les parcelles proches des habitations, seuls des amendements organiques et des déchets ménagers sont utilisés, alors que dans les parcelles éloignées des habitations, les engrais minéraux étaient les plus utilisés à Buyenzi et Kirimiro et la fumure organique à Mumirwa (tableau 2.2). Le pourcentage d'agriculteurs appliquant des fertilisants était plus élevés dans les parcelles sous bananiers que dans les parcelles sous caféiers (tableau 2.1 ; tableau 2.2). Cependant, l'objectif des agriculteurs n'était pas de fertiliser les bananiers car les engrais sont appliqués au moment du semis du haricot et du maïs, associés au bananier. Cela montre que dans les cultures associées sur les parcelles de plus faible fertilité car éloignées des habitations, l'agriculteur peut se permettre d'investir dans les engrais.

L'application d'insecticides était pratiquée par la majorité des caféiculteurs car annuellement plus de 65 % des caféiculteurs appliquaient cette technique (tableau 2.1). Les faibles pourcentages observés en 2008 étaient dus au fait que l'enquête ait été réalisée pendant que la campagne d'application des insecticides était encore en cours. Mais, on constate un manque de régularité dans l'application des insecticides (tableau 2.1). Comme les insecticides appliqués étaient subventionnés par le gouvernement, on pourrait s'attendre à ce que 100% des caféiculteurs appliquent la technique chaque année. Cette situation serait due aux provisions insuffisantes et à la lourdeur de la logistique qui inclut le transport et la distribution des pesticides et des pulvérisateurs jusqu'aux exploitations. Les bananiers, quant à eux, sont cultivés sans applications de pesticides. Les maladies du bananier économiquement

importante comme la maladie virale du bananier (BBTD : banana bunchy top disease), observée dans les régions de basse altitude (Niyongere, 2012), et le flétrissement bactérien (BXW : Banana Xanthomonas Wilt) observé dans toutes les régions de culture de la banane (Niko et al., 2012 ; FAO-ISABU, 2012) ne sont pas traitables au moyen de pesticides.

Le paillage est une opération qui était respectée par presque tous les caféiculteurs des trois régions naturelles (tableau 2.1), mais la quantité de paillis était souvent insuffisante (figure 2.3) suite au manque de matériaux de paillage. En plus de l'insuffisance de la quantité de paillis, la période d'application était inadéquate car le paillis était principalement appliqué entre juin et septembre (figure 2.4). Les mois de juillet et août correspondent aux mois avec la plus faible pluviométrie. Le paillis appliqué pendant le milieu de la saison sèche ne peut plus dès lors jouer son rôle de conservation de l'humidité du sol (Wintgens et Descroix, 2009), ce qui accroît le risque de déficit hydrique des caféiers. Or, un bon paillage avant le début de la saison sèche permet de garder l'humidité du sol à un niveau suffisant pendant au moins 1 mois (Bouharmont, 1979). Les matériaux de paillage étaient différents dans les trois régions naturelles. A Buyenzi et à Kirimiro, les résidus des bananiers constituaient l'essentiel du paillis, avec pour conséquence que les bananeraies n'étaient pas paillées. Au contraire, à Mumirwa, c'étaient les graminées sauvages qui étaient utilisées pour le paillage des caféiers et les bananeraies étaient paillées par auto-paillage (avec les résidus de bananiers provenant de la parcelle elle-même). Une plus grande disponibilité de graminées et la connaissance des effets négatifs de l'exportation des résidus de bananier sur sa production font que les agriculteurs de Mumirwa ne paillent pas les caféiers avec les résidus des bananiers.

L'association des caféiers avec d'autres cultures était couramment pratiquée, avec des pourcentages de parcelles en association variant entre 45 et 53 % selon les régions naturelles. Le taro était la principale culture associée avec les caféiers dans les trois régions naturelles (figure 2.5). La deuxième place était occupée par le haricot à Buyenzi et Kirimiro, et par le bananier à Mumirwa, malgré que cette dernière association soit découragée par les services publics

d'encadrement (Gaie et Flémal, 1988). Les caféiers étaient associées avec le bananier dans près de 15% des caféières dans le Mumirwa, 10 % à Buyenzi et 5 % à Kirimiro (figure 2.5). L'intensité de l'association avec le café était forte pour le haricot et le maïs, moyenne pour le taro et faible pour le bananier. Le haricot et la tomate étaient associés avec des caféiers âgés car l'âge moyen était de 8 ans et 10 ans après la taille de régénération respectivement, pour le haricot et la tomate. Cette pratique est contraire aux recommandations en vigueur, qui conseillent d'associer les caféiers uniquement avec le haricot, le soja ou l'arachide, et cela seulement pendant les 2 premières années qui suivent l'installation ou la taille de régénération (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007).

A Buyenzi et à Mumirwa, la culture la plus fréquemment associée avec les bananiers proches des habitations était le taro (figure 2.6a). Ce système a aussi été aussi rapporté par Drion (1992) à Buyenzi. A Kirimiro, les bananiers proches des habitations étaient moins souvent associés avec des cultures vivrières et, là où il y avait association, il y avait le haricot et les arbres fruitiers. A Buyenzi et Kirimiro, dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations, il y avait toujours association avec plusieurs cultures. Le haricot était la culture omniprésente dans toutes les parcelles des deux régions (figure 2.6b). Cela confirme les observations de Wortmann et al. (1992), qui avaient déjà montré que l'association bananier-haricot était un système dominant dans la région des Grands Lacs africains. Les cultures associées étaient plantées à haute densité à Buyenzi et Kirimiro et à densité moyenne à Mumirwa. En effet, la faible densité de bananiers dans les parcelles éloignées des habitations à Buyenzi et Kirimiro (tableau 2.5) avait permis d'installer d'autres cultures avec des densités élevées.

2.4.3 Résultats d'analyse de sol et de feuilles des caféiers et des bananiers

Les sols étaient différents dans les trois régions naturelles. A Buyenzi et Mumirwa, les sols étaient dominés par des ferrisols alors que les sols de Kirimiro étaient des ferralsols (Sottiaux et al., 1988) et des acrisols (B. Delvaux,

Communication personnelle). Les caractéristiques du sol des parcelles des caféiers étaient significativement différentes entre régions naturelles avec des valeurs de pH et de cations échangeables plus élevées à Kirimiro (tableau 2.3). En utilisant les normes de Snoeck et Lambot (2009 ; Annexe 2.2), les valeurs de pH étaient inférieures à la norme à Mumirwa et Buyenzi. Les valeurs de Ca étaient inférieures aux normes dans toutes les régions naturelles alors que les valeurs de Mg étaient supérieures à la normale à Kirimiro, mais, inférieures à la norme à Buyenzi et Mumirwa. Les valeurs de K du sol étaient supérieures à la norme dans les trois régions naturelles, ce qui pourrait entre autre être lié au paillage. En effet, le type de paillis est susceptible d'influencer les caractéristiques du sol, avec un grand apport en K par exemple en cas d'utilisation des résidus de bananiers (Pozy et Dehareng 1996). L'excès de K dans les parcelles de caféiers a aussi été rapporté par Gaie et Flémal (1988).

En utilisant les indices CND des éléments majeurs dans les feuilles (N, P, K, Ca et Mg) et la valeur relative de Zn (RZn), des carences en N et en Zn ont été observés dans toutes les régions naturelles. Par contre, un excédent de K a été observé dans toutes les régions naturelles (figure 2.7). La carence en azote a aussi été observée par Gaie et Flémal (1988) et Lambot et al (1992). En utilisant les photos illustrant la carence en N proposées par Lambot et Bouharmont (2009), la carence en azote était très présente dans la plupart des caféières visitées. La valeur relativement moins négative de l'indice de N à Mumirwa, bien que non significative, pourrait être due à un niveau de fertilisation légèrement plus élevé (tableau 2.1). La carence en Zn a été rapportée pour plusieurs zones du Burundi, particulièrement dans la région de Kirimiro par Lambot et al. (1992) et dans les rapports de l'ISABU (1996). Cela a été confirmé par nos résultats car la carence en Zn était significativement plus élevée à Kirimiro (figure 2.7). Il y avait carence de Ca et de Mg à Kirimiro et Mumirwa. A Mumirwa, cette carence était due aux faibles teneurs en Ca et en Mg dans le sol avec des valeurs inférieures aux normes proposées par Snoeck et Lambot (2009). Mais, à Kirimiro, ces carences seraient plutôt dues au déséquilibre entre les cations. En effet, le rapport Mg/K était de 1,1 et celui de (Ca+Mg)/K de 4,3 alors que ces rapports devraient être compris entre 2 et 5 pour Mg/K et entre 10 et 20 pour (Ca+Mg)/K (Snoeck et Lambot, 2009). Cela

montre que l'excès de K avait limité l'absorption de Ca et Mg. Un déséquilibre de cations avait déjà été souligné par Gaie et Flémal (1988), qui avaient proposé un léger chaulage pour corriger ce déséquilibre.

Pour les bananiers, les sols de Buyenzi étaient plus riches que les sols de Mumirwa et de Kirimiro pour les cations. Cependant, les valeurs de pH et de K les plus élevées ont été enregistrées à Kirimiro, comme pour les caféiers (tableau 2.4). A Mumirwa, les teneurs en Corg étaient faibles, malgré l'auto-paillage observé dans les parcelles de bananiers. Cela pourrait être dû aux i) caractéristiques du sol, qui pourrait ne pas avoir une grande affinité pour la matière organique, par exemple suite à une teneur plus faible en argile, et ii) à la forte pente (plus de 60 %) et une pluviométrie abondante dans cette région qui pourraient conduire à une perte par érosion hydrique de la couche de surface, riche en carbone organique. La pente dans les deux autres régions était relativement faible (moins de 10 %). Dans chaque région naturelle, la valeur de K était plus élevée dans les parcelles proches des habitations, bien que la différence entre la valeur observée loin des habitations et celles enregistrées près des habitations fût significative uniquement à Buyenzi. Pour le Ca et le Mg, les valeurs plus élevées ont aussi été observées près des habitations à Buyenzi et Kirimiro (tableau 2.4). Des valeurs élevées de K et des autres cations dans les sols des parcelles de bananiers proches des habitations ont aussi été rapportées par Nibasumba (2008), la présence des cendres de cuisine ayant augmenté sensiblement la teneur en cations, particulièrement en K, dans deux sites du Burundi (Gitega et Cibitoke) et dans 2 sites du Rwanda (Butare et Kibungo). Comme dans les caféiers, il y avait une carence en N dans toutes les parcelles de bananiers et dans toutes les régions. Pour le K, il y avait excès ou équilibre dans les parcelles proches des habitations. L'effet sur les propriétés du sol de la proximité avec les habitations était plus marqué à Kirimiro. Les parcelles proches des habitations avaient un bon statut nutritionnel pour le N, P, K et Zn (figure 2.9a ; figure 2.9b ; figure 2.9c).

Il est à noter que les résultats d'analyse du sol et des feuilles des parcelles de caféiers et des parcelles de bananiers ne peuvent pas être comparés entre eux

car les analyses n'ont pas été réalisées dans un même laboratoire et les techniques d'analyse étaient différentes.

2.4.4 Production de café et de banane

Une grande variabilité de la production de café sur deux années successives a été observée dans toutes les régions de l'étude, mais les plus fortes variations ont été observées à Buyenzi et Kirimiro (figure 2.10). Ces résultats confirment les données publiées par l'OCIBU (2008) sur la production globale des SOGESTALS (Société de Gestion des Stations de Lavage du café), extrapolable par région naturelle. Selon ces résultats, la variation bisannuelle de production de café était élevée à Buyenzi et Kirimiro et faible à Mumirwa. Les meilleures productions de café ont été obtenues en 2008 et en 2006 (Figure 2.10). Cela correspond aux meilleures années de production de café au niveau national, avec une production de 26.000 tonnes en 2008 et 29.950 T en 2006. La production de 2005 était de 6.200 T et celle de 2007 de 7.950 T (OCIBU, 2009). La production de café des régions de Buyenzi et Kirimiro représente une part importante de la production nationale (Gaie et Flémal, 1988 ; OCIBU, 2009). Le rendement de café était cependant globalement le plus élevé à Mumirwa et le plus faible à Kirimiro (figure 2.10). Le rendement plus élevé et la plus faible fluctuation de la production à Mumirwa pourraient être dus à la combinaison de plusieurs paramètres comme la pluviométrie plus abondante (figure 2.4), un âge après de taille de régénération plus faible (figure 2.2b) et une moindre carence en N (figure 2.7) compte tenu du fait qu'un pourcentage relativement plus élevé d'exploitations y appliquent de l'urée (tableau 2.1). La carence en N, observée dans toutes les régions naturelles bien que plus faible à Mumirwa (figure 2.7), pourrait être une des sources de la cyclicité de production de café au niveau de l'exploitation. En effet, cette carence combinée avec le stress hydrique pendant la saison sèche pourrait conduire à la chute considérable des feuilles (Clowes et Wilson, 1977 ; DaMatta et Ramalho, 2006). Pour reprendre la production l'année suivante, le plant devrait alors reconstituer son feuillage (Coste, 1990). La synchronisation de la cyclicité de production de café au niveau national pourrait être due à la forte production de 2002 sur des caféiers mal entretenus durant la période de guerre.

Le rendement de banane par cycle a été utilisé. Le cycle de production de la banane au Burundi est compris entre 18 et 24 mois. Mais en retenant 3 rejets par plant (rejet mère, le rejet fille et le rejet petite fille), le temps entre deux récoltes est divisé par trois. Dans des bananeraies en équilibre de production, le temps entre deux récoltes sur un même plant est alors au plus de 8 mois. Ainsi, la production par cycle est inférieure à la production sur une année. Le rendement de banane par cycle était variable en fonction de la localisation de ces derniers au niveau de l'exploitation. Les rendements de banane observés près des habitations étaient significativement plus élevés comparativement à ceux enregistrés loin des habitations et dans les parcelles de caféiers. Le faible rendement de banane enregistré dans les parcelles de caféiers était dû à la faible densité car le poids du régime était statistiquement égal au poids du régime enregistré dans les parcelles de bananiers proches des habitations (tableau 2.5). Ce système (association bananiers-caféiers) ne s'est pas encore stabilisé car il est très récent. Les plants de bananiers rencontrés dans les parcelles de caféiers étaient âgés en moyenne de 4 ans. La densité de bananiers pourrait encore augmenter si les agriculteurs gardent le libre choix de faire cette association. Les poids du régime près des habitations et dans les parcelles de caféiers étaient statistiquement les mêmes dans les trois régions naturelles. Loin des habitations, le rendement observé à Mumirwa était significativement plus élevée. Une différence dans l'aspect végétatif en fonction de la localisation des bananiers par rapport à l'habitation a été aussi rapportée dans d'autres études (Rishirumuhirwa 1997 ; CIALCA, 2013). Dans le système traditionnel burundais, les parcelles de bananiers proches des habitations reçoivent régulièrement des résidus ménagers (Drion, 1992). Les parcelles de bananiers proches des habitations étaient plus riches en K et en cations en général bien que non significatif à Buyenzi et Mumirwa. Or, les besoins du bananiers en ces éléments sont élevés (Lahav, 1995). De plus, les cultures associées installées dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations nécessitent un labour profond pour la plantation et l'entretien. Cela pourrait avoir un impact négatif sur le développement racinaire du bananier qui est superficiel (Fogain et Gowen, 2005) et justifier le meilleur rendement observé dans les parcelles de caféiers et dans les parcelles de bananiers proches des

habitations, moins labourées, même si chaque année le système racinaire du bananier se régénère chaque année.

2.5 Conclusions

Les caféiers et les bananiers sont des cultures pérennes qui sont rarement renouvelées au Burundi. Pour les caféiers, la taille de régénération qui permet de renouveler les tiges et de relancer la production n'est pas non plus régulièrement pratiquée, particulièrement à Buyenzi. On assiste donc à un vieillissement progressif des caféières. La fertilisation minérale des caféiers est pratiquée par très peu de caféiculteurs, malgré les subsides de l'état et le remboursement sans intérêts, démontrant par là le faible intérêt économique que les producteurs accordent à cette culture. Par contre, dans les parcelles de bananiers éloignées des habitations, la fertilisation organo-minérale est pratiquée, particulièrement à Kirimiro et Buyenzi, mais cette fertilisation est destinée aux cultures associées, maïs et haricot.

Le paillage des caféiers et l'application d'insecticide est fait par un grand nombre de caféiculteurs. Bien que le paillage des caféiers soit largement suivi par les caféiculteurs, la quantité de paillis est insuffisante et le moment d'application n'est pas adéquat. En effet, appliqué pendant la saison sèche, l'effet favorable du paillis sur la conservation de l'humidité du sol est compromis. Le paillage des bananiers était réalisé uniquement à Mumirwa, sous forme d'auto-paillage. Les caféiers y étaient dès lors paillés avec des graminées, contrairement aux deux autres régions où le paillage des caféiers était réalisé avec des résidus de bananiers. Il y a donc un transfert de nutriments des bananiers vers les caféiers. L'association des caféiers avec d'autres cultures est une pratique courante, avec la prédominance du taro. Dans certains cas, et malgré que cela soit déconseillé, le bananier est associé avec le caféier, surtout dans le Mumirwa. Dans les parcelles de bananiers, une intense association avec le haricot a été observée à Buyenzi et Kirimiro. La bonne pluviométrie, le niveau d'application de l'urée relativement élevé et donc une moindre carence en N, et le respect de la période de taille pourraient expliquer le fait que la région de Mumirwa avait un rendement de café plus

élevé avec une production plus stable. Les caféiers étaient carencés en N et Zn mais excédentaires en K. La carence en N et la plus faible pluviométrie pourraient être partiellement responsable de la plus grande cyclicité de production de café à Buyenzi et à Kirimiro. Le rendement de banane était élevé près des habitations et dans les parcelles de caféiers. L'auto-paillage dans les parcelles de bananiers a permis d'obtenir un rendement élevé dans les parcelles éloignées des habitations à Mumirwa.

De manière générale, on observe de nombreux cas de non-respect des pratiques optimales de gestion dans les caféiers : absence de fertilisation minérale avec certaines carences minérales (N, Zn, ...), paillage sous-optimal et timing inapproprié, périodicité non respectée de la taille de régénération. A cela s'ajoute le faible renouvellement des caféières. Ces différentes observations semblent traduire un certain désintérêt des producteurs à investir dans la culture de café. Bien que déconseillée, on commence à observer l'association des caféiers avec les bananiers. Celle-ci est récente, et pourrait être une réponse des producteurs à la faible rentabilité économique des caféiers. Vu cette tendance, qui va dans le même sens que ce qui est déjà observé ailleurs (Tanzanie, Ouganda), il semble utile d'étudier les interactions entre ces deux cultures dans le contexte du Burundi. Ceci fera l'objet des chapitres 3, 5 et 6. Dans le chapitre 3, ces interactions sont étudiées en milieu réel au travers de l'interface entre les parcelles de bananiers et de caféiers. Les chapitres 5 et 6 étudient ces interactions dans le cadre d'essais agronomiques en conditions contrôlées.

CHAPITRE 3 : INTERACTIONS SOL-PLANTES DANS DES PARCELLES ADJACENTES DE BANANIERES ET DE CAFEIERS AU BURUNDI

Résumé

Dans le temps, l'association des caféiers avec les bananiers était interdite au Burundi. Des agriculteurs ont alors installé des bananiers près des caféiers pour que les bananiers puissent profiter de la richesse des parcelles des caféiers. Pour étudier les interactions entre ces deux cultures dans ce système, une enquête diagnostique a été réalisée dans 60 exploitations choisies dans les régions naturelles de Buyenzi et Kirimiro. Dans chaque exploitation, la parcelle de bananiers a été subdivisée en deux sous-parcelles, la sous-parcelle proche et la sous parcelle éloignée des caféiers. De même, la parcelle de caféier a été subdivisée en deux sous parcelles, la sous-parcelle proche et la sous-parcelle éloignée des bananiers. Le rendement de banane était plus élevé dans les sous-parcelles PC, avec des valeurs de 28,6 T/ha/cycle contre 10,4 T/ha/Cycle. Le rendement de café n'a pas été significativement affecté par la présence des bananiers, avec un rendement de 4,9 T/ha/an et 4,8 T/ha/an LB et PB respectivement. Par contre, le poids de 100 cerises étaient significativement plus élevé PB, avec une valeur de 162 g contre 152 g LB. Dans les parcelles sous caféiers, le paillis était constitué de 50 % de résidus de bananiers dans les sous-parcelles LB contre 71 % dans les sous-parcelles PB. Les sols sous caféiers étaient significativement plus riches en Corg, N, K, Ca et Mg que les sols sous bananiers. Les facteurs limitants dans les sous-parcelles de bananiers LC étaient, par ordre décroissant, le K, Mg, Corg, P et pH. Dans les sous-parcelles PC, les facteurs limitants étaient $K/(Ca+Mg)$, pH, Zn, P et N. Dans les sous-parcelles de caféiers PB, les facteurs limitants étaient, par ordre décroissant, Corg Mulch, Zn, P et K. Dans les sous-parcelles LB, les facteurs limitants étaient Zn, N, Mulch et P. La présence des bananiers n'a pas affecté significativement les performances végétatives et le rendement des caféiers, mais la présence des caféiers a permis d'augmenter significativement le rendement et les performances végétatives des bananiers. La proximité des bananiers avec les caféiers montre un impact positif sur les bananiers sans conséquences négatives sur les caféiers. Ces résultats ont cependant été

obtenus avec les deux cultures séparées. Il serait intéressant de faire une étude avec les deux cultures associées.

3.1 Introduction

Au Burundi, la banane et le café *Arabica* sont très importants pour l'économie. Le café représente près de 80 % des exportations, avec une production pendant une année de bonne production avoisinant 30.000 T de grains verts obtenus après dépulpage, séchage et dépalchage (BRB, 2007 ; BRB, 2008 ; BRB, 2009 et BRB, 2010). Ainsi, le café est la source principale de revenus pour près de 750.000 petits exploitants (Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage du Burundi, 2008). La banane quant à elle représentait 40 % de la production agricole nationale avec 1.759.960 tonnes produites en 2009 (Faostat, 2011).

Les caféiers sont plantés sans ombrage au Burundi. Cette pratique a été recommandée dans le passé car les arbres utilisés pour l'ombrage se développaient rapidement et faisaient concurrence aux caféiers et leur élagage était dangereux pour les caféiers (Gaie et Flémal, 1988). Or, plusieurs avantages de l'ombrage des caféiers ont été rapportés par Beer (1987), Beer et al. (1998) et DaMatta (2004). L'ombrage permet de modérer les variations de températures (Barradas and Fanjul, 1986), de réduire la perte en eau du sol par évaporation (Brenda, 2010) et d'améliorer la fertilité et la conservation du sol par l'apport d'éléments nutritifs et le contrôle de l'érosion (Beer, 1987). L'ombrage affecte aussi la morphologie des caféiers, le rendement et ses composantes. Quand l'ombrage est intense, le rendement diminue suite à une plus faible assimilation de carbone et à une stimulation de l'appareil végétatif au détriment des bourgeons floraux (Cannell, 1976). Soto-Pinto et al. (2000) ont trouvé qu'un ombrage intense avait un effet dépressif sur le rendement de caféiers, mais qu'un ombrage modéré avait un effet positif sur le rendement. Un faible ombrage permet de modérer le microclimat sans toutefois générer une trop grande compétition avec les caféiers (Beer, 1987 ; Muschler, 1999 ; Campanha et al., 2004). Ainsi, l'effet de l'ombrage sur le rendement n'est pas univoque et dépend de plusieurs facteurs dont les conditions du sol et

climatiques (Beer, 1987 ; Muschler, 1999) et la nature des variétés de caféiers (van der Vossen, 2005 ; Freire Ricci et al., 2011; Steiman et al., 2011). En plus des effets sus-mentionnés, les caféiers ombragés sont moins sensibles aux variations de la production sur deux années successives (cyclicité de production) (Cannell, 1985). Or, la cyclicité de production est un problème réel au Burundi, qui se remarque même au niveau national, avec une production d'environ 30.000 tonnes de grains verts pour les années de bonne production et moins de 10.000 tonnes pour les années de mauvaise production (OCIBU, 2008). Par ailleurs, l'ombrage augmente la taille et le poids individuel des cerises, et cela se répercute sur la taille et le poids des grains (Muschler, 2001). Enfin, la culture des caféiers sans ombrage permet une plus grande floraison avec un rendement supérieur à celui des caféiers sous ombrages (Campanha et al., 2004). Cependant, pour maintenir ce niveau de production élevé, il faut recourir à beaucoup d'intrants agrochimiques (Beer et al., 1998), surtout les fertilisants (MacVan, 1997), difficilement accessibles financièrement pour les petits producteurs qui produisent la majorité du café du Burundi.

En plus des effets agronomiques et morphologiques, l'ombrage des caféiers a un effet sur l'incidence et la sévérité des maladies. Dans une étude faite au Malawi, Phiri et al. (2001) ont trouvé que l'ombrage ou l'association des caféiers avec d'autres cultures réduisait l'incidence et la sévérité de la rouille et de l'anthracnose. Ceci a été confirmé par Mouen Bendimo et al. (2007) au Cameroun et par Staver et al. (2001) au Nicaragua. Les cultures d'ombrage ou les cultures associées limitent la dispersion des conidies entre les plants de caféiers (Mouen Bendimo et al., 2007). Ces deux maladies sont fréquentes au Burundi (Mussche et al., 1992).

Vu la faible taille des exploitations (en moyenne 0,5 ha /ménage) résultant de la densité de population élevée (312 habitants/km² ; Ministère de l'intérieur, 2009), l'association des cultures est une stratégie paysanne communément rencontrée afin de maximiser la productivité de la terre et de réduire les risques. Dans le cas du caféier, cette pratique a été déconseillée par les autorités par crainte d'une compétition néfaste à la production du caféier, à l'exception des deux premières années qui suivent l'installation des jeunes caféiers. Avant que les

caféiers n'entrent en production, l'association avec le haricot est recommandée afin de permettre aux agriculteurs de bénéficier de revenus ou de productions vivrières (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007). En dehors de cette période, la ligne de conduite générale est d'encourager la monoculture des caféiers, avec des restrictions particulières en ce qui concerne l'association avec le bananier. Cette crainte de compétition entre les bananiers et les caféiers était guidée par le fait que les deux cultures ont une exigence élevée en N et en K (Carvajal, 1984 ; Lahav, 1995). De plus, ces deux cultures présentent des systèmes racinaires superficiels, avec une majorité de racines dans les 30 premiers centimètres du sol (Nutman, 1933 ; Fogain et Gowen, 2005). Les feuilles de bananier produisent un ombrage provoquant une compétition pour la lumière en défaveur du caféier, comme c'est le cas pour les arbres d'ombrages (Cannell, 1976 ; Campanha et al., 2004). Par conséquent, les services de vulgarisation recommandaient une distance minimale de trois mètres entre les parcelles de bananiers et les parcelles de caféiers (A. Tuyaga, Communication personnelle).

Pourtant, dans le système de culture burundais, les bananiers et les caféiers sont étroitement liés par la pratique du paillage. Les bananiers constituent la première source de biomasse au niveau de l'exploitation (Rishirumuhirwa et Roose, 1998) et leurs résidus sont les plus utilisés pour le paillage des caféiers (Cochet, 1996). Cet apport de résidus de bananiers permet d'apporter dans le sol sous caféiers beaucoup de nutriments, dont l'azote (Snoek et al., 1994, Soares et al., 2008), le potassium et le phosphore. Les services d'encadrement considèrent par exemple que le paillage doit suffire à lui seul à satisfaire les besoins en phosphore et en potassium des caféiers. La technique de paillage a été longtemps encouragée par les services d'encadrement du gouvernement. L'agriculteur devait ainsi maintenir sa caféière paillée en permanence, avec un paillage intensif aux mois d'avril-mai d'une épaisseur de 10-12 cm (Gaie et Flémal, 1988), ce qui équivaut à 48 à 58 T de matière sèche/ha (S. Bizimana, doctorat UCL en cours). Cependant, avec la réduction des surfaces cultivables et la faible production de biomasse de bananiers, la non-disponibilité du paillis est devenue une contrainte majeure chez les caféiculteurs. Actuellement, le

pourcentage de parcelles de caféiers suffisamment paillées est faible (ISABU-OCIBU, 2009).

Les bananiers se comporteraient comme des arbres d'ombrage s'ils sont associés avec les caféiers. Ainsi, tous les effets de l'ombrage sur les performances des caféiers soulevés dans les paragraphes précédents sont envisageables dans le cas de l'association des bananiers avec les caféiers. Mais, cette association présente d'autres avantages. Dans une étude menée en Ouganda, en comparaison à des monocultures de caféiers et de bananiers, van Asten et al. (2011) ont démontré que les revenus et le rapport d'équivalence de la terre (Land equivalent ratio - LER) augmentaient dans une association de bananiers et de caféiers, particulièrement pour le café *Arabica*. L'effet positif d'un ombrage modéré sur la production et surtout sur la qualité du café, a par ailleurs été observée (Beer et al., 1998 ; DaMatta, 2004 ; Mouen Bendimo et al., 2007). Aucune étude similaire n'a été réalisée à ce jour pour les conditions agro-pédologiques du Burundi. Or, les conditions de l'Ouganda sont différentes de celles du Burundi. En effet, pour des altitudes égales, la pluviométrie et la température sont plus élevées en Ouganda qu'au Burundi (Nyombi et al., 2009 ; Wairegi et al., 2010) dans les zones de culture de caféiers *Arabica* et de bananiers. En plus, les sols volcaniques très présents en Ouganda (Wairegi et al. 2010) sont plus fertiles que les sols du Burundi. Il serait donc intéressant d'étudier plus en détail les interactions entre caféiers et bananiers dans le contexte spécifique du Burundi. De façon générale, la recherche sur le café et la banane au Burundi est très peu documentée. Les études qui ont été faites se sont focalisées uniquement sur le caféier sans essayer de comprendre les pratiques paysannes en termes d'association ou d'interactions entre le caféier et les autres cultures.

Les objectifs de ce chapitre sont donc i) d'étudier les différentes interactions entre le caféier et le bananier ; ii) de quantifier l'impact de ces interactions sur les rendements des bananiers et des caféiers ; et iii) d'identifier les facteurs limitant la production de café et de banane dans ce système. Les parcelles cultivées en associations bananiers-caféiers étant plutôt rares en milieu paysan au Burundi, nous avons mis à profit l'espace tampon entre les parcelles de

bananiers et les parcelles de caféiers pour étudier les interactions entre les deux cultures. La présence de cet espace tampon fût exigée par les services d'encadrement du Burundi, mais certains agriculteurs n'ont pas toujours respecté cette consigne et ont installé, parfois depuis des dizaines d'années, des parcelles de bananiers juste à côté des parcelles de caféiers. Avec ce positionnement des cultures, des interactions ont eu lieu sur une longue période entre les plants de bananiers et de caféiers qui sont à la bordure. Il est donc possible d'exploiter cette zone de transition pour étudier les interactions bananiers-caféiers, en la comparant avec les zones de monoculture de banane ou de café plus éloignées de la bordure. A notre connaissance, aucune étude n'a été faite sur ce système au Burundi.

3.2 Matériel et méthode

3.2.1 Choix des sites, des exploitations et des variétés de bananiers et de caféiers

Les exploitations choisies pour cette étude étaient situées dans les régions naturelles de Kirimiro et de Buyenzi, deux régions qui totalisent à elles seules plus de 50% de la production nationale de café (Gaie et Flémal, 1988 ; InterCafé, 2011). Le bananier y constitue aussi une culture importante car il occupe entre 15 et 20% des terres dans le Kirimiro et 20 à 25% dans le Buyenzi (Sottiaux et al., 1988^a). Ces deux régions naturelles sont par ailleurs reprises parmi les zones de production du bananier au Burundi (Davies, 1995). La région naturelle de Kirimiro se trouve au centre du pays avec une altitude oscillant entre 1400 et 1750 m. La région naturelle de Buyenzi se trouve au centre nord du pays avec une altitude variant de 1500 à 1900 m. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1200 et 1300 mm pour les deux régions (Sottiaux et al., 1988^a). La température moyenne annuelle est de 19,6°C dans le Kirimiro et 19,1°C dans le Buyenzi (IGEBU, 2008). Les sols dominants sont des Ferrisols à Buyenzi et des Ferralsols à Kirimiro (Sottiaux et al., 1988^b).

Dans chacune des deux régions naturelles, 30 exploitations ayant une parcelle de caféiers juxtaposées à une parcelle de bananiers ont été choisies et géo-référencées (Figure 3.1). Le choix des exploitations était guidé par le souci de couvrir toute la zone de l'étude. Les exploitations choisies avaient des parcelles de bananiers et de caféiers bien établies et en production. L'âge moyen des caféiers était de 34 ans et celui des bananiers de 18 ans.

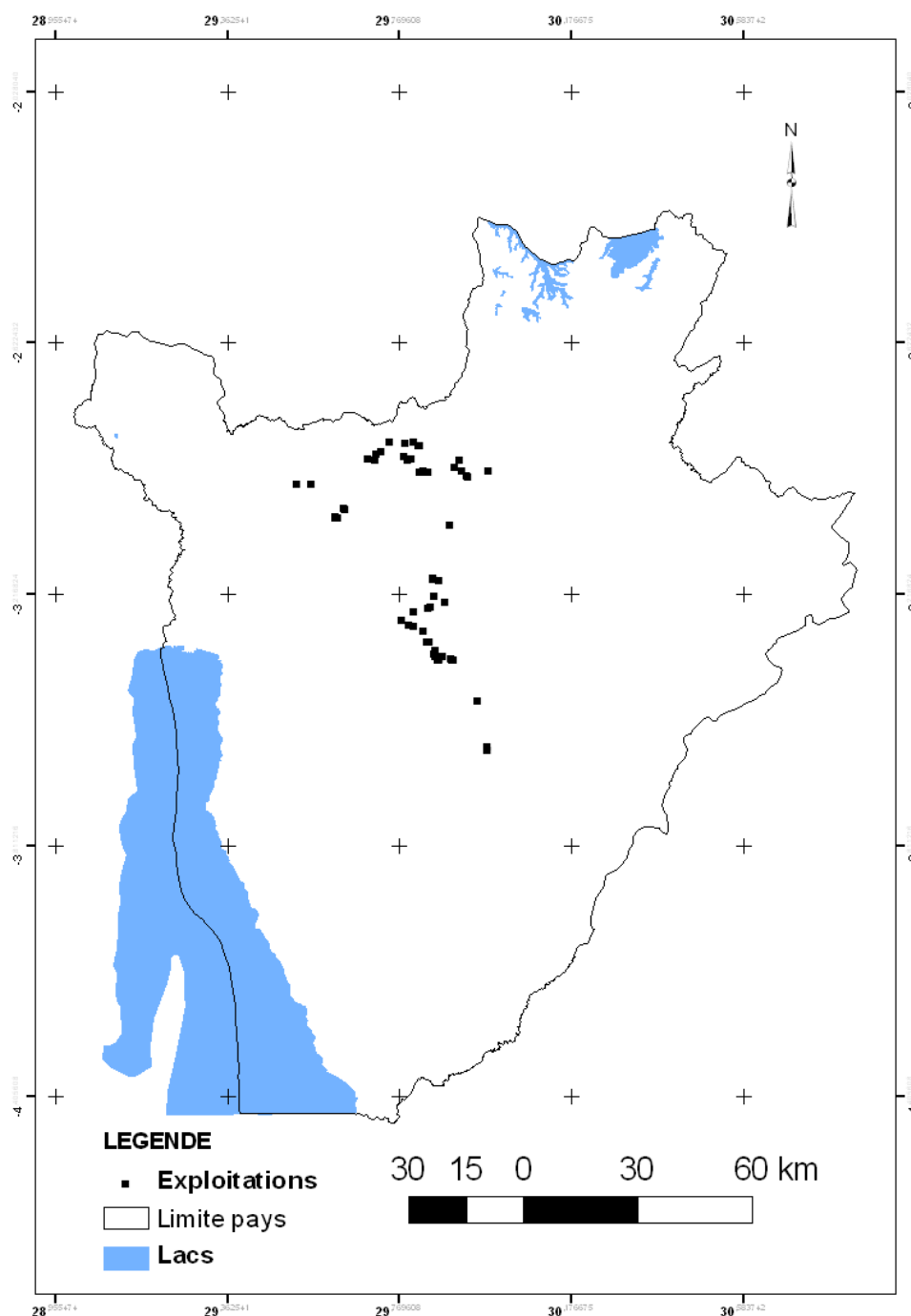


Figure 3.1 : Localisation géographiques des exploitations sélectionnées.

Pour chaque exploitation, la parcelle de bananier a été subdivisée en deux sous-parcelles : la sous-parcelle proche des caféiers (PC), qui s'étendait sur une largeur de 3 m après la dernière ligne de caféiers, et la sous-parcelle éloignée des caféiers (LC) qui était au-delà d'une largeur de 3 m (Figure 3.2). La distance de 3 m a été choisie car cela correspond à la séparation minimale exigée par les services d'encadrement entre les parcelles de bananiers et les parcelles de caféiers. Cette norme considère qu'au-delà de 3 m, l'interaction entre bananiers et caféiers est faible, voire négligeable. En effet, la longueur des feuilles et des racines dépassant rarement 3 m (Avilán et al., 1982 ; Nyombi et al., 2009) , il ne peut y avoir une interaction des bananiers et des caféiers au-delà de 3 m. De même, la parcelle de caféiers a été divisée en deux sous-parcelles : la sous-parcelle proche des bananiers (PB) qui s'étendait sur une largeur de 2.5 m, soit l'équivalent de deux rangs de caféiers, et la sous-parcelle éloignée des bananiers (LB) qui était au-delà de ces deux rangs (figure 3.2 ; photo 3.1). Pour les bananiers, la zone de transition (PC) n'a pas pu être définie en termes de nombre de rangs car, contrairement aux caféiers, les bananiers ne sont pas plantés en lignes. Les sous-parcelles PB et PC constituaient la zone d'interaction entre les bananiers et les caféiers. La largeur des sous-parcelles LC et LB était variable d'une ferme à une autre.

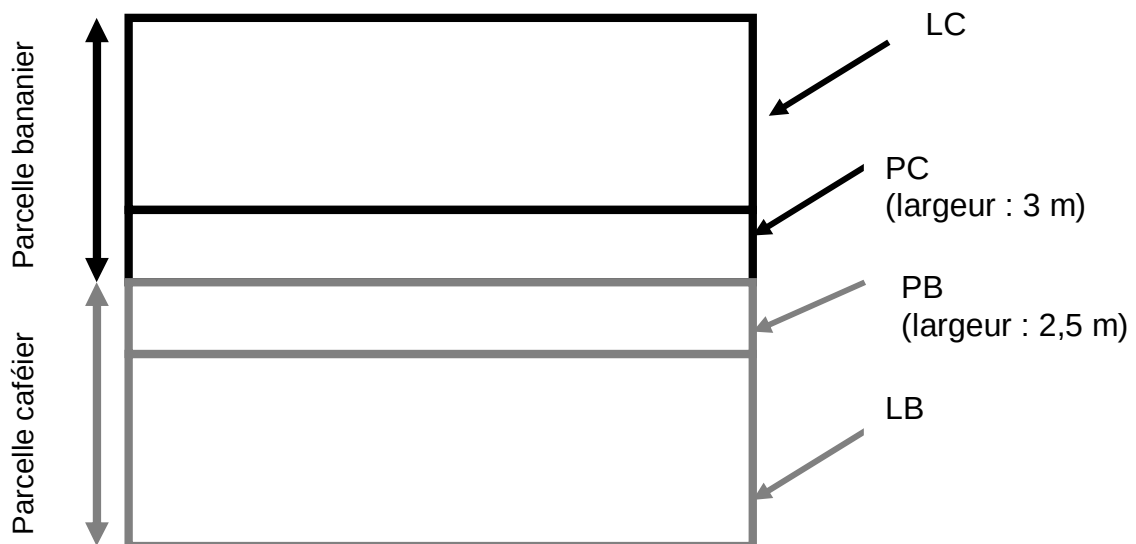


Figure 3.2 : Subdivision des parcelles de bananiers et de caféiers en sous-parcelles



Photo 3.1: Les parcelles de bananiers adjacentes aux parcelles de caféiers (photo A. Copus).

La variété de bananiers considérée en priorité était la variété *Igitsiri*, qui est la variété à bière la plus présente dans les bananeraies burundaises (Kabonyi, 1985 ; Niyongere et al., 2012). En ce qui concerne le caféier, les principales variétés cultivées au Burundi sont *Mibirizi*, le groupe des *Jacksons*, *Blue Mountain* et le groupe des *Bourbons* (Gaie et Flémal, 1988). Aucune de ces variétés n'a été privilégiée, mais il était essentiel que les parcelles PB et LB d'une même exploitation soient couvertes par une même variété. En se basant sur le descripteur du caféier (IPGRI, 1996), aucune différence variétale n'a pu être décelée entre les parcelles PB et LB d'une même exploitation.

L'ensemble des observations a été réalisé pendant les mois de février et mars 2009, à l'exception de l'échantillonnage des feuilles et des composantes de rendement du caféier. L'échantillonnage des feuilles de caféiers pour les analyses foliaires a été réalisé juste après la floraison, au mois de novembre 2008. La mesure des composantes de rendement du café a été faite la première semaine du mois d'avril 2009, avant le premier passage de récolte de café.

3.2.2 Mesures des caractéristiques morphologiques

Pour les bananiers, la hauteur du plant (HTB) et la circonférence à la base (CRBB) ont été mesurées sur 5 plants pris au hasard dans chaque sous-parcelle. Pour les caféiers, les données concernaient la hauteur (HTC) et la circonférence à la base (CRBC) de chacune des 3 tiges qui constituaient le

plant. En plus, sur trois rameaux choisis en bas, au milieu et en haut de chaque tige, la longueur des rameaux (L-RM), le nombre de nœuds par rameau (NNRM) et le nombre de feuilles (NB-FE) ont été encodés. Ces mesures ont été prises sur 5 plants choisis aléatoirement dans chaque sous-parcelle de caféiers.

3.2.3 Estimation des rendements de bananiers et de caféiers

a) *Bananiers*

Les composantes de rendement ont été prises sur 5 plants de bananier sélectionnés aléatoirement dans chaque sous-parcelle, les mêmes que ceux du point 3.2.2. Le poids du régime (PR) a été estimé à l'aide du modèle allométrique développé par Wairegi et al. (2010) intégrant les circonférences du pseudotrunc à la base et à 1 m, le nombre de mains et le nombre de doigts de la 2^{ème} rangée de l'avant dernière main (équation 3.1 qui avait un R² de 0,73):

$$\ln(\text{PR}) = - 6,795 + 0,755 \ln(\text{CRBB}) + 1,059 \ln(\text{CR1mB}) + 0,569 \ln(\text{NM}) + 0,478 \ln(\text{ND}) \quad (3.1)$$

Avec PR : poids du régime (kg), CRBB : circonférence à la base (cm) ; CR1mB: circonférence à 1 m (cm) ; NM : nombre de mains ; ND : nombre de doigts de la 2^{ème} rangée de l'avant dernière main.

Pour calculer le rendement par hectare (RDTB ; kg ha⁻¹ cycle⁻¹), la formule suivante a été utilisée (équation 3.2) :

$$\text{RDTB} = \text{PR} \times \text{densité} \quad (3.2)$$

La densité des bananiers (plants/ha) a été déterminée pour chaque sous-parcelle en mesurant la superficie de la sous-parcelle et en comptant le nombre de plants situés à l'intérieur de la sous-parcelle. La superficie a été mesurée en délimitant le plus grand rectangle possible dans la sous-parcelle et en mesurant sa longueur et sa largeur.

b) Caféiers

Le rendement de café a été estimé dans un nombre limité d'exploitations en utilisant la l'équation 3.3. Dans 20 exploitations choisies au hasard parmi les 60 exploitations, le rendement par plant (g) a été estimé en utilisant l'équation (3.3) :

$$PC/PL = NC/RM * NRF * P100C/100 \quad (3.3)$$

Où PC/PL : poids de cerises par plant ; NC/RM: le nombre moyen de cerises vivantes par rameau fructifère; NRF : le nombre total de rameaux fructifères et P100C : poids de 100 cerises (g).

Pour cela, les données des composantes de rendement (CR, NRF, P100) ont été collectées sur 5 plants de caféiers choisis au hasard dans chacune des 2 sous-parcelles de caféiers, juste avant la première récolte. Sur chaque plant, le nombre total de rameaux fructifères a été enregistré. Ensuite, 5 rameaux fructifères ont été choisis, en bas, sur le quart inférieur, au milieu, sur le quart supérieur et en haut, et ce sur chacune des 3 tiges du plant de caféiers. Sur chacun de ces rameaux, le nombre total de cerises vivantes a été enregistré. Finalement, le poids de 100 cerises a été déterminé à l'aide d'une balance électronique portable ($\pm 0,1$ g).

La collecte des données nécessaires pour estimer le rendement via l'équation 3.3 étant très laborieuse, une autre formule a été développée par régression multiple en vue d'estimer le rendement moyen de café par plant pour les 60 exploitations de cette étude. Sur base des données obtenues sur les 20 exploitations, des corrélations entre la moyenne (10 plants des deux sous-parcelles de caféiers) de tous les facteurs morphologiques mesurés par sous-parcelle de caféiers et la moyenne du rendement par plant obtenue par l'équation 3.3 ont été réalisées. Ces facteurs morphologiques sont la circonférence à la base, la hauteur du plant, la longueur moyenne des entrenœuds, la longueur moyenne des rameaux (rameaux bas, du milieu et haut), et le nombre moyen de nœuds par rameau (rameaux bas, du milieu et

haut, pris séparément ou ensemble). Les facteurs ayant un coefficient de corrélation de Pearson (r) significatif avec le rendement à $p \leq 0,05$ ont été sélectionnés comme paramètres du modèle. Ces facteurs étaient i) le nombre moyen de nœuds sur tous les rameaux avec $R^2 = 0,30$ et $p = 0,003$, ii) le nombre moyen de nœuds du plus long rameau avec $R^2 = 0,41$ et $p < 0.001$ et iii) la longueur moyenne du plus long rameau avec $R^2 = 0,17$ et $p = 0,036$.

La prise en compte des trois facteurs n'a pas permis d'améliorer significativement le modèle par rapport à l'utilisation du seul facteur (ii) car les trois facteurs étaient fortement corrélés entre eux. Pour améliorer le modèle, la circonférence à la base (CRBC) a été ajoutée au nombre moyen de nœuds du plus long rameau. Sur base de ces deux variables, le modèle retenu a été le suivant (équation 3.4 ; $R^2 = 0,59$, $p < 0.0001$):

$$PC/PL = -3.42182 + 0.65981 \text{ NNRM} + 0.28089 \text{ CRBC} + -0.03858 \text{ NNRM} \cdot \text{CRBC} \quad (3.4)$$

Où PC/PL : poids cerise de café par plant, en kg ; NNRM : nombre moyen de nœuds du plus long rameau ; CRBC ; circonférence à la base, en cm.

C'est ce modèle qui a été utilisé pour calculer la production de cerises par plant dans les 60 exploitations. Cette formule est proche de celle proposée par Walyaro et Van Der Vossen (1978) au Kenya où les paramètres sont le diamètre à la base et la longueur du plus long rameau, mais elle a été améliorée en prenant le nombre de nœuds au lieu de la longueur. Pour notre jeu de données, la formule de Walyaro et Van Der Vossen présente un R^2 plus faible ($R^2 = 0,16$) que l'équation 3.4.

Le rendement de café cerise par hectare (RDTC/ha) a été obtenu en multipliant le rendement par plant par la densité de caféiers. La densité de plantation des caféiers a été déterminée en faisant la moyenne de 5 distances mesurées entre les lignes et 5 distances entre les plants dans les lignes. Comme la densité de caféiers était homogène dans toute la parcelle de caféiers, sa détermination a été faite sans distinction des sous-parcelles (équation 3.5).

$$DC = ((100/DEL) + 1)) * ((100/DDL) + 1)) \quad (3.5)$$

Où DC : densité des caféiers (plants/ha) ; DEL : écartement moyen entre les lignes (m) ; DDL : écartement moyen des plants dans les lignes (m).

3.2.4 Détermination de la biomasse aérienne du plant de bananier

La biomasse aérienne du plant de bananier a été déterminée en utilisant l'équation 3.6 développée par Nyombi et al. (2009) obtenue en Ouganda sur les bananiers d'altitude:

$$BAB = 9,29 * 10^{-6} * HTB^{2,301} \quad (3.6)$$

Avec BAB : la biomasse aérienne du plant de bananier (kg) et HTB : la hauteur du plant (cm). Pour avoir la biomasse totale aérienne des bananiers par hectare (BIOB), la biomasse moyenne par plant a été multipliée par la densité des bananiers.

3.2.5 Echantillonnage des feuilles de bananiers et de caféiers, analyse foliaires et détermination des indices CND (Compositional Nutrient Diagnosis)

L'échantillonnage des feuilles de bananiers a été fait en utilisant la Méthode d'Echantillonnage Internationale de Référence (MEIR) proposée par Martin-Prével (1969). La troisième feuille comptée à partir de la feuille récemment épanouie a été sélectionnée sur un plant en floraison au stade des mains femelles découvertes. Une bande de 10 cm se trouvant au milieu du limbe et de part et d'autre de la nervure centrale a été sectionnée. La nervure a été écartée. Chacune des deux parties restantes a été coupée en deux parties égales parallèlement à la nervure. Seule la moitié interne – proche de la nervure - a été conservée pour les analyses au laboratoire. Un échantillon composite par sous-parcelle était constitué des échantillons de feuilles provenant de 5 plants différents.

L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été fait sur la troisième paire de feuilles comptées à partir de la dernière paire de feuilles récemment épanouie (Wrigley, 1988). Dans chaque sous-parcelle de caféiers, 10 pieds ont été choisis au hasard et sur chaque pied, 5 paires de feuilles ont été récoltées sur 5 parties différentes du plant : en bas, quart inférieur, milieu, quart supérieur et la partie supérieure. Les feuilles provenant de la même sous-parcelle ont été mélangées pour avoir un échantillon composite. Chaque échantillon composite était constitué de 100 feuilles de caféiers.

Après l'échantillonnage, les feuilles ont été nettoyées manuellement à l'aide d'un tissu pour enlever les traces de poussières et séchées dans une étuve à une température de 60°C pendant 96 heures. Les analyses de feuilles de caféiers et de bananiers ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Les éléments analysés sont le N, P, K, Ca, Mg, et Zn. Les feuilles ont été séchées à l'étuve pendant 48-96 heures, broyées et tamisées avec un tamis de 2 mm de mailles. Le produit obtenu a été digéré dans une solution d'acide sulfurique et sélénique. Les teneurs en N et en P ont été obtenues par colorimétrie et la teneur en K, Ca, Mg et Zn par spectrométrie à absorption atomique.

Les indices CND ont été déterminés en utilisant les normes de Wairegi et al. (2009) pour les bananiers et Wairegi et al. (2012) pour les caféiers (annexe 2.3). L'analyse des CND permet de détecter les déficiences ou les excès pour un élément en fonction de la concentration des autres éléments. Un élément est déficient quand son indice est inférieur à 0, excédentaire quand il est supérieur à 0 et en équilibre quand son indice est égal à 0.

3.2.6 Mesure des paramètres de gestion des bananiers et des caféiers

Pour chaque sous-parcelle de bananiers et/ou de caféiers, l'apport éventuel de fumier ou de compost et l'application d'engrais a été noté sur base de l'avis de l'agriculteur.

Les mesures du niveau de paillage ont été réalisées uniquement dans les sous-parcelles de caféiers car cette pratique n'a pas été observée dans les sous-

parcelles de bananiers. Pour déterminer les caractéristiques du paillage, trois transects de 10 m chacun ont été tirés au hasard dans chaque sous-parcelle de caféiers. Pour chaque transect, à 1 m de distance, les mesures suivantes ont été prises : i) présence de paillis (1 = paillé, 0 = non paillé) ; ii) le type de paillis dominant (1 = résidus de bananier ; 2 = graminées de marais ; 3 = autres graminées ; 4 = capsules de café ; 5 = résidus de haricot ; 6 = autres cultures annuelles ; 7 = autres) et iii) la profondeur du paillis, mesurée à l'aide d'une règle graduée. Plusieurs types de paillis ont été trouvés dans une même sous-parcelle. Sur base du pourcentage de points ayant le même type de paillage, le type de paillis dominant a pu être déterminé pour chaque sous-parcelle.

3.2.7 Echantillonnage et analyse de sol

L'échantillonnage du sol a été réalisé à l'aide d'une tarière sur une profondeur de 30 cm dans chacune des sous-parcelles de bananiers et de caféiers. Le sol provenant de 5 points choisis au hasard a été bien mélangé pour faire un échantillon composite. Après échantillonnage, le sol a été séché à l'air libre dans un local couvert pendant 3 à 4 jours pour réduire son humidité avant d'être stocké pour analyse. Les analyses de sols ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Avant l'analyse, le sol a été séché et tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm de mailles. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre dans une suspension de sol et de l'eau désionisée dans le rapport 1 : 2,5. La matière organique (MO) du sol a été déterminée à l'aide de la méthode Walkley et Black (1934). L'azote total a été déterminé en utilisant la solution de digestion de Kjeldahl et la mesure a été faite par spectrophotométrie. Le P, Zn, Ca, Mg et K extractibles ont été extraits avec la solution Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Le P a été déterminé par colorimétrie alors que K, Ca, Mg et Zn ont été dosés à l'aide d'un spectromètre à absorption atomique.

3.2.8 Analyse des courbes limites et détermination des facteurs limitants

Les relations entre le rendement et les caractéristiques du sol d'une part, et entre le rendement et les facteurs de gestion des bananiers et des caféiers d'autre part, ont été développées en utilisant le rendement par plant (poids de cerises ou du régime) moyen de chaque sous-parcelle. Le rendement moyen sur les 5 plants a été utilisé plutôt que le rendement par hectare parce que ce dernier présentait en règle générale de moins bonnes corrélations avec les propriétés du sol et les facteurs de gestion. La production par plant a aussi été utilisée par Delstanche (2011).

Avec le test de Spearman, les corrélations entre les différents facteurs et le poids moyen de cerises par plant dans les sous-parcelles de caféiers d'une part, et le poids moyen du régime par sous-parcelle de bananiers d'autre part, ont été déterminées. Des relations ont été recherchées entre d'une part la production moyenne du plant de bananier ou de caféier, et d'autre part les facteurs qui soit avaient un coefficient de corrélation de Spearman significatif ($p \leq 0,05$), soit avaient montré l'existence d'une relation fonctionnelle pour les points limites (Shatar and McBratney, 2004 ; Wairegi et al. 2010). Les points limites dans le nuage de points ont été déterminés en utilisant la méthode de Schnug et al. (1996). La détermination des données aberrantes a été faite avec la technique du cercle (Schnug et al., 1996).

Pour les facteurs qui étaient positivement corrélés avec le rendement par plant, le modèle qui a été utilisé pour représenter la courbe limite du poids moyen du régime ou de cerises par plant pour chaque facteur pris individuellement est celui proposé par Fermont et al. (2009 ; équation 3.7) :

$$YI = \frac{Y_{\max}}{(1 + (K \exp(-R \cdot x_n)))} \quad (3.7)$$

Avec YI = le poids moyen du régime ou de cerises par plant ; $Y_{\max}$ = poids maximal obtenu pour le bananier ou le caféier ; x_n = la n-ième variable indépendante ; K et R des coefficients.

Pour les facteurs ayant une corrélation négative ou ne présentant pas de corrélation significative avec le rendement, un modèle quadratique a été ajusté sur les points limites.

Après avoir déterminé les coefficients des équations pour les différents paramètres du sol ou de gestion, le poids moyen du régime ou de cerises par plant correspondant à chacun de ces facteurs a été calculé au moyen de la courbe limite pour chaque sous-parcelle. Pour chaque sous parcelle, il y avait donc autant de valeurs de rendements calculés que de facteurs considérés. Pour chaque sous-parcelle de bananiers et de caféiers, le poids moyen minimal par plant (Y_{min}) a ensuite été déterminé parmi les poids moyen par plant calculés avec tous les facteurs (équation 3.8).

$$Y_{min} = \text{Min}(Y_{x1}, Y_{x2}, \dots, Y_{xn}) \quad (3.8)$$

avec Y_{xn} = le poids moyen du régime ou de cerises par plant calculé avec le facteur x_n .

Ceci correspond au rendement prédit par la loi du minimum de Von Liebig (Shatar and McBratney, 2004). Le facteur correspondant à ce rendement minimum a été identifié comme facteur le plus limitant. On a donc pu identifier pour chaque sous parcelle (LB, PB, LC, PC) le facteur le plus limitant. Pour chaque type de sous-parcelles, on détermine ensuite le pourcentage de sous-parcelles pour lesquelles un facteur donné a été identifié comme le plus limitant. Ceci a permis de classer les différents facteurs limitants selon leur importance dans chaque type de sous-parcelle (LB, PB, LC, PC).

Pour l'ensemble des parcelles, un graphe a été établi mettant en relation le poids du régime observé et le poids minimum du régime (Y_{min} ; équation 3.8) prédit par la méthode des courbes limites LC et PC. Pour chacun des points situés au-dessus de la diagonale (droite 1 :1), la différence de rendement par plant (poids du régime ou de cerises) entre le rendement par plant maximal observé au sein de l'ensemble des sous-parcelles et le rendement Y_{min} obtenu par la méthode des courbes limites ($= Y_{max} - Y_{min}$) peut s'expliquer à partir du

facteur le plus limitant (figure 3.10 ; figure 3.11). On appellera cette différence la « différence de rendement expliquée ». La différence de rendement entre Y_{min} et le rendement observé ($= Y_{min} - Y_{obs}$) est défini comme inexpliqué car non explicable sur base de la courbe limite du facteur le plus limitant (Wairegi et al., 2010). Pour déterminer la différence moyenne du poids de régime ou de cerises non expliquée, les points qui sont en-dessous de la ligne $y = x$ n'ont pas été pris en compte car ils ont été obtenus avec une certaine surestimation de l'effet des facteurs limitants sur le rendement. Par contre, pour montrer la différence du poids de régime ou de cerises expliquée par la méthode des courbes limites, tous les points ont été pris en considération. La limite de cette méthode est qu'elle ne permet pas d'analyser les interactions entre les facteurs.

3.2.9 Analyse statistique des résultats

L'analyse statistique des résultats a été faite sans distinction entre les régions naturelles car i) la différence entre les régions naturelles pour le rendement de café et de banane n'était pas significative ii) les conditions climatiques (température et pluviométrie) et les gammes d'altitudes sont proches dans les deux régions; iii) les exploitations sont fortement dispersées au sein de chaque région (figure 3.1) de telle sorte que les variations pourraient être plus élevées au sein de chaque région qu'entre les régions ; iv) l'utilisation des données des 60 exploitations dans une analyse unique a permis de mettre en évidence des corrélations ou des tendances significatives qui seraient passées inaperçues si les régions naturelles avaient été analysées séparément. Les données utilisées étaient les moyennes des différentes variables au niveau des sous-parcelles (LB, PB, PC, LC) pour les 60 exploitations. La comparaison des moyennes dans les sous-parcelles a été réalisée par l'analyse de la variance à un facteur. Pour comparer les caractéristiques physico-chimiques du sol dans les quatre sous parcelles, une ANOVA III hiérarchisée (exploitation/parcelle (bananiers et caféiers)/sous parcelles) a été utilisée. La comparaison des moyennes a été faite avec le test de Tukey. L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel R version 2.13.1. Le niveau de signification était de $p \leq 0,05$.

3.3 Résultats

3.3.1 Caractéristiques morphologiques des bananiers et des caféiers

Les caractéristiques morphologiques des bananiers variaient en fonction de la localisation des sous-parcelles (tableau 3.1). Dans les sous-parcelles de bananiers, la hauteur du plant (HTB) et la circonférence à la base (CRBB) étaient significativement plus élevées ($p \leq 0,001$) PC, avec une valeur moyenne de 3,8 m PC et 3,2 m LC pour la hauteur et 72,7 cm PC et 58,4 cm LC pour la circonférence à la base.

Pour le caféier, la hauteur du plant (HTC) n'était pas significativement différente entre les sous-parcelles (tableau 3.1). De même, les moyennes de la circonférence à la base (CRBC) et le nombre de nœuds par rameau (NNRM) n'étaient pas significativement différentes selon la localisation des sous-parcelles de caféiers. Par contre, la longueur moyenne des rameaux (L-RM), la moyenne des longueurs d'entrenœuds (L-ENED), le nombre total de feuilles par rameau (NB-FE) et le nombre de feuilles par nœuds (NFE/ND) étaient significativement plus élevées ($p < 0,001$) PB comparé à LB.

Tableau 3.1 : Minima, maxima et moyennes $\pm$ erreurs standards sur la moyenne (n = 60) des caractéristiques morphologiques des bananiers et des caféiers en fonction des sous-parcelles (LC : loin des caféiers, PC : près des caféiers, LB : loin des bananiers, PB : près des bananiers).

	Min	Max	Moy $\pm$ s.e.m	Min	Max	Moy $\pm$ s.e.m
Bananiers	LC			PC		
HTB ¹ (m)	2,5	4,7	3,2 $\pm$ 0,1 a	3	4,7	3,8 $\pm$ 0,1 b*
CRBB ² (cm)	45,6	72,2	58,4 $\pm$ 0,8 a	57,8	88,8	72,7 $\pm$ 0,9 b
Caféiers	LB			PB		
HTC ³ (m)	1,3	4,2	2,9 $\pm$ 0,07 a	1,3	4	3,0 $\pm$ 0,07 a
CRBC ⁴ (cm)	7	20	13,1 $\pm$ 0,4 a	5,8	18,3	12,6 $\pm$ 0,4 a
NNRM ⁵	5,7	17,3	10,9 $\pm$ 0,3 a	6,2	14,8	10,1 $\pm$ 0,3 a
L-RM ⁶	27,0	51,1	37,9 $\pm$ 0,7 a	26,0	63,6	40,6 $\pm$ 1,0 b
L-ENED ⁷ (cm)	2,2	6,1	3,6 $\pm$ 0,1 a	2,9	6,3	4,1 $\pm$ 0,1 b
NB-FE ⁸	1,2	7,4	4,6 $\pm$ 0,2 a	2,9	12,1	5,5 $\pm$ 0,2 b
NFE/NED ⁹	0,1	1,16	0,4 $\pm$ 0,02 a	0,24	1,16	0,5 $\pm$ 0,02 b

¹ HTB : hauteur du plant de bananier ; ² CRBB : circonférence à la base du plant de bananier ; ³ HTC : hauteur du plant de caféier ; ⁴ CRBC : circonférence à la base du plant de caféier ; ⁵ NNRM : nombre de nœuds par rameau ; ⁶ L-RM : longueur moyenne des rameaux ; ⁷ L-ENED : longueur moyenne d'entrenœuds ; ⁸ NB-FE : nombre de feuilles ; ⁹ NFE/NED : nombre de feuilles par nœuds ; * : les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes entre sous-parcelles à $p \leq 0,05$.

3.3.2 Résultats d'analyse foliaire et indices CND

Dans les sous-parcelles de bananiers, les résultats d'analyse foliaire ont montré que les valeurs enregistrées PC étaient significativement plus élevées pour tous les éléments mesurés sauf pour le Mg (Tableau 3.2). Dans les sous-parcelles de caféiers, les analyses foliaires ont montré des valeurs significativement plus élevées pour le N, K et Ca PB comparé à LB.

Tableau 3.2 : Les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles des bananiers et des caféiers (n= 60).

	Min	Max	Moy $\pm$ s.e.m	Min	Max	Moy $\pm$ s.e.m
Bananiers	LC			PC		
N (%)	1,50	3,21	2,41 $\pm$ 0,05 a	1,96	3,51	2,74 $\pm$ 0,04 b
P (%)	0,10	0,31	0,19 $\pm$ 0,01 a	0,13	0,42	0,21 $\pm$ 0,01 b
K (%)	1,67	4,02	3,06 $\pm$ 0,07 a	2,43	4,08	3,47 $\pm$ 0,04 b
Ca (%)	0,49	1,85	0,99 $\pm$ 0,04 a	0,92	1,40	1,21 $\pm$ 0,02 b
Mg (%)	0,18	0,58	0,35 $\pm$ 0,01 a	0,23	0,52	0,34 $\pm$ 0,01 a
Zn (ppm)	1,99	11,36	6,57 $\pm$ 0,27 a	4,19	12,57	8,66 $\pm$ 0,21 b
Caféiers	LB			PB		
N (%)	1,20	3,13	2,65 $\pm$ 0,04 a	1,99	3,23	2,77 $\pm$ 0,04 b *
P (%)	0,07	0,29	0,17 $\pm$ 0,01 a	0,09	0,26	0,16 $\pm$ 0,01 a
K (%)	0,95	3,85	2,29 $\pm$ 0,08 a	1,64	4,3	2,7 $\pm$ 0,07 b
Ca (%)	0,22	1,18	0,71 $\pm$ 0,03 a	0,17	1,5	0,99 $\pm$ 0,03 b
Mg (%)	0,15	0,77	0,41 $\pm$ 0,01 a	0,03	0,75	0,38 $\pm$ 0,02 a
Zn (ppm)	0	3,05	1,33 $\pm$ 0,11 a	0	4,58	1,56 $\pm$ 0,20 a

* : Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Par analyse des indices CND, le N, le K et le Mg étaient déficients dans les sous-parcelles de bananiers LC. Dans les sous-parcelles de bananiers PC, seuls le K et le Mg étaient déficients. Le Ca et P étaient excédentaires dans les deux sous-parcelles. Le N était presque à l'équilibre dans les sous-parcelles PC (Figure 3.3a). Des différences significatives entre sous-parcelles de bananiers ont été observées uniquement pour le Ca et Mg.

Dans les sous-parcelles de caféiers, les indices CND étaient significativement différents pour tous les éléments analysés sauf le N (figure 3.3b). Dans les deux types de sous-parcelles, il y avait un excédent en N et un déficit en P. Pour les cations, il y avait un déficit de K et Ca et un excédent de Mg dans les sous parcelles LB. Dans les sous-parcelles PB, le K et le Ca étaient excédentaires alors que le Mg était presque à l'équilibre.

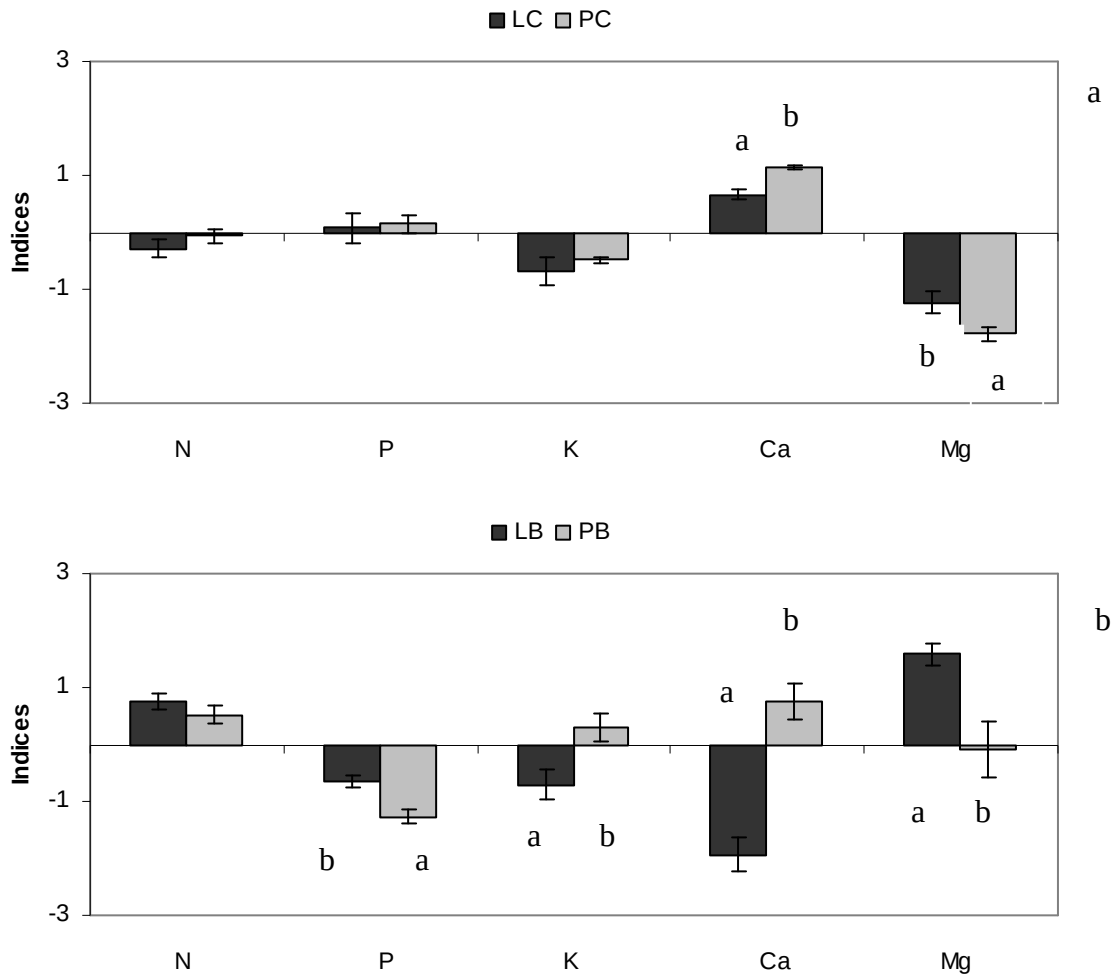


Figure 3.3 : Indices CND des principaux éléments pour les bananiers (a) et pour les caféiers (b). Les valeurs avec les lettres différentes sont significativement différentes à $p \leq 0,05$. Pas de lettre pour les valeurs non significativement différentes à $p \leq 0,05$. Les barres représentent l'erreur standard de la moyenne (s.e.m).

3.3.3 Techniques culturales

Dans les exploitations visitées, il n'y avait pas d'apports de fumure organique ou d'engrais inorganiques dans les sous-parcelles de caféiers, et le paillage n'était pas pratiqué dans les sous-parcelles de bananiers.

Dans les sous-parcelles de bananiers, les techniques culturales étaient différentes selon la localisation par rapport aux caféiers (figure 3.4). Dans les sous-parcelles LC, le labour était réalisé dans 68 % des sous-parcelles alors que PC il était fait uniquement dans 25 %. De même, l'apport de fumier ou de

compost était réalisé dans 53 % des sous-parcelles LC alors qu'il était fait dans 25 % uniquement PC. L'apport d'engrais chimiques se faisait uniquement dans les parcelles de bananiers LC et cela dans 22 % des exploitations.

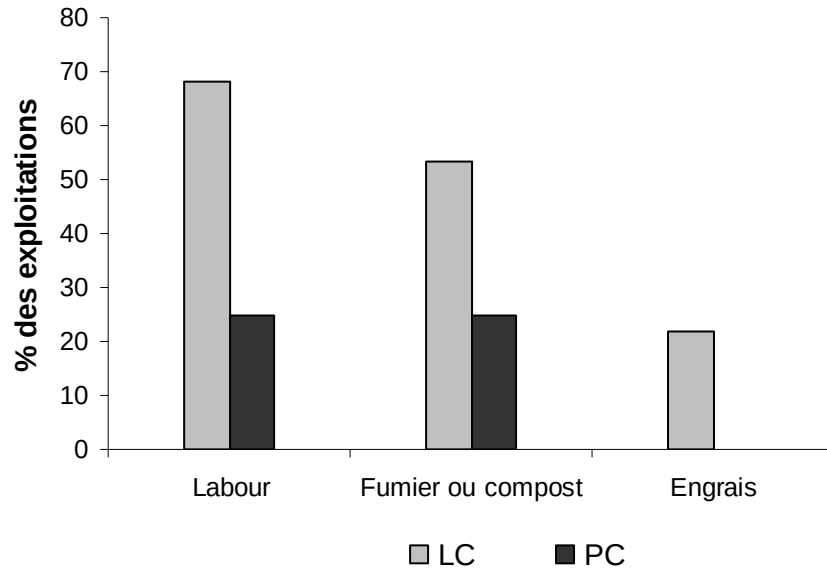


Figure 3.4 : Labour et fertilisation organique et minérale dans les sous-parcelles de bananiers.

Le labour était préférentiellement pratiqué dans les sous-parcelles avec des densités faibles de bananiers (figure 3.5). Avec l'augmentation de la densité, le labour était de moins en moins pratiqué. Par contre, l'application de la fumure organique était indépendante de la densité. Il n'y avait pas d'application d'engrais dans les 3 tranches de densité les plus élevées.

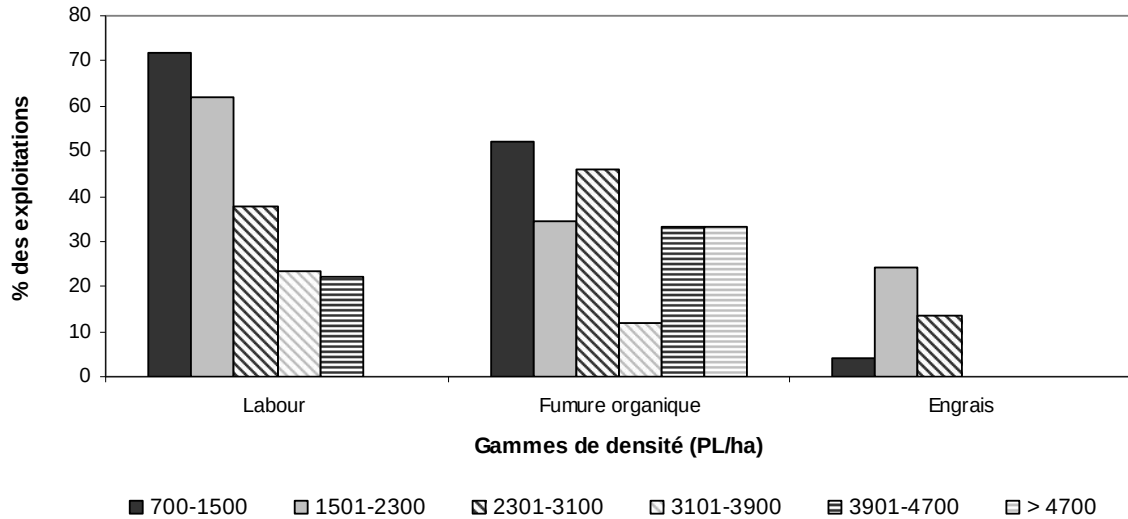


Figure 3.5 : Pourcentage de sous-parcelles labourées et fertilisées en fonctions de la densité des bananiers (PL/ha : nombre de plants de bananiers par hectare).

Dans les sous-parcelles de caféiers, la profondeur du paillis était significativement plus élevée PB ($p \leq 0,05$), avec une moyenne de 5,4 cm PB contre une épaisseur de 3,6 cm LB. Les résidus de bananiers (RB) étaient le type de paillis dominant dans les deux sous-parcelles de caféiers (Figure 3.6). Cependant, son pourcentage était plus élevé dans les sous-parcelles PB (71%) comparé avec celui observé dans les sous-parcelles LB (50%). Les graminées (graminées de marais (GM), autres graminées (AG)) étaient la seconde source la plus importante de paillage et étaient dominantes dans les sous-parcelles LB. Les points sans paillis (SP) étaient fréquents dans les sous parcelles LB. Les pourcentages des SP étaient de 24,1 % LB et de 11,7 % PB.

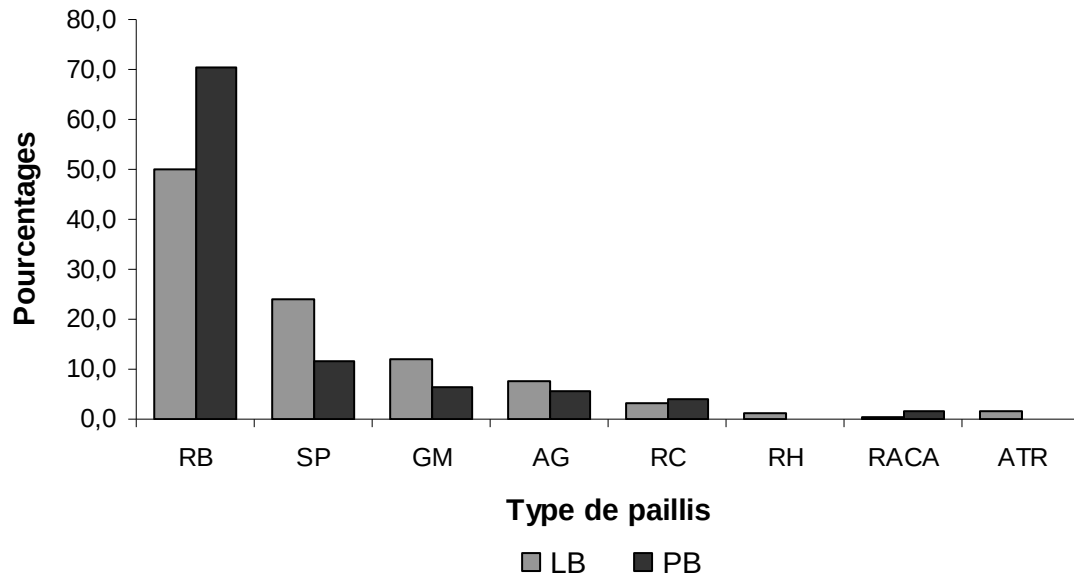


Figure 3.6 : Les pourcentages des différents types de paillis dans les sous-parcelles de caféiers (RB : résidus des bananiers ; SP : points sans paillis ; GM : graminées de marais ; AG : autres graminées ; RC : résidus des caféiers ; RH : résidus de haricot ; RACA : résidus des autres cultures annuelles ; ATR : autres types de paillis).

3.3.4 Résultats d'analyse du sol

Les valeurs des caractéristiques physico-chimiques du sol variaient en fonction de la localisation des sous-parcelles de bananiers et de caféiers. En moyenne, le sol était plus riche et le pH plus élevé dans les sous-parcelles de caféiers que dans les sous-parcelles de bananiers, sauf pour le P et le Zn pour lesquelles les valeurs les plus élevées étaient enregistrées dans les sous-parcelles de bananiers (Tableau 3.3). Dans les sous-parcelles de caféiers, des teneurs significativement plus élevées étaient rencontrées PB comparé à LB pour le Corg, le N, le P et le Mg. Dans les sous-parcelles de bananiers, les moyennes de Mg et N étaient significativement plus élevées LC comparé à LB, alors que l'inverse est observé pour K (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Teneurs en éléments dans le sol dans les différentes sous-parcelles de caféiers et de bananiers (0-30 cm) (n = 60).

	Banancier		Caféier	
	LC	PC	LB	PB
	Moy ± s.e.m	Moy ± s.e.m	Moy ± s.e.m	Moy ± s.e.m
pH	5,88 ± 0,1 a (a)	5,90 ± 0,1 a (a)	6,18 ± 0,07 b (a)	6,16 ± 0,1 b (a)
Corg (%)	2,96 ± 0,10 a (a)	2,71 ± 0,08 a (a)	3,11 ± 0,08 ab (a)	3,71 ± 0,11 b (b)
N (%)	0,26 ± 0,01 a (b)	0,24 ± 0,01 a (a)	0,28 ± 0,01 ab (a)	0,31 ± 0,01 b (b)
P (mg/kg)	3,53 ± 0,68 ab (a)	3,87 ± 0,94 b (a)	1,67 ± 0,16 a (a)	2,65 ± 0,14 ab (b)
K (cmolc/kg)	0,18 ± 0,01 a (a)	0,23 ± 0,01 a (b)	0,45 ± 0,03 b (a)	0,46 ± 0,04 b (a)
Ca (cmolc/kg)	7,33±0,30 a (a)	7,41± 0,34 a (a)	9,35 ± 0,64 b (a)	9,73 ± 0,39 b (a)
Mg (cmolc.kg)	1,01 ± 0,04 b (b)	0,7 ± 0,03 a (a)	0,98 ± 0,07b (a)	1,15 ± 0,05 c (b)
Zn (mg/kg)	6,78 ± 0,21 b (a)	6,04 ± 0,46 b (a)	4,42 ± 0,14 a (a)	4,16 ± 0,32 a (a)

Les moyennes avec les mêmes lettres, dans les lignes, ne sont pas significativement différentes. Les lettres entre parenthèses montrent les comparaisons au sein des sous-parcelles de bananiers uniquement et des sous-parcelles de caféiers uniquement, et les lettres qui ne sont pas entre parenthèses montrent les comparaisons entre toutes les sous-parcelles.

3.3.5 Rendement de café et de banane

Le rendement moyen de banane par cycle (RDTB) LC et PC était significativement différent ($p < 0,001$) avec une moyenne de 10,4 T/ha/cycle LC et 28,6 T/ha/cycle PC (tableau 3.4). Le poids moyen du régime (PR) était aussi significativement plus élevé ($p \leq 0,05$) PC, avec un poids moyen égal à 190 % du poids moyen du régime LC. De même, la densité des bananiers et la biomasse totale (BIOB) étaient significativement ($p < 0,001$) plus élevées PC.

Pour le café, les moyennes du rendement en cerises par ha (RDTC) et la production moyenne de cerises par plant (PC/PL) n'étaient pas significativement différentes entre les deux types de sous- parcelles de caféiers (tableau 3.4). Le rendement obtenu était de 4,9 T/ha de café cerise LB contre

4,8 T/ha PB. Par contre, le poids de 100 cerises était significativement plus élevé ($p \leq 0,05$) PB, avec une moyenne de 161,6 g PB et 152,2 g LB.

Tableau 3.4 : Les moyennes, les minima et les maxima des caractéristiques du rendement des bananiers et des caféiers

	Min ⁶	Max ⁷	Moy $\pm$ s.e.m ⁸	Min	Max	Moy $\pm$ s.e.m
Bananiers	LC			PC		
RDTB ¹ (T)	3,1	42,6	10,4 $\pm$ 0,8 a	6,5	69,0	28,6 $\pm$ 1,8 b
PR ² (kg)	3,4	16,0	8,0 $\pm$ 0,3 a	3,7	26,6	15,1 $\pm$ 0,6 b
D(plants/ha)	535	3077	1321 $\pm$ 77 a	504	3546	1949 $\pm$ 100 b
BIOB ³ (T/ha)	2,70	27,19	10,1 $\pm$ 0,7 a	2,49	36,0	15,5 $\pm$ 1,0 b
Caféiers	LB			PB		
RDTC ⁴ /ha (T)	1,6	10,5	4,9 $\pm$ 0,3 a	1,92	8,35	4,8 $\pm$ 0,2 a
PC/PL ⁵ (kg)	0,7	3,4	2,01 $\pm$ 0,1 a	0,98	3,45	1,98 $\pm$ 0,01 a
P100 ⁹ (g)	127,4	174,3	152,2 $\pm$ 2,4 a	120,1	187,1	161,6 $\pm$ 3,4 b
D ¹⁰ (Plants/ha)	1261	3451	2407 $\pm$ 58 a	1261	3451	2407 $\pm$ 58 a

¹ RDTB : rendement de bananier (par hectare et par cycle), ² PRG ; poids du régime ; ³ BIOB : la biomasse aérienne des bananiers par hectare ; ⁴ RDTC : rendement de café cerises ; ⁵ PC/PL : production de café cerise par plant ; ⁶ Min : minimum ; ⁷ Max : maximum ⁸ s.e.m : l'erreur standard de la moyenne. ⁹ P100 : poids de 100 cerises ¹⁰D : densité. Les moyennes avec les mêmes lettres, dans les lignes, ne sont pas significativement différentes.

3.3.6 Les courbes limites et les facteurs limitants

Les courbes limites dans les sous parcelles de bananiers sont décrites par la figure 3.7. Dans les sous-parcelles PC, les facteurs qui avaient une corrélation de corrélation de Spearman significatif à $p \leq 0,05$ avec le poids moyen du régime étaient Corg ($r = 0,30$), N ($r = 0,29$), Zn ($r = 0,39$), le pH ($r = -0,28$) et la densité de bananiers ($r = -0,29$). Les facteurs (P, K, Mg et K/(Ca+Mg)) ont également été retenus car le nuage de points montrait une relation fonctionnelle avec le poids moyen du régime. Dans les sous parcelles de bananiers LC, les

facteurs significativement ($p \leq 0,05$) corrélés avec le poids moyen du régime étaient le Corg ($r = 0,30$), le N ($r = 0,29$), Ca ($r = 0,33$) et Zn ($r = 0,39$). Les facteurs P, K, Mg et le rapport $K/(Ca+Mg)$ ont également été retenus parce que le nuage de points montrait une relation fonctionnelle avec le poids moyen du régime. Ainsi, les courbes limites réalisées sont celles de Corg, N, P, K, Mg, Zn, le rapport $K/(Ca+Mg)$, le pH et la densité des bananiers dans les sous-parcelles PC et Corg, N, P, K, Ca, Mg, Zn et le rapport $K/(Ca+Mg)$ dans les sous-parcelles LC (figure 3.7).

Pour les sous-parcelles de caféiers, tous les facteurs (Corg, N, P, K, Mg, profondeur de paillis, le rapport $K/(Ca+Mg)$, le pH, le Zn) ont été retenus car le nuage de points montrait une relation fonctionnelle avec le poids de cerises par plant. Dans les sous-parcelles LB, le seul facteur significativement corrélé avec la production de cerises par plant était le Mg ($r = 0,29$). Les facteurs Corg, N, P, K, la profondeur du paillis, le pH et le Zn ont été retenus car le nuage de points montrait une relation fonctionnelle avec le poids moyen de cerises par plant. Ainsi, les courbes limites utilisées pour le café PB étaient celles de Corg, N, P, K, Mg, le rapport $K/(Ca+Mg)$, Zn, le pH et la profondeur du paillis dans les sous-parcelles PC. Dans les sous-parcelles de café LB, les facteurs retenus étaient Corg, N, P, K, Mg, Zn, le pH, et la profondeur du paillis (figure 3.8).

Les courbes des facteurs qui n'ont pas été pris en considération sont dans l'annexe 3.2.

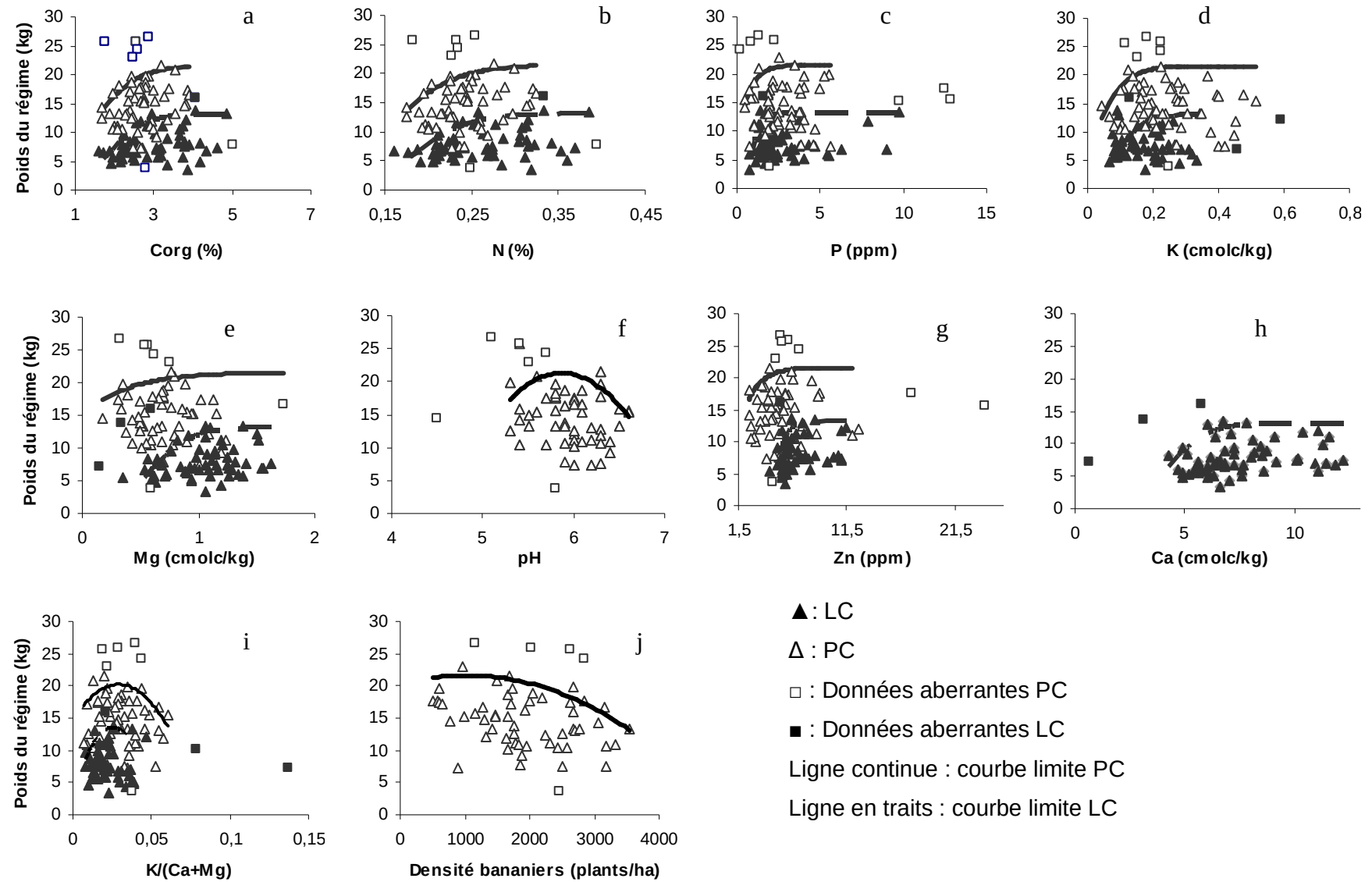


Figure 3.7 : Relations entre les différents facteurs et le poids du régime PC et LC, et courbes limites.

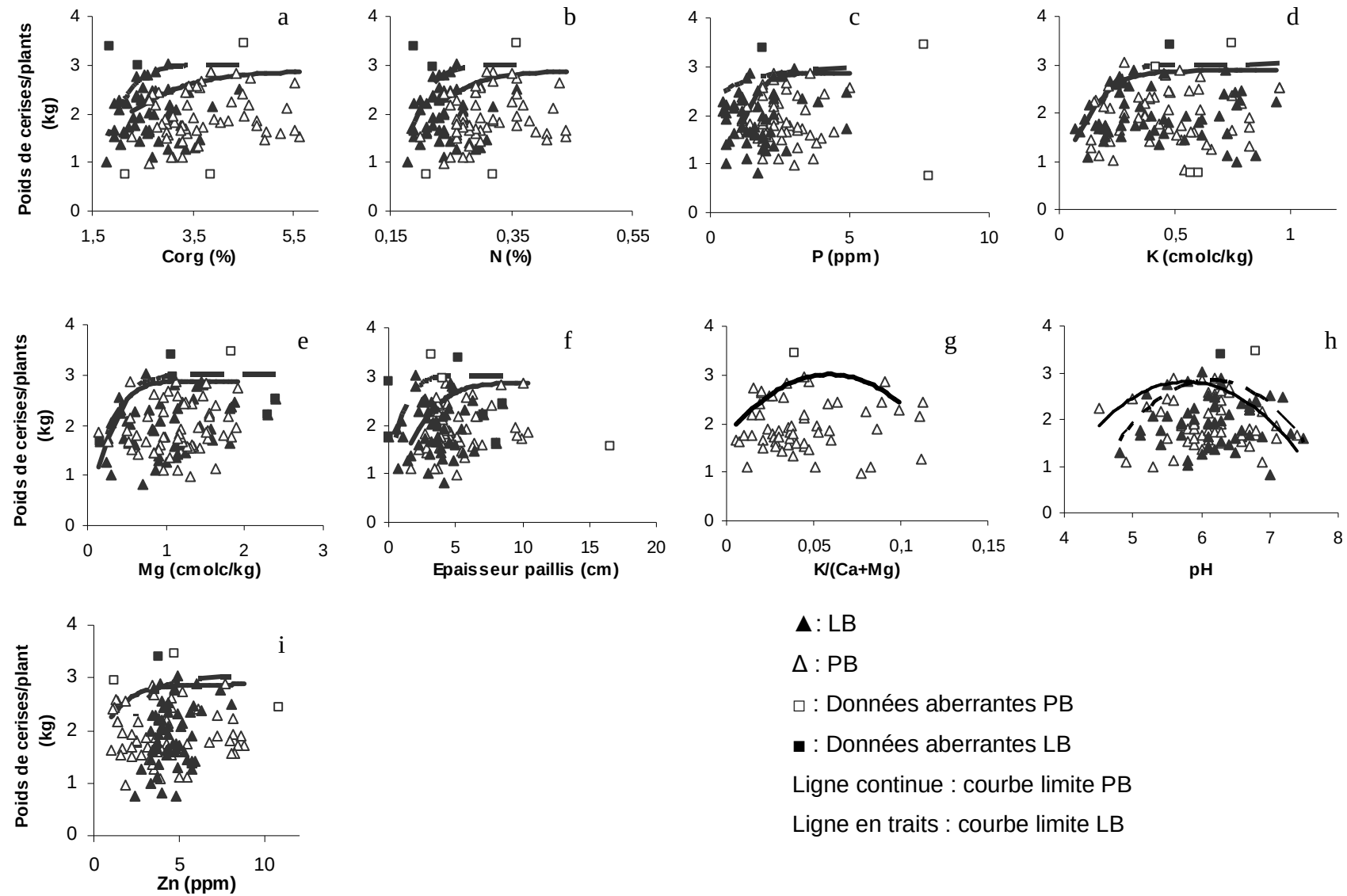


Figure 3.8 : Relations entre les différents facteurs et le poids des cerises par plant PB et LB, et courbes limites

Dans les sous-parcelles de bananiers, les facteurs les plus limitant PC étaient par ordre décroissant, K/(Ca+Mg) avec 28 % des sous-parcelles, suivi par le pH avec 22 %, le Zn avec 13 %, puis le P et le N avec 12 % des sous-parcelles. Les facteurs limitant LC par ordre décroissant étaient le K avec 22 % de sous-parcelles, le Mg avec 17 %, le Corg avec 15 %, le pH et P avec 12 % chacun et le Zn avec 10 % (figure 3.9).

Les facteurs limitant dans les sous-parcelles de caféiers différaient en fonction de la position par rapport aux bananiers (Fig. 10). Dans les sous-parcelles de caféiers LB, les principaux facteurs limitant étaient dans l'ordre décroissant le Zn avec 28 % des sous-parcelles, le N avec 20 % des sous-parcelles, le mulch et le P avec respectivement 13 % et 12 % des sous-parcelles chacun, et le Mg avec 10 % des sous-parcelles. Dans les sous-parcelles PB, le Corg était le facteur le plus limitant avec 18 % des parcelles, suivi par le mulch avec 17 %, le Zn avec 15 %, et le P et K avec 12 % de sous-parcelles chacun. Les autres facteurs pris individuellement concernent moins de 10% des sous-parcelles.

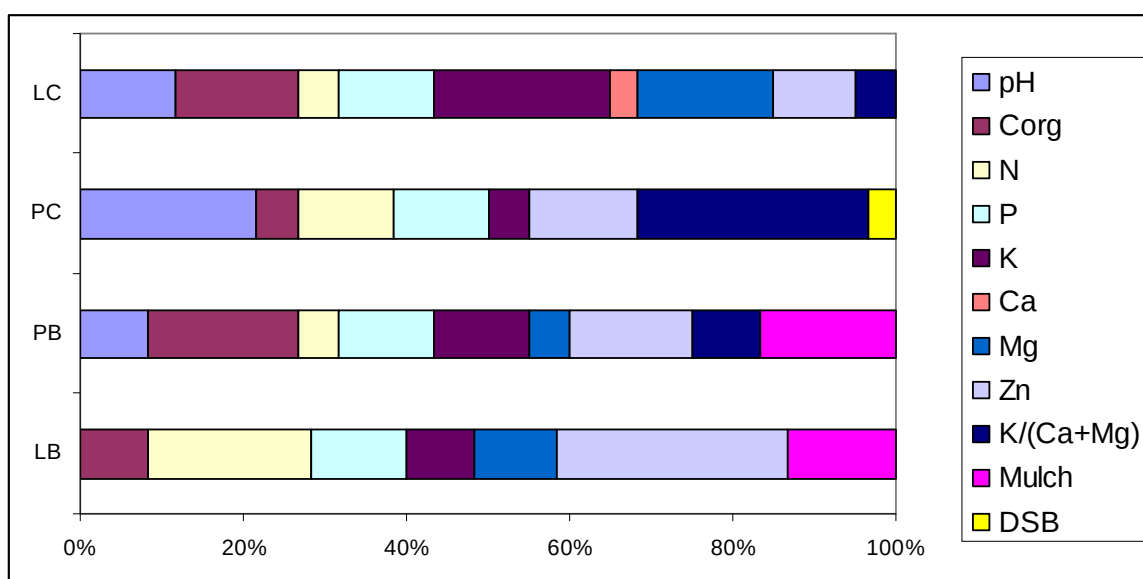


Figure 3.9 : Facteurs (propriétés du sol et facteurs de gestion) limitant le plus la production de café et de banane en fonction de la localisation des sous-parcelles de bananier et de caféier (DSB : la densité de bananiers).

La différence de poids du régime expliquée par la méthode des courbes limites, par rapport au poids maximal du régime mesuré, était en moyenne de 4,5 kg

PC et de 4,8 kg LC. La différence de poids du régime non expliquée était de 4,8 kg et de 2,7 kg respectivement PC et LC (figure 3.10). Les corrélations entre le poids du régime mesuré et le poids du régime prédit par l'analyse des courbes limites ont été faibles. Le coefficient de détermination (R^2) était de 0,16 avec $p = 0,002$ LC. Ce même coefficient était de 0,02 avec $p = 0,46$ PC.

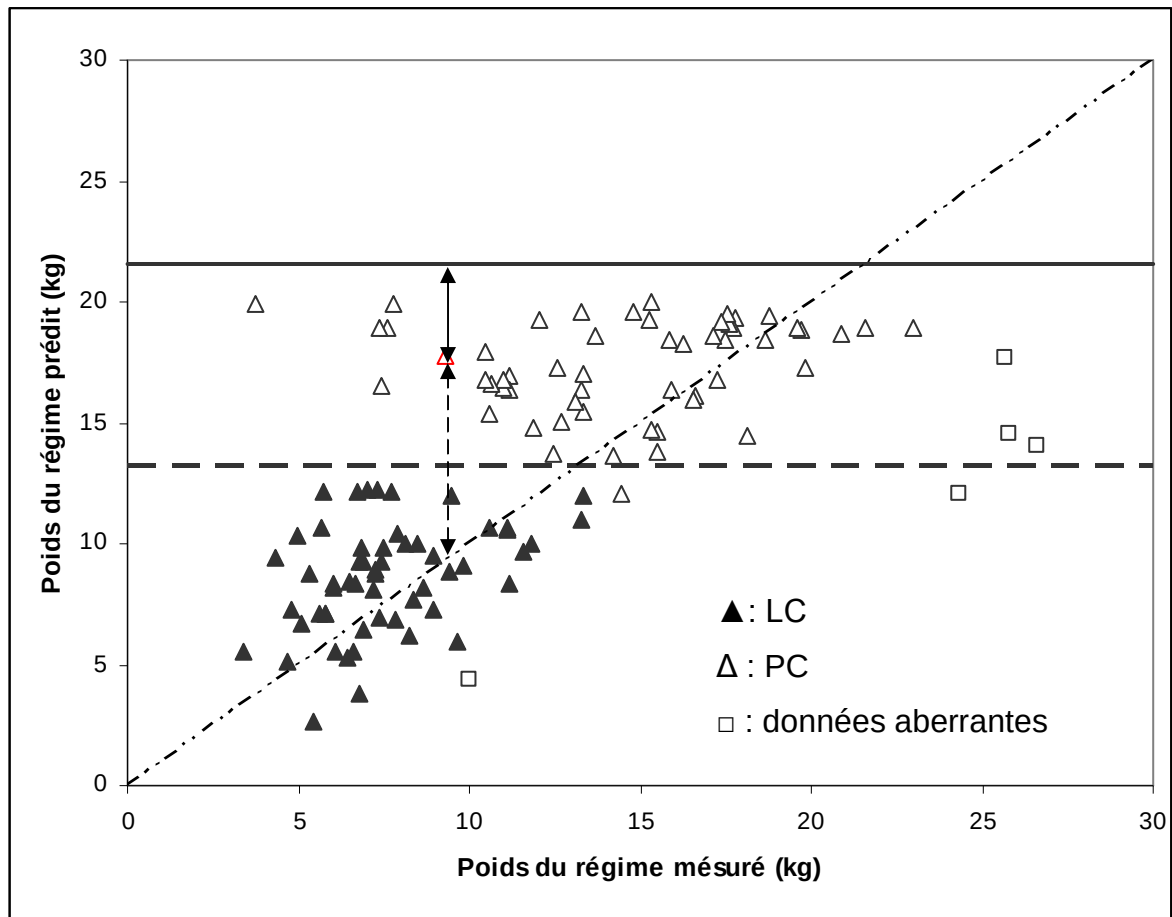


Figure 3.10 : Relation entre le poids du régime observé et le poids du régime minimum (Y_{min} ; équation 3.8) prédit par la méthode des courbes limites LC et PC. La ligne continue est le poids maximal dans les sous-parcelles PC. La ligne en grands traits est le poids maximal dans les sous-parcelles LC et la diagonale représente la fonction $Y = X$. La flèche en trait continu montre la différence de rendement expliquée et flèche en trait pointillé la différence de rendement non expliquée.

La différence du poids de cerises par plant expliquée par la méthode des courbes limites, par rapport au poids maximal, était en moyenne de 0,70 kg PB et de 0,89 kg LB. La différence de poids de cerises par plant non expliqué était

de 0,48 kg PB et de 0,50 LB (figure 3.11). La corrélation entre la production de cerises par plant observée et la production prédite était faible mais significative LB. Le coefficient de détermination R^2 était de 0,23 avec $p = 0,009$. Mais PB, le coefficient de détermination était faible et non significatif ($R^2 = 0,10$ et $p = 0,134$).

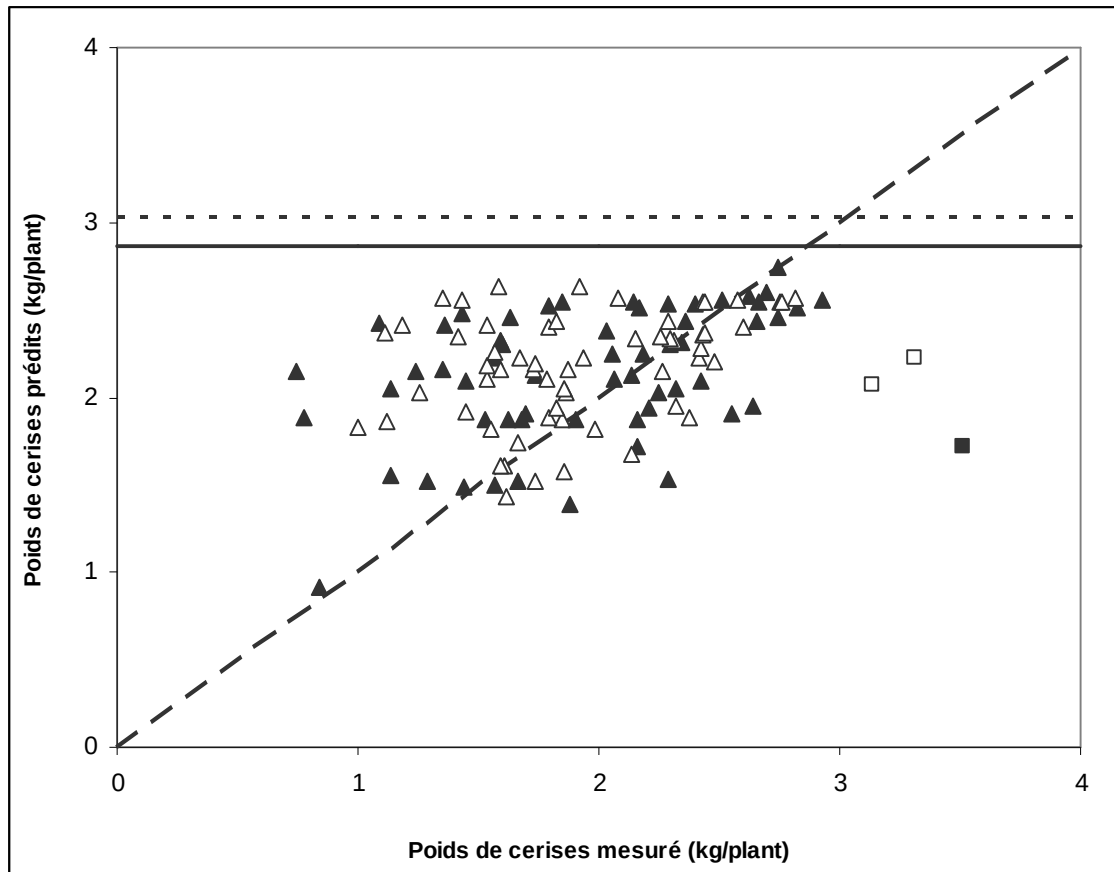


Figure 3.11 : Relation entre le poids de cerises par plant observé et le poids de cerises minimum (Y_{min} ; équation 3.8) prédit par la méthode des courbes limites LB et PB. La ligne continue est le poids maximal dans les sous-parcelles PB. La ligne en grands traits est le poids maximal dans les sous-parcelles LB et la diagonale représente la fonction $Y = X$.

3.4 Discussion des résultats

3.4.1 Conduites culturales et leurs impacts sur les teneurs en éléments nutritifs dans le sol et dans les feuilles

Dans les sous-parcelles de bananiers, le labour était pratiqué dans 68 % des cas LC contre 25 % PC. Le fumier ou le compost était apporté dans 53 % des sous-parcelles LC et dans 25 % PC, et les engrais étaient utilisés uniquement dans les sous-parcelles LC avec une fréquence de 22 % (figure 3.4). Les sous-parcelles de bananiers localisées LC correspondent à la zone où le bananier est cultivé en association avec d'autres cultures vivrières comme les céréales, les légumineuses et les plantes à tubercules. La plus faible densité de bananiers LC (tableau 3.4) permet en effet d'y associer le bananier à d'autres cultures tout en limitant la compétition entre la culture pérenne et les cultures annuelles (Godefroy et al., 1991; Worthmann et al., 1992). Ces cultures associées sont couramment plantées après labour, ce qui est facilité par la faible densité de bananiers (figure 3.5). Comparé aux parcelles PC, les parcelles LC sont préférentiellement fertilisées avec de la fumure organique et minérale. L'agriculteur vise en priorité à accroître la production des cultures associées et non pas des bananiers, car ces cultures lui procurent des retours sur investissement à court terme, contrairement au bananier. Cette stratégie se reflète aussi dans la faible fertilisation organique et l'absence de fertilisation minérale dans les sous-parcelles PC, qui bénéficiaient par ailleurs des apports réalisés sur les caféiers.

Dans les sous-parcelles caféiers, la profondeur de paillis était significativement plus élevée PB avec une profondeur de 5,4 cm, contre une profondeur de 3,6 cm LB. Dans tous les cas, cette profondeur est inférieure à celle proposée par Gaie et Flémal (1988) pour les caféiers burundais qui est de 10 à 12 cm. Mais ces valeurs étaient proches de la valeur optimale de 4 cm proposée par Wairegi et van Asten (2010) pour le bananier. Notons que la différence d'épaisseur ne résulte pas d'un apport unique mais bien d'une différence de gestion à long terme. Bien que modeste, la différence d'épaisseur traduit des apports réguliers supérieurs dans les parcelles de café PB que LB. Les bananiers sont

la principale source de paillage. En effet, le paillis était constitué par des résidus de bananiers à raison de 50 % LB et 71 % PB (figure 3.6). Cela s'explique par la source importante de biomasse que représentent les bananiers et leur proximité avec les parcelles de caféiers. L'utilisation préférentielle des résidus de bananiers dans le paillage des caféiers a également été observée par Cochet (1996) au Burundi. Le pourcentage plus élevé de résidus de bananiers dans les parcelles PB suggère que la main d'œuvre nécessaire pour cette activité est toutefois limitante.

Le taux de paillage plus élevé PB que LB semble avoir affecté positivement les caractéristiques physico-chimiques du sol. On observe en effet des teneurs plus élevées de Corg, N, P et Mg dans les parcelles PB, où le paillage était plus épais, par rapport aux parcelles LB ayant un paillage moins épais (tableau 3.3). Le paillage est à la fois une source de matière organique (C, N) et de cations (Snoek et al., 1994 ; Rodrigo et al., 2001). Dans une étude faite par Youkhana et Idol (2009), le paillage a permis d'augmenter significativement la teneur du sol en N et C sur une période de 4 ans. Robinson et Hosegood (1965) étaient aussi arrivés à la même conclusion. On note également que la teneur en Corg est plus élevée dans les parcelles de caféiers PB, paillées, que dans les parcelles de bananiers PC, non paillées (tableau 3.3). Cette différence semble être attribuable directement au paillage. En effet, la restitution de biomasse au sol par les bananiers est théoriquement plus élevée que pour le caféier (Rishirumuhirwa, 1997 ; Malvolta, 1990) et, de plus, les bananiers bénéficient d'apports de fumure organique, ce qui n'est pas le cas des caféiers. Les plus faibles teneurs en Corg dans les parcelles de bananiers ne peuvent donc s'expliquer que suite à l'exportation d'une grande part des résidus de culture de bananiers vers le caféier.

On observe également des teneurs en K, Ca et Mg plus élevées dans les parcelles de café PB que dans les parcelles de bananier PC. Cela pourrait également résulter des apports de nutriments par le paillage. En effet, le transfert de la fertilité des parcelles de bananiers vers les parcelles de caféiers apportent les éléments nutritifs principalement le K (Pozy et Dehareng 1996). Pour cette raison, les parcelles sous caféiers sont plus riches en K que les

parcelles sous bananiers (tableau 3.3). Il faut cependant rester prudent dans l'interprétation de ces différences car les teneurs en éléments minéraux dans le sol résultent du bilan global des entrées et sorties de nutriments, et pas du seul paillage. Les teneurs plus faibles dans les parcelles de bananiers PC pourraient donc aussi résulter d'un prélèvement plus important de ces éléments par les bananiers comparés aux caféiers. Pour certains éléments tels que le Zn et le P, on observe d'ailleurs des teneurs plus élevées dans les parcelles de bananiers PC que dans les caféiers PB. Dans le cas du P, cela ne semble pas pouvoir s'expliquer par la fertilisation minérale et organique des parcelles de bananiers, car les parcelles de bananiers PC sont beaucoup moins souvent fertilisées (Figure 3.4), tout en présentant des teneurs en P équivalentes aux parcelles de bananiers LC. Dans les parcelles de bananiers, la minéralisation de la matière organique et le prélèvement de nutriments (K, Ca, Mg) ne semble pas être compensée par les apports externes. La fumure organique apportée sous bananier ne semble pas compenser les pertes, d'autant plus que cette pratique n'est observée que lorsqu'il y a des cultures associées qui sont une cause supplémentaire d'exportation de nutriments.

Enfin, on observe que le pH est plus élevé dans les parcelles de caféiers que dans les parcelles de bananiers. Ceci pourrait s'expliquer par la forte exportation de cations pour le paillage des caféiers ou par l'utilisation d'engrais azoté (NH_4 , urée) dans les parcelles de bananiers, ainsi que par l'augmentation du pouvoir tampon du sol dans les parcelles de caféiers suite à l'augmentation de la teneur en matière organique. De façon générale, à l'exception du P et du Zn, les différences observées entre les parcelles de caféiers et de bananiers semblent pouvoir s'expliquer par les effets positifs du paillage sur les propriétés du sol sous caféier, et les effets négatifs de l'exportation des résidus de bananiers sur les propriétés du sol sous bananier.

L'analyse foliaire a montré que les bananiers des sous-parcelles PC avaient un meilleur statut nutritionnel comparativement aux bananiers des sous-parcelles LC. En effet, les valeurs obtenues étaient significativement plus élevées PC que LC, sauf pour le Mg (tableau 3.2). En comparant les valeurs obtenues avec les valeurs critiques proposées par la littérature (3,1 % pour N, 0,48 % pour Mg et

18,4 mg kg⁻¹ pour Zn ; Worthmann et al., 1994), les teneurs en N, Mg et en Zn dans les feuilles de bananiers étaient inférieures aux valeurs critiques PC et LC. Les teneurs de K étaient égales ou supérieures à la valeur critique (3% ; Lahav et Turner, 1983) dans les deux sous-parcelles de bananiers. Par rapport aux valeurs critiques (1.13% pour Ca, Worthmann et al., 1994 ; et 0.2% pour P, Lahav et Turner, 1983), les teneurs de P et Ca étaient égales ou inférieures à ces valeurs LC, et égales ou supérieures à ces valeurs PC. Les indices CND obtenus mettent en évidence une déficience des bananiers en N, en K et en Mg et un excès en P et Ca. Pour N et K, la déficience était relativement faible PC mais pour Mg, cette déficience était élevée PC. Pour le P et le Ca, il y avait plus d'excès PC que LC (figure 3.3a). Ceci confirme encore une fois le fait que les bananiers proches des caféiers avaient un meilleur statut nutritionnel, sauf pour le magnésium.

Les valeurs obtenues par analyse des feuilles de caféiers étaient significativement plus élevées PB pour N, K et Ca. Pour les autres facteurs, à savoir P, Mg et Zn, la différence entre les moyennes n'était pas significative (tableau 2.2). Les normes proposées par la littérature sont de 2,5-3,0 % pour N, 0,15-0,20 % pour P, de 1,5-2,6 % pour K, de 0,7-1,3 % pour Ca, de 0,10-0,20 % pour Mg et de 10-15 mg kg⁻¹ pour Zn (Snoeck et Lambot, 2009). Les valeurs de N, P, K et de Ca obtenues étaient dans les normes dans les deux types de sous-parcelles de caféiers, les valeurs de Mg étaient supérieures aux normes alors que celles de Zn sont inférieures aux normes. La déficience en Zn était élevée car les valeurs obtenues étaient 10 fois inférieures aux normes. La carence en Zn a été déjà observée dans les caféiers du Burundi particulièrement dans la région naturelle de Kirimiro (ISABU, 1996).

Quelques fois, il y avait contradiction entre les normes utilisées pour déterminer les carences des éléments nutritifs dans les feuilles et les indices CND. Des valeurs brutes dans les feuilles qui étaient dans les normes apparaissaient déficientes avec les indices CND (tableau 3.2 ; Figure 3.3). Cela est dû au fait que les indices CND prennent en considération les valeurs des autres éléments pour montrer qu'un élément est déficient ou non (Wairegi, 2010 ; Wairegi, 2012). Les indices de CND et indices DRIS ont antérieurement été utilisés pour

diagnostiquer l'état nutritionnel des bananiers en Ouganda et au Rwanda (Wairegi et al., 2010 ; Delstanche, 2011) et des caféiers en Ouganda (Wairegi et al., 2011). Ces deux indices sont très corrélés entre eux (Wairegi et al., 2010 ; Delstanche, 2011). Dans cette étude, seuls les indices CND ont donc été utilisés, car ils sont plus faciles à calculer.

3.4.2 Caractéristiques morphologiques et rendement des bananiers et de caféiers

Les caractéristiques morphologiques des bananiers (hauteur, circonférence à la base) étaient significativement plus élevées PC que LC (tableau 3.1). La biomasse aérienne ainsi que le rendement des bananiers étaient aussi significativement plus élevés dans les sous-parcelles PC (tableau 3.4). Les caractéristiques morphologiques des bananiers (HTB et CRBB) sont d'ailleurs très bien corrélées avec le poids du régime (Wairegi et al., 2009 ; Gaidashova et al., 2007). Le rendement moyen des bananiers PC était ainsi de 28,6 T/ha/cycle contre un rendement de 10,4 T/ha/cycle LC, soit une augmentation de plus de 275% (tableau 3.4). Le poids du régime était aussi plus élevé PC avec une moyenne de 15,1 kg contre 8,0 kg LC (tableau 3.4), malgré une densité de plantation moyenne PC plus élevée (1949 plants/ha) comparativement aux sous-parcelles LC (1321 plants/ha ; tableau 3.4). Le rendement élevé à l'hectare PC était donc dû aux deux facteurs, à savoir la moyenne plus élevée du poids du régime et la plus forte densité des bananiers. Le poids de régime moyen enregistré dans cette étude était inférieur au poids de régime de 17 kg enregistré dans d'autres pays de la région comme l'Ouganda (Wairegi et al., 2009). La corrélation entre le rendement PC et LC était faible avec un $r = 0,17$. Cela pourrait suggérer que l'effet des techniques de gestion qui sont différentes PC et LC au sein d'une même exploitation, prime sur les facteurs environnementaux.

Les valeurs plus élevées du rendement, de biomasse et des caractéristiques morphologiques des bananiers enregistrées PC seraient dues au fait que ces bananiers s'approvisionnaient en eau et en nutriments dans les sous-parcelles de café PB. En effet, la longueur des racines des bananiers peut atteindre 2-3

m (Avilán et al., 1982 ; Gousseland, 1983). Une partie des racines de bananiers explorerait donc les sous-parcelles de café PB, dont le sol est plus riche en N, K, Ca, Mg (tableau 3.3), qui sont les principaux éléments exportés par le régime et la biomasse du bananier (Lahav, 1995). En plus de ces éléments nutritifs, les bananiers PC profitaient des autres avantages du paillis des sous-parcelles PB comme la conservation de l'humidité du sol (Debashis Chakraborty et al., 2008). La forte différence de rendement entre les bananiers dans les sous-parcelles PC et les bananiers LC (tableau 3.4) pourrait être accentuée par le labour qui est plus fréquent dans les sous-parcelles LC (figure 3.4).

L'effet variétal sur la sensibilité à l'ombrage pourrait être soulevé car les variétés de notre étude étaient diversifiées. Cependant, les variétés Jackson, Mibirizi et Bleu Montain qui sont les plus cultivées au Burundi, sont toutes du groupe des Bourbons (Lambot et Bouharmont, 2009). De plus, leur sélection a été réalisée sans ombrage. Dans les sous-parcelles de caféiers, les valeurs de hauteur (HTC) et de circonférence à la base (CRBC) n'étaient pas significativement différentes LB et PB (tableau 3.1), mais les hauteurs étaient globalement élevées. Cela a révélé que la plupart des caféiers nécessiteraient une taille de régénération. En effet, Gaie et Flémal (1988) ont proposé de faire une taille de régénération quand un plant de caféier atteint une hauteur de 3 m. Par contre, le rapport HTC/CRBC, la longueur moyenne des rameaux (L-RM), la longueur moyenne des entrenœuds (L-ENED), le nombre moyen de feuilles par rameau (NB-FE) et le nombre moyen de feuilles par nœuds (NF/NE) étaient significativement plus élevés PB (tableau 3.1). La valeur de L-ENED qui était statistiquement plus élevée PB était due à l'allongement des entrenœuds, pas à une l'augmentation du nombre de nœuds par rameau (tableau 3.1). Ainsi, la présence des bananiers a affecté certaines caractéristiques morphologiques des caféiers PB. La modification des caractéristiques morphologiques suite à l'ombrage a aussi été observée par Campanha et al. (2004). Selon Morais et al. (2003), quand l'ombrage est intense, même la hauteur du plant et la circonférence à la base sont affectées, avec une augmentation de la hauteur et une diminution de la circonférence à la base. Cet effet n'a pas été observé dans la présente étude. L'effet de l'ombrage sur la morphologie des caféiers n'était

donc pas très marqué. La raison pourrait être que l'ombrage par les bananier PC ne venait que d'un seul côté.

Pour le café, la densité moyenne de caféier enregistrée dans cette étude était de 2407 plants/ha (tableau 3.4), ce qui était inférieur à la densité de plantation recommandée au Burundi, qui est de 3333 plants/ha (Gaie et Flémal, 1988). Il n'y avait pas de différence significative entre le rendement PB et le rendement LB (tableau 3.4). De même, la production de cerises par plant n'était pas significativement différente PB et LB (tableau 4). Avec le facteur de conversion du café cerises en café marchand de 5,82 (Gaie et Flémal, 1988), le rendement obtenu serait de 0,82 T de café marchand/ha PB et 0,84T/ha LB. Ces rendements par hectare sont supérieurs à la moyenne nationale qui est de 0,58 T/ha de café marchand (obtenu en utilisant les données de Gaie et Flémal, 1988). Le poids de 100 cerises était plus élevé PB que LB (tableau 3.4). Or, le poids de 100 cerises est l'un des indicateurs de la qualité de café (Muschler, 2001 ; Steiman et al., 2011). Cette différence de poids de 100 cerises serait due à l'ombrage des caféiers par les bananiers, à la bonne teneur en K dans les feuilles (tableau 3.2) et au nombre de feuilles qui est plus élevé PB que LB (tableau 3.1). En effet, Muschler (2001) a montré que le poids de 100 cerises était plus élevé dans les parcelles de caféiers sous ombrage. Ce même auteur a aussi montré que le poids des grains verts était plus élevé sous ombrage, c'est-à-dire que la différence de poids enregistrée au niveau des cerises reste maintenue jusqu'au poids des grains verts. En effet, en évaluant le pourcentage de grains larges (taille>16mm), Bosselmann et al. (2009) ont trouvé que leur pourcentage augmentait avec l'ombrage et ces mêmes tendances ont été confirmées par Steiman et al. (2011). De plus, la fertilisation potassique permet d'augmenter le poids de 100 grains et donc des cerises. Une étude faite par Cong et al. (2001) a montré qu'une fertilisation azotée augmentait le rendement alors qu'une fertilisation potassique augmentait le poids de 100 cerises. Or, la teneur en K dans les feuilles de caféier étaient plus élevée PB (tableau 3.2). En outre, le remplissage des cerises se fait à partir des feuilles, ce qui favorise un poids plus élevé de cerises dans le cas de rameaux avec un nombre élevé de feuilles (Lima Filho et Malavolta, 2003). Ceci était le cas pour notre étude où le nombre de feuilles était plus élevé dans les sous-parcelles PB (tableau 3.1).

3.4.3 Les facteurs limitant

Les facteurs limitants dans les sous-parcelles de bananiers étaient différents en fonction de la localisation. Les facteurs limitant LC sont dans l'ordre K, Mg, Corg, P, pH, Zn, $K/(Ca+Mg)$, N et Ca alors que PC les facteurs limitant sont $K/(Ca+Mg)$, pH, Corg, P, Zn, K, N et la densité des bananiers (figure 3.7). Dans les sous-parcelles de caféiers, les facteurs limitant le rendement par plant LB sont dans l'ordre le Zn, le N, la profondeur du paillis, le P, le Mg, K, Corg et pH. Les facteurs limitant PB étaient le Corg, la profondeur du paillis, Zn, P et K (figure 3.8).

Les facteurs limitants observés LB, LC et PC sont avant tout des facteurs liés à la qualité du sol (K, Mg, Corg, P, N, $K/(Ca+Mg)$, pH, Zn) et secondairement liés à la gestion (quantité du paillis pour les sous-parcelles LB, densité des bananiers dans les parcelles PC). Wairegi et al. (2010) et Delstanche (2011) ont trouvé que les mêmes facteurs étaient limitants pour les bananiers dans des proportions variables selon les régions en Ouganda et au Rwanda. Le Zn a été un important facteur limitant pour les caféiers LB. Les carences en Zn sur le caféier ont été aussi observées par Gaie et Flémal (1988) au Burundi et Martinez et al. (2003) au Brésil. Le rapport des cations ($K/(Ca+Mg)$) était le plus limitant dans 28 % des parcelles de bananier PC. Un déséquilibre entre cations entraîne une compétition dans l'absorption de ces cations. Un des cations peut être déficient même s'il est disponible dans le sol (Boyer, 1978). Les facteurs limitant observés PB sont en rapport avec la gestion des bananiers et des caféiers.

La corrélation entre le poids du régime observé LC et le poids de régime prédit par la méthode d'analyse des courbes limites avait un coefficient de corrélation faible bien que significatif. Cela a été aussi observé pour le poids de cerises dans les sous-parcelles LB. Cela montre que d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte ont un impact important sur le rendement. Ces facteurs pourraient être les maladies et les conditions climatiques (pluviométrie) qui affectent le rendement de café et de banane. Dans les sous-parcelles PB et PC, les coefficients de corrélations étaient très faibles et non significatifs. Cela

montre qu'en plus des facteurs biotiques et environnementaux, certaines interactions entre les deux cultures n'ont pas été prises en comptes. C'est notamment l'incidence et la sévérité des maladies en fonction de la localisation des sous-parcelles de caféiers. Mais d'après la littérature, chez les caféiers, l'incidence et la sévérité de la rouille et de l'anthracnose sont faible en cultures associées ou sous ombrage (Phiri et al. 2001 ; Mouen Bendimo et al., 2007 ; Staver et al., 2001).

3.5 Conclusion

La pratique paysanne de mettre les bananiers près des caféiers a permis d'avoir un rendement élevé de bananiers à proximité des caféiers sans affecter la production de café PB. En plus, le poids de 100 cerises qui est un indicateur de qualité du café était plus élevé PB. Si cela se confirme par des études plus poussées sur la qualité du café, l'agriculteur gagnerait sur la production de banane et sur la qualité du café. Le bananier a été plus compétitif pour la lumière et a affecté certaines caractéristiques morphologiques des caféiers, mais l'effet de l'ombrage est resté modéré car les caractéristiques principales du plant comme la hauteur, la circonférence à la base et le nombre moyen de nœuds par rameau n'ont pas été affectées. Les caractéristiques physico-chimiques des parcelles de caféier avaient des valeurs généralement plus élevées que les sous-parcelles de bananiers. Cela montre que le paillage, qui a été pratiqué depuis longtemps a amélioré sensiblement les parcelles de caféiers au détriment des parcelles de bananiers. Le paillage prioritaire des sous-parcelles de caféiers PB par les résidus de bananier a permis d'enrichir le sol de ces sous-parcelles pour presque tous les éléments. Les facteurs limitant dans les sous-parcelles LB, PC et LC sont en général des facteurs liés au besoin des deux cultures (K, Mg, Corg, N, mulch...). Dans les sous-parcelles PB, les facteurs limitant sont surtout liés à la gestion des bananiers. L'analyse de ce système a montré que ces deux cultures profitaient mutuellement de leur proximité et que les compétitions exercées par le bananier n'étaient pas nuisibles aux caféiers car ceux-ci ont profité de l'apport des résidus de bananier appliqués comme paillis.

Les interactions observées dans ce chapitre ont été obtenues avec un dispositif expérimental où ces deux cultures étaient séparées. Ainsi, les résultats obtenus pourraient être différents si les deux cultures étaient dans une même parcelle (associées). Ainsi, ces interactions sont étudiées avec des essais agronomiques en conditions contrôlées où les bananiers sont associés avec des jeunes caféiers (chapitre 5) ou des caféiers matures (chapitre 6). L'estimation du rendement a été réalisée avec un modèle difficilement applicable dans d'autres conditions. Un modèle permettant le rendement de café en un seul passage dans les conditions générales du Burundi fait l'objet du chapitre 4.

CHAPITRE 4 : PREDICTION DU POIDS DE CERISES PAR PLANT DANS LES CONDITIONS SOUS-OPTIMALES DE PRODUCTION DE CAFE DU BURUNDI

Résumé

La production de café est échelonnée sur plusieurs mois, ce qui rend sa détermination lourde et fastidieuse. Pour pouvoir estimer le rendement de café au début de la récolte, des données sur la production de café par plant, sur les caractéristiques morphologiques et sur les composantes de rendement ont été collectées, dans le but d'établir une équation de prédiction des rendements de café cerises à partir des caractéristiques morphologiques ou des composantes de rendement déterminables en un seul passage. Ces mesures ont été réalisées sur 53 plants de caféiers choisis dans les sites de Gitega et de Kayanza. Des données ont été récoltées sur les nœuds, les rameaux, les tiges et les plants. A Kayanza, 40 plants ont été choisis dont 23 étaient âgés de 4 ans après la taille de régénération et 17 âgés de 5 ans après la taille de régénération. Les caféiers de Gitega étaient âgés de 8 ans après la taille de régénération. A partir des données récoltées, des relations ont été développées à chaque niveau du plant (nœuds, rameaux, tiges et plant). Les relations obtenues avec les composantes de rendement avaient toujours des R^2 adj. plus élevées et des erreurs faibles par rapport aux relations obtenues avec les caractéristiques morphologiques. Trois modèles ont été proposés pour estimer la production de cerises par plant avec des valeurs de R^2 ajusté comprises entre 0,93 et 0,97. Ces valeurs de R^2 ajusté sont supérieures à celles obtenues avec les modèles de la littérature qui ont des valeurs de R^2 ajusté inférieures à 0,47. L'augmentation du nombre de mesures de composantes de rendement prises par plant permet d'augmenter le R^2 adj du modèle et de réduire l'erreur. La validation de ces trois modèles sur des données indépendantes a montré qu'ils peuvent être utilisés pour estimer la production de café cerise par plant. Le modèle 3 a été validé avec un R^2 le plus élevé. Pour cela, ce modèle est suggéré pour des études nécessitant une bonne précision dans le calcul du rendement.

4.1 Introduction

Dans la Région des Grands Lacs d'Afrique centrale, et en particulier au Burundi, la récolte du café s'échelonne sur plusieurs mois, entre début avril et début août, en raison d'un étalement de la floraison et de la maturation des grains de café (Gaie et Flémal, 1988). La détermination du rendement par parcelle nécessite donc plusieurs passages sur chaque parcelle. Cela rend la détermination du rendement très laborieuse lorsque celle-ci vise des objectifs scientifiques. De, plus cela complique également la détermination des rendements en milieu rural car la production de café dans ces régions est principalement le fait de petits producteurs et peu d'entre eux sont équipés pour mesurer des rendements et en mesure de tenir des registres (Ministère de l'Intérieur du Burundi, 2009). Les données souvent utilisées dans les différentes études sont la compilation des données obtenues dans les stations de lavage (Gahungu, 2008). Or, seule une partie du café produit au niveau de la ferme est vendue aux stations de lavage, l'autre étant traitée manuellement par les agriculteurs pour être vendue chez les commerçants collecteurs. Prendre uniquement en considération le café vendu aux stations de lavage risque donc de sous-estimer la production de café par exploitation.

L'établissement de relations entre les paramètres de croissance et les composantes de rendement permet de déterminer les valeurs caractéristiques difficiles à mesurer sur le terrain à partir de caractéristiques facilement mesurables et non destructives. Pour cela, les relations allométriques ont été depuis longtemps utilisées pour déterminer la croissance générale des espèces animales et végétales en fonction de la croissance des différentes parties du corps (Huxley, 1924). A titre d'exemple, des relations allométriques ont récemment été proposées permettant de déterminer le poids du régime de banane à partir de la circonférence du pseudotrunc à la base, de la circonférence du pseudotrunc à 1 m, du nombre de mains et du nombre de doigts (Wairegi et al., 2009). La biomasse aérienne du plant de bananier peut être estimée à partir de la hauteur du plant (Nyombi et al., 2009). La biomasse aérienne du plant de caféier peut être estimée à partir de la hauteur et du diamètre du tronc à 15 cm de hauteur (Segura et al., 2006), et l'indice de

surface foliaire du plant de caféier peut être calculé en utilisant le diamètre de la canopée inférieure (les deux premières rameaux primaires) et la hauteur (Favarin et al., 2002).

Un modèle souvent utilisé dans les relations allométriques est la fonction de puissance proposée par Huxley (1932) (équation 4.1).

$$y = a x^b \quad (4.1)$$

Avec y, la variable expliquée, x la variable explicative et a et b les coefficients. Ce modèle a été utilisé dans plusieurs études (Peters et al., 1988 ; Weiner et Thomas, 1992 ; Antunes et al., 2008 ; Nyombi et al., 2009). Dans d'autres études, la variante linéarisée de ce modèle a été utilisée. Cette fonction est (équation 4.2) :

$$\ln (y) = \ln (a) + b \ln (x) \quad (4.2)$$

Cette fonction a été utilisée entre autres par Niklas (1993), Segura et al. (2006), Wairegi et al. (2009) et Kuyah et al. (2012). Ce modèle présente certains avantages car la transformation ln des données i) permet de réduire le problème d'incorporer les données aberrantes dans le modèle; ii) permet dans certains cas le respect de l'hypothèse de normalité (Niklas, 2004). Certains auteurs ont utilisé des modèles linéaires (Upreti et al., 1991 ; Laamouri et al., 2002) car, quand $b = 1$, alors l'équation 4.1 devient un modèle linéaire avec l'ordonnée à l'origine nulle.

En plus des relations allométriques, des techniques utilisant les composantes de rendement (Cannell, 1973 ; Cannell, 1985) ont été proposées dans plusieurs études pour déterminer le rendement de café par plant. Soto-Pinto et al. (2000) ont proposé de choisir 3 rameaux au hasard (haut, bas et milieu) sur 5 plants conduits en unicaulie choisis au hasard, de compter le nombre total de rameaux productifs et le nombre total de drupes (fruits verts) sur les 3 rameaux. Le nombre total de drupes par plant a été obtenu en multipliant la moyenne obtenue sur 3 rameaux par le nombre de rameaux fructifères de chaque plant.

Un échantillon de 1 kg de drupes a été séché jusqu'à 12% d'humidité. Le poids moyen par plant a ensuite été estimé en multipliant le poids sec moyen de chaque drupe par le nombre total de drupes. Schmitt et al. (2009) ont compté le nombre total de fruits sur un plant puis, ils ont multiplié le nombre de fruits par le poids sec moyen des drupes obtenu à partir de 30 ou 300 drupes. Cilas et Descroix (2009) ont estimé le rendement dans la région de Mumirwa (Burundi) en prenant en compte le nombre moyen de cerises par tige, par rameau et par nœud (formule 4.3).

$$NC/PL = TI/PL * NRF/TI * NNF/RF * NC/NNF \quad (4.3)$$

où NC/PL est le nombre moyen de cerise par plant ; TI/PL est le nombre moyen de tiges par plant fait sur 5 plants ; NRF/TI est le nombre moyen de rameaux fructifères par tige estimé à partir d'une tige par plant ; NNF/RF est le nombre moyen de glomérules fructifères par rameaux établi à partir d'observations sur 4 rameaux fructifères par plant et NC/NNF le nombre moyen de cerises par glomérule sur 2 glomérules par plant.

Avec le poids moyen d'une cerise à partir de mesures réalisées l'année antérieure, il était possible de calculer le rendement à partir du nombre de cerises estimé par l'équation 4.3. Ceci suppose que le poids moyen d'une cerise est peu variable d'une année à l'autre. Lorsque c'est possible, l'utilisation du poids moyen d'une cerise de l'année en cours combinée avec l'équation 4.3 permettrait vraisemblablement d'améliorer l'estimation du rendement. Une autre formule d'estimation du rendement par plant a été proposée par Upreti et al. (1991). Cette formule se base sur le nombre de nœuds par plant, le nombre moyen de cerises sur 3 nœuds (le nœud basal, le nœud du milieu et le nœud distal) et le poids des premières cerises mûres.

Dans la cadre de la sélection variétale de café, certains auteurs ont développé des modèles permettant de réaliser une projection des rendements sur plusieurs années à partir des données de 2 à 3 ans de mesure en combinant les paramètres de croissance et les composantes de rendement. Ainsi, Walyaaro et Van Der Vossen (1979) ont développé des modèles intégrant la

circonférence à la base et la longueur du plus long rameau. Anim-Kwapong et Adomako (2011) ont trouvé que la sélection variétale pour de hauts rendements peut être basée sur la circonférence du plant, le diamètre à la base et le nombre de rameaux primaires. Cilas et al. (2011) ont montré que pour le café robusta, le nombre de cerises sur le 15^{ème} rameau compté à partir du sommet peut être un bon indicateur du rendement sur au moins deux saisons de récolte. De plus, des corrélations positives ont été observées entre le rendement et les caractéristiques de croissance comme le nombre de rameaux et le diamètre à la base (Freitas et al., 2007).

Les modèles d'estimation du rendement de café décrits ci-dessus ne peuvent pas être utilisés dans conditions culturelles du Burundi. 1°) L'estimation de rendement basée sur les caractéristiques de croissance du plant ne peut être envisagée que dans les conditions de croissance optimales où il y a équilibre entre la croissance végétative et le rendement. Dans le cas contraire, l'entretien de l'appareil végétatif du plant va se faire au détriment de la production (Anim-Kwapong et Adomako, 2011). Des plants ayant des caractéristiques morphologiques identiques pourraient donc conduire à des rendements très différents, selon que l'on est plus ou moins proche des conditions optimales de production. Or, au Burundi, la production de café se fait dans des conditions sous optimales, et très variables d'une parcelle à une autre. Alors que la pluviométrie optimale des caféiers se situe au-dessus de 1500 mm par an (DaMatta et al., 2008), au Burundi la plupart des régions caféicoles reçoivent moins de 1300 mm de pluie par an (Gaie et Flémal, 1988). De plus, la fertilisation est presque inexistante et le paillis appliqué n'est plus suffisant et n'est souvent pas appliqué pendant la bonne période (chapitre 2). Enfin, le verger caféicole est vieux et est mal taillé (chapitre 2). Or, la taille est une opération importante pour maintenir l'équilibre entre l'appareil productif et l'appareil végétatif. La forte variation bisannuelle de production de café observée au Burundi (OCIBU, 2008 ; chapitre 2) porte à conclure que pour un plant de caféier dont la morphologie et la biomasse ne varie pas beaucoup entre deux années, le rendement de café varie énormément. 2°) Les techniques utilisées étaient difficiles à mettre en œuvre car elles exigent beaucoup de travail comme le comptage de tous les fruits par plant (Schmitt et al., 2009), la

connaissance du rendement et le nombre de cerises de l'année précédente (Cilas et Descroix, 2009) ou ne fait pas référence au rendement de café cerises car ce sont les drupes (fruits encore verts) qui sont utilisés (Soto-Pinto et al., 2000). Certaines techniques suppose que tous les fruits présents arriveront à maturité (Soto-Pinto et al., 2000 ; Schmitt et al., 2009) alors que au cours de la maturation, certaines cerises peuvent être perdues. Le modèle d'Upreti et al. (1991), qui pourrait sembler applicable, a été développé dans de conditions de forte production avec des caféiers conduits en unicaulie.

Les conditions sous optimales de production de café (Gaie et Flémal, 1988 ; DaMatta et al., 2008 ; OCIBU, 2008) exigent donc l'élaboration des modèles d'estimation de rendement par plant utilisable dans ces mêmes conditions et qui devraient a priori être basés sur des composantes de rendement plutôt que des caractéristiques morphologiques. Ces modèles pourraient servir dans des études scientifiques ou dans des prévisions de rendement pour une organisation logistique des intervenants de la filière café. L'objectif de ce chapitre est de développer des modèles permettant d'estimer le rendement de café par plant en un seul passage avant le début de la récolte de café dans les conditions sous optimales de productions de café au Burundi. L'approche allométrique sera comparée à une approche basée sur les composantes de rendement.

4.2 Matériel et méthode

4.2.1 Description des sites

Les données ont été récoltées dans deux sites du Burundi : Kayanza dans la région naturelle de Buyenzi et Gitega dans la région naturelle de Kirimiro. Gitega et Kayanza sont des centres de la recherche café de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Le site de Gitega est situé au centre du pays à 1651 m d'altitude, à 03,36162° de latitude sud et à 29,93323° de longitude est (figure 4.1). Le site de Kayanza quant à lui est situé au nord du Burundi à 1812 m d'altitude à 02,90188° de latitude sud et à 29,71292° de longitude est. La pluviométrie moyenne annuelle (2009-2011) était de 1122 mm

à Gitega et de 1459 mm à Kayanza. La température moyenne annuelle sur cette même période était de 20,1°C à Gitega et de 19,1°C à Kayanza. Le sol de Gitega est un Acrisol tandis que celui de Kayanza est un Ferrisol.

4.2.2 Gestion des caféiers

Dans les deux sites, les caféiers ont été conduits en multicaulie avec 3 tiges de caféiers par plant même si quelques plants avaient 2 tiges. La taille de production et d'entretien ont été effectuées ; les gourmands et les rameaux desséchés ont été enlevés chaque mois et les rameaux d'en bas qui n'étaient plus productifs ont été enlevés après la récolte. Cependant, la taille apicale n'a pas été pratiquée et la tige a été laissée en croissance libre vers le haut. Les caféiers ont été maintenus paillés tout au long de l'année avec des graminées sauvages à Gitega et du *Themeda* à Kayanza. Il n'y a pas eu d'apport d'engrais pendant quatre années consécutives. Les données d'analyse du sol sont reprises dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Les moyennes et les écart-types des résultats d'analyse du sol de Gitega et Kayanza (0-30 cm). P, K, Ca et Mg ont été extraits avec la méthode Mehlich-3.

Site	pH	C (%)	N _{tot}	P	K	Ca	Mg
		%	%	mg/kg	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Gitega	4,9	2,8	0,2	3,5	0,3	0,4	0,3
Kayanza	5,0	3,1	0,3	31,6	1,2	0,9	0,5

A Kayanza, les caféiers avaient été plantés entre 1982 et 1984. Une partie des plants étaient à la 4^{ème} année après la taille de régénération et une autre à la 5^{ème} année. A Gitega, les caféiers ont été installés à la même période qu'à Kayanza mais ils étaient à la 8^{ème} année après la taille de régénération. Ce choix a été motivé par le fait que, chez les petits producteurs, l'âge des caféiers après la taille de régénération est souvent supérieur aux 7 ans recommandés par la recherche (chapitre 2). Ces plantations de caféiers avaient été utilisées, depuis une décennie, pour la production de semences. Dans les deux sites, le

traitement de la punaise du caféier a été fait par insecticide avec un passage au mois de novembre et un autre passage au mois de février. Il n'y a pas eu de traitements contre la rouille et l'antracnose mais l'incidence de ces maladies était faible. La densité de semis était de 1,5 m dans les lignes et de 2,5 m entre les lignes dans les deux sites.

4.2.3 Collecte des données

Les données utilisées pour l'élaboration des modèles allométriques ont été récoltées sur 40 plants à Kayanza et 13 plants à Gitega (figure 4.1). A Kayanza, 20 plants étaient de la variété *Jackson 2/1256* avec 7 plants âgés de 5 ans après la taille de régénération et 13 plants âgés de 4 ans après la taille de régénération. Les 20 plants restant étaient de la variété *Bourbon Mayaguez* avec 10 plants âgés de 5 ans après la taille de régénération et 10 plants âgés de 4 ans après la taille de régénération. A Gitega, tous les plants étaient de la variété *Jackson 2/1256* âgés de 8 ans après la taille de régénération.

Pour chaque plant, des données ont été prises au niveau du plant, au niveau des tiges, au niveau des rameaux et au niveau des nœuds fructifères. Sur le plant, les mesures concernaient le poids de 100 cerises et le poids total de cerises. Le poids de 100 cerises a été déterminé en pesant 100 cerises choisies aléatoirement parmi les premières cerises mûres récoltées fin mars 2010. Le poids total de cerises par plant a été déterminé par la pesée des récoltes successives effectuées entre le 2 avril 2010 et le 26 juin 2010 à Gitega et entre le 4 avril 2010 et le 6 août 2010 à Kayanza. Sur chaque tige, les données récoltées étaient la circonférence à la base, la hauteur, le nombre total de rameaux et le nombre total de rameaux fructifères. Le poids de cerises par tige a été supposé proportionnel au nombre de cerises par tige car le poids moyen d'une cerise a été déterminé sur tout le plant. Sur chaque rameau, les données collectées étaient la longueur du rameau, le nombre total de nœuds, le nombre de nœuds fructifères et le nombre de feuilles. Sur chaque nœud fructifère, le nombre total de cerises a été encodé. La somme des cerises de tous les nœuds du rameau a permis de connaître le nombre total de cerises par rameau. La somme des cerises de tous les rameaux de la tige a donné le

nombre total de cerises par tige alors que la somme des cerises de toutes les tiges a donné le nombre de cerises par plant. Seules les cerises saines ont été comptées.

Trois modèles d'estimations des rendements ont été développés (voir résultats). La validation des modèles 1 et 2 a été réalisée sur 40 plants choisis à Makamba (29,87879° de longitude est et 04,14509° de latitude sud), à Gitega, à Murongwe (29,86364° de longitude est et 03,18564° de latitude sud) et Kayanza à raison de 10 plants par site. La validation du modèle 3 a été réalisée sur 25 plants choisis Gitega, Murongwe et Kayanza car les données disponibles sur les autres plants ne permettaient pas sa validation. Les données utilisées pour l'élaboration et la validation des modèles d'estimation du rendement café cerise étaient collectées dans des centres de recherche de l'ISABU. Mais, la gestion était sous-optimale. En effet, avec la réduction des fonds alloués à la recherche, les caféiers n'étaient pas fertilisés et la taille était appliquée uniquement à Kayanza. Les résultats sont donc extrapolables en milieu rural. Les données pour la validation ont été récoltées entre avril et juillet 2012. Les plants utilisés pour la validation étaient différents de ceux utilisés pour l'élaboration des modèles allométriques et les données ont été collectées à des périodes différentes. La localisation des sites est reprise sur la figure 4.1.

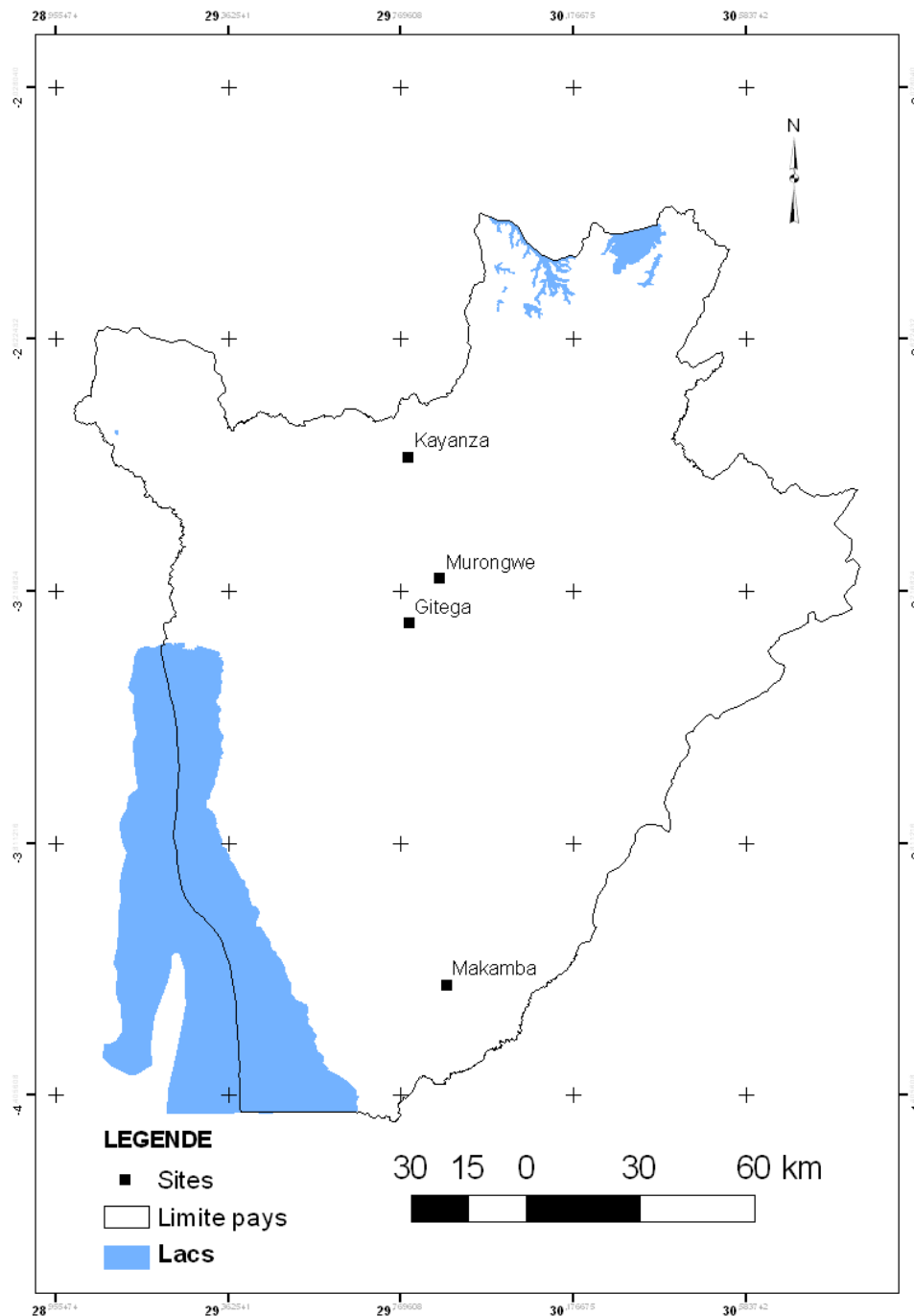


Figure 4.1 : Sites de collecte des données pour l'élaboration (Gitega et Kayanza) et la validation des modèles d'estimation de rendement (Gitega, Kayanza, Makamba et Murongwe).

4.2.4 Approches pour le choix des variables du modèle

Le modèle général de détermination du rendement à partir de ses composantes est décrit par la formule 4.4.

$$\frac{\text{poids cerises}}{\text{plant}} = \frac{\text{poids}}{\text{cerise}} \times \frac{\text{nbre cerises}}{\text{noeudfructifères}} \times \frac{\text{nbre noeudsfructifères}}{\text{rameau fructifère}} \times \frac{\text{nbre rameaux fructifères}}{\text{tige}} \times \frac{\text{nbre tiges}}{\text{plant}} \quad (4.4)$$

A partir du modèle général 4.4, deux approches ont été utilisées pour réduire le nombre de mesures et obtenir un modèle dont les paramètres sont faciles à mesurer sur terrain. La première approche était d'estimer les composantes de rendement à partir des caractéristiques morphologiques à chaque niveau du plant : nœuds, rameaux, tiges et plant. La deuxième approche était de chercher la méthode la moins laborieuse pour estimer chaque composante de rendement à partir de quelques mesures sur les autres composantes de rendement. Ainsi par exemple, au lieu de compter toutes les cerises sur tous nœuds, sur tous les rameaux et toutes les tiges, le comptage pouvait être réalisé sur certains nœuds du rameau, sur certains rameaux d'une tige et sur certaines tiges du plant. Pour chacune des 5 composantes (poids moyen d'une cerise, nombre de cerises/nœud fructifères, nombre de nœuds fructifères/rameau fructifère, nombre de rameaux fructifères/tige et le nombre de tiges/plant), la réduction des mesures a été réalisée pour faciliter le travail de terrain en combinant les deux approches. Les valeurs utilisées pour estimer le nombre de cerises par nœuds, le nombre de nœuds fructifères par rameau, le nombre de rameaux fructifères par tige étaient des moyennes par tiges.

1°) Le poids moyen de cerises a été mesuré avant la récolte et concernait les 100 premières cerises mûres sur le plant obtenues en un seul passage avant le premier passage de récolte. Le poids moyen d'une cerise a été supposé constant pour toutes les tiges d'un même plant et durant toute la période de récolte. En effet, en mettant en relation le poids moyen de cerises mesuré au début de la récolte et le poids moyen de cerises calculé en utilisant le rendement mesuré et le nombre total de cerises par plant, le coefficient de détermination (R^2) était de 0,64 avec une pente de 0,96 pour une fonction linéaire passant par l'origine. Bien que le coefficient de détermination ne soit pas très élevé, la pente était proche de 1. Une variation du poids de cerises au

cours de la saison a été donc observée, mais cette variation était proportionnelle au poids moyen des premières cerises mûres.

2°) Pour estimer la moyenne du nombre de cerises par nœuds, une moyenne du nombre de cerises sur 3 nœuds ou 5 nœuds sur le rameau primaire a été réalisée. Le choix des nœuds a été fait sur le rameau en divisant en 3 (figure 4.2) ou en 5 la fraction fructifère et en sélectionnant au hasard un nœud dans chaque partie. Si le rameau primaire était fortement ramifié, le nœud choisi pouvait se trouver sur le rameau primaire, les branches secondaires ou tertiaires mais en respectant les divisions du rameau primaire.

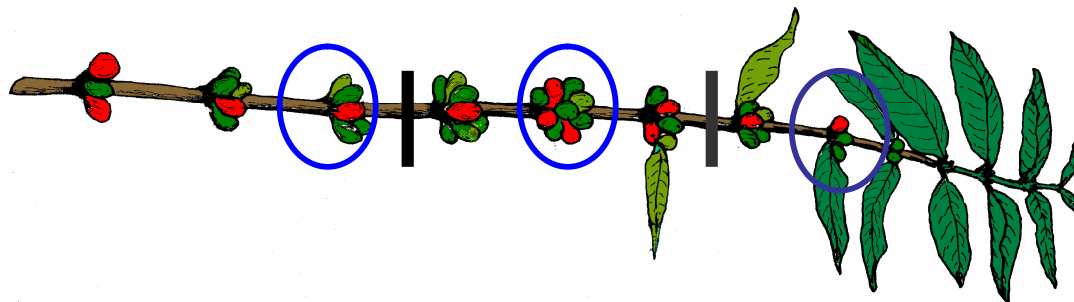


Figure 4.2 : localisation des nœuds utilisés pour déterminer la moyenne de cerises par nœud (nœuds encerclés). Les cerises rouges sont des cerises mûres, les cerises vertes sont encore immatures et les cerises vertes claires sont en cours de maturation. Les barres verticales montrent la subdivision de la fraction fructifère du rameau en 3 parties dans le choix de 3 nœuds aléatoires sur les 3 parties du rameau.

Cette moyenne sur 3 ou 5 nœuds a été corrélée avec la moyenne du nombre de cerises compté sur l'ensemble des nœuds du rameau (nombre de nœuds fructifères par rameau/nombre de cerises par rameau). La relation globale pour les 3 types de caféiers est montrée à la figure 4.3. Les valeurs de R^2 respectives pour la figure 4.3a et 4.3b sont de 0,94 et 0,93.

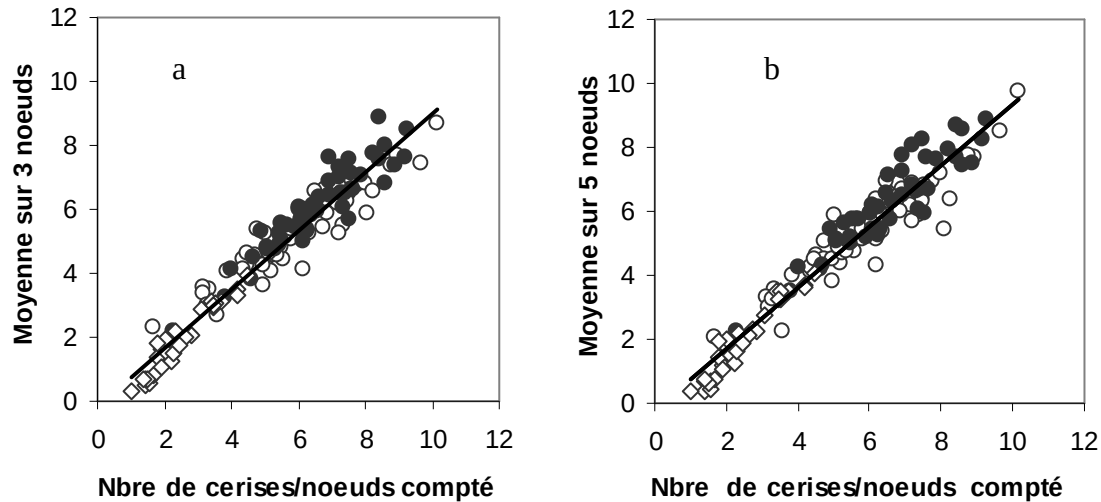


Figure 4.3 : Relation globale entre le nombre moyen de cerises par nœuds compté et la moyenne de cerises par nœuds estimée à partir de trois nœuds (a) ou de cinq nœuds (b). Les points représentent les moyens par tige. Les losanges non remplis représentent les valeurs de Gitega-8ATR ; les cercles remplis les valeurs de Kayanza-5ATR et les cercles non remplis les valeurs de Kayanza-4ATR (ATR : années après la taille de régénération).

3°) Pour estimer le nombre de nœuds fructifères par rameaux, une moyenne a été réalisée sur 3 rameaux ou sur 5 rameaux choisis le long de la tige. Le choix des 5 rameaux a été réalisé selon la figure 4.4. Pour choisir 3 rameaux, il suffisait d'exclure le rameau d'en bas et le rameau d'en haut. En plus de ces composantes de rendement, des caractéristiques de croissance comme la longueur du rameau ou le nombre de nœuds du plus long rameau (NNLGRM) ont été considérés (figure 4.5). Le nombre total de nœuds (fructifères et non fructifères) par rameau n'a pas été utilisé pour estimer le nombre de nœuds fructifères par rameau car son obtention demande plus de temps que le comptage du nombre de nœuds fructifère.

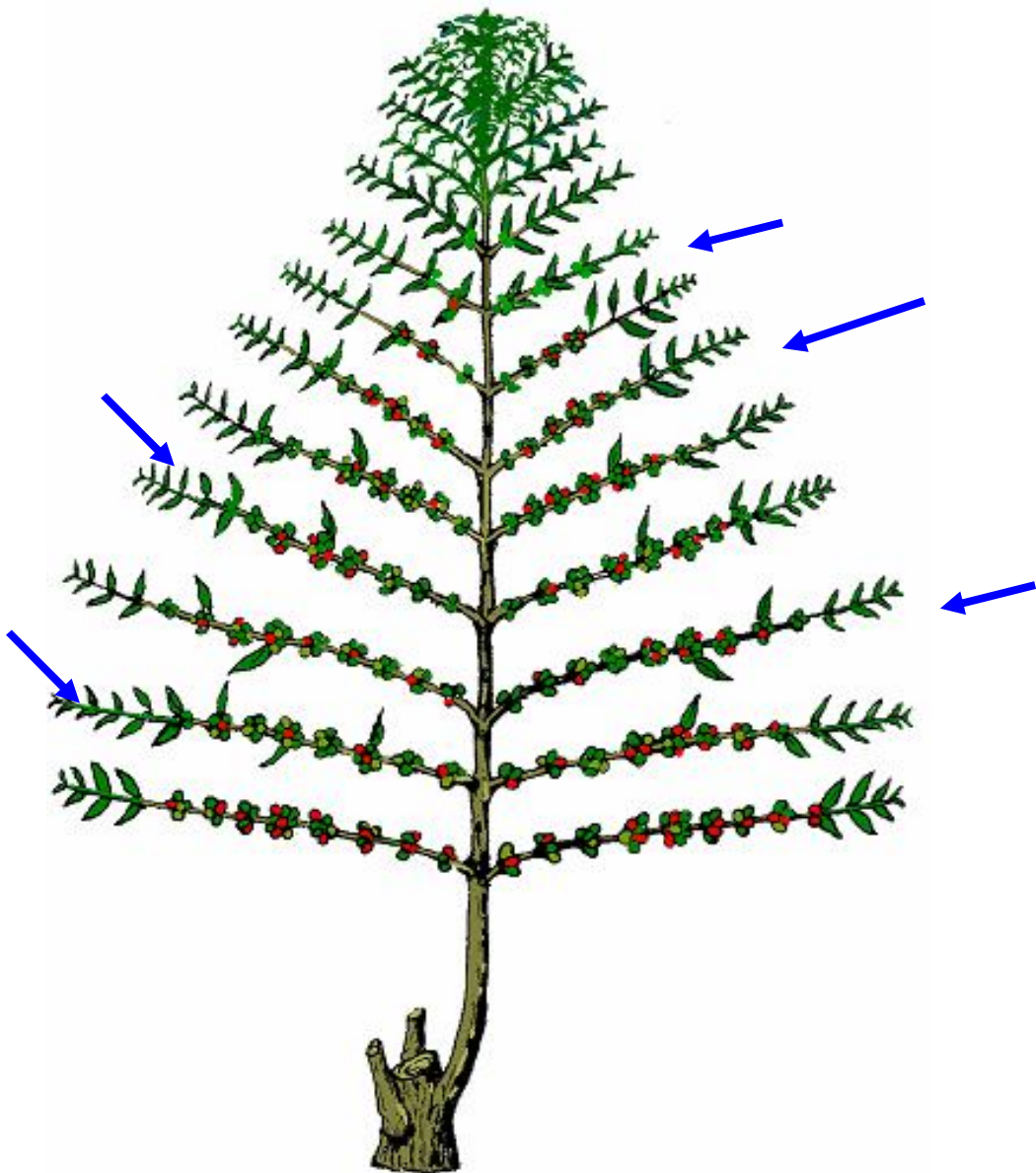


Figure 4.4 : Localisation des rameaux utilisés pour estimer la moyenne du nombre de nœuds fructifères par rameau sur la tige (rameaux indiqués par des flèches bleues).

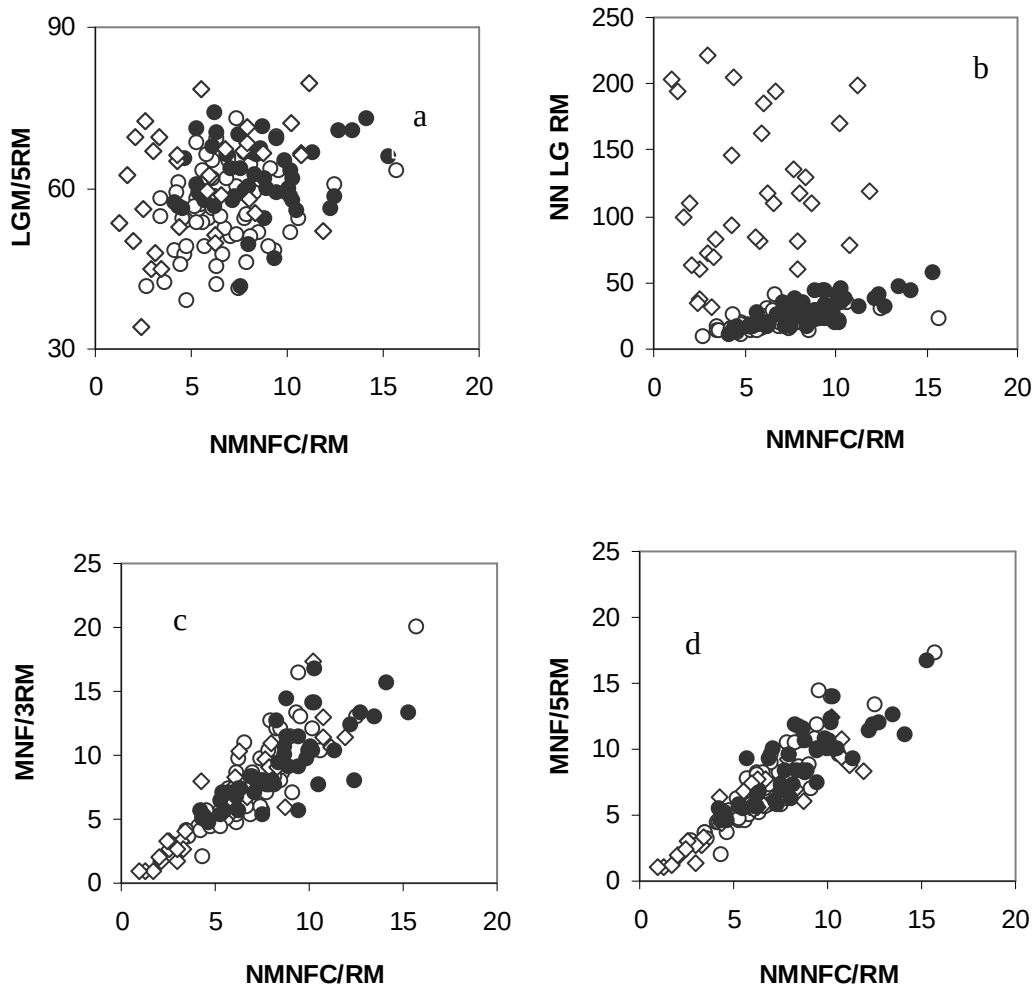


Figure 4.5 : Relation entre le nombre moyen de nœuds fructifères compté par rameau fructifères et la longueur moyenne (cm) sur 5 rameaux (LGM/5RM) (a), le nombre de nœuds du plus long rameau (NNLGRM) (b), la moyenne de nœuds fructifères sur 3 rameaux (c) et la moyenne de nœuds fructifères sur 5 rameaux (d). Les points représentent les moyennes par tige. Les losanges non remplis représentent les valeurs de Gitega-8ATR ; les cercles remplis les valeurs de Kayanza-5ATR et les cercles non remplis les valeurs de Kayanza-4ATR (ATR : années après la taille de régénération).

4°) Pour estimer le nombre de rameaux fructifères par tige, le nombre de rameaux fructifères comptés a été corrélé avec la hauteur de la tige, le diamètre à la base, la longueur du plus long rameau, la combinaison diamètre à la base et hauteur de la tige, et la combinaison du diamètre à la base et la longueur du plus long rameau. Le nombre total de rameaux n'a pas été utilisé car il est était plus difficile à obtenir que le nombre de rameaux fructifères. Les relations entre

le nombre de rameaux fructifères par tige et la circonférence à la base de la tige (CRBTC), la hauteur de la tige (HTC) et la longueur du plus long rameau (LNLRM) ou rayon de la canopée sont montrées à la figure 4.6.

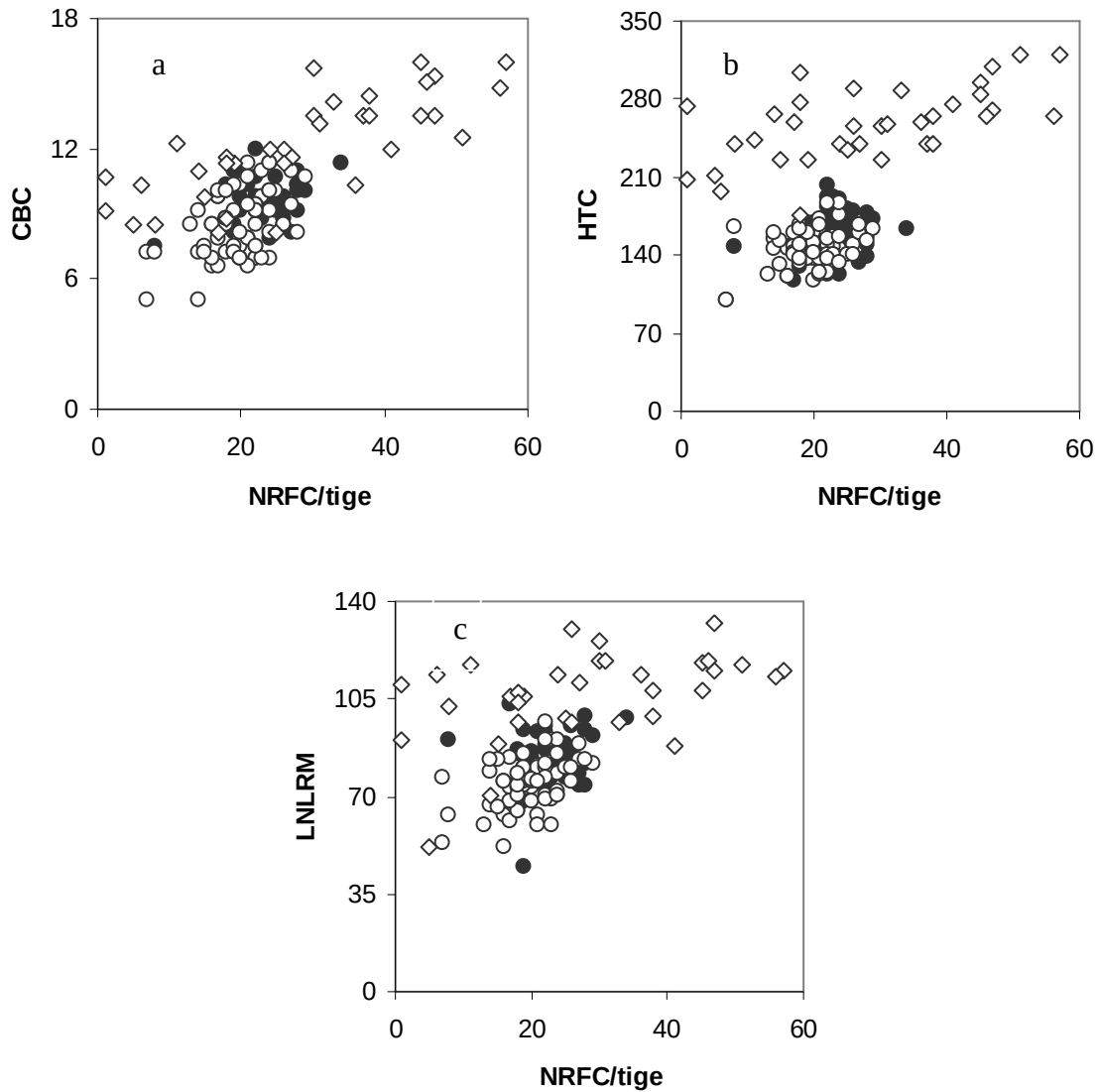


Figure 4.6 : Relations entre le nombre de rameaux fructifères comptés par tige (NRFC/tige) et la circonférence à la base de la tige de caféier (CBTC) (a), la hauteur de la tige de caféier (HTC) (b) et la longueur du plus long rameau de la tige (LNLRM) (c). Chaque point correspond à une tige. Les losanges non remplis représentent les valeurs de Gitega-8ATR ; les cercles remplis les valeurs de Kayanza-5ATR et les cercles non remplis les valeurs de Kayanza-4ATR (ATR : années après la taille de régénération).

5°) Pour réduire le nombre de tiges sur lesquelles il faut faire des mesures, des relations ont été réalisées entre le poids de cerises mesuré par plant et le poids de cerises mesuré sur la tige avec le plus faible poids de cerises (TMP) d'une part, et entre le poids de cerises mesuré par plant et le poids de cerises mesuré sur la tige avec le poids le plus élevé de cerises d'autre part (TPP) (figure 4.7)

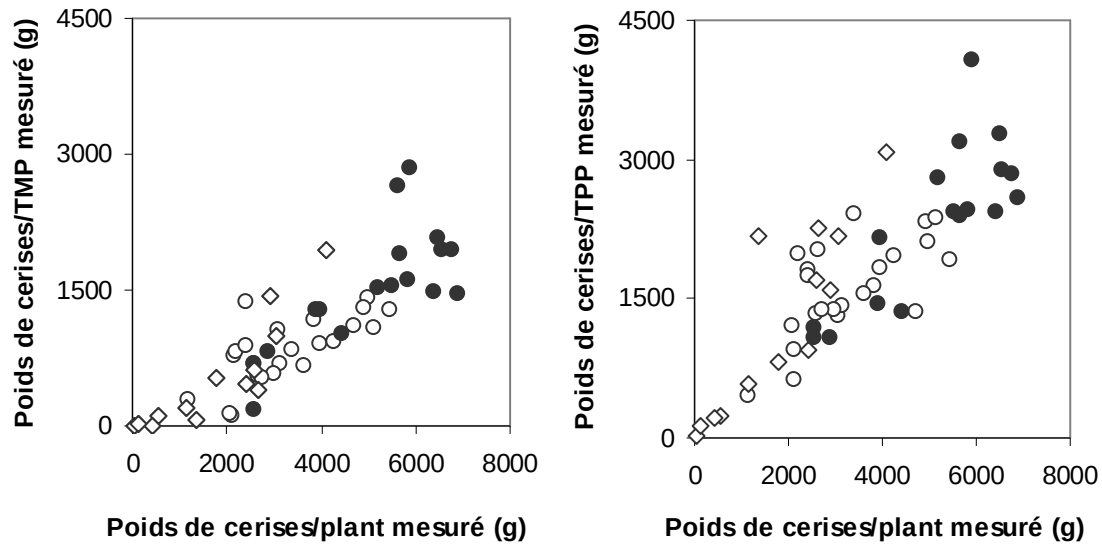


Figure 4.7 : Relations entre le poids de cerises mesuré par plant et le poids de cerises mesuré sur la tige avec le plus faible poids de cerises (TMP) (a) et la tige avec le poids le plus élevé de cerises (TPP) (b). Chaque point représente un plant. Les losanges non remplis représentent les valeurs de Gitega-8ATR ; les cercles remplis les valeurs de Kayanza-5ATR et les cercles non remplis les valeurs de Kayanza-4ATR (ATR : années après la taille de régénération).

D'après les figures 4.3 et 4.5 (c et d), les relations étaient linéaires dans l'estimation de la moyenne de cerises par nœuds avec un modèle représenté par la formule 4.5.

$$y = a + b x \quad (4.5)$$

Avec y : variable expliquée, x : la variable explicative et a et b des constantes

A chaque niveau (nœud, rameau, tige et plant), un modèle général a été développé en utilisant toutes les données des variables montrées dans les figures 4.3, 4.5, 4.6 et 4.7. Par après, des modèles spécifiques en fonction de

l'état des caféiers ont été développés en utilisant les mêmes variables que pour le modèle général. Dans le développement des modèles spécifiques, les variétés n'ont pas été prises en considération parce que les variétés *Jackson* font partie du type *Bourbon* (Eskes et Leroy, 2009). En plus, aucune différence phénotypique entre les trois variétés n'a été visible sur le terrain. Les modèles spécifiques ont été développés uniquement pour les 3 états des caféiers résultant de la combinaison des facteurs de gestion et d'environnement. Le 1^{er} état était celui des caféiers âgés de 4 ans après la taille de régénération à Kayanza. Les nœuds et les rameaux étaient bien chargés en cerises mais n'avaient pas encore atteint le pic de production. Le 2^{ème} état des caféiers était celui des caféiers âgés de 5 ans après la taille de production. La production était au pic, avant de chuter à partir de la 6^{ème} année (Gaie et Flémal, 1988). Le 3^{ème} état était celui des caféiers âgés de 8 ans après la taille de régénération, cultivés sur des sols pauvres avec une pluviométrie déficiente. Ces caféiers possédaient des rameaux moins chargés en cerises. Avec ces données, il n'était pas possible de comparer l'effet spécifique de la taille de régénération car il y a d'autres paramètres qui entraient en jeu, comme les conditions climatiques et édaphiques qui étaient propres à chaque site. La comparaison a été uniquement faite entre les 3 états de caféiers qui sont tous présents dans les conditions du Burundi.

4.2.5 Développement des modèles d'estimation de la production de cerises par plant

A chaque niveau (nœuds, rameau, tige et plant), une variable a été choisie pour construire les modèles. Les variables choisies étaient celles ayant montré une bonne corrélation avec la composante de rendement considérée. Pour cela, la variable ayant un R^2 ajusté élevée et une faible erreur en utilisant toutes les données a été considérée. En plus, cette variable devait avoir un R^2 ajusté et une faible erreur pour chacune des trois catégories de caféiers prise séparément. Avec ces variables, le nombre total de cerises par plant a été estimé. Le poids de cerises par plant est estimé en multipliant le nombre total de cerises par le poids moyen d'une cerise qui était obtenu à partir du poids de 100 cerises. Une relation est ensuite établie entre le poids de cerises estimé et

le poids mesuré (équation 4.6). La relation entre le poids de cerises mesuré (PCM) et le poids de cerises calculé devrait être linéaire. Mais, dans le souci de répondre aux conditions de normalité et d'homoscédasticité des résidus, les données ont été transformées avec la fonction $\ln$. Par ailleurs, la figure 4.5 (c et d) montre l'absence de l'homoscédasticité pour le modèle linéaire. La formule 4.6 permet donc la correction du poids de cerises calculé par rapport au poids de cerises mesuré.

$$\ln (\text{PCM/PL}) = \ln (a) + b * \ln (\text{PCC/PL}) \quad (4.6)$$

Où PCM/PL : poids de cerises mesuré par plant (g) ; PCC/PL : poids de cerises calculé par plant ; a et b les coefficients du modèle.

Pour permettre à l'utilisateur de choisir un modèle en fonction du temps disponible. 3 modèles avec une augmentation progressive de l'intensité des mesures ont été développés. Le premier modèle a été développé à partir de la tige du plant qui avait plus de cerises. Le poids de cerises obtenu sur cette tige a été automatiquement multiplié par le nombre de tiges du plant. Le deuxième modèle a été déterminé en utilisant les moyennes sur toutes les tiges du plant pour avoir le poids de cerises d'une tige moyenne qui sera multiplié par le nombre de tiges du plant. Les variables utilisées étaient les mêmes que celles du premier modèle, la seule différence était que les mesures étaient faites sur toutes les tiges du plant au lieu d'une seule tige. Pour le troisième modèle, certaines caractéristiques ont été comptées au lieu d'être estimées et les moyennes ont été réalisées sur toutes les tiges du plant pour avoir les valeurs sur une tige moyenne du plant.

Sur ces modèles, plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer leur fiabilité. Les tests réalisés étaient i) le test de normalité des résidus par le test de Shapiro-Wilk et la méthode de Q-Q plots, ii) la distance de Cook et iii) le test de l'existence de la multicolinéarité des facteurs en utilisant l'inflation de la variance qui doit être inférieur à 10 (Montgomery and Peck, 1992). La qualité du modèle était basée sur le coefficient de détermination ajusté R^2_{adj} , l'erreur relative (équation 4.7) (Chave et al., 2005 ; Kuyah et al. 2012), la racine carrée

de la moyenne du carré de l'erreur (RMSE) (équation 4.8) et la faible multicolinéarité (Wairegi et al., 2009). L'élimination des données aberrantes a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, les observations ayant des distances de Cook (Crawley, 2005) extrêmement élevées ont été identifiées. Ensuite, si après retrait de ces valeurs le modèle conduisait à une augmentation du R^2 adj, une amélioration de la normalité des résidus et de l'homoscédasticité de la variance, ces observations étaient retirées définitivement. Dans le développement de ces trois modèles, aucune donnée aberrante n'a été observée.

$$RE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{prédit} - \text{observé}}{\text{observé}} \right) * 100 \quad (4.7)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{prédit} - \text{observé})^2 \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

Avec RE : erreur relative et RMSE : la racine carrée de la moyenne du carré de l'erreur (root mean square error).

4.2.6 La validation des modèles

Le rendement de cerises observé et le rendement prédit ont été mis en relation, et une droite de régression a été tracée avec son coefficient de détermination. Ensuite la déviation des valeurs prédites par rapport aux valeurs observées a été analysée en utilisant le RMSE (équation 4.8), l'erreur absolue et le pourcentage de biais (Wairegi et al. 2009) calculé avec la formule (4.9).

$$\% \text{ biais} = \sum_{i=1}^n (xi - yi / xi) * 100 / n \quad (4.9)$$

Où xi est la valeur observée, yi la valeur prédite et n le nombre d'observations. Une valeur du biais proche de 0 indique une meilleure prédiction (Camargo García et Kleinn, 2010), une valeur positive indique une sous-estimation et une valeur négative indique une surestimation (Wairegi et al., 2009).

Pour connaître le nombre de nœuds à échantillonner par rameau, le nombre de plants à échantillonner par parcelle, la formule 4.10 a été utilisée. Cette formule suppose que la variable d'intérêt suit une distribution normale. Le nombre de plants à échantillonner pour avoir le plant moyen par parcelle a été calculé uniquement pour les caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération car c'est uniquement sur ces plants que les données présentaient une distribution normale.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha} \cdot \sigma}{d \cdot m} \right)^2 \quad (4.10)$$

Avec n : le nombre d'échantillons nécessaires, σ : écart-type, m : la moyenne, d : marge d'erreur acceptable exprimée en pourcentage par rapport à la moyenne, Z_{α} : valeur de la variable normale réduite pour un intervalle de confiance α ($Z_{\alpha} \sim 2$ pour $\alpha = 95\%$).

Le développement et l'analyse des modèles ont été faits avec le logiciel R version 2.13.1.

4.3 Les résultats

4.3.1 Description statistique du rendement et de ses composantes sur les rameaux, les tiges et les plants

Sur les nœuds, le nombre de cerises par nœud était le plus élevé à Kayanza (Kayanza-5ATR) et il était le plus faible sur les caféiers de Gitega (Gitega-8ATR) (tableau 4.2). La différence était significative entre les différents états de caféiers à $p \leq 0,05$. Sur les rameaux, le nombre de nœuds fructifères par rameau était le plus élevé sur les caféiers de Kayanza-5ATR. Les rameaux les plus chargés en cerises étaient ceux des caféiers de Kayanza âgés de 5 ans après la taille de régénération suivi par les caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération (Kayanza-4ATR). Le nombre de nœuds par rameau (NNF/RM) et le nombre moyen de cerises par rameau (NC/RM) étaient significativement différents entre les états des caféiers à $p \leq 0,05$ (tableau 4.2).

Au niveau des tiges, le nombre le plus élevé de rameaux fructifères a été observé sur les caféiers de Gitega et il était significativement différent de celui des caféiers de Kayanza (Tableau 2). Ce nombre était statistiquement le même pour les deux états des caféiers de Kayanza bien qu'ayant des âges différents. Le nombre moyen de cerises par tige (NC/TG), le poids de cerises mesuré par tiges (PC/TG) et le poids de cerises par plant (PC/PL) étaient plus élevés sur les caféiers de Kayanza âgés de 5 ans après la taille de régénération, suivis par les caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération. Les différences étaient significatives à $p \leq 0,05$. Pour le poids de 100 cerises (P100C), la différence n'était pas significative à $p \leq 0,05$ pour les 3 états des caféiers (tableau 4.2).

Les coefficients de variation étaient plus élevés au niveau des rameaux et moins élevés pour les différentes composantes de rendement au niveau de la tige. Les coefficients de variation entre les nœuds étaient intermédiaires (tableau 4.2). En plus, les coefficients de variation étaient plus élevés pour les caféiers de Gitega.

Tableau 4.2 : Description statistique du rendement et de ses composantes sur les rameaux, les tiges et les plants. Les données sont des moyennes ($\pm$ écart-type) sur les tiges pour les valeurs des nœuds, des rameaux et des tiges, et des moyennes sur les plants pour les valeurs des plants.

	Kayanza-4ATR¹		Kayanza-5ATR²		Gitega-8ATR³	
	Moy $\pm$ ET ⁴	CV ⁵	Moy $\pm$ ET	CV	Moy $\pm$ ET	CV (%)
Sur nœuds						
NC/N ⁶	6 $\pm$ 4 b	0,65	7 $\pm$ 4 c	0,63	3 $\pm$ 2 a	80
Sur rameaux						
NNF/RM ⁷	7 $\pm$ 4 a	0,89	9 $\pm$ 6 b	0,90	7 $\pm$ 6 a	96
NC/RM ⁸	42 $\pm$ 35 b	0,84	59 $\pm$ 53 c	0,90	20 $\pm$ 22 a	112
Sur tiges						
NRF ⁹	20 $\pm$ 5 a	0,23	23 $\pm$ 4 a	0,18	28 $\pm$ 15 b	56
NC/TG ¹⁰	821 $\pm$ 359 a	0,44	1329 $\pm$ 542 b	0,41	557 $\pm$ 531 a	95
PC/TG (g) ¹¹	1163 $\pm$ 542 b	0,47	1780 $\pm$ 689 c	0,39	825 $\pm$ 835 a	102
Sur plants						
PC/PL ¹²	3308 $\pm$ 1173b	0,35	5129 $\pm$ 1472c	0,29	1781 $\pm$ 1284a	72
P100 (g) ¹³	148 $\pm$ 20 a	0,13	143 $\pm$ 19 a	0,13	150 $\pm$ 19 a	12

¹Kayanza-4ATR : caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération ; ²Kayanza-5ATR : caféiers de Kayanza âgés de 5 ans après la taille de régénération ; ³Gitega-8ATR : caféiers de Gitega âgés de 8 ans après la taille de régénération ; ⁴Moy $\pm$ ET : moyenne plus ou moins écart-type ; ⁵CV : coefficient de variation ; ⁶NC/N : nombre moyen de cerises par nœud ; ⁷NNF/RM : nombre moyen de nœuds fructifères par rameau ; ⁸NC/RM : nombre moyen de cerises par rameau ; ⁹NRF : nombre moyen de rameaux fructifères par tige ; ¹⁰NC/TG : nombre moyen de cerises par tige ; ¹¹PDC : poids de cerises mesuré par tige ; ¹²PC/PL : poids de cerises par plant ; ¹³P100 : le poids de 100 cerises. Les moyennes avec les mêmes lettres n'étaient pas significativement différentes à $p \leq 0,05$.

4.3.2 Distribution des cerises sur les nœuds des rameaux et sur les rameaux des tiges

La distribution des cerises sur les nœuds des rameaux était différente en fonction de l'état des caféiers (figure 4.8). A Gitega, les cerises étaient distribuées d'une façon presque homogène sur tout le rameau. La distribution des cerises sur les nœuds des rameaux était similaire pour les 2 états de caféiers de Kayanza, avec une augmentation du nombre de cerises par nœuds jusqu'au 4^{ème} nœud, puis une réduction du nombre de cerises par nœuds.

Le pourcentage de nœuds fructifères par rapport au nombre total de nœuds était de 22% pour les caféiers de Gitega, de 43% pour les caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération et de 46% pour les caféiers de Kayanza âgés de 5 ans après la taille de régénération.

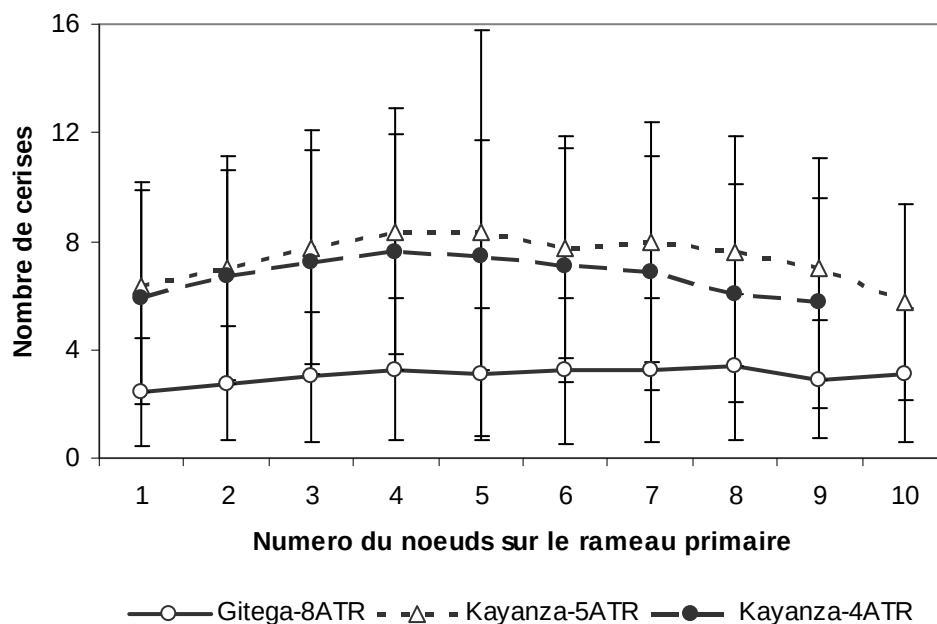


Figure 4.8 : Distribution des cerises sur les nœuds des rameaux primaires en fonction de l'état des caféiers. Les barres représentent les écarts-types.

La distribution des cerises sur les paires de rameaux primaires était différente en fonction de leur localisation et de l'état des caféiers (Figure 4.9). Sur les caféiers de Gitega (Gitega-8ATR), le nombre de cerises sur les différents rameaux de la tige était faible mais le nombre de paires de rameaux par tige

était plus élevé comparativement aux deux autres types de caféiers. Pour les caféiers de Kayanza, le nombre de cerises par paire de rameaux augmentait à partir de la 1^{ère} paire pour atteindre un pic entre la 3^{ème} et la 4^{ème} paire de rameaux (Kayanza-5ATR, Kayanza-4ATR).

Le pourcentage de rameaux fructifères par rapport au nombre total de rameaux était de 51%, de 44% et de 48% pour les caféiers de Gitega, les caféiers de Kayanza âgés de 4 ans après la taille de régénération et les caféiers de Kayanza âgés de 5 ans après la taille de régénération, respectivement.

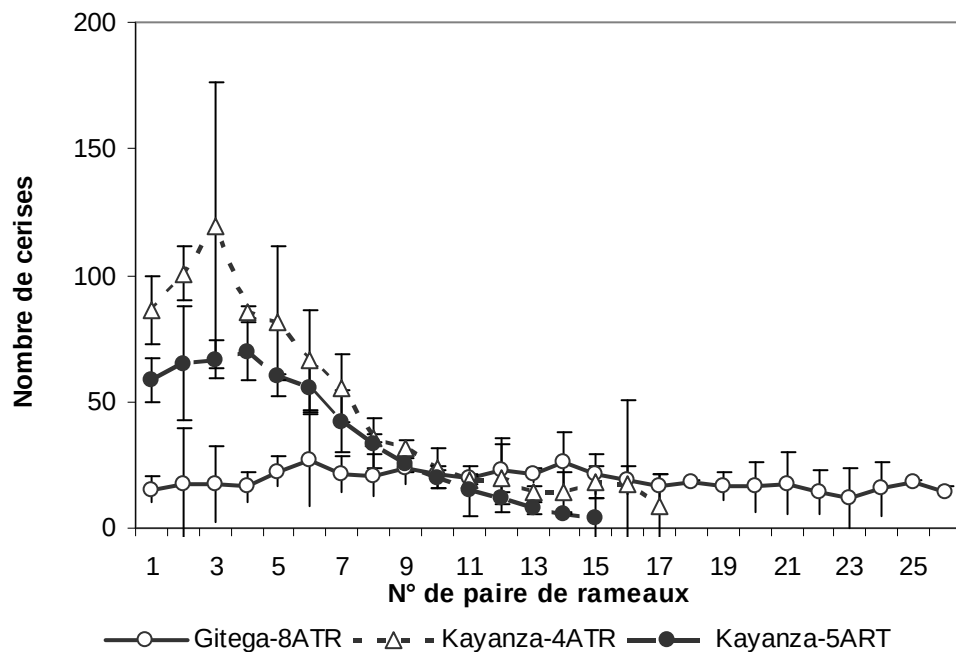


Figure 4.9 : Distribution des cerises sur les rameaux en fonction de l'état des caféiers

4.3.3 Relations et choix des variables des modèles

a) Relations pour estimer le nombre de cerises par nœud

L'estimation de la moyenne de cerises par nœuds en utilisant la moyenne sur 3 nœuds ou la moyenne sur 5 nœuds a donné des coefficients de détermination ajustés (R^2 adj.) supérieurs à 0,85 (tableau 4.3 et figure 4.3). Mais, l'utilisation de 3 nœuds pour estimer la moyenne de cerises par nœuds avait un R^2 adj. légèrement supérieur à celui obtenu en utilisant 5 nœuds. Cela a été observé

pour les trois types de caféiers et pour les données globales de ces trois types. L'erreur relative la plus élevée observée était de 1,3 et le RMSE le plus élevé était de 0,6.

Tableau 4.3 : Relations entre la moyenne de cerises par nœuds sur 3 nœuds et 5 nœuds et la moyenne de cerises par nœuds observée par tige (ATR années après la taille de régénération ; RE : erreur relative ; RMSE : la moyenne de la racine carrée du carré de l'erreur). a et b sont les coefficients du modèle (modèle linéaire).

Variables	a	b	R ² adj	p	RE	RMSE
Kayanza-4ATR						
Avec 3 nœuds	-0,480	1,218	0,86	< 0,001	1,3	0,6
Avec 5 nœuds	0,032	1,084	0,85	< 0,001	1,3	0,6
Kayanza-5ATR						
Avec 3 nœuds	0,366	1,023	0,86	< 0,001	0,77	0,5
Avec 5 nœuds	0,554	0,958	0,84	< 0,001	0,9	0,6
Gitega-8ATR						
Avec 3 nœuds	0,801	0,895	0,94	< 0,001	0,5	0,3
Avec 5 nœuds	0,891	0,802	0,93	< 0,001	-0,9	0,2
Général						
Avec 3 nœuds	0,489	1,024	0,94	< 0,001	0,4	0,5
Avec 5 nœuds	0,558	0,974	0,93	< 0,001	0,6	0,6

b) Modèles pour estimation du nombre de nœuds fructifères par rameau.

La moyenne du nombre de nœuds fructifères par rameau obtenue sur les composantes de rendement (3 rameaux : MNF/3RM ou 5 rameaux : MNF/5RM) était fortement corrélée avec la moyenne observée car le R² adj. était toujours supérieur à 0,65 (tableau 4.4 et figure 4.4). Cependant, la moyenne obtenue sur 5 rameaux était la mieux corrélée avec la moyenne observée car le R² adj pour chaque catégorie de caféiers était partout supérieur à 0,74. De plus, les erreurs étaient généralement plus faibles quand la moyenne sur 5 rameaux était utilisée. L'utilisation des caractéristiques de croissance n'a pas permis d'avoir

un R^2 adj. élevé et stable. Par exemple, l'utilisation du nombre total de nœuds du plus long rameau (NNLGRM) a permis d'avoir des coefficients de détermination (R^2 adj.) relativement élevés (figure 4.5) et des erreurs faibles pour les caféiers de Kayanza mais pas pour les caféiers de Gitega et pour les données générales (tableau 4.4).

Tableau 4.4. Relation entre la moyenne de nœuds fructifères par rameau et les moyennes calculées sur 3 rameaux (MNF/3RM), 5 rameaux (MNF/5RM), le nombre de nœuds du plus long rameau (NNLGRM) et la moyenne des longueurs des 5 rameaux fructifères (MLG/5RM). (ATR : années après la taille de régénération) a et b sont les coefficients du modèle (modèle puissance).

Variables	a	b	R^2 adj	p	RE	RMSE
Kayanza-4ATR						
MNF/3RM	0,613	0,647	0,73	< 0,001	0,9	0,2
MNF/5RM	0,549	0,694	0,77	< 0,001	0,8	0,2
NNLGRM	-0,035	0,635	0,39	< 0,001	1,9	0,2
MLG/5RM	-0,783	0,657	0,07	0,011	2,9	0,3
Kayanza-5ATR						
MNF/3RM	0,443	0,767	0,65	< 0,001	0,8	0,2
MNF/5RM	0,305	0,844	0,74	< 0,001	0,6	0,2
NNLGRM	0,094	0,618	0,61	< 0,001	0,9	0,2
MLG/5RM	0,637	0,353	-0,05	0,383	2,4	0,9
Gitega-8ATR						
MNF/3RM	0,266	0,789	0,89	< 0,001	0,4	0,2
MNF/5RM	0,200	0,893	0,90	< 0,001	0,3	0,2
NNLGRM	0,514	0,215	-0,002	0,337	27,6	0,6
MLG/5RM	-3,230	1,178	0,10	0,039	19,7	0,8
Général						
MNF/3RM	0,392	0,763	0,81	< 0,001	1,2	0,7
MNF/5RM	0,329	0,819	0,85	< 0,001	1,2	0,2
NNLGRM	1,952	-0,024	-0,005	0,6257	9,9	0,5
MLG/5RM	-1,445	0,816	0,07	0,001	10,8	0,4

c) Modèles pour estimation du nombre de rameaux fructifères par tige.

Pour les caféiers de Kayanza, l'utilisation des caractéristiques morphologiques pour estimer la moyenne du nombre de rameaux fructifères par tige a donné des valeurs de R^2 adj. et des erreurs faibles. A Gitega et pour les données générales, les valeurs de R^2 adj. les erreurs étaient relativement plus élevées (figure 4.6 ; tableau 4.5). L'utilisation conjointe de la circonférence à la base avec la hauteur d'une part, et la circonférence à la base avec la longueur du plus long rameau fructifère d'autre part, n'a pas permis d'améliorer les R^2 adj et de réduire les erreurs ni à Gitega, ni pour les données générales. Ainsi le R^2 adj. obtenu était de 0,61 à Gitega et de 0,47 pour les données générales.

Tableau 4.5 : Relation entre la moyenne du nombre de rameaux fructifères par tige et les caractéristiques morphologiques de la tige (CBC : circonférence à la base ; HTC : hauteur ; LNLGRM : la longueur du plus long rameau ; a et b sont les coefficients des modèles (modèle linéaire).

Variables	a	b	R^2 adj	p	RE	RMSE
Kayanza-4ATR						
CBC (cm)	7,470	1,450	0,21	< 0,001	6,3	4,0
HTC (cm)	6,097	0,093	0,11	0,003	6,9	4,2
LNLGRM (cm)	2,519	0,230	0,20	0,001	6,5	4,0
Kayanza-5ATR						
CBC (cm)	11,168	1,234	0,10	0,02	4,2	3,9
HTC (cm)	14,328	0,053	0,03	0,108	4,5	4,0
LNLGRM (cm)	17,474	0,647	0,004	0,277	4,8	4,1
Gitega-8ATR						
CBC (cm)	-34,160	5,157	0,58	< 0,001	102,1	9,9
HTC (cm)	-43,174	0,277	0,33	0,002	148,0	12,5
LNLGRM (cm)	-19,378	0,444	0,18	0,007	156,9	14,0
Général						
CBC (cm)	-4,340	2,810	0,44	< 0,001	38,5	6,7
HTC (cm)	6,585	0,092	0,26	< 0,001	48,8	7,8
LNLGRM (cm)	0,130	0,266	0,24	< 0,001	44,8	7,8

d) Modèles pour l'estimation du nombre de tiges à mesurer par plant

L'utilisation du poids de cerises obtenu sur la tige la plus productive (TPP) pour estimer le poids de cerises sur plant a permis d'avoir les R^2 adj. les plus élevés et les valeurs d'erreurs les plus faibles (figure 4.7 ; tableau 4.6).

Tableau 4.6 : Relations entre le poids de cerises par plant mesuré et le poids de cerises par plant calculé avec la tige la plus productive (TPP) et de la tige la moins productive (TMP). ATR : années après la taille de régénération ; a et b les coefficients des modèles (modèle puissance).

Variables	a	b	R^2 adj	p	RE	RMSE
Kayanza-4ATR						
TMP	5,292	0,358	0,39	< 0,001	0,05	0,3
TPP	1,894	0,736	0,62	< 0,001	0,08	0,4
Kayanza-5ATR						
TMP	4,902	0,433	0,64	< 0,001	0,12	0,2
TPP	1,221	0,833	0,83	< 0,001	0,05	0,1
Gitega-8ATR						
TMP	3,354	0,583	0,81	< 0,001	1,1	0,6
TPP	0,091	0,924	0,87	< 0,001	0,7	0,5
Général						
TMP	3,419	0,600	0,83	< 0,001	0,4	0,4
TPP	-0,166	0,981	0,89	< 0,001	0,2	0,3

En résumé, les variables retenues pour les modèles d'estimation de rendement de cerises par plant de caféiers étaient donc :

- 1°) Le poids moyen des premières 100 cerises mûres à déterminer par pesée avant le début de la récolte.
- 2°) La moyenne du nombre de cerises par nœud obtenue sur 3 nœuds (figure 4.2).
- 3°) La moyenne du nombre de nœuds fructifères par rameau a été estimée en faisant la moyenne sur 5 rameaux choisis le long de la tige (figure 4.4).

4°) Le nombre de rameaux fructifères par tige doit être compté car aucune estimation fiable n'a été possible.

5°) La tige la plus productive (avec le plus de cerises) est la tige retenue pour estimer le poids de cerises par plant.

Pour obtenir le nombre de cerises par tige la formule suivante a été utilisée (4.11) :

$$NC/TI = \frac{NC}{NF} * \frac{NNF}{RF} * \frac{NRF}{TI} \quad (4.11)$$

NC/TI: nombre de cerises par tige ; NC/NNF : nombre moyen de cerises par nœuds, obtenu en faisant la moyenne de 3 nœuds choisis aléatoirement pour 5 rameaux de la tige, NNF/RF : nombre moyen de nœuds fructifères par rameau dérivés à partir de 5 rameaux de la tige, les mêmes que ceux utilisés pour le nombre de cerises par nœuds, et NRF/TI : le nombre total de rameaux fructifères compté sur la tige.

4.3.4 Détermination des paramètres des modèle allométrique pour estimer le rendement par plant

Le modèle 1 est obtenu en multipliant le nombre de cerises estimé sur la tige la plus productive par le nombre de tiges du plant et le poids moyen de cerises. Pour le modèle 2, le nombre de cerises par tige a été obtenu en additionnant le nombre de cerises estimées sur chacune des 3 tiges multiplié par le poids moyen de cerises (g). Pour le modèle 3, le nombre de cerises sur les 5 rameaux a été compté au lieu d'être estimé. Le rendement calculé était bien corrélé avec le rendement mesuré (figure 4.10). Avec l'utilisation de la tige la plus productive (modèle 1), le R² était de 0,93 et il était de 0,96 avec l'utilisation des moyennes sur les 3 tiges (modèle 2). Pour le modèle 3, la moyenne du nombre de cerises sur les 5 rameaux a été comptée au lieu d'être estimé. Le R² était de 0,97.

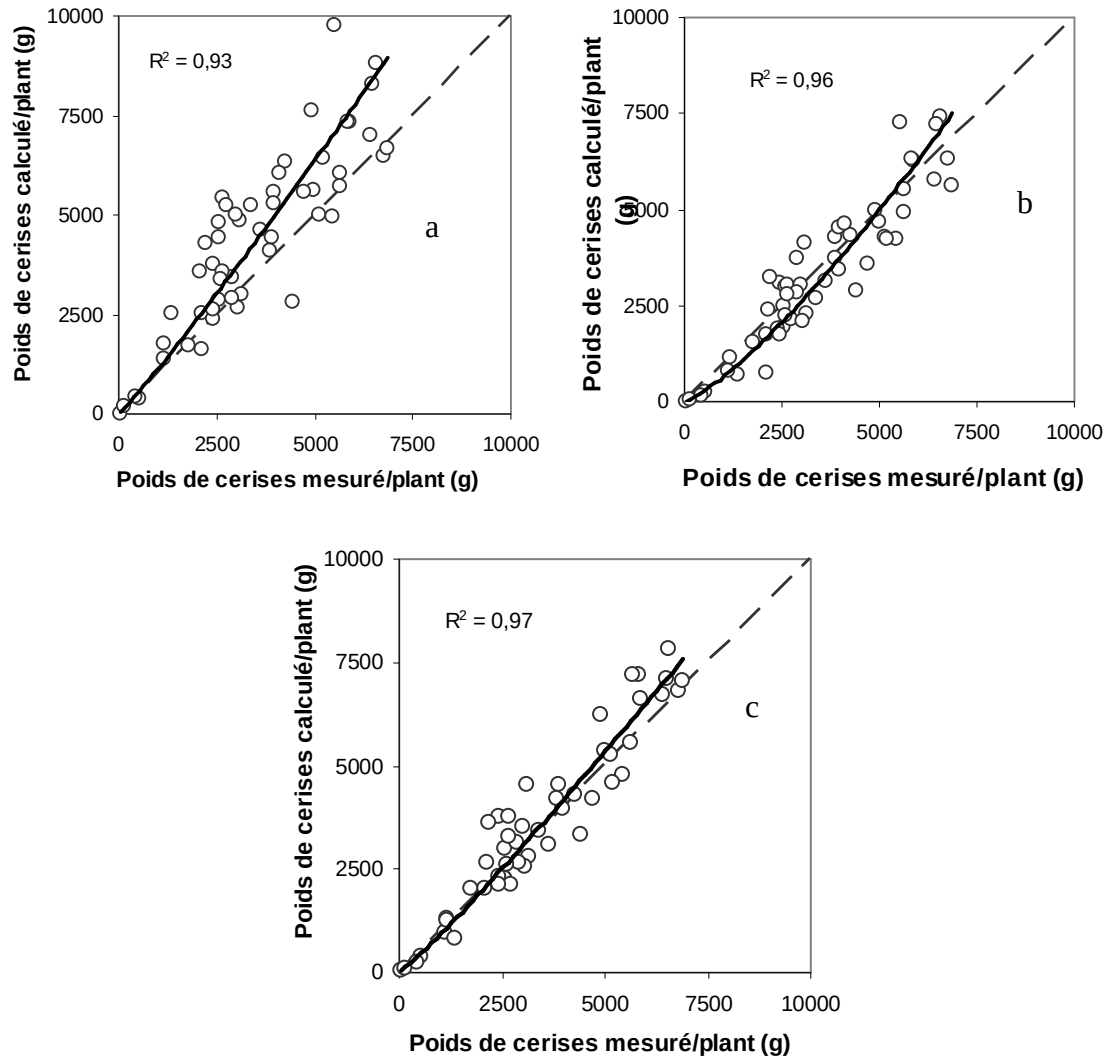


Figure 4.10 : Relation entre le rendement mesuré par plant et le rendement calculé avec la tige la plus productive (a ; modèle 1), avec la moyenne sur toutes les tiges du plant (b ; modèle 2) et avec la moyenne sur toutes les tiges du plant en comptant le nombre de cerises pour les 5 rameaux (c ; modèle 3). La ligne discontinue correspond à la droite de l'équation $y = x$.

Avec l'augmentation de l'intensité des mesures sur les plants de caféiers, on observe une augmentation du R^2 adj. et une diminution du RMSE (tableau 4.7). La normalité des résidus a été vérifiée et la valeur de l'indice W de Shapiro-Wilk était proche de 1 et la valeur de $p > 0,05$, donc non significative. De même, l'hypothèse de l'homoscédasticité de la variance des résidus a été vérifiée avec des valeurs d'indice de Breusch-Pagan (BP). Le diagnostic graphique a été aussi réalisé et repris dans l'annexe 4.1.

Tableau 4.7 : Les valeurs des paramètres a et b de la fonction puissance (formule 4.6) des 3 modèles proposés ($\pm$ erreur standard) entre le poids de cerises calculé et le poids mesuré (figure 4.10), et caractéristiques d'analyses des modèles (p : la valeur de p ; RMSE : la racine carrée de la moyenne du carré de l'erreur ; W : l'indice de Shapiro-Wilk).

	a	b	R ² adj.	p	RMSE
Modèle 1	0,9172 $\pm$ 0,2811	0,8625 $\pm$ 0,0343	0,93	< 0,001	0,38
Modèle 2	2,0845 $\pm$ 0,1784	0,7522 $\pm$ 0,0227	0,96	< 0,001	0,19
Modèle 3	0,9096 $\pm$ 0,1878	0,8826 $\pm$ 0,0234	0,97	< 0,001	0,18
Diagnostic numérique					
	W	P			
Modèle 1	0,98	0,62			
Modèle 2	0,98	0,82			
Modèle 3	0,98	0,56			

Avec une moyenne de 3307,8 g de cerises et un écart-type de 1173,1g, le nombre de plants qu'il fallait échantillonner par parcelle était de 50 plants pour une précision de 90 % et de 12 plants pour une précision de 80 %. Pour une précision de 70 % il fallait échantillonner 6 plants.

4.3.5 Comparaison avec les modèles existants

En utilisant les données de ce chapitre pour valider ou calibrer les techniques et les modèles proposés par la littérature, les valeurs de R² ajusté étaient faibles car elles étaient inférieures à 0,47. La corrélation significative entre les valeurs de production prédites et les valeurs mesurées a été observée uniquement pour le modèle 5. Mais, même pour ce modèle, le biais et le RMSE avaient des valeurs absolues très élevées. Les modèles 8 et 9 ne pouvaient pas être validés car il était difficile d'établir un quadrant (Upreti et al., 1991) avec les données disponibles si cela n'a pas été fait au préalable sur terrain.

Tableau 4.8 : Les caractéristiques statistiques obtenues sur nos données pour différentes techniques utilisées dans la littérature pour estimer la production de café par plant.

Type de modèle	Modèle	Biais	RMSE	R ² adj
1. Walyaaro et Van Der Vossen (1979)	0,23 DBC + 0,02 LNLGRM	-356,0	15,9	0,09
2. Calibration (1) avec nos données	0,24 DBC + 0,01 LNLGRM	-275,9	15,1	0,12
3. Cilas et al. (2011)	0,26 RM15	18,63	19,36	0,09
4. Modèle (3) avec le NRF ¹	0,1164 NRF + 0,068RM15	-73,4	14,3	0,01
5. Cilas et Descroix (2009)	1,15 NC/PL	-15,6	22,8	0,47
6. Soto-Pinto et al. (2000)	ND3RM*			
7. Soto-Pinto et al. (2000) et Schmitt et al. (2009)	ND/PL*			
8. Upreti et al. (1991)	0,837 NC/TI*			
9. Upreti et al. (1991)	0,753 NC/TI + 0,825*			

¹ NRF : nombre de rameaux fructifères ; * : modèles ne pouvant pas être vérifiés avec les données disponibles. DBC : diamètre à la base ; LNLGRM : la longueur du plus long rameau ; RM15 : nombre de cerises sur le 15^{ème} rameau compté à partir du sommet ; NRF : nombre de rameaux fructifères ; NC/PL : nombre de cerises par plant estimé à partir du nombre de cerises par nœuds sur 2 nœuds par plant, le nombre de nœuds fructifères fait sur 4 rameaux par plant, le nombre de rameaux fructifères sur une tige, le nombre de tige par plant ; ND3RM : nombre de drupes estimés sur 3 rameaux multiplié par le nombre de rameaux productifs ; ND/PL : nombre total de drupes par plant ; NC/TI : nombre de cerises estimé sur un quadrant et rapporté sur tout le plant.

4.3.6 Validation des modèles

Pour le modèle 1, la moyenne de la production en cerises observée par plant était de 2691 g contre 3175 g pour la moyenne de la production prédite. Par le t-test, ces moyennes étaient statistiquement différentes à $p \leq 0,05$. Le minimum

était de 360 g par plant et de 285 g pour la production observée et la production prédite respectivement. Le maximum était de 6675 g et de 11541 g respectivement pour la production observée et la production prédite. Les valeurs obtenues par l'équation de la droite de la figure 4.11a étaient statistiquement différentes de celles obtenues par l'équation $y = x$ à $p \leq 0,05$ ($p < 0,001$). Le biais était de -8,8 et le R^2 était de 0,66 (figure 4.11a). La RMSE était de 1334 g et l'erreur moyenne absolue de 485 g.

Pour le modèle 2, la moyenne de la production observée par plant était de 2691 g contre 3232 g pour la moyenne de la production prédite. Par le t-test, ces moyennes étaient statistiquement différentes à $p \leq 0,05$. Le minimum était de 360 g par plant et de 353 g pour la production observée et la production prédite, respectivement, et le maximum était de 6675 g et de 7387 g respectivement pour la production observée et la production prédite. Les valeurs obtenues par l'équation de la droite de la figure 4.11b étaient statistiquement différentes de celles obtenues par l'équation $y = x$ à $p \leq 0,05$ ($p = 0,04$). Le biais était de -8,7 et le R^2 était de 0,87 (figure 4.11b). La RMSE était de 534 g et l'erreur moyenne absolue de 220 g.

Pour le modèle 3, la moyenne du poids de cerise observée par plant était de 3165 g et la moyenne prédite était de 3105 g. Ces moyennes n'étaient pas statistiquement différentes à $p \leq 0,05$ par le t-test. Les valeurs obtenues par l'équation de la droite de la figure 4.11c n'étaient pas statistiquement différentes de celles obtenues par l'équation $y = x$ à $p \leq 0,05$ ($p = 0,16$). Le minimum observé et le minimum prédit étaient respectivement de 841 g et 693 g. Le maximum observé était de 6675 g et le maximum prédit de 6660 g. Le biais était de -1,6 et le R^2 était de 0,89 (figure 4.11c). La RMSE était de 511 g et l'erreur moyenne absolue de 108 g.

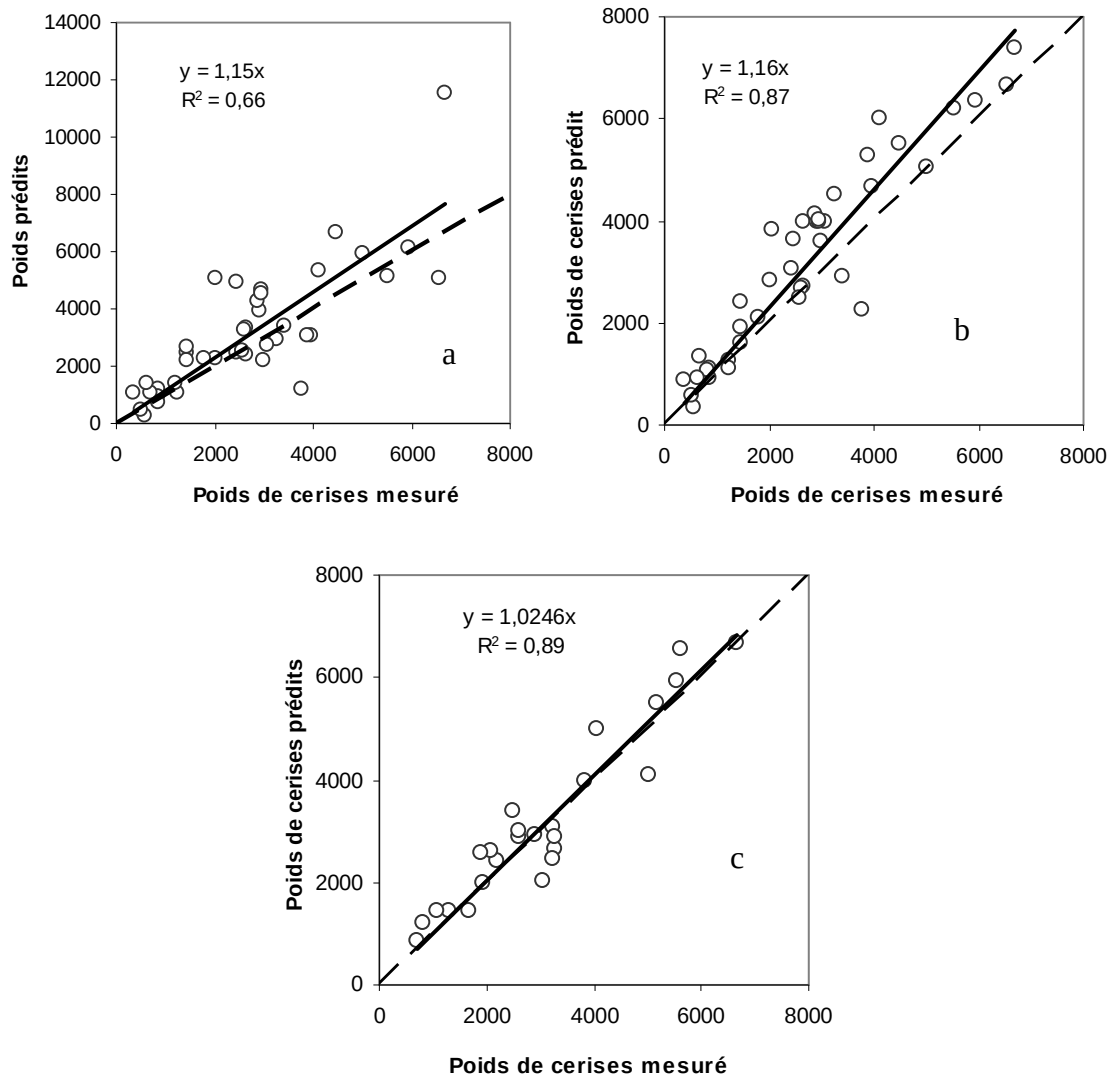


Figure 4.11 : validation du modèle 1 (a), du modèle 2 (b) et du modèle 3 (c). La ligne continue est la droite de régression du modèle sur les données et la ligne discontinue la droite de l'équation $y = x$. Les relations entre le poids de cerises mesuré et le poids de cerises prédit est linéaire.

4.4 Discussion des résultats

4.4.1 Les modèles et ses variables

Les modèles de prédiction de rendement obtenus avaient tous un R^2 ajusté supérieur à 0,93 (tableau 4.7), avec une augmentation de ce coefficient et la diminution de l'erreur avec l'augmentation de l'intensité des mesures, c'est-à-dire en passant du modèle 1 au modèle 3. Les modèles proposés sont semi-destructifs car il faut récolter 100 cerises pour estimer le rendement par plant.

Dans le tableau 4.2, le poids de 100 cerises variait entre 142 et 150 g pour les trois catégories de caféiers avec une moyenne de 138 g et un écart type de 27 g. Mais le minimum et le maximum de poids de 100 cerises étaient respectivement de 91 g et 198 g. Dans les données utilisées pour la validation, le minimum du poids de 100 cerises était de 83 g, le maximum de 187 g pour une moyenne de 123 g et un écart type de 22 g. Ainsi, le poids de 100 cerises était variable entre les plants et entre les périodes de prises de données. Il est donc important de faire des mesures de 100 cerises pour estimer la production de cerises par plant. Le nombre de cerises par plant a été calculé en utilisant les composantes de rendement, à savoir le nombre moyen de cerises par nœuds, le nombre de nœuds fructifères par rameau et le nombre de rameaux fructifères. La nouveauté des modèles est qu'ils sont ajustés aux conditions du Burundi. L'utilisation des caractéristiques morphologiques comme variables complémentaires n'a pas permis d'augmenter le R^2 ajusté (tableau 4.4 ; tableau 4.5). Cela pourrait être dû au fait que les conditions n'étaient pas optimales en termes de fertilité des sols, de climat et d'entretien des cultures. Il n'y avait pas d'équilibre entre la croissance végétative et le rendement (Anim-Kwapong et Adomako 2011). Les données du modèle sont faciles à récolter sur terrain car il suffit de prendre 5 rameaux le long de la tige (figure 4.4) et sur ces 5 rameaux prendre 3 nœuds (figure 4.2). La technique de Cilas et Descroix (2009) pour déterminer le nombre de cerises par plant a été développée au Burundi avec le même principe que ce travail, c'est-à-dire l'utilisation des composantes de rendement (moyenne de cerises par nœuds, moyenne de nœuds fructifères par rameau, le nombre de rameaux fructifères par tige et le nombre de tiges par plant). Cependant, le choix des nœuds et des rameaux était aléatoire. En faisant le même choix que celui de Cilas et Descroix (2009) selon la formule 4.3, la relation entre le poids de cerises mesuré et le calculé de cerises calculé par plant avait un R^2 de 0,47, plus bas que celui obtenu dans nos trois modèles (tableau 4.8).

Les choix des nœuds et des rameaux pour l'établissement du modèle ont été faits après analyse de la distribution des cerises sur les rameaux et sur les tiges. Sur les rameaux, la distribution des cerises sur les nœuds fructifères était différente selon les états des caféiers (figure 4.8 ; figure 4.9). Sur les caféiers

de Gitega, la distribution était homogène. Sur les caféiers de Kayanza, le nombre de cerises par nœuds augmentait pour atteindre un pic puis diminuait pour atteindre un plateau (figure 4.8). Les premiers nœuds plus âgés et derniers nœuds moins âgés ont moins de bourgeons floraux que les nœuds du milieu qui ont un âge moyen (Lambot et Bouharmont, 2009). Les 3 nœuds sélectionnés pour estimer le nombre moyen de cerises par nœuds étaient choisis au hasard sur les trois parties du rameau à savoir la partie inférieure, la partie du milieu et la partie supérieure (figure 4.2). Selon la localisation des paires de rameaux fructifères sur la tige, le nombre de cerises par paire de rameaux augmentait à partir de la 1^{ère} paire pour atteindre un pic avant de diminuer. L'augmentation du nombre de cerises par rameaux était faible sur les caféiers de Gitega. Les rameaux fructifères du sommet de la tige avaient moins de cerises. Le nombre de cerises plus faibles sur les rameaux d'en bas et ceux d'en haut était dû au fait que ces rameaux avaient un grand nombre de nœuds âgés pour les premiers, et un grand nombre de nœuds jeunes qui n'étaient pas encore en production pour les derniers (Lambot et Bouharmont, 2009).

La comparaison des modèles développés dans ce chapitre et les modèles proposés par la littérature a montré que les modèles proposés étaient les mieux indiqués pour estimer la production de cerises par plant (tableau 4.7 ; tableau 4.8 ; figure 4.11). Les modèles 6 et 7 ne pouvaient pas être validés avec nos données car les drupes ont été utilisées (Soto-Pinto et al. 2000; Schmitt et al., 2009). Or, les drupes sont des cerises non encore mûres avec faible poids. En effet, le poids moyen d'une drupe était estimé à 0,33 g (Schmitt et al., 2009) contre plus de 1,4 g pour les cerises (tableau 4.2).

4.4.2 Validation des modèles

Le modèle 1 avait un R^2 adj. faible par rapport aux autres modèles, et le biais était le plus élevé avec une valeur de -8,8. Ainsi le modèle surestimait le poids de cerises par plant (Wairegi et al. 2009). Le modèle 2 avait un biais proche de celui du modèle 1 mais le R^2 adj était élevé (0,86), signe que les poids mesurés et les poids prédits étaient bien corrélés même si le modèle surestime les poids prédits. Le modèle 3 est bien validé avec R^2 adj. de 0,89 et un biais faible de -

1,6 (figure 4.11). Ce modèle conduit à une petite surestimation du poids de cerises. Le modèle 3 (tableau 4.7) était donc le mieux indiqué pour la prédiction de la production de cerises par plant.

Bien que ces modèles permettent d'estimer la production de cerises par plant, ils n'en restent pas moins lourds car il y a plusieurs mesures à prendre. Sur une tige, il faut compter le nombre de rameaux fructifères et ensuite choisir 5 rameaux. Sur chacun des 5 rameaux, il faut compter le nombre total de nœuds fructifères et le nombre de cerises sur 3 nœuds. Enfin, sur chaque plant il faut mesurer le poids de 100 cerises. Au total, il faut prendre 34 mesures sur un plant de 3 tiges. Le modèle 1 permet de réduire les mesures et de passer de 34 mesures à 13 mesures. Le modèle 3 permet de prendre 17 mesures mais, sur chacun des rameaux, il faut compter toutes les cerises. Il est donc plus lourd que les deux autres (annexe 4.3).

4.4.3 Utilisation des modèles

Les modèles proposés peuvent être utilisés pour déterminer la production de cerises par plant dans les différentes conditions de production de café du Burundi car les variables choisies pour développer les modèles permettent de contrôler les variations entre les variétés et les différents effets environnementaux. En effet, la production par plant, quelles que soient la variété et les conditions environnementales, dépend du nombre de cerises et du poids moyen de cerise (Cannell, 1973, Cannell, 1985). Avec l'utilisation de ces composantes de rendement, Upreti et al. (1991) ont développé 2 modèles sur deux variétés différentes et adaptées aux conditions différentes. Cilas et Descroix (2009) ont calculé la production de café sur plusieurs variétés et sur une zone avec des conditions climatiques et géographiques différentes en utilisant les composantes de rendement. Cela montre que les modèles basés sur les composantes de rendement sont moins sensibles aux changements des systèmes de production que les modèles basés sur les caractéristiques de croissance. Ces modèles n'intègrent pas les conditions climatiques par exemple dans leurs paramètres. Cela pourrait faire craindre une certaine fragilité et un manque de validité entre les saisons. Mais, cela n'est pas vrai car les

composantes de rendement sont les résultantes des systèmes de productions, des conditions environnementales et des caractères variétaux. Ces modèles peuvent être utilisés dans l'estimation de la production par parcelle en vue de relier ce rendement avec les facteurs de production. Ils peuvent aussi être utilisés pour prévoir le rendement de café au niveau d'une région pour une organisation logistique des compagnies de lavage de café. L'utilisateur aura à choisir lequel des trois modèles à utiliser car la diminution de l'erreur s'accompagne de l'augmentation de l'intensité des mesures à prendre.

Les modèles développés dans ce chapitre ne peuvent pas être utilisés chez des caféiers atteints par des maladies ou ayant des stress entraînant une forte chute de drupes comme l'anthracnose ou le die back des caféiers. Pour l'anthracnose, les drupes n'étant pas au même niveau de développement sur un même caféier (Gaie et Flémal, 1988 ; Muller et al., 2009), l'attaque des jeunes drupes peut entraîner des chutes considérables entre le début et la fin de la récolte et les modèles surestimeraient alors le rendement. De même, le die back qui entraîne le dessèchement des cerises à partir du sommet des rameaux (Coste, 1989) peut endommager un grand nombre de cerises et, comme précédemment, les modèles surestimeraient le rendement. Mais ces modèles peuvent alors être utilisés pour calculer la chute de rendement due aux maladies, en comparant la production obtenue et celle prédite par ces modèles qui peut être considérée comme la production potentielle.

Ces modèles ont été développés dans les conditions du Burundi où les caféiers étaient conduits dans des conditions sous optimales. L'utilisation de ces modèles dans d'autres conditions où la production de café est intensive devrait être soumise à une validation préalable ou une calibration des coefficients des variables.

4.5 Conclusion

Trois modèles d'estimation du rendement par plant ont été développés à partir des mesures de composantes de rendements. Les 3 modèles proposés avaient des R^2 ajusté supérieurs à 0,93. Ainsi, la production de cerises par plant de caféier peut être estimée avant la récolte en prenant des mesures des

composantes de rendement. L'utilisation des caractéristiques morphologiques de la tige n'a pas permis d'estimer fiablement le rendement et seules les composantes de rendement doivent donc être prises en compte. L'utilisation de la tige la plus productive pour estimer la production par plant permet de réduire les mesures à prendre mais le R^2 adj. de sa validation est faible. Ces modèles peuvent être utilisés sur toutes les variétés et dans toutes les conditions de gestion des caféiers car seules les composantes de rendement ont été considérées. Le modèle 3 a été validé avec un R^2 le plus élevé, un biais et une erreur faibles. Pour cela, ce modèle est suggéré pour des études nécessitant une bonne précision dans le calcul du rendement. Dans les conditions différentes de celle du Burundi, les modèles doivent être préalablement validés ou calibrés.

CHAPITRE 5 : ETUDE AGRONOMIQUE ET ECONOMIQUE DE L'ASSOCIATION BANANIER/JEUNES CAFEIERS

Résumé

Au Burundi, le café joue un rôle essentiel dans l'économie des ménages et constitue la principale source de devises étrangères pour l'économie nationale. La banane quant à elle, occupe une place centrale dans l'alimentation et dans les revenus des ménages. Ces deux cultures sont liées par le paillage car les résidus de bananiers constituent la majeure partie du paillis appliqué dans les parcelles de caféiers. Contrairement à certains pays, l'association de ces deux cultures n'est pas fréquente au Burundi. Pour étudier les performances agronomiques de l'association de jeunes caféiers avec des bananiers, des essais ont été installés à Gitega et à Kayanza. Le suivi de la croissance et du rendement des caféiers et de bananiers a été fait sur une période de 3 ans. Les bananiers ont affecté négativement la croissance des caféiers. Ainsi, les caractéristiques de croissance (hauteur, diamètre à la base, nombre de rameaux primaires et le rayon de la canopée) étaient plus faibles dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. Le rendement de café diminuait avec l'augmentation de l'ombrage, donc avec l'augmentation de la densité de bananiers. Ainsi, à Gitega, le rendement de café cerise dans les parcelles de caféiers en monoculture était de 0,7 T/ha contre 0,2 T/ha dans les parcelles avec forte densité de bananiers. A Kayanza, le rendement de café cerise était de 0,3 T/ha et 0,1 T/ha respectivement pour les parcelles de caféiers en monoculture et les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. Le poids de 100 cerises, un des indicateurs de la qualité de café, était cependant plus élevé dans les parcelles de caféiers sous ombrage. Les teneurs de Mg et de N dans les feuilles de caféiers augmentaient avec l'accroissement de l'ombrage, alors que la teneur de K dans les feuilles diminuait avec l'augmentation de l'ombrage. Les caféiers n'avaient pas affecté la croissance et le rendement des bananiers. Dans les parcelles avec forte densité de bananiers, le rendement de banane était de 9 T de banane fraîche par ha et par cycle à Gitega contre 27 T/ha à Kayanza. Les quantités d'éléments nutritifs immobilisées, exportées ou recyclées augmentaient avec

l'accroissement de la densité de bananiers. De même, l'augmentation de la densité des bananiers permettait d'augmenter les caractéristiques de rentabilité comme les revenus, la valeur ajoutée et le résultat de l'exploitation. Ainsi, l'association des jeunes caféiers avec les bananiers avait permis d'augmenter les revenus de plus de 70 % et d'éviter les valeurs ajoutées et les résultats bruts de l'exploitation négatifs sur une période de 3 ans. Les valeurs de LER étaient toujours supérieures à 1 avec des valeurs plus élevées quand les caféiers étaient associés avec des bananiers avec faible densité. L'association de jeunes caféiers avec les bananiers permettait d'augmenter les revenus. Cependant, suite aux fortes quantités d'éléments nutritifs exportés, il y a nécessité de compenser ces éléments par des apports de paillis et de fertilisants.

5.1 Introduction

Au Burundi, la banane et le café *Arabica* sont très importants pour l'économie. Le café représente près de 80% du revenu des exportations, et est la source de revenus pour près de 750.000 petits exploitants (Ministère de l'Agriculture et de l'élevage, 2008, BRB, 2011). La banane quant à elle représentait 40 % de la production agricole nationale avec 1.759.960 tonnes produites en 2009 (Faostat, 2011). Traditionnellement, les caféiers sont plantés en culture pure et sans ombrage au Burundi. Cette pratique a été recommandée dans le passé par crainte de voir les revenus du café baisser car les arbres d'ombrage se développaient rapidement et faisaient concurrence aux caféiers (Gaie et Flémal, 1988). Dans de nombreux pays ((par exemple : Nicaragua (Segura et al., 2006), Mexique (Soto-Pinto et al., 2000), Costa Rica (Siles et al., 2009), Tanzanie (Rugalema et al., 1994 ; Bart, 2007)), la culture du caféier se fait sous ombrage car ce dernier apporte de nombreux avantages.

Dans les pays où il est pratiqué, l'ombrage des caféiers agit sur de nombreux paramètres édaphiques et climatiques qui ont un impact positif sur la durabilité et la productivité des parcelles. Les arbres d'ombrage apportent au sol de la matière organique et des éléments nutritifs par la chute de leurs feuilles et par les produits de l'élagage (Beer et al., 1998). Chez les caféiers ombragés, la

température maximale peut être réduite de 5°C et la température minimale augmentée de 0.5°C par rapport aux caféiers en monoculture (Siles et al., 2010). L'ombrage peut aussi réduire la vitesse du vent (Pezzopane et al., 2007), l'évaporation de l'eau du sol et l'évapotranspiration des caféiers (Beer et al., 1987, Brenda, 2010). En plus, le couvert assuré par les arbres d'ombrage et la litière qui en résulte réduisent le ruissellement et l'érosion et favorisent l'infiltration de l'eau (Wiersum, 1984). La réduction de l'évaporation de l'eau du sol, du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration vont ainsi contribuer à maintenir l'humidité du sol et donc à réduire les risques de stress hydrique en cas de sécheresse.

Malgré les effets positifs de l'ombrage sur les paramètres édaphiques et climatiques, les effets de l'ombrage sur le rendement de café sont loin d'être univoques. Campanha et al. (2004) et Jaramillo-Botero et al. (2010) ont montré que le rendement de café était plus faible dans le système de caféiers agroforestiers que dans le système monoculture. Le rendement en systèmes ombragés représentait environ 25 % du rendement des systèmes de caféiers en monocultures que ce soit pour les cerises ou pour le café vert (Campanha et al., 2004). De même, selon Siles et al. (2010), le rendement était 30 % moins élevés dans les systèmes ombragés. Par contre, Steiman et al. (2011) ont trouvé que le rendement de café n'était pas significativement différent avec ou sans ombrage quand la variété de caféier était adaptée à l'ombrage. Ainsi, certaines variétés de caféiers sont indifférentes à l'ombrage, montrant une production presque égale sous ombrage et sans ombrage (Freire Ricci et al., 2011). D'autres sont adaptées à l'ombrage à tel point qu'elles présentent des symptômes de 'photo-dommages' quand elles sont exposées au soleil (van der Vossen, 2005). Les variétés actuellement cultivées au Burundi sont des descendants des introductions en provenance de l'Ethiopie et du Yémen (van der Vossen, 2005) qui sont adaptés à l'ombrage. Mais, la plupart ont été sélectionnées sans ombrage et sont donc plus productives en plein soleil (DaMatta et Rena, 2002).

Bien que l'ombrage puisse affecter négativement les rendements, l'ombrage permet de stabiliser la production de café en réduisant la fluctuation bisannuelle

(Jaramillo-Botero et al., 2010). De plus, il améliore la qualité du café (Guyot et al., 1996). L'effet de l'ombrage sur l'augmentation du poids des cerises et des grains, qui est un indicateur de qualité, a été montré par plusieurs études (Lara-Estrada et Vaast, 2004 ; DaMatta et al., 2008 ; Bosselmann et al., 2009 ; Muschler, 2001 ; Siles et al., 2010). D'après ces auteurs, le poids de 100 cerises et de 100 grains augmente avec l'augmentation de l'ombrage. De plus, l'ombrage augmente la qualité organoleptique du café à la tasse (DaMatta, 2008), surtout en haute altitude (Lara-Estrada et Vaast, 2004).

La morphologie des caféiers est aussi affectée par l'ombrage. En effet, l'ombrage des caféiers stimule la croissance en hauteur de ces derniers (Marais, 2003 ; Campanha et al., 2004). De même, la taille des feuilles augmente sous l'effet de l'ombrage (Morais, 2003). Cependant, la croissance du diamètre à la base et des rameaux est ralentie, de même que la production des feuilles, des nœuds et des bourgeons floraux (Montoya et al., 1961 ; Campanha et al., 2004). Certains auteurs ont observés que les avantages de l'ombrage sont beaucoup plus visibles en conditions sous optimales de production (Muschler, 1999 ; Hagggar et al. 2011). En effet, en conditions optimales, les arbres d'ombrage vont se développer très rapidement (Muschler, 1999) et la compétition pour la lumière, l'eau et les nutriments très élevée affecte négativement le développement et le rendement des caféiers (Muschler, 1999 ; Beer, 1987).

Parmi les autres avantages des systèmes ombragés, on notera la meilleure conservation de la biodiversité (DaMatta, 2008). Par exemple, dans le système agroforestier du Kilimandjaro basé sur le bananier et le caféier, plusieurs espèces ligneuses sont associées à ces cultures, permettant de sauvegarder les espèces forestières (Hemp, 2006). La biodiversité est mieux conservée quand des essences autochtones sont utilisées dans l'ombrage des caféiers (Beer et al., 1998). La diversification des cultures par la pratique de la polyculture ou l'association des cultures permet, en plus, de réduire la vulnérabilité aux changements climatiques par la régulation des maladies et ravageurs et la conservation de l'eau (Brenda et al., 2008).

L'ombrage des caféiers permet de plus une certaine diversification des revenus (Siles et al., 2010). En effet, les systèmes ombragés apportent des revenus supplémentaires par la vente des produits d'arbres d'ombrage comme les fruits et le bois (DaMatta, 2008). L'ombrage des caféiers par des cultures génératrices de revenus est plus avantageux pendant les premières années, période pendant laquelle les caféiers ne sont pas encore en production. Ainsi, l'association de caféiers avec des papayers en Australie (DaMatta et al., 2008) et l'association de caféiers avec des légumineuses au Burundi (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007) ont permis d'obtenir des récoltes, et donc des revenus, avant la première production de café. Chez les petits agriculteurs en Ouganda, l'association du caféier avec le bananier permet d'augmenter considérablement les revenus (van Asten et al., 2011) et d'assurer la sécurité alimentaire. Dans certains pays, la labellisation du café produit sous ombrage permet d'obtenir un prix supérieur au prix payé pour le café conventionnel, ce qui permet de compenser la chute de la production de café due à l'ombrage (Lyngbæk, 2001). Cette diversification des revenus et la réduction de la variabilité inter-annuelle de la production de café (Jaramillo-Botero et al., 2010) permettent d'assurer la stabilité des revenus.

Certaines caractéristiques des arbres d'ombrage sont favorables au maintien de la production de café. Ainsi, les arbres les plus recommandés pour l'ombrage sont ceux i) qui ont un enracinement profond pour limiter la compétition avec le café (DaMatta et al., 2008) et un enracinement solide pour éviter la chute des arbres, ii) qui ne produisent pas de rejets et ont une bonne croissance apicale, iii) qui fixent l'azote et iv) qui ont relativement peu de branches et de tiges pour faciliter la gestion (Beer, 1987). Une bonne densité de semis et la fréquence de l'élagage sont des opérations indispensables pour maintenir un niveau d'ombrage adéquat dans les parcelles de café (DaMatta et al., 2008). Pour des raisons de productivité, certains fermiers ont cependant déjà associé les caféiers avec des cultures plus compétitives. L'association des caféiers avec les bananiers pratiquée en Ouganda (van Asten et al., 2011), autour du mont Kilimandjaro et dans d'autres pays de l'Afrique de l'Est (Hemp, 2006), est l'une de ces pratiques. En effet, bien que l'association des bananiers avec les caféiers présente des avantages, elle présente aussi des risques de

compétition pour les ressources. Le bananier et le caféier ont tous les deux une exigence élevée en N et en K (Lahav, 1995 ; Carvajal, 1984) et ils possèdent tous les deux un système racinaire superficiel (Fogain et Gowen, 2005 ; Nutman, 1933). En plus, les bananiers produisent des rejets. Gérer cette compétition est donc fondamental pour soutenir ce type d'association de culture.

C'est pour prévenir les risques de compétition et de perte de rendement des caféiers que les bananiers ont été formellement déconseillés dans les parcelles de caféiers au Burundi (Gaie et Flémal, 1988), ceci afin de protéger les revenus de l'Etat en devises étrangères générés par la vente de café. Cependant, la forte rentabilité de l'association de bananiers et de caféiers (van Asten et al., 2011) pousse certains agriculteurs à installer des bananiers dans les caféiers (chapitre 2), contribuant ainsi à la lutte contre la pauvreté et l'amélioration des conditions de vie des petits producteurs. Ces deux points de vue ne sont pas nécessairement irréconciliables. Ainsi, l'objectif de cette étude était d'étudier l'effet des bananiers et de leur densité de plantation sur la croissance et le rendement des caféiers au cours des premières années qui suivent la plantation des caféiers. De plus, elle visait à évaluer la rentabilité de l'association des bananiers avec des caféiers par rapport aux caféiers en monoculture. A notre connaissance, aucune étude récente de ce genre n'a été réalisée au Burundi et dans la Région des Grands Lacs africains.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Description des sites

L'étude a été réalisée dans les sites de Gitega et Kayanza au Burundi. Le site de Gitega est situé au centre du pays à 1651 m d'altitude à 29,93323° de longitude est et 03,36162° de latitude sud. Le site de Kayanza quant à lui est situé au nord du Burundi à 1812 m d'altitude à 29,71292° de longitude est et 02,90188° de latitude sud (figure 0.1). Le sol de Gitega est un Acrisol tandis que celui de Kayanza est un Ferrisol. Les caractéristiques physico-chimiques moyennes des sols de Gitega et Kayanza au début de l'essai sont reprises ci-

dessous (tableau 5.1). Gitega et Kayanza sont des centres de l'ISABU spécialisés dans la recherche café.

Tableau 5.1 : Moyennes (n = 24) des résultats d'analyse du sol des sites de Gitega et Kayanza sur deux profondeurs (0-10 cm et 10-30 cm) au début d'essais. Les valeurs entre parenthèses sont des écart-types.

	Corg	Ntotal	P	Bases extractibles (Mehlich-3)		
				K	Ca	Mg
Unités	%	%	Mg/kg	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Gitega						
0-10 cm	3,0 (0,4)	0,2 (0,01)	0,7 (0,6)	0,2 (0,01)	0,1 (0,02)	0,1 (0,1)
10-30 cm	2,9 (0,3)	0,2 (0,02)	1,7 (1,3)	0,5 (0,2)	0,2 (0,1)	0,1 (0,1)
Kayanza						
0-10 cm	3,8 (0,4)	0,3 (0,04)	27,1 (15,5)	1,2 (0,3)	1,3 (0,3)	0,6 (0,1)
10-30 cm	3,5 (0,4)	0,3 (0,02)	16,6 (12,8)	1,0 (0,3)	1,2 (0,4)	0,5 (0,1)

Les données climatiques ont été mesurées à l'aide d'une station météorologique électronique installées dans les deux sites. La pluviométrie moyenne annuelle pendant la période de la récolte des données a été de 1122 mm et 1459 mm respectivement à Gitega et Kayanza. La température annuelle moyenne était de 20,1°C à Gitega et 19,1°C à Kayanza. Les moyennes mensuelles des précipitations et des températures sur toute la période de la collecte des données sont reprises à la figure 5.1.

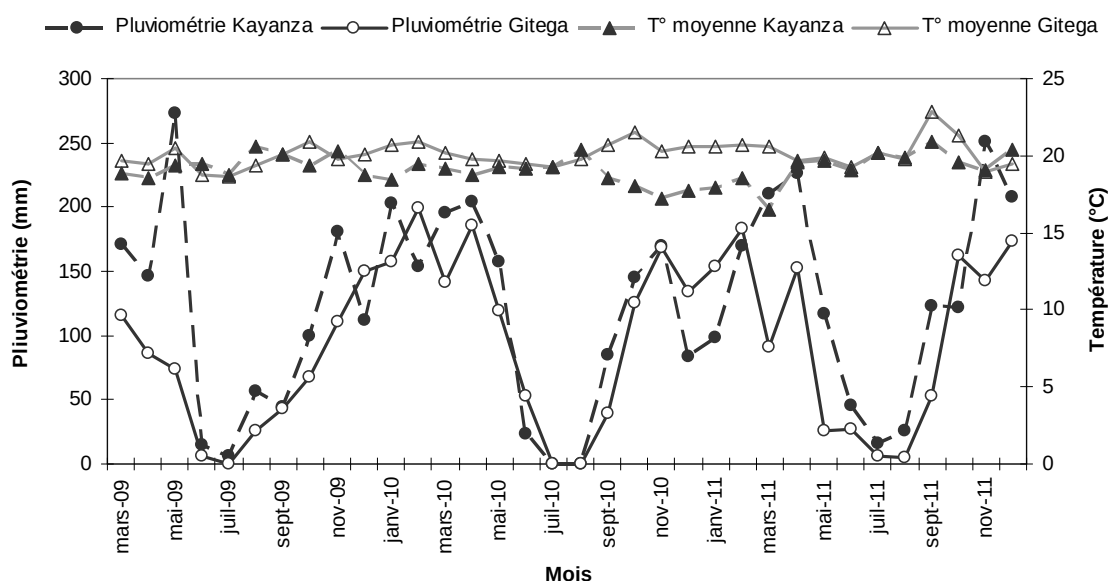


Figure 5.1 : Précipitations et températures moyennes mensuelles à Gitega et à Kayanza de mars 2009 à novembre 2011.

5.2.2 Installation et entretien des essais

Les essais ont été installés au mois de mars 2009. Un même dispositif expérimental a été utilisé dans les deux sites. Le dispositif expérimental était en blocs aléatoires complets avec 3 répétitions. La parcelle élémentaire avait une longueur de 15 m et une largeur de 10 m. En pratique, chaque parcelle comptait 4 lignes de caféiers ou 5 lignes de bananiers pour le cas de la monoculture. Les parcelles où ces deux cultures étaient associées comptaient 4 lignes de caféiers et 5 lignes de bananiers. Dans le cas de l'association, les lignes de bananiers et de caféiers alternaient mais les bananiers étaient toujours sur les lignes de bordure. La distance entre deux lignes de la même espèce était de 2.5 m dans toutes les parcelles, quel que soit le traitement. Une distance de 3 m a été laissée comme allée entre les blocs (photo 5.1). La disposition schématique des plants dans les différents traitements est reprise en annexe 5.1.



Photo 5.1 : Essais d'association bananiers avec jeunes caféiers : parcelle avec des caféiers à forte densité et des bananiers à faible densité (photo A. Nibasumba)

Chaque bloc était constitué de 8 traitements. Ces traitements étaient une combinaison factorielle de 2 densités de bananiers et deux densités de caféiers, à la fois en culture associée et en monoculture. La densité de caféiers de référence était de 2747 plants/ha qui est la densité de plantation la plus pratiquée au Burundi (Gaie et Flémal, 1988), et celle des bananiers était de 1681 plants/ha, proche de la densité observée dans les systèmes intensifs dans la Région des Grands Lacs africains (Odeke et al., 1999). La densité des traitements faible densité était la moitié de la densité forte densité, soit 861 plants de bananiers/ha et 1394 plants/ha de caféiers. Les traitements sont décrits au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Descriptions des 8 traitements des essais

	Bananiers		Caféiers		Ecartement entre plants ⁵ (m)	
Traitement	HDB	LDB	HDC	LDC	Bananiers	Caféiers
1. HDB ¹	X				2,5	
2. LDB ²		X			5	
3. HDC ³			X			1,5
4. LDC ⁴				X		3
5. HDB + HDC	X		X		2,5	1,5
6. LDB + HDC		X	X		5	1,5
7. HDB + LDC	X			X	2,5	3
8. LDB + LDC		X		X	5	3

¹ HDB : bananiers à forte densité (« high density »); ² LDB : bananiers à faible densité (« low density »); ³ HDC : caféiers à forte densité; ⁴ LDC : caféiers à faible densité. ⁵ Au sein d'une rangée.

Avant la plantation, des trous de plantations ont été creusés. Chaque trou de plantation du bananier avait les dimensions de 60 cm de largeur, 60 cm de longueur et 80 cm de profondeur. Le trou de plantation du caféier avait les dimensions de 40 cm de largeur, 40 cm de longueur et 40 cm de profondeur. Deux semaines avant l'installation des plants, du fumier de ferme a été appliqué dans chaque trou de plantation à raison de 5 kg de fumier pour le caféier et 10 kg de fumier pour le bananier. Après le sarclage d'octobre 2009, 100 g d'urée et 50 de DAP ont été appliqués au pied de chaque plant de bananier et de caféier. Dans la suite de la conduite des essais, aucune autre application d'engrais minéraux ou de fumier n'a été effectuée. Dans le but d'avoir la même quantité et la même distribution du fumier et des engrais dans chaque traitement, d'autres trous ont été creusés dans les rangées faible densité et la même quantité de fumier et d'engrais a été appliquée même si aucun plant n'a été installé dans ces trous. Ainsi, dans chaque parcelle, il y avait le même nombre de trous de bananiers et le même nombre de trous de caféiers même si le nombre de plants était différent.

La variété de bananier utilisée était une variété à bière appelée Igitsiri et la variété de caféier était la variété Jackson 2/1256. L'adaptation à l'ombrage de la variété de caféier n'était pas connue, mais elle a été sélectionnée sans ombrage. Après la reprise des plants de caféiers au mois de juin 2009, ils ont subi l'arcure pour favoriser l'émergence de rejets, permettant la sélection des 3 rejets à garder. Le choix des rejets a été réalisé au mois de novembre 2009, 7 mois après installation. L'entretien des essais consistait en un arrachage manuel des adventices chaque fois qu'elles apparaissaient. Au site de Kayanza, la croissance rapide et l'enracinement profond des adventices ont parfois obligé à faire un labour superficiel à la houe, en grattant sur les premiers cm du sol pour ne pas endommager les racines. En plus du sarclage, un paillage annuel et intégral a été réalisé au mois d'avril à raison de 10 tonnes de matières sèches par hectare, ce qui équivalait à 150 kg de matière sèche par parcelle. Le type de paillis a été choisi selon sa disponibilité dans chacun des sites. A Kayanza, le paillis était constitué par le *Themeda* et à Gitega par l'*Eragrostis*.

Un contrôle du nombre de rejets a été effectué sur les plants de bananiers, ne laissant que 3 rejets par plant : le rejet mère, le rejet fille et le rejet petite-fille. Tous les deux mois, les rejets émergents non retenus, les feuilles mortes et les résidus obtenus après la récolte des bananes ont été découpés et pesés et répartis sur toute la parcelle de provenance. Une feuille était considérée comme morte lorsque plus de 50 % de la feuille était nécrosée. La détermination de la matière sèche des résidus de bananiers recyclée a été réalisée avec le séchage à l'étuve pendant 96 heures à 65°C d'un échantillon composite par site de 5 kg. Les mesures de biomasse de bananiers ont été réalisées jusqu'en avril 2012. Le contrôle des insectes ravageurs des caféiers a été réalisé à l'insecticide DECIS EC avec quatre applications par an: deux applications au mois de novembre et deux autres applications au mois de février. Contre les maladies des caféiers (rouilles et anthracnose) et des bananiers aucune application de pesticides n'a été réalisée.

5.2.3 Mesure des rendements et des caractéristiques de croissance des caféiers et des bananiers

Toutes les mesures de rendement et de croissance ont été réalisées sur la parcelle utile, c'est-à-dire en excluant les rangs de bordure ainsi que les plants situés à l'extrémité des rangées. Pour les plants de caféiers, les mesures ont été réalisées sur 18 plants et 8 plants respectivement pour la forte densité et la faible densité. Pour les bananiers, les mesures ont été prises sur 15 plants pour la forte densité et 6 plants pour la faible densité. Le rendement de banane a été mesuré sur deux cycles entre décembre 2010 et mars 2012. La première production de café a été obtenue au cours de l'année 2012. Cette récolte a été faite entre le 28 mars 2012 et le 02 juillet 2012. La mesure du rendement a été effectuée par des pesées successives des cerises de café ou du régime de banane pendant la période susmentionnée. Le rendement de café et de banane obtenu par parcelle a été reporté à l'hectare. Le poids de 100 cerises a été déterminé sur 5 plants choisis au hasard sur lesquels 300 cerises ont été récoltées et pesées au mois d'avril 2012.

Les mesures de croissance prises sur les caféiers concernaient la hauteur du plant (HTC), le diamètre à la base (DBC), le nombre de paires de rameaux primaires (NPR) et le rayon de la canopée (RC). Pour le bananier, les mesures de hauteur (HTB), de la circonférence à la base (CRBB), de la longueur et de la largeur de la feuille du milieu et du nombre de feuilles vivantes ont été prises. L'intervalle de prise des données de croissance a été choisi dans l'objectif de couvrir les différentes saisons selon la pluviométrie. Ainsi, la première prise des données de croissance a été faite au mois de novembre 2009 directement après le choix des rejets de caféiers, la deuxième au mois de mars 2010, la troisième au mois de juin 2010, la quatrième au mois d'octobre 2010, la cinquième au mois de janvier 2011, la sixième au mois de juin 2011 et la dernière au mois d'octobre 2011. Cette dernière mesure correspondait à la période de floraison des caféiers. Ces périodes de prise de données étaient les mêmes pour les caféiers et les bananiers. Une exception a été faite pour le rayon de la canopée pour laquelle les mesures n'ont été prises qu'à partir du mois de juin 2010.

5.2.4 Détermination de l'ombrage exercé par les bananiers à partir de l'indice de surface foliaire par parcelle

La surface foliaire totale de chaque plant de bananier et de ses rejets a été calculée avec la formule 5.1 (Nyombi et al., 2010), avec un R^2 de 0,85. Cette formule a été utilisée car elle a été développée dans les conditions de l'Ouganda, proches de celles du Burundi, et sur les variétés de bananiers d'altitudes, les mêmes que celles cultivées au Burundi.

$$\text{TLA predicted} = [(0,68 \times l \times w) \times n] \quad (5.1)$$

Avec : TLA: la surface foliaire totale par plant (m^2) ; l : la longueur de la feuille du milieu (m) ; w : la largeur de la feuille du milieu (m) et n : le nombre de feuilles vivantes.

Pour obtenir l'indice de surface foliaire (LAI ; m^2/m^2), la somme des surfaces foliaires totales de tous les plants et rejets retenus par parcelle a été divisée par la surface de la parcelle.

La mesure de l'ombrage exercé par les bananiers a été réalisée une seule fois, au mois d'août 2010 à l'aide d'une caméra hémisphérique. Les photos de la camera hémisphérique ont été utilisées dans plusieurs études pour déterminer l'ombrage. Par exemple, Montes et al. (2005) ont utilisé cette technique pour caractériser la structure spatiale de la canopée de *Pinus silvestris* et Soto-Pinto et al. (2000) l'ont utilisée pour déterminer l'ombrage des caféiers par des arbres forestiers. La camera a été posée à une hauteur de 1 m avec la lentille orientée vers le haut sur chaque plant de caféier de la parcelle utile dans tous les traitements en association. Ensuite, les photos obtenues ont été nettoyées à l'aide du logiciel ImageJ pour ne retenir que l'ombrage au-dessus des caféiers (Schneider et al., 2012). Par une transformation binaire de la photo en noir et blanc, le pourcentage d'ombrage a été déterminé par le même logiciel ImageJ. Ces étapes sont décrites dans la figure 5.2.

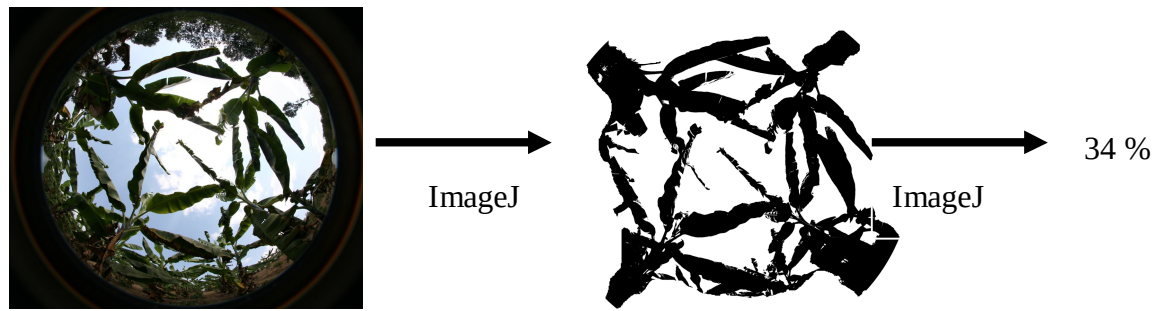


Figure 5.2 : Etapes de détermination du pourcentage d'ombrage par la caméra hémisphérique et le logiciel ImageJ.

La relation entre le LAI prédit et l'ombrage moyen (%) mesuré avec la caméra hémisphérique a été décrite avec une relation logarithmique ($p = 0,0001$; Figure 5.3). Cette relation a été utilisée pour déterminer l'ombrage à partir des LAI de bananier calculés aux autres dates d'observation. Pendant la période de suivi des essais, le LAI était toujours dans le domaine de la validité de la relation car le RLAI était compris entre 0,3 et 2,3.

Cette relation a été déterminée car dans la littérature, c'est l'ombrage qui est utilisé pour caractériser les systèmes de caféiers sous ombrage (Campanha et al., 2004 ; Muschler, 1999 ; Bellow et Nair, 2003), pas le LAI.

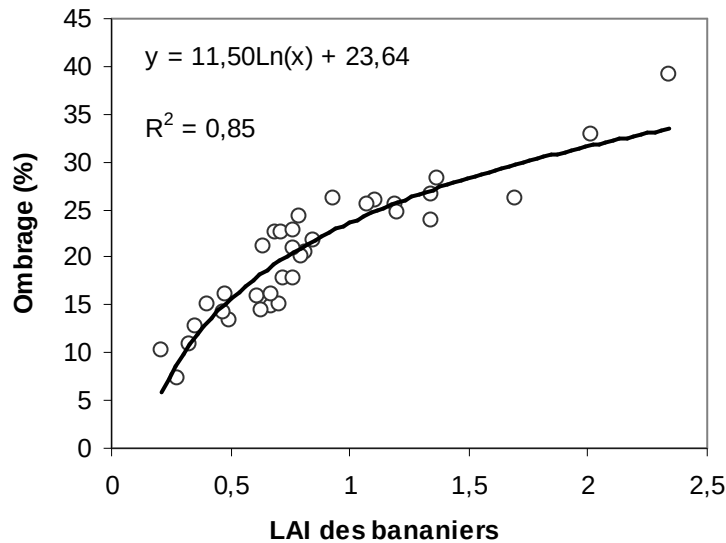


Figure 5.3 : Relation entre l'indice de surface foliaire (LAI (m²/m²)) et l'ombrage exercé par les feuilles de bananiers mesuré avec la caméra hémisphérique. Chaque point correspond à une parcelle.

5.2.5 Détermination des biomasses et estimation de la répartition des nutriments majeurs dans le compartiment végétal

La biomasse aérienne des bananiers (matière sèche) a été calculée en utilisant l'équation allométrique entre la hauteur du plant et la biomasse aérienne totale par plant (Eq. 5.2, avec un R² de 0,98) développée par Nyombi et al. (2009) sur les bananiers d'altitude en Ouganda.

$$ABG = 9,29 \cdot 10^{-6} \cdot x^{2,301} \quad (5.2)$$

Avec ABG = la biomasse aérienne totale (kg) et x la hauteur du plant (cm).

La détermination de la biomasse aérienne (matière sèche) des caféiers a été réalisée avec la formule 5.3 de Segura et al. (2006), avec un R² de 0,94. Cette formule permet de déterminer la biomasse du caféier *Arabica*, le même que

celui de notre étude. Elle a aussi été utilisée par Kuyah et al. (2012) dans une étude menée au Kenya.

$$\text{Log10(BT)} = -1,113 + 1,578 * \text{Log10(d15)} + 0,581 * \text{Log10(h)} \quad (5.3)$$

Où BT = la biomasse aérienne totale des caféiers (kg/plant) ; d15 = diamètre du pied à 15 cm de hauteur (cm) ; h = la hauteur du plant de caféier (m).

Pour les bananiers, les teneurs en éléments nutritifs ont été déterminées dans la biomasse aérienne des parcelles, dans les régimes récoltés et dans la biomasse recyclée. Dans la biomasse aérienne (hors régimes), la fraction des feuilles a été supposée égale à 12 % contre 82 % pour les pseudotroncs (Yamaguchi et Araki, 2004). Pour les régimes récoltés, 86 % étaient constitués de doigts et 14 % par des pédoncules. De plus, les doigts avaient une teneur en eau de 25 % et les pédoncules 14 % (S. Bizimana, doctorat en cours). Pour les caféiers, les teneurs en éléments nutritifs ont été déterminées dans la biomasse aérienne des parcelles et dans les cerises récoltées. La biomasse de caféier recyclée a été supposée négligeable et n'a pas été prise en compte. Dans la biomasse aérienne, la fraction des feuilles a été supposée égale à 12,5%, celle des rameaux égale à 12,5 % et celle des tiges égale à 75 % (Dossa et al., 2008). La conversion du poids de cerises en poids de café marchand a été réalisée en divisant le poids de cerises par le coefficient de 5,82 proposé par Gaie et Flémal (1988).

Les teneurs en éléments nutritifs majeurs dans les différentes fractions de la biomasse de bananiers sont celles proposées par S. Bizimana (non publié) et sont reprises dans le tableau 5.3. Les mêmes valeurs ont été utilisées pour les deux sites. Pour les caféiers, les rapports des éléments nutritifs dans les rameaux et les tiges par rapport aux teneurs dans les feuilles ont été calculés à partir des données obtenues par Dossa et al. (2008) sur le caféier *Robusta*. Ces rapports ont été utilisés pour déterminer les teneurs en éléments nutritifs dans les rameaux et dans les tiges à partir des données obtenues sur les feuilles (§ 5.2.6) dans nos essais. Seules les moyennes des teneurs des éléments nutritifs dans les feuilles pour chaque site ont été utilisées car il n'y

avait pas de différences significatives entre les traitements ($p > 0,05$). Pour calculer la quantité d'éléments nutritifs exportés par la récolte de café (café marchand), les valeurs proposées par Cannell et Kimeu (1971) ont été utilisées (tableau 5.3).

Tableau 5.3 : Teneurs en N, P, K, Ca et Mg utilisées pour le calcul des quantités d'éléments nutritifs présents dans les différentes fractions de la biomasse de caféiers et de bananiers.

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Bananier¹					
Feuilles	0,7	0,1	2,5	0,7	0,9
Pseudotrunc	1,0	0,1	3,2	0,4	0,7
Pédoncule	1,2	0,1	7,1	0,4	0,3
Doigts	1,1	0,1	3,3	0,1	0,3
Caféier					
Gitega					
Feuilles ²	3,0	0,12	3,4	0,9	0,5
Rameaux ²	1,1	0,02	2,0	0,5	0,2
Tiges ²	0,5	0,01	0,4	0,2	0,04
Café verts ³	31,4	2,4	39,4	3,6	2,7
Kayanza					
Feuilles ²	2,7	0,3	3,2	0,3	0,4
Rameaux ²	1,0	0,04	1,8	0,2	0,1
Tiges ²	0,4	0,02	0,4	0,1	0,03
Café verts ³	31,4	2,4	39,4	3,6	2,7

¹ Les données utilisées sont celles obtenues par S. Bizimana sur des essais menés au Burundi; ² obtenus à partir des données de Dossa et al. (2008) ; ³ selon Cannell et Kimeu (1971)

5.2.6 Détermination des caractéristiques physico-chimiques du sol et des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles

Dans chaque parcelle, l'échantillonnage du sol a été réalisé à l'aide d'une tarière à deux profondeurs différentes (0-10 cm et 10-30 cm) sur 10 points sélectionnés au hasard. Le sol provenant de ces 10 points a été bien mélangé pour faire un échantillon composite par parcelle pour chaque profondeur. L'échantillonnage a été réalisé à deux périodes : avant l'installation des essais (mars 2009) pour avoir la situation de référence et au mois de mai 2012 pour

voir l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du sol à la fin des essais. Après chaque échantillonnage, le sol a été séché à l'air libre dans un local couvert pendant 3 à 4 jours pour réduire son humidité avant d'être conservé pour analyse.

Les analyses de sols ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Avant l'analyse, le sol a été séché et tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm de mailles. Le carbone organique (MO) du sol a été déterminé à l'aide de la méthode Walkley-Black. L'azote total a été extrait en utilisant la solution de digestion de Kjeldahl et la mesure a été faite par spectrophotométrie. Le P, Ca, Mg et K extractibles ont été extraits avec la solution Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Le P a été déterminé par colorimétrie alors que K, Ca et Mg ont été dosés à l'aide d'un spectromètre à absorption atomique.

L'échantillonnage des feuilles de bananiers a été fait en utilisant la Méthode d'Echantillonnage Internationale de Référence (MEIR) proposée par Martin-Prével (1969) d'une façon progressive à chaque fois que les bananiers entraient en floraison. La troisième feuille comptée à partir de la feuille récemment épanouie a été sélectionnée sur un plant en floraison au stade des mains femelles découvertes. Une bande de 10 cm se trouvant au milieu du limbe de part et d'autre de la nervure centrale a été sectionnée. Après élimination de la nervure, chacun des deux morceaux a été divisé en deux parties égales, parallèlement à l'ex-nervure centrale. Seules les moitiés internes ont été conservées pour les analyses au laboratoire. L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été réalisé en octobre 2011. Cette période correspondait au début de la floraison des caféiers. L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été fait sur la troisième ou la quatrième paire de feuilles comptées à partir de la dernière paire de feuilles récemment épanouie (Wrigley, 1988). Dans chaque parcelle de caféiers, 8 pieds ont été choisis au hasard dans la parcelle utile et sur chaque pied, 6 paires de feuilles ont été récoltées sur 5 parties différentes du plant : en bas, quart inférieur, milieu, quart supérieur et la partie supérieure. Les feuilles de bananier ou de caféier provenant de la même parcelle ont été

mélangées pour avoir un échantillon composite de feuilles de bananiers et de feuilles de caféiers.

Après échantillonnage, les feuilles ont été nettoyées manuellement à l'aide d'un tissu pour enlever les traces de poussières et séchées dans une étuve à une température de 60°C pendant 96 heures avant le stockage. Les analyses de feuilles de caféiers et de bananiers ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Les éléments analysés étaient N, P, K, Ca et Mg. Les feuilles ont été séchées à l'étuve pendant 48-96 heures, broyées et tamisées avec un tamis de 2 mm d'ouverture. Le produit obtenu a été digéré dans une solution d'acide sulfurique et sélénique. Les teneurs en N et en P ont été obtenues par colorimétrie et la teneur en K, Ca et Mg par spectrométrie à absorption atomique.

5.2.7 Détermination de la rentabilité de l'association bananiers-caféiers

La rentabilité économique a été calculée sur les 3 années de suivi des essais. Les 3 premières années correspondent à la période précédant la production de café où les investissements pour la main d'œuvre et pour les intrants sont élevés. Ainsi, les données de rendement utilisées étaient constituées par la première récolte de café et les deux cycles combinés de production de banane. Pour analyser la rentabilité, plusieurs paramètres ont été déterminés. Les premiers à être calculés étaient le rapport d'équivalence de la terre (LER : land equivalent ratio) et le revenu par hectare pour chaque culture. Le LER a été calculé avec la formule 5.5 proposée par Willey (1985). Une valeur supérieure à 1 montre que l'association des deux cultures est avantageuse par rapport à la monoculture.

$$LER = \frac{Y_{c_{int}}}{Y_{c_{mon}}} + \frac{Y_{b_{int}}}{Y_{b_{mon}}} \quad (5.5)$$

Avec : $Y_{c_{int}}$: rendement de café en association avec le bananier (T/ha) ; $Y_{c_{mon}}$: rendement de café en monoculture (T/ha) ; $Y_{b_{int}}$: rendement de banane en association avec le caféier (T/ha) ; $Y_{b_{mon}}$: rendement de banane en

monoculture (T/ha). Pour une culture donnée, les valeurs de rendement en monoculture sont prises pour la même densité que la densité de la culture dans l'association.

Le revenu par traitement et par hectare a été obtenu en multipliant le rendement rapporté à l'hectare par le prix du café et de la banane. L'évolution des prix de la banane et du café a été caractérisée pour une période de 11 ans, de 2002 à 2012. Les prix du café ont été fournis par Kimonyo et Ntiranyibagira (2007) pour la période allant de 2002 à 2006, par Pana (2008 et 2010) pour la période allant de 2007 à 2010, par la CNAC (2011) pour l'année 2011 et par l'InterCafé (2012) pour l'année 2012. Les prix de banane sur cette période ont été calculés à partir des données fournies par Faostat (2013) pour la période allant de 2002 à 2010 et par FEWS NET (2012 ; 2013) pour les années 2011 et 2012. A partir des prix observés sur cette période, 3 valeurs de prix ont été calculées pour analyser le revenu en fonction de la variabilité des prix. Ces valeurs étaient i) le prix du quartile inférieur, ii) le prix moyen sur toute la période et iii) le prix du quartile supérieur. Pour l'année 2012, le prix du café cerise a changé quatre fois au cours de l'année, et cela a été pris en considération dans le calcul des 3 valeurs. La conversion du revenu en dollars a été faite en utilisant le taux de change proposé au mois d'avril de chaque année (Foxtop, 2012). Ainsi, pour la banane, les valeurs des prix par kg étaient de 0,28 \$, 0,32 \$ et 0,33 \$ respectivement pour le quartile inférieur, la moyenne et le quartile supérieur. Pour le café cerise, les valeurs respectives de ces prix étaient de 0,12 \$, 0,27 \$ et 0,37 \$ le kg. L'évolution des prix de café et de banane est montrée à la figure 5.4.

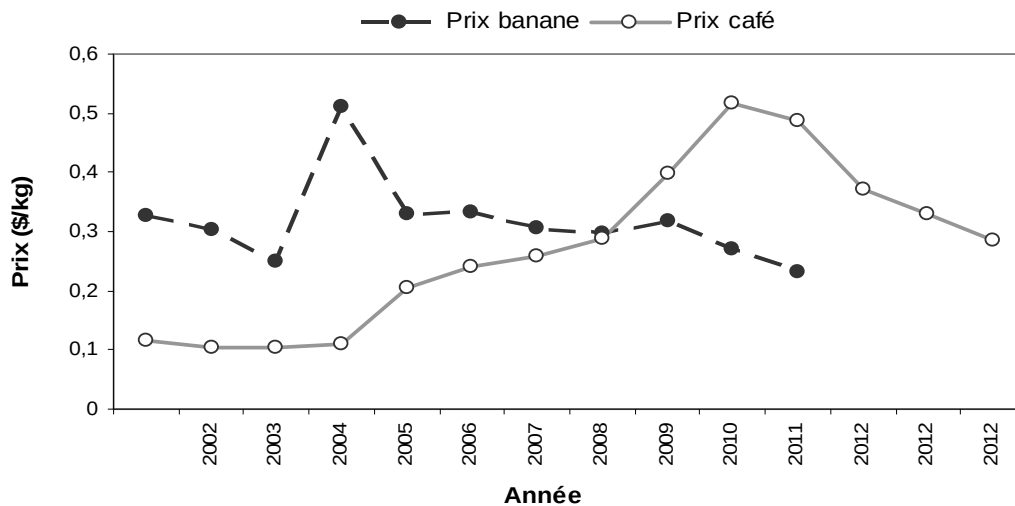


Figure 5.4 : Evolution des prix de café cerise et de banane de 2002 à juillet 2012 (\$/kg)

En plus du revenu à l'hectare et du LER, deux autres paramètres ont été calculés. Il s'agit de la valeur ajoutée (VA, \$) et du résultat brut de l'exploitation (RBE, \$). Ces deux paramètres ont été calculés comme suit (équations 6.6 et 6.7 ; Gahungu, 2008).

$$VA = P - CI \quad (5.6)$$

Avec CI : valeurs des consommations intermédiaires (\$) et P : la valeur du produit (\$).

Les fournitures ont concerné l'achat du paillis appliqué sur les trois années, le fumier appliqué lors de la plantation des bananiers et des caféiers et des engrais appliqués en mai 2009 après le premier sarclage. Les insecticides et les pulvérisateurs qui étaient fournis par les services d'encadrement et les outils de récolte de café qui étaient supposés être ceux utilisés dans la vie quotidienne du ménage, n'ont pas été comptabilisés. L'achat du paillis a été estimé égal à 30 BIF/kg de matière sèche, valeur arrondie à partir de la valeur de 27 BIF/kg proposée par Gahungu (2008). Le prix du paillis a été supposé constant pour les 3 années mais a été réajusté avec le changement du taux de change du dollar selon l'année. Le prix des engrais en 2009 était de 1,15 \$/kg (1400 BIF) pour l'urée et 1,64 \$/kg (2000 BIF) pour le DAP. Le prix du fumier au

cours de cette même année était de 16,4 \$ (20.000 BIF) la tonne transport inclus.

$$\text{RBE} = \text{VA} - (\text{Rémunération du personnel} + \text{Frais financier} + \text{Taxes}) \quad (5.7)$$

La main d'œuvre nécessaire pour les travaux caféicoles a été déterminée avec les normes du temps de travail proposées par Gaie et Flémal (1988) et reprises dans l'annexe 5.4. Les normes de travail dans les bananiers ont été celles proposées par Bagamba et al. (1998). Comme les normes dans les bananiers proposées étaient exprimées en homme-heure, elles ont été ramenées en homme-jour en divisant le total des heures par 8. Pour l'entretien (sarclage), les normes de Gaie et Flémal ont été utilisées pour les deux cultures. La rémunération du personnel a seulement été calculée pour les opérations réalisées, en utilisant les normes proposées pour chacune d'elles (les normes de travail sont reprises en annexe 5.3). La récolte et le transport de la banane n'ont pas été comptabilisés dans le temps de travail car ils sont échelonnés dans le temps et ne demandent pas une quantité élevée de main d'œuvre en même temps. En plus, comme les prix de banane sont ceux octroyés au niveau de la ferme ('Farm gate price' ; Faostat, 2013), le transport réalisé est très faible. La main d'œuvre pour cette activité n'avait pas non plus été quantifiée dans une étude menée en Ouganda par Bagamba et al. (1998). La main d'œuvre nécessaire pour certaines activités dépend de la densité des bananiers et des caféiers. Cela a été pris en considération dans la détermination de la main d'œuvre et d'autres dépenses en calculant le coût des opérations en fonction de notre densité, à partir de la densité de référence. Ainsi, la main d'œuvre nécessaire pour l'arcure des caféiers et l'œilletonnage des bananiers par exemple, dépend de la densité. Par contre, les activités réalisées par parcelle (paillage, sarclage) réclament la même charge de travail en culture pure et en association. Le coût d'un homme-jour est resté relativement stable comparativement au taux de change du dollar. En 2004, il était de 0,66 \$ et en 2012 il était de 0,69 \$. Le coût journalier de la main d'œuvre utilisé dans les calculs a été alors arrondi à 0,7 \$. Les frais financiers et les taxes ont été supposés égaux à 0 car les prix octroyés aux agriculteurs ne sont pas soumis aux taxes et il n'existe pas de charges financières.

5.2.8 Analyses statistiques

Une première analyse de variance (ANOVA I) a été réalisée entre les sites. Si les caractéristiques des bananiers et des caféiers dans les deux sites étaient statistiquement différentes ($p \leq 0,05$), les deux sites étaient analysés séparément. Pour toutes les données analysées, il y avait des différences significatives entre les sites. Ainsi, les sites ont été analysés séparément. Dans chaque site, l'analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA II) a été utilisée. Les deux facteurs étaient la densité des bananiers et la densité des caféiers. L'effet bloc a été pris en compte. La structure de l'analyse était croisée : densité des caféiers x densité bananiers. Cette structure permet d'analyser l'effet de la densité de caféiers, de la densité des bananiers et de leur interaction. Quand l'interaction était significative, les moyennes de tous les traitements étaient montrées, sinon seules les moyennes des facteurs significatifs sont montrées. Pour les biomasses, la dynamique des nutriments et les caractéristiques économiques, seul l'ANOVA I a été utilisé avec pour seul facteur les 8 traitements. L'analyse statistique des résultats, la classification des moyennes avec le test de Tukey ont été faites avec le logiciel R version 2.13.1. Le niveau de signification était de $p \leq 0,05$.

5.3 Résultats

5.3.1 Les caractéristiques de croissance des caféiers et des bananiers

a) Evolution de l'ombrage dû aux bananiers

A Gitega, l'ombrage a augmenté du 7^{ème} mois jusqu'au 15^{ème} mois après la plantation. Après le 15^{ème} mois, l'ombrage a chuté avec des pics de faible ombrage au 19^{ème} mois et au 31^{ème} mois après la plantation. Ainsi, les valeurs de l'ombrage au 7^{ème} mois étaient de 4 % et 1 % respectivement pour la forte densité de bananiers (HDB) et pour la faible densité de bananiers (LDB). Au 15^{ème} mois, les valeurs respectives étaient de 26 % et 21 %. Au 31^{ème} mois, les valeurs de l'ombrage étaient de 15 % dans les parcelles HDB et de 14 % dans les parcelles LDB.

L'effet de la densité des bananiers sur l'ombrage des caféiers à Gitega étaient significatif au 7^{ème} ($p < 0,001$), 12^{ème} ($p < 0,001$) et 15^{ème} mois ($p = 0,003$) après la plantation. Pour cette période, les valeurs d'ombrage les plus élevées ont été observées dans les parcelles de bananiers à forte densité (figure 5.5a). Au-delà du 15^{ème} mois, les valeurs d'ombrage n'étaient plus significativement différentes en fonction de la densité des bananiers. Les densités croissantes de caféiers n'ont pas affecté significativement l'ombrage dû aux bananiers. De même, l'interaction densité des bananiers-densité des caféiers n'était pas significative.

Contrairement à Gitega, il y a eu une augmentation régulière de l'ombrage à Kayanza sur toute la période de développement végétatif. Les valeurs de l'ombrage au 7^{ème} mois étaient de 3 % et 1 % respectivement pour les parcelles HDB et pour les parcelles LDB. Au 23^{ème} mois, ces valeurs étaient de 28 % et 21 %. Au 31^{ème} mois, les valeurs de l'ombrage étaient de 36 % dans les parcelles HDB et de 27 % dans les parcelles LDB. Comme à Gitega, la densité des bananiers a significativement ($p < 0,001$) affecté l'ombrage à Kayanza, avec des valeurs plus élevées dans les parcelles HDB (figure 5.5b). L'augmentation de la densité des caféiers n'a pas affecté significativement l'ombrage provenant des bananiers et l'interaction densité des bananiers-densité des caféiers n'était pas significative.

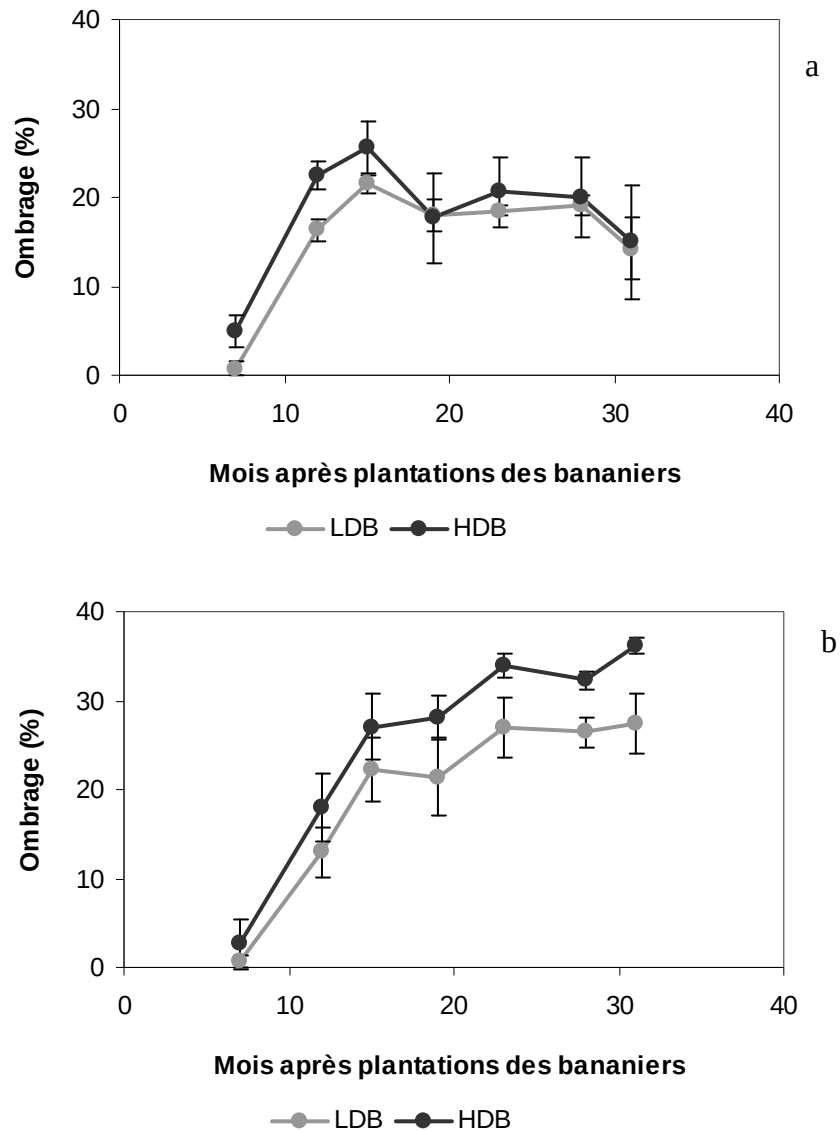


Figure 5.4 : Evolution de l'ombrage dû aux bananiers en fonction de la densité des bananiers dans les sites de Gitega (a) et Kayanza (b). LDB : bananiers faible densité ; HDB : bananiers haute densité.

b) Croissance des caféiers en fonction de la densité des bananiers

A Gitega, un effet significatif des densités croissantes de bananiers sur l'évolution du diamètre à la base des caféiers (DBC) a été observé uniquement 7, 11, 14 et 19 mois après le choix des rejets de caféiers (figure 5.6a). Les valeurs de p sur ces périodes étaient de 0,026 au 7^{ème} mois et < 0,001 au 11^{ème}, 14^{ème} et 19^{ème} mois. Pendant ces périodes, les valeurs les plus élevées de DBC ont été observées dans les parcelles de caféiers en monoculture (NB) et les plus faibles dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers

(HDB). Au 14^{ème} mois après le choix des rejets de caféiers par exemple, le DBC était de 2,0 cm dans les parcelles de caféiers en monoculture, de 1,7 cm dans les parcelles de caféiers avec faible densité de bananiers (LDB) et de 1,6 cm dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers (HDB). L'effet de la densité des caféiers et l'interaction densité bananiers-densité caféiers étaient non significatifs, quelle que soit la date d'observation.

Pour la hauteur des caféiers (HTC), des différences significatives entre les différentes densités de bananiers ont été observées uniquement au 11^{ème} et 14^{ème} mois après le choix des rejets de caféiers. La valeur de p était $< 0,001$ au 11^{ème} mois et de 0,043 au 14^{ème} mois. Les valeurs de HTC étaient les plus élevées dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers et plus faible dans les parcelles de caféiers en monoculture et avec faible densité de bananiers (figure 5.6b). Au 14^{ème} mois, les valeurs de HTC étaient de 91 cm dans les parcelles de caféiers en monoculture et de 86 cm dans les autres parcelles. L'interaction densité bananiers-densité caféiers n'était pas significative, quelle que soit la date d'observation.

Pour le nombre de paires de rameaux primaires (NPR), les densités croissantes de bananiers ont eu un effet significatif au 11^{ème}, 14^{ème} et 19^{ème} mois après le choix des rejets, avec des valeurs respectives de $p < 0,001$, $< 0,001$ et de 0,008. Le NPR était significativement plus élevé dans les parcelles de caféiers en monoculture et plus faible dans les autres parcelles (figure 5.6c). Ainsi, au 14^{ème} mois, les valeurs de NPR respectives pour les parcelles NB, LDB et HDB étaient de 13, 11 et 10. Au début et à la fin de la période de prise des mesures, les valeurs de NPR étaient statistiquement les mêmes. Il n'y a pas eu d'effet de la densité des caféiers sur le NPR, ni d'interactions densité banane x densité café, quelle que soit la date d'observation.

Du 7^{ème} mois jusqu'au 23^{ème} mois, les densités de bananiers ont affecté significativement le rayon de la canopée (RC) des caféiers avec des valeurs de p de 0,004 au 7^{ème} mois, de 0,003 au 11^{ème} mois et de $p < 0,001$ au 14^{ème}, au 19^{ème} et au 23^{ème} mois. Les valeurs les plus élevées ont été observées dans les parcelles de caféiers en monoculture (figure 5.6d). Au 23^{ème} mois, le RC était

de 34 cm dans les parcelles NB, de 31 cm dans les parcelles LDB et 32 cm dans les parcelles HDB. Il n'y a pas eu d'effet de la densité des caféiers sur le RC, ni d'interactions densité banane x densité café, quel que soit la date d'observation.

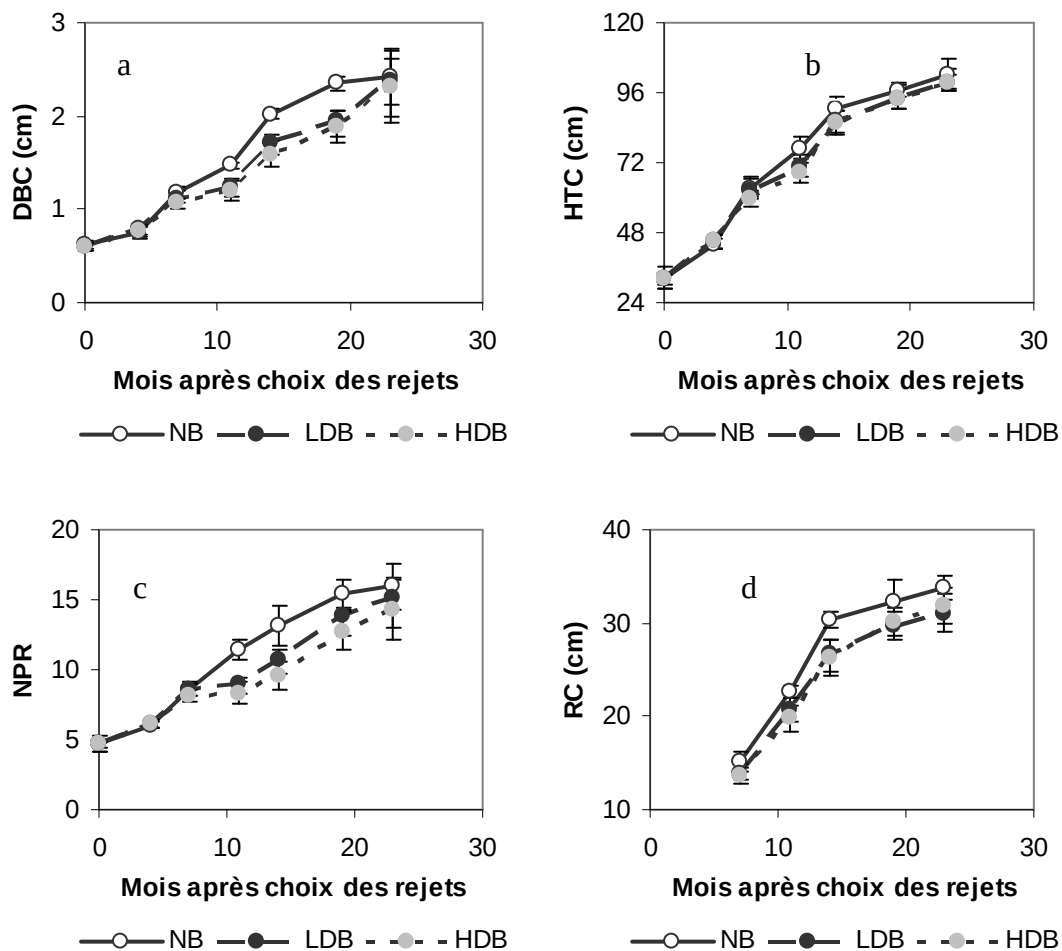


Figure 5.6 : Evolution des caractéristiques de croissance des caféiers (DBC : diamètre à la base (a), HTC : hauteur (b), NPR : nombre de paires de rameaux primaires (c), RC : rayon de la canopée (d)) au site de Gitega en fonction de la densité des bananiers (NB : caféiers en monoculture, LDB : caféiers avec faible densité de bananiers et HDB ; caféiers avec forte densité de bananiers). Les barres représentent les écart-types.

A Kayanza, des effets significatifs de la densité des bananiers sur la croissance des caféiers ont été observés pour le diamètre à la base (DBC) et le nombre de paires de rameaux primaires (NPR) dès le 7^{ème} mois après le choix des rejets des caféiers, et ce jusqu'au 23^{ème} mois. Pour ces deux caractéristiques, les valeurs les plus élevées ont été observées dans les parcelles de caféiers en

monoculture (NB) et les plus faibles ont été enregistrées dans les parcelles avec forte densité de bananiers (HDB) (figure 5.7a, 5.7b). Pour le DBC, les valeurs de p étaient comprises entre 0,020 et 0,046 et pour le NPR entre 0,002 et 0,018. Au 23^{ème} mois, les valeurs de DBC étaient de 1,6 cm dans les parcelles NB, de 1,4 cm dans les parcelles de caféiers à faible densité (LDB) et de 1,3 cm dans les parcelles HDB. Les valeurs respectives de NPR pour ces mêmes traitements étaient de 11, 10 et 9. Pour la hauteur (HTC) et le rayon de la canopée (RC), on observe une tendance (valeurs de p comprises entre 0,053 et 0,097) à des valeurs décroissantes de HTC et RC avec l'augmentation de la densité de bananiers. Là aussi, les valeurs les plus élevées de HTC (figure 5.7b) et de RC (figure 5.7d) ont été observées dans les parcelles NB. Pour ces différents paramètres (DBC, NPR, HTC, RC), il n'y a pas eu d'effet de la densité des caféiers, ni d'interactions densité banane x densité café, quelle que soit la date d'observation.

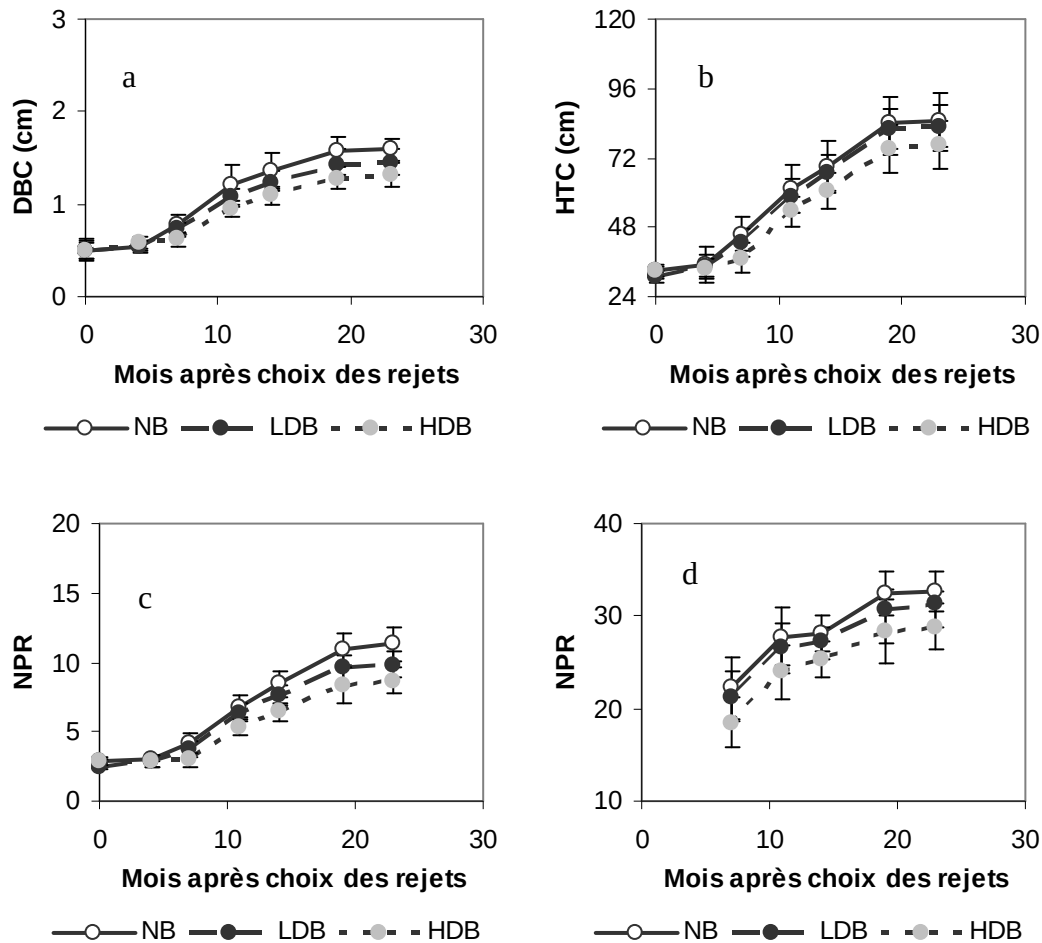


Figure 5.7 : Evolution des caractéristiques de croissance des caféiers (DBC : diamètre à la base (a), HTC : hauteur (b), NPR : nombre de paires de rameaux primaires (c), RC : rayon de la canopée (d) au site de Kayanza en fonction de la densité des bananiers (NB : caféiers en monoculture, LDB : caféiers avec faible densité de bananiers et HDB ; caféiers avec forte densité de bananiers). Les barres montrent les écart-types.

c) Relation entre les caractéristiques de croissance des caféiers mesurées en octobre 2011 et l'ombrage apporté par les bananiers pour ce même mois.

A Kayanza, il y avait des corrélations négatives et significatives entre toutes les caractéristiques de croissance des caféiers et l'ombrage exercé par les bananiers (figure 5.8a, 5.8b, 5.8c et 5.8d). Les coefficients de détermination (R^2) étaient de 0,43, 0,24, 0,63 et 0,25 respectivement pour le diamètre à la base (DBC), la hauteur (HTC), le nombre de paires de rameaux primaires

(NPR) et le rayon de la canopée (RC). Les valeurs respectives de p pour ces caractéristiques de croissance étaient de 0,004, 0,035, < 0,001 et 0,03. A Gitega, une corrélation significative a été observée uniquement entre l'ombrage et le rayon de la canopée (RC) (figure 5.8d). La corrélation était négative et le coefficient de détermination R^2 était de 0,68 avec une valeur de $p < 0,001$.

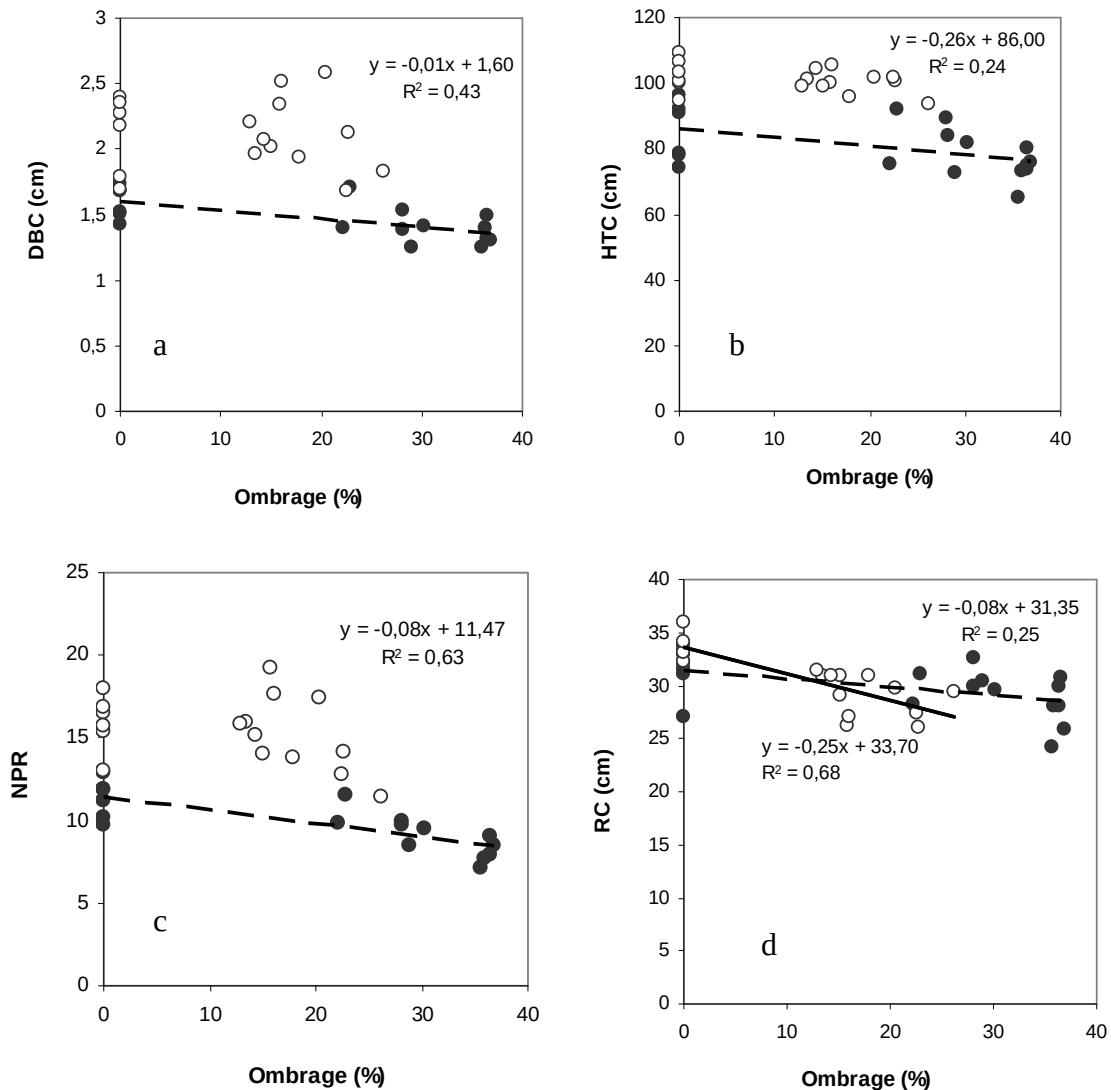


Figure 5.8 : Relation entre l'ombrage exercé par les bananiers et les caractéristiques de croissance des caféiers en octobre 2011 (DBC : diamètre à la base (a), HTC : hauteur (b), NPR : nombre de paires de rameaux primaires (c) et RC : rayon de la canopée (d). Les cercles non remplis et la ligne continue représentent le site de Gitega et les cercles remplis et la ligne discontinue le site de Kayanza. Chaque point correspond à une parcelle. Seules les relations significatives ont été montrées.

d) Croissance des bananiers

Il n'y avait de différence significative entre les traitements. A Gitega, la hauteur des bananiers était stable avec une hauteur moyenne de 205 cm au 15^{ème} mois et au 23^{ème}. Par contre le nombre de feuilles vivantes avait diminuait avec 10 feuilles vivantes au 15^{ème} mois contre 5 au 23^{ème} mois. A Kayanza, la hauteur des bananiers avait des valeurs de 250 cm et de 298 cm respectivement au 15^{ème} mois et au 23^{ème} mois. De même, le nombre de feuilles vivantes avait augmenté passant de 8 à 10 sur les mêmes mois.

e) Biomasse aérienne des bananiers et des caféiers

En octobre 2011, la part de la biomasse de bananiers dans la biomasse totale était la plus importante à la fois à Gitega (figure 5.9a) et Kayanza (figure 5.9b), quel que soit le traitement en association. A Gitega, la part de la biomasse de caféiers était au maximum de 16 %, contre 7 % à Kayanza. Il y avait une différence significative entre les traitements ($p < 0,001$) dans les deux sites, avec des valeurs de biomasse totale plus faibles dans les parcelles de caféiers en monoculture (LDC et HDC). A Gitega, il n'y a pas eu de différences significatives entre les biomasses totales observées dans les parcelles de caféiers à forte densité associés avec des bananiers à forte densité ou à faible densité (HDC-LDB et HDC-HDB). A Kayanza, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les parcelles avec forte densité de bananiers (HDB, LDC-HDB et HDC-HDB). Dans les deux sites, la biomasse de caféiers n'a pas affecté significativement la biomasse totale.

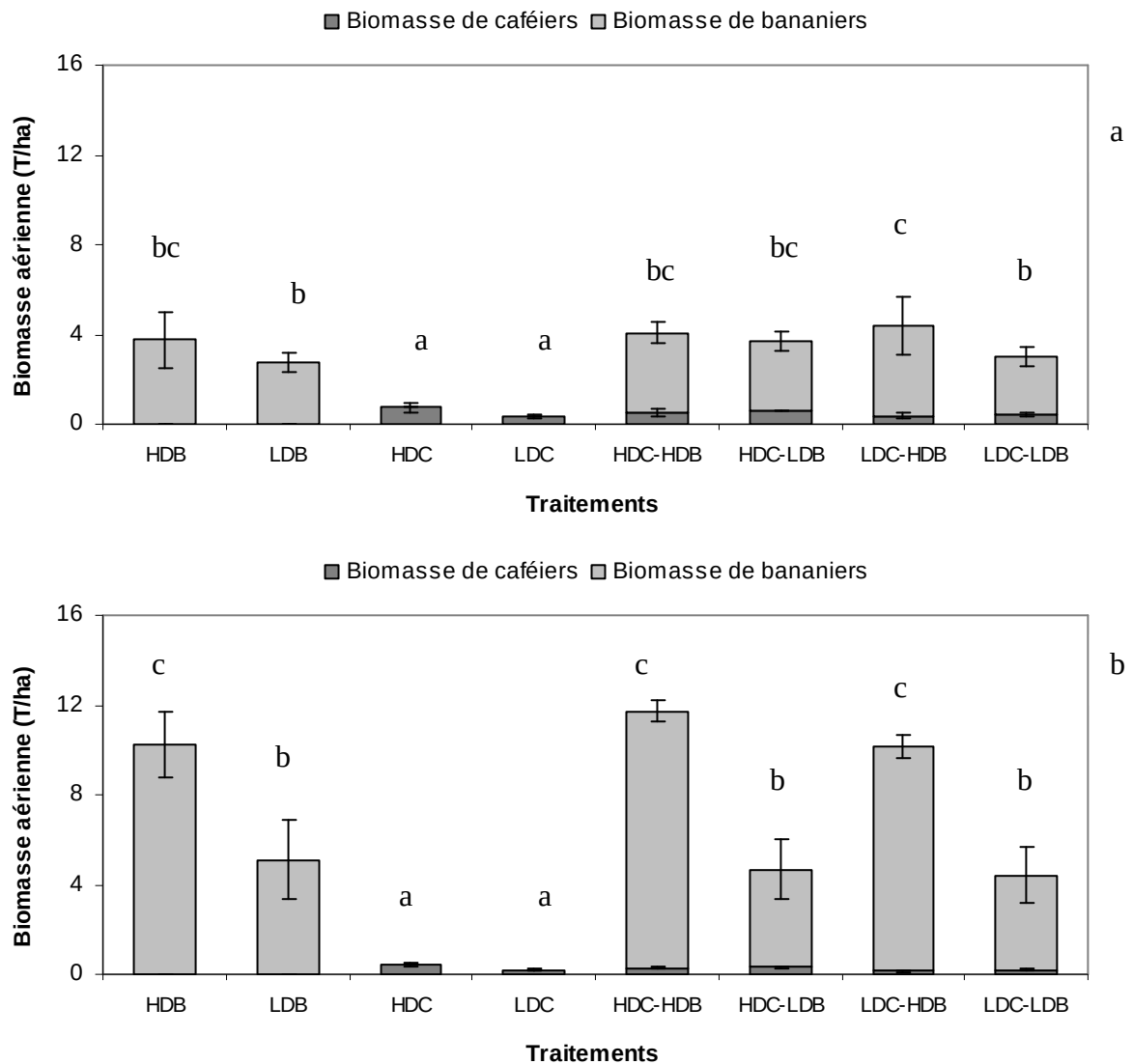


Figure 5.9 : Biomasse aérienne des bananiers et des caféiers en fonction des traitements dans le site de Gitega (a) et de Kayanza (b) au mois d'octobre 2011. HDB : bananiers à forte densité, LDB : bananiers à faible densité, HDC : caféiers à forte densité, LDC : caféiers à faible densité.

5.3.2 Interaction sol-plante dans l'association des bananiers et des caféiers

a) Biomasse de bananiers recyclée

La biomasse recyclée depuis la plantation jusqu'en avril 2012 était significativement plus élevée ($p < 0,001$) dans les parcelles avec forte densité de bananiers. A Gitega, la biomasse recyclée était de 6,1 T de matière sèche

par ha dans les parcelles LDB et de 9,2 T dans les parcelles HDB. A Kayanza, cette biomasse était de 8,4 T de matière sèche et 13,6 T respectivement pour les parcelles LDB et HDB. Les densités croissantes des caféiers n'ont pas affecté significativement la biomasse de bananiers recyclée. De même, l'interaction densité bananiers-densité caféiers n'était pas significative.

b) Evolution des caractéristiques physico-chimiques du sol

En utilisant les données des caractéristiques du sol enregistrées au début de l'installation des essais comme covariables, il n'y a pas eu de différences significatives entre les différentes densités de bananiers dans les parcelles de caféiers pour le Corg, le N, le K, le Ca et le Mg dans le site de Gitega. Mais pour le P, l'augmentation de densité des bananiers dans les parcelles de caféiers a conduit à une diminution moins rapide de P extractible. Les valeurs étaient de 0,64 mg/kg dans les parcelles avec forte densité de bananiers, de 0,19 mg/kg dans les parcelles avec faible densité de bananiers et de 0,24 mg/kg dans les parcelles de bananiers en monoculture. Les différences étaient significatives ($p = 0,022$). En faisant une analyse de la variance dans les parcelles de bananiers, une valeur de P extractible significativement ($p < 0,001$) plus élevée a été enregistrée dans les parcelles à forte densité de bananiers, avec une valeur de 0,66 mg/kg contre 0,17 mg/kg dans les parcelles de bananiers à faible densité. Il n'y a pas eu d'effet de la densité des caféiers ou d'interaction densité de caféiers x densité de bananiers. A Kayanza, aucun effet significatif de la densité des bananiers ou des caféiers sur les propriétés du sol n'a été observé.

c) Teneurs en éléments nutritifs majeurs dans les feuilles des caféiers en fonction de la densité des bananiers

Les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de caféiers n'ont pas été affectées significativement par la densité des caféiers ou des bananiers, quel que soit le site. De même, les rapports des cations dans les feuilles étaient statistiquement les mêmes pour les différents traitements. Pourtant, il y avait une relation significative à $p \leq 0,10$ entre la teneur en N, K et Mg dans les

feuilles des caféiers et l'ombrage exercé par les bananiers. La teneur en N et en Mg avait tendance à augmenter avec l'augmentation de l'ombrage alors que celle de K avait tendance à diminuer avec l'augmentation de l'ombrage (figure 5.10).

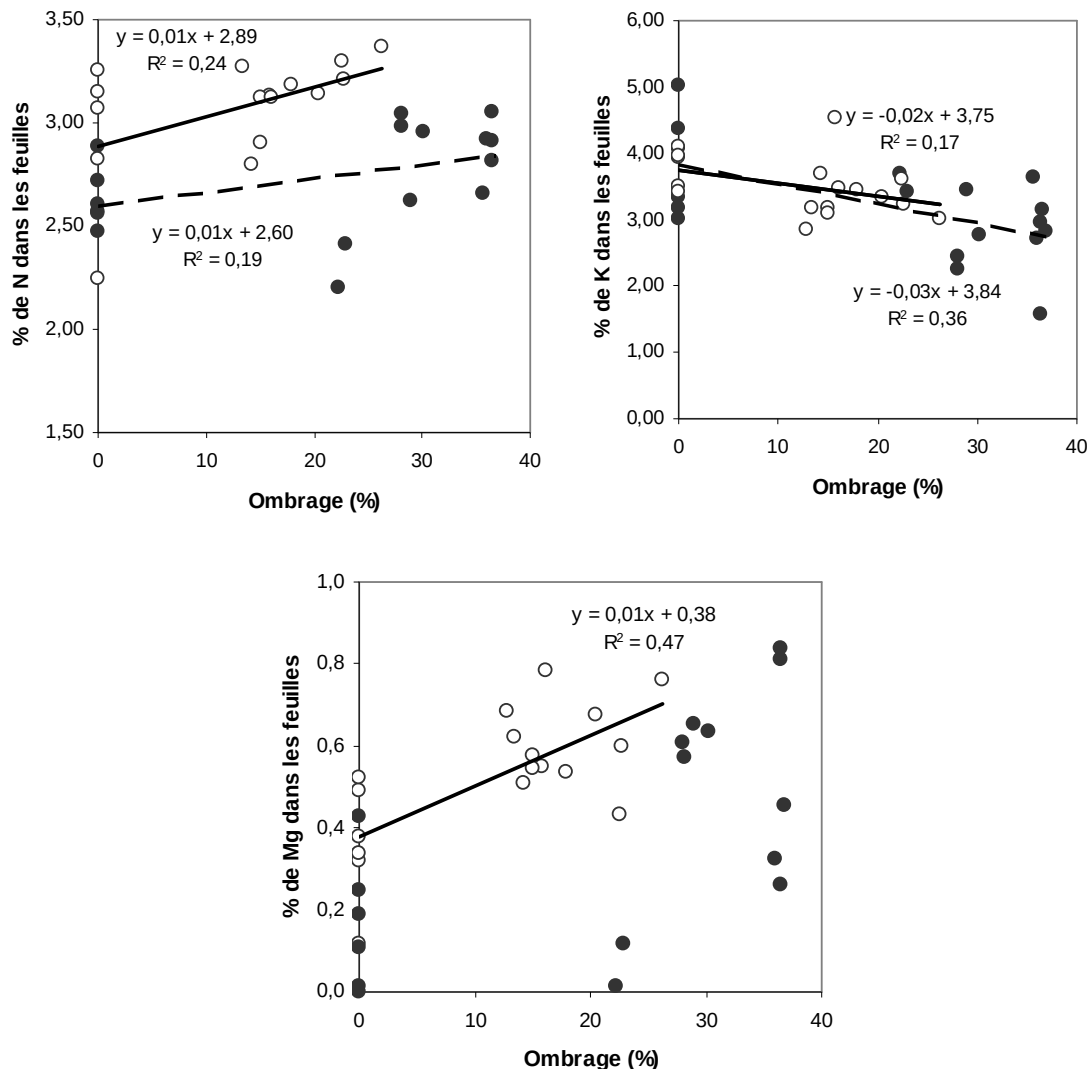


Figure 5.10 : Relations entre le N, K et Mg dans les feuilles de caféiers et l'ombrage exercé par les bananiers. Les cercles non remplis et la ligne continue représentent le site de Gitega et les cercles remplis et la ligne discontinue le site de Kayanza. Seules les relations avec des coefficients de détermination significatifs à $p \leq 0,10$ ont été montrées.

Les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de bananiers ne dépendaient ni de la densité des bananiers, ni de la densité des caféiers. Par contre, il y avait uniquement des différences significatives entre les sites. Ainsi, les teneurs

de P, K, Ca et Mg dans les feuilles des bananiers étaient significativement plus élevées à Kayanza. Les valeurs respectives de ces éléments étaient de 0,16 %, 3,79 %, 0,75 % et 0,71 % à Kayanza contre 0,11 %, 2,35 %, 0,53 % et 0,43 % à Gitega. Les valeurs de N dans les feuilles des bananiers étaient statistiquement les mêmes dans les deux sites.

5.3.3 Rendement de café et de banane

Dans les deux sites, les densités de bananiers ont affecté significativement tous les paramètres de rendement de café analysés, à savoir le rendement (RDTC), le poids de cerises par plant (PC/PL) et le poids de 100 cerises (P100). Les valeurs de RDTC et de PC/PL étaient les plus faibles dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers (HDB) et les plus fortes dans les parcelles de caféiers en monoculture (NB) (tableau 5.4). A Gitega, la chute de rendement de café par rapport aux parcelles en monoculture était de 39 % dans les parcelles LDB et de 75 % dans les parcelles HDB. A Kayanza, les chutes de rendement pour ces mêmes parcelles étaient respectivement de 47% et 77 %. De même, la diminution de PC/PL était de 42 % et 78 % respectivement pour les parcelles LDB et les parcelles HDB à Gitega, et de 49 % et 75 % à Kayanza. Contrairement au rendement et au rendement par plant, le P100 augmentait avec l'augmentation de la densité des bananiers. L'augmentation était en moyenne de 6% (Gitega) et 9% (Kayanza) entre le traitement NB et le traitement HDB. Seul le rendement de café par hectare a été affecté par la densité des caféiers (tableau 5.4), avec des augmentations de 139% (Gitega) et 67% (Kayanza) en moyenne entre les traitements LDC et HDC.

Tableau 5.4 : Rendement de café cerise $\pm$ écart-type par hectare (RDTC) et par plant (PC/PL), poids de 100 cerises (P100) en fonction de la densité des bananiers et des caféiers dans les sites de Gitega et Kayanza.

	Densité des bananiers			Densité des caféiers	
	NB	LDB	HDB	LDC	HDC
Gitega					
RDTC (kg/ha)	675 $\pm$ 250 c	412 $\pm$ 201 b	171 $\pm$ 178 a	247 $\pm$ 179 a	592 $\pm$ 284b
PC/PL (g)	326 $\pm$ 37 c	191 $\pm$ 36 b	72 $\pm$ 58 a	177 $\pm$ 128a	216 $\pm$ 103a
P100 (g)	154 $\pm$ 6 a	159,7 $\pm$ 5 ab	163 $\pm$ 4 b	159 $\pm$ 5a	159 $\pm$ 7a
Kayanza					
RDTC (kg/ha)	315 $\pm$ 94 c	169 $\pm$ 98 b	74 $\pm$ 26 a	139 $\pm$ 81a	232 $\pm$ 151b
PC/PL (g)	156 $\pm$ 22 c	79 $\pm$ 36 b	41 $\pm$ 21 a	100 $\pm$ 58a	85 $\pm$ 55a
P100 (g)	141 $\pm$ 5 a	151 $\pm$ 11 ab	154 $\pm$ 6 b	148 $\pm$ 9a	150 $\pm$ 10a

* Les valeurs avec des lettres différentes dans les lignes et selon les densités des deux cultures sont statistiquement différentes.

Une relation entre l'ombrage exercé par les bananiers au moment de la floraison des caféiers et le poids des cerises par plant a été observée. Cette relation avait un R^2 de 0,88 à Gitega et un R^2 de 0,83 à Kayanza (figure 5.11) et était significative à $p \leq 0,001$. A Gitega, la diminution du rendement par plant sous l'effet de l'ombrage était rapide, avec une prédiction d'avoir une récolte nulle pour un ombrage de 26 %. A Kayanza, la diminution de poids des cerises par plant sous l'effet de l'ombrage des bananiers était modérée, et un rendement nul était prédit pour un ombrage de 43 %.

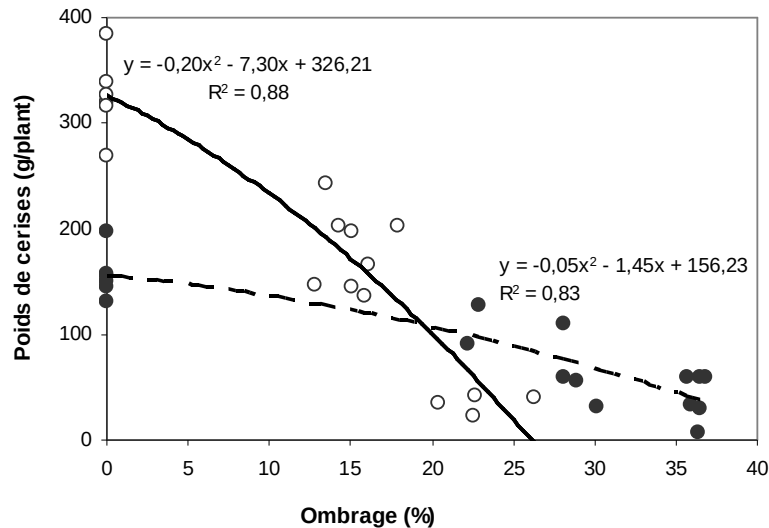


Figure 5.11 : Relation entre l'ombrage exercé par les bananiers au moment de la floraison des caféiers et le poids des cerises par plant à la récolte. Les cercles non remplis et la ligne continue représentent le site de Gitega et les cercles remplis et la ligne discontinue le site de Kayanza. Chaque point représente une parcelle.

La relation entre l'ombrage exercé par les bananiers au moment de la floraison des caféiers et le poids de 100 cerises était significative avec des R^2 de 0,43 et 0,49 pour les sites de Gitega et Kayanza, respectivement. Les valeurs de p étaient de 0,002 à Gitega et $< 0,001$ à Kayanza. L'augmentation de l'ombrage exercé par les bananiers a entraîné une augmentation du poids de 100 cerises (figure 5.12).

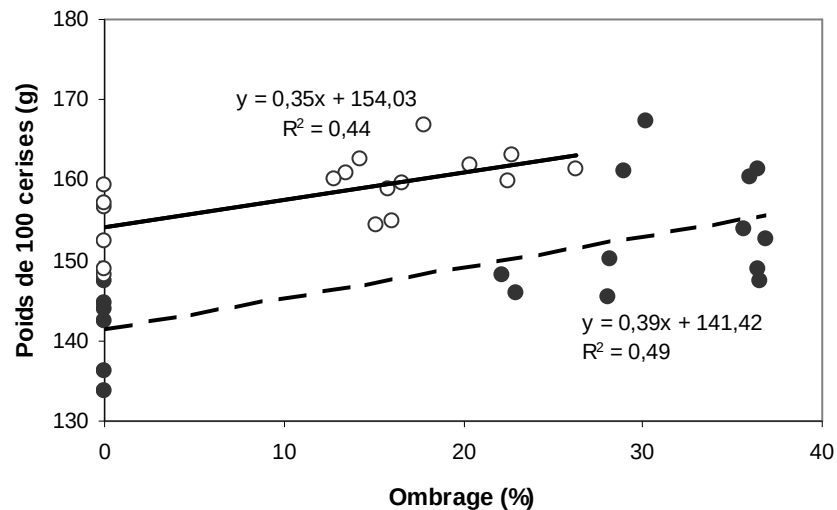


Figure 5.12 : Relation entre l'ombrage exercé par les bananiers et le poids de 100 cerises. Les cercles non remplis et la ligne continue représentent le site de Gitega et les cercles remplis et la ligne discontinue le site de Kayanza. Chaque point représente une parcelle.

Le rendement de banane par cycle (RDTB) et le poids du régime (PR) n'ont pas été significativement affectés par la densité des caféiers. Par contre, il y a eu un effet significatif de la densité des bananiers et des cycles de récolte sur le RDTB et le PR, sauf à Kayanza où le PR était statistiquement le même pour la forte densité de bananiers (HDB) et la faible densité de bananiers (LDB) (tableau 5.5). Le RDTB augmentait avec la densité alors que le PR diminuait avec la densité. Sur les deux cycles de production de banane, le RDTB et PR ont chuté à Gitega et ont augmenté à Kayanza. A Gitega, le RDTB et le PR ont diminué de 14% alors qu'à Kayanza ces deux paramètres ont augmenté de 23 %. Il n'y a pas eu d'interaction densité caféiers x densité bananiers pour RDTB et PR.

Tableau 5.5 : Rendement de banane par hectare (RDTB) et poids du régime (PR) sur les deux cycles en fonction de la densité des bananiers dans les sites de Gitega et Kayanza. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

	LDB	HDB	Valeur-p	Cycle1	Cycle2	valeur-p
Gitega						
RDTB (T/ha)	6,7 $\pm$ 0,9	9,4 $\pm$ 2,20	< 0,001	8,6 $\pm$ 2,5	7,5 $\pm$ 1,7	0,024
PR (kg)	7,8 $\pm$ 1,1	5,6 $\pm$ 1,3	< 0,001	7,2 $\pm$ 1,8	6,2 $\pm$ 1,4	0,010
Kayanza						
RDTB (T/ha)	14,8 $\pm$ 2,8	27,2 $\pm$ 4,7	< 0,001	18,8 $\pm$ 6,1	23,2 $\pm$ 8,0	< 0,001
PR (kg)	17,2 $\pm$ 3,3	16,2 $\pm$ 2,8	0,300	14,9 $\pm$ 2,2	18,4 $\pm$ 2,8	< 0,001

LDB : faible densité de bananiers ; HDB : forte densité de bananiers

5.3.4 Répartition des éléments nutritifs majeurs dans le compartiment végétal en fonction de la densité de bananiers et de caféiers

Il y avait des différences significatives ($p < 0,001$) entre les quantités d'éléments nutritifs stockés dans la biomasse aérienne, exportés par les récoltés et recyclés en fonction des traitements. Les quantités d'éléments nutritifs exportés dans la récolte ou contenus dans la biomasse de caféiers sont très faibles (tableau 5.6). Par contre, les éléments contenus dans les biomasses et les récoltes de bananiers sont très élevés, particulièrement dans les parcelles avec forte densité de bananiers (HDB). Ainsi, les quantités d'éléments exportés ou contenus dans la biomasse aérienne dépendaient fortement de la densité des bananiers, avec une contribution négligeable des caféiers. La contribution maximale de 25 % a été observée pour les caféiers à Gitega. Pour les éléments exportés, stockés ou recyclés, les quantités de K étaient très élevées, suivies par les quantités de N. Par contre, les quantités de P étaient très faibles.

Les détails de la répartition des éléments nutritifs dans les différentes fractions des biomasses des bananiers et des caféiers en fonction des traitements sont repris dans l'annexe 5.4 et annexe 5.5.

Tableau 5.6 : Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers en novembre 2011, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Gitega et Kayanza pour la période de mars 2009 à avril 2012. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

Gitega					Kayanza			
Nutriments	HDC	HDB	HDC-HDB	HDC-LDB	HDC	HDB	HDC-HDB	HDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	6,4 $\pm$ 1,7	26,3 $\pm$ 12,0	38,2 $\pm$ 5,1	35,0 $\pm$ 4,2	3,3 $\pm$ 0,7	98,0 $\pm$ 14,1	111,7 $\pm$ 4,8	44,2 $\pm$ 12,9
P (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,0	2,2 $\pm$ 1,0	2,9 $\pm$ 0,4	2,6 $\pm$ 0,3	0,2 $\pm$ 0,1	8,1 $\pm$ 1,2	9,2 $\pm$ 0,4	3,6 $\pm$ 1,1
K (kg/ha)	7,2 $\pm$ 1,9	85,3 $\pm$ 38,9	113,9 $\pm$ 15,4	102,3 $\pm$ 13,3	3,8 $\pm$ 0,9	317,4 $\pm$ 45,7	357 $\pm$ 14,7	137,9 $\pm$ 41,5
Ca (kg/ha)	2,2 $\pm$ 0,6	12,0 $\pm$ 5,5	16,8 $\pm$ 2,3	15,3 $\pm$ 1,9	0,4 $\pm$ 0,1	44,5 $\pm$ 6,4	50,0 $\pm$ 2,1	19,3 $\pm$ 5,8
Mg (kg/ha)	0,8 $\pm$ 0,2	19,7 $\pm$ 9,0	25,8 $\pm$ 3,5	23,0 $\pm$ 3,1	0,3 $\pm$ 0,1	73,5 $\pm$ 10,6	82,3 $\pm$ 3,3	31,5 $\pm$ 9,8
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	4,8 $\pm$ 0,2 a	51,0 $\pm$ 6,3	45,2 $\pm$ 2,1	41,8 $\pm$ 2,9	2,1 $\pm$ 0,2	152,2 $\pm$ 32,0	149,5 $\pm$ 13,3	75,6 $\pm$ 18,1
P (kg/ha)	0,4 $\pm$ 0,0 a	4,9 $\pm$ 0,6	4,3 $\pm$ 0,2	4,0 $\pm$ 0,3	0,2 $\pm$ 0,0	14,6 $\pm$ 3,1	14,4 $\pm$ 1,3	7,2 $\pm$ 1,7
K (kg/ha)	6,1 $\pm$ 0,2 a	162,6 $\pm$ 20,2	141,3 $\pm$ 6,2	127,1 $\pm$ 9,6	2,7 $\pm$ 0,2	485,5 $\pm$ 102,0	476,3 $\pm$ 42,9	238,8 $\pm$ 57,9
Ca (kg/ha)	0,6 $\pm$ 0,0 a	5,4 $\pm$ 0,7 d	4,8 $\pm$ 0,2	4,4 $\pm$ 0,3	0,2 $\pm$ 0,0	16,1 $\pm$ 3,4	15,8 $\pm$ 1,4	8,0 $\pm$ 1,9
Mg (kg/ha)	0,4 $\pm$ 0,0 a	11,2 $\pm$ 1,4 d	9,7 $\pm$ 0,4	8,7 $\pm$ 0,7	0,2 $\pm$ 0,0	33,4 $\pm$ 7,0	32,7 $\pm$ 2,9	16,4 $\pm$ 4,0
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	-	83,3 $\pm$ 7,7	92,8 $\pm$ 6,9	69,8 $\pm$ 7,6	-	130,3 $\pm$ 12,4	171,8 $\pm$ 23,9	84,0 $\pm$ 18,5
P (kg/ha)	-	6,9 $\pm$ 0,6	7,7 $\pm$ 0,6	5,8 $\pm$ 0,6	-	10,8 $\pm$ 1,0	14,2 $\pm$ 2,0	7,0 $\pm$ 1,5
K (kg/ha)	-	269,6 $\pm$ 25,1	300,5 $\pm$ 22,3	226,2 $\pm$ 24,7	-	422,0 $\pm$ 40,1	556,3 $\pm$ 77,3	272,1 $\pm$ 59,8
Ca (kg/ha)	-	37,8 $\pm$ 3,5	42,2 $\pm$ 3,1	31,7 $\pm$ 3,5	-	59,2 $\pm$ 5,6	78,1 $\pm$ 10,8	38,2 $\pm$ 8,4
Mg (kg/ha)	-	62,4 $\pm$ 5,8	69,6 $\pm$ 5,2	52,3 $\pm$ 5,7	-	97,7 $\pm$ 9,3	128,8 $\pm$ 17,9	63,0 $\pm$ 13,8

HDC : forte densité café ; LDB : faible densité bananiers ; HDB : forte densité banane

5.3.5 Productivité de l'association bananiers-caféiers

Les LER (Land Equivalent Ratio) observés dans les deux sites étaient partout supérieurs à 1. A Gitega, les LER statistiquement les plus élevés ($p < 0,001$) ont été observés dans l'association des caféiers à forte densité avec les bananiers à faible densité. Ces valeurs étaient de 1,84 en ne prenant en compte que le rendement de banane au second cycle (LER-Cycle 2) et de 1,75 pour le rendement de banane cumulé (LER- Σ DRT). Venaient ensuite les LER observés dans l'association de caféiers à faible densité avec les bananiers à faible densité. L'association de caféiers avec des bananiers à forte densité a réduit significativement les LER sur le site de Gitega (figure 5.13a).

A Kayanza, il n'y avait pas de différences significatives entre les LER des différents traitements, que ce soit pour le 2^{ème} cycle (LER-cycle 2) ou pour la production cumulée de banane (LER- Σ DRT). Bien que non significativement différentes, les valeurs de LER observées pour l'association des caféiers avec des bananiers à forte densité étaient les plus faibles. Les valeurs de LER étaient comprises entre 1,17 et 1,32 (figure 5.13b).

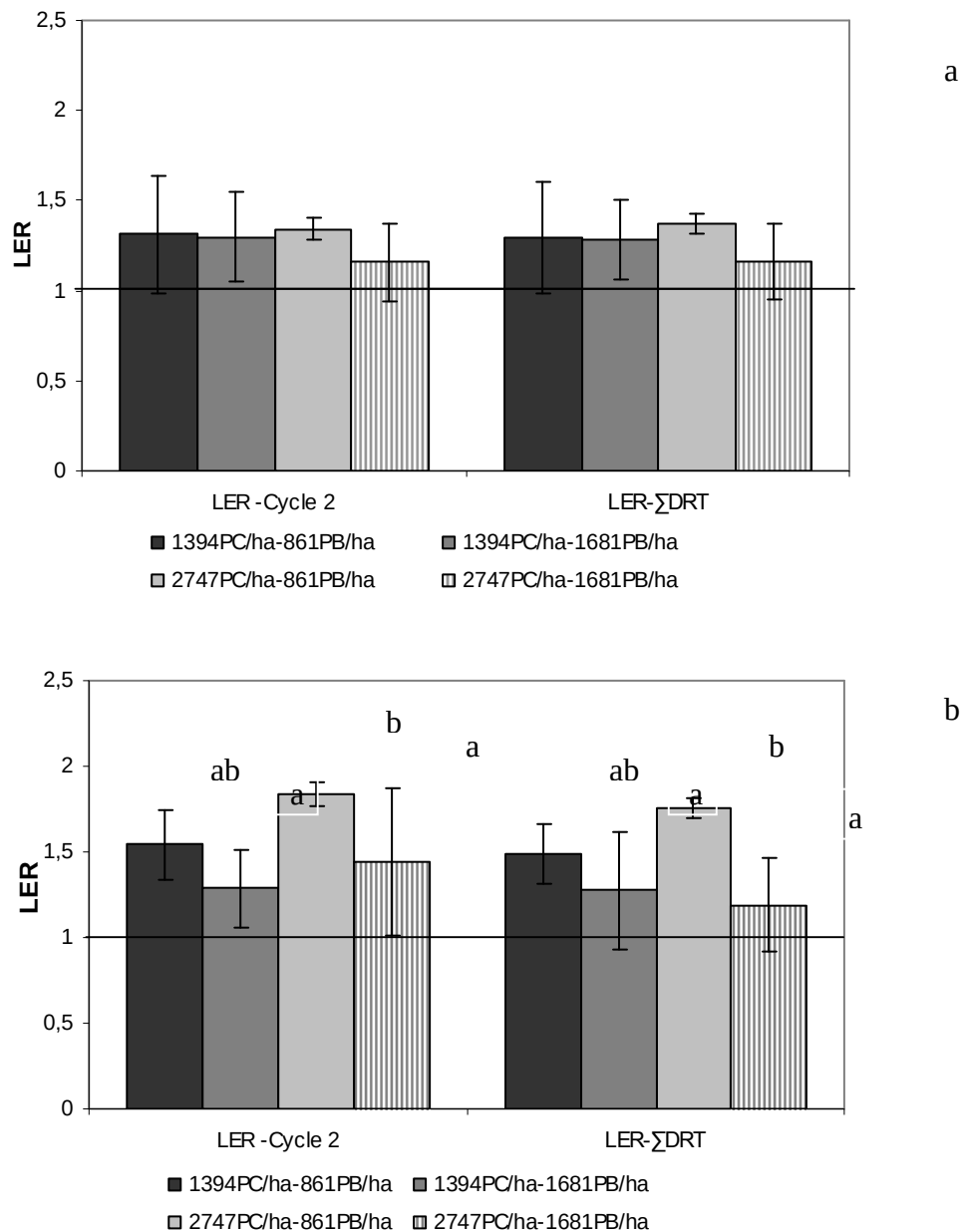


Figure 5.13 : Rapport d'équivalence de la terre (LER : Land Equivalent Ratio) dans le site de Gitega (a) et Kayanza (b). LER-Cycle 2 représentent le rendement de banane du 2^{ème} cycle de production (octobre 2011, juin 2012) et le rendement de café récolté en 2012 et le LER- Σ DRT représentent les rendements de banane sur les deux cycles de production et le rendement de café obtenu en 2012. La ligne horizontale correspond à la droite de fonction LER = 1.

Des différences significatives ($p < 0,001$) entre les traitements ont été observées dans les deux sites pour les trois caractéristiques économiques analysées, à savoir le revenu (RV), la valeur ajoutée (VA) et le résultat brut de

l'exploitation (RBE). Les VA et les RBE étaient négatifs dans les parcelles de caféiers en monoculture (tableau 5.7), mais le déficit diminuait avec l'augmentation du prix des commodités (annexe 5.6).

A Gitega, les revenus, les valeurs ajoutées et les résultats bruts de l'exploitation les plus faibles ont été enregistrés dans les parcelles de caféiers en monoculture (HDC). Les parcelles de bananiers avec forte densité en monoculture (HDB) ont eu des valeurs de RV, de VA et de RBE significativement plus élevées. Les parcelles avec faible densité de bananiers (HDC-LDB) avaient des RV, des VA et des RBE intermédiaires.

A Kayanza, les RV, les VA et les RBE étaient plus faibles dans les parcelles de caféiers en monoculture (HDC), intermédiaires dans les parcelles avec faible densité de bananiers (HDC-LDB) et plus élevés dans les parcelles avec forte densité de bananiers (HDB et HDC-HDB).

L'annexe 5.6 montre les détails des revenus, de la valeur ajoutée et du résultat en fonction des traitements.

Les revenus (valeurs positives) étaient élevés dans les parcelles avec forte densité de bananiers et faibles dans les parcelles de caféiers en monoculture plus particulièrement dans les parcelles avec faible densité de caféiers. Les dépenses (valeurs négatives) étaient élevées dans les parcelles avec forte densité de caféiers et de bananiers. Le gros des dépenses étaient liées à l'achat et à l'application du paillis (figure 5.14)

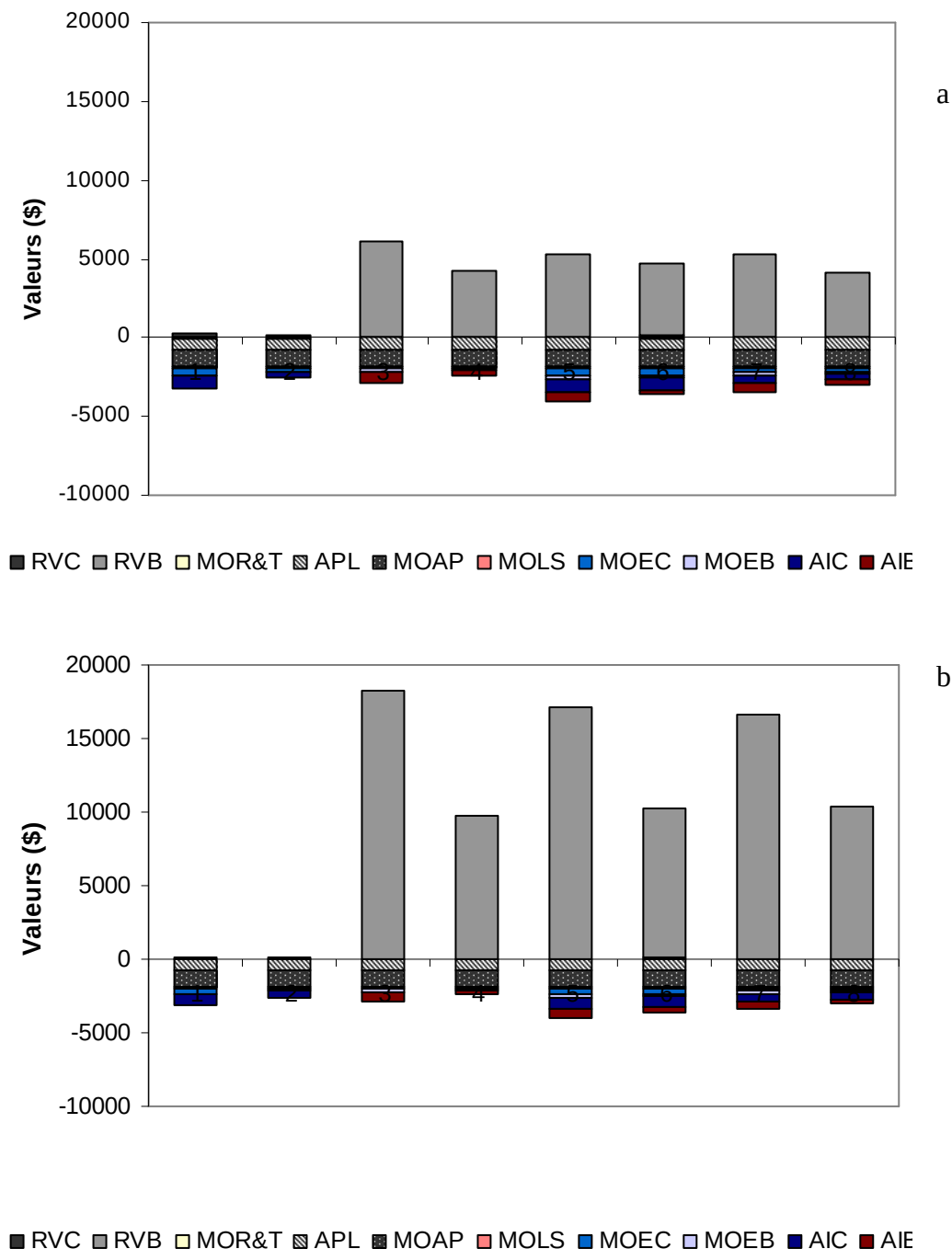


Figure 5.14 : Les dépenses et les revenus en fonction des traitements à Gitega (a) et Kayanza (b). D'à gauche à adroite : HDC ; LDC ; HDB ; LDB ; HDC-HDB ; HDC-LDB ; LDC-HDB ; LDC-LDB. RVC : revenu café ; RVB : revenu banane ; MOR&T : main d'œuvre récolte et transport café ; APL : achat paillis ; MOAP : main d'œuvre application paillis ; MOLS : main d'œuvre labour et sarclage ; MOEC : main d'œuvre entretien caféiers (arcure ; taille ; application pesticides et engrais) ; MOEB : main d'œuvre entretien bananiers ; AIC : achat intrants café ; AIE : achat intrant banane.

Tableau 5.7 : Les valeurs du revenu, de la valeur ajoutée (VA) et du résultat brut de l'exploitation (RBE) des deux cycles de production de banane et la première production de café en fonction des traitements dans les sites de Gitega et de Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type). Les valeurs sont en \$.

Traitement	RVM	VAM	RBEM	RVM	VAM	RBEM
Gitega				Kayanza		
HDC	242	-1259	-3026	107	-1395	-3140
LDC	122	-1002	-2493	63	-1061	-2543
HDB	6069	4726	3202	18119	16777	15252
LDB	4197	3151	1774	9816	8769	7393
HDC-HDB	5279	2178	1009	17777	14676	13516
HDC-LDB	4754	1949	914	12010	9205	8185
LDC-HDB	5457	2989	1830	16803	14336	13175
LDC-LDB	4127	1956	936	10720	8649	7535

HDC : forte densité de caféiers ; HDB : forte densité de bananiers ; LDB : faible densité bananiers ; RVM : revenu calculé avec le prix moyen ; VAM : valeur ajoutée calculée avec le moyen ; RBEM : résultat brut calculé avec le prix moyen.

5.4 Discussion des résultats

5.4.1 Croissance des caféiers en fonction de la densité des bananiers

L'ombrage a augmenté continuellement à Kayanza (figure 5.4a), mais, à Gitega, l'ombrage a augmenté avant de chuter après le 15^{ème} mois (figure 5.4b). L'ombrage prédit par la relation de la figure 5.3 était faible si on le compare avec les résultats de la littérature. Avec la même allure de la courbe, Nyombi et al. (2009) ont trouvé qu'avec un LAI de 2 l'ombrage était de 70 %. Turner et al. (2007) ont obtenu un ombrage de 90 % pour un LAI de 4,5. Cette différence peut être due au fait que dans notre cas l'ombrage a été mesuré au dessus des plants de caféiers se trouvant au minimum à 1,25 m des plants de bananiers.

La croissance des caféiers a été négativement affectée par l'ombrage des bananiers. A Gitega, l'ombrage était significativement plus élevé dans les parcelles de bananiers avec haute densité que basse densité entre le 7^{ème} et le 15^{ème} mois (figure 5.4). Cela s'est traduit par des effets négatifs sur les caractéristiques de croissance du caféier dans les parcelles de bananiers avec haute densité entre le 7^{ème} et le 19^{ème} mois (figure 5.6). Au-delà du 15^{ème} mois, l'ombrage a diminué et n'était plus dépendant de la densité des bananiers. Ceci a permis aux différents traitements de retrouver des caractéristiques de croissance des caféiers similaires. Ainsi, à la fin de la période de prise des mesures, le diamètre à la base des caféiers (DBC), le nombre de paires de rameaux primaires (NPR) et la hauteur (HTC) ne différaient pas selon la densité des bananiers à Gitega (figure 5.6). Par contre à Kayanza, où l'augmentation de l'ombrage a été continue et où l'augmentation de la densité des bananiers a systématiquement conduit à un ombrage plus important, les caractéristiques de croissance des caféiers sont restées significativement différentes sur toute la période d'observation (figure 5.7). La diminution du diamètre à la base et de la longueur des rameaux des caféiers ombragés a été observée par plusieurs auteurs (Campanha et al., 2004 ; DaMatta, 2008). Cependant, l'augmentation de la hauteur des caféiers sous ombrage rapportée dans la littérature (Morais et al., 2004) n'a pas été observée ici. Au contraire, la hauteur des caféiers était plus faible dans les parcelles de caféiers avec forte densité des bananiers et plus élevée dans les parcelles sans bananiers (figure 5.6b; figure 5.7b et figure 5.8b). Les caractéristiques de croissance des jeunes caféiers seraient donc négativement affectées par l'ombrage.

5.4.2 Teneurs en éléments nutritifs dans le sol et dans les feuilles de caféiers

Les différents traitements n'ont pas eu d'impact sur les propriétés du sol, si ce n'est qu'au niveau du P extractible à Gitega. La quantité de biomasse de bananiers recyclée a uniquement affecté le P, avec des diminutions faibles dans les parcelles avec forte densité de bananiers. Cela a été observé à Gitega où la teneur initiale de P était très faible (tableau 5.1). Une source probable de P dans la biomasse de bananiers pourrait être le P absorbé grâce à la

symbiose par mycorhize (Heather et al., 2006). En effet, les mycorhizes favorisent une bonne absorption des éléments nutritifs et limitent la toxicité aluminique chez le bananier (Rufyikiri et al., 2000, Rufyikiri et al., 2004). Pour les autres éléments, la dynamique des éléments dans la biomasse de bananiers n'a pas affecté leurs teneurs dans le sol bien que leurs teneurs dans cette biomasse étaient plus élevées que le P (tableau 5.6).

La teneur en N et en Mg dans les feuilles de caféiers a augmenté avec l'augmentation de l'ombrage (figure 5.10). Cette augmentation, qui n'a pas eu d'impact positif sur la croissance (figure 5.6, 5.7 et 5.8) et la production des caféiers (tableau 5.4), semble plutôt résulter d'une adaptation des caféiers aux conditions d'ombrage par la production de chlorophylle, car la teneur des feuilles de caféiers en N et en Mg est très corrélée avec la teneur en chlorophylle totale (Rodrigues et al., 2009). Cela va permettre à la plante d'augmenter le niveau de la photosynthèse par unité de surface (Niinemets, 2009). L'augmentation de la teneur en chlorophylle va améliorer l'interception de la faible quantité de lumière qui parvient à traverser la canopée des bananiers (Evans, 1993; Niinemets, 2007). Cet important investissement des éléments de la chlorophylle comme le N et le Mg pour l'interception de la lumière quand il y a déficit de lumière peut détourner l'azote d'autres objectifs comme la production de cerises (Niinemets et Tenhunen, 1997). Par contre, la teneur en K dans les feuilles de caféiers a diminué avec l'augmentation de l'ombrage (figure 5.10). Ceci pourrait résulter de la plus forte compétition avec les bananiers dans les parcelles à haute densité de bananier car les besoins en K des bananiers sont très élevés (Lahav, 1995).

5.4.3 Production de café et de banane

Le rendement de café obtenu à la première récolte était faible avec une moyenne 0,6 T/ha pour la forte densité de caféiers (tableau 5.4) comparé à la moyenne nationale qui est de 2,8 T/ha pendant les années de bonne production et 1,2 T/ha pendant les années de mauvaise production (ISABU-OCIBU, 2009). L'obtention d'un faible rendement à la première récolte de café est cependant

normal (Gaie et Flémal, 1988) car le maximum de rendement n'est obtenu qu'à partir de la 3^{ème} récolte.

Le rendement de Gitega était supérieur à celui de Kayanza même sur les parcelles en monoculture (tableau 5.4), alors que le site de Kayanza est réputé plus favorable pour le café que celui de Gitega (ISABU, 2007), ce qui est confirmé par les analyses de sol (tableau 5.3). Cela peut être mis en relation avec une plus forte croissance des caféiers à Gitega (figure 5.6 et 5.7), qui pourrait résulter des températures légèrement plus élevées dans ce site (figure 5.1). La qualité du fumier utilisé, bien que non analysé, pourrait aussi avoir affecté la production de café. A Gitega, la litière était constituée de *Trypsacum* alors qu'à Kayanza la litière était constituée d'*Eragrostis*. Or, le *Trypsacum* est de loin plus riche en éléments nutritifs que l'*Eragrostis* (Pozy et Dehareng, 1996). Enfin, la grêle observée à Kayanza au mois de mars 2011 pourrait avoir occasionné la destruction partielle des bouts des rameaux et des bourgeons floraux. L'autre cause probable de cette différence de rendement de café entre le site de Gitega et Kayanza seraient les valeurs de certaines caractéristiques de croissance des rejets au moment de leur choix après arcure. Le diamètre à la base (DBC) était de 0,5 cm à Kayanza contre 0,6 cm à Gitega, et le nombre de paires de rameaux primaires (NPR) était de 3 à Kayanza et 5 à Gitega. Les caféiers de Kayanza n'ont pas pu rattraper ce retard au cours de la période de suivi des essais. En effet, pour des rejets sélectionnés après arcure des caféiers (stress du plant), des petites différences au départ peuvent conduire à des grandes différences pendant une certaine période, car un rejet vigoureux deviendra plus vite autonome qu'un rejet chétif. Cela pourrait supposer une bonne émergence des rejets après arcure à Gitega suite à la haute température.

La densité des plants de bananiers a eu un effet négatif sur le rendement des caféiers. Quelle que soit la densité de caféier, le rendement de café diminuait avec l'augmentation du nombre de plants de bananiers. Les meilleurs rendements de café pour les deux sites ont été observés dans les parcelles avec forte densité de caféiers en monoculture. Pour la faible densité de bananiers, la chute de rendement par rapport au café en monoculture était

cependant modérée. Cette chute de la production par la présence des bananiers peut résulter de plusieurs types de compétitions pouvant exister entre ces deux cultures : la compétition pour la lumière, pour les nutriments (Muschler, 1999 ; Beer, 1987 ; tableau 5.6), voire pour l'eau. En effet, une diminution de la production de café cerise par plant avec l'augmentation de l'ombrage a été observée dans cette étude (figure 5.10). En plus, l'analyse des caractéristiques de croissance des caféiers indique un effet négatif des bananiers sur le rendement de café. En effet, une relation positive entre le rendement de café et certaines caractéristiques de croissance du caféier comme le diamètre à la base, la hauteur, le nombre de paires de rameaux primaires et le rayon de la canopée a pu être mise en évidence (annexe 5.2 ; Walyaro et Van Der Vossen, 1979 ; Anim-Kwapong et Adomako 2011). Ainsi, un arbuste de caféier chétif observé sous ombrage ne pourrait pas produire autant qu'un arbuste plus vigoureux sans ombrage (figure 5.5 ; figure 5.6 et Figure 5.7).

Ici, il est important de souligner que l'ombrage exercé par les bananiers est bien corrélé avec leur biomasse ($R^2 = 0,83$ et $p < 0,001$). Cependant, la corrélation avec la production de café par plant était plus élevée avec l'ombrage qu'avec la biomasse (R^2 compris entre 0,68 et 0,76 pour la biomasse, contre 0,83 et 0,88 pour l'ombrage), ce qui semble indiquer que la forte corrélation négative entre rendement et l'ombrage reflète plus que la seule compétition pour les nutriments qui serait proportionnelle à la biomasse produite. Par ailleurs, l'ombrage, qui est fortement corrélé au LAI, peut également refléter une compétition pour l'eau. Au final, l'ombrage semble donc refléter les effets cumulés de la compétition pour les nutriments, l'eau et la lumière.

La réduction du rendement avec l'intensité de l'ombrage des caféiers par des arbres d'ombrage a été rapportée par plusieurs études (Campanha et al., 2004 ; Jaramillo-Botero et al., 2010 ; Lyngbæk, 2001). Cependant, dans notre étude, la baisse de production de café a été observée même pour un ombrage relativement faible car l'ombrage était au maximum de 36 % (figure 5.3). Pour des niveaux d'ombrage de 23 à 38 %, Soto-Pinto et al. (2000) ont observé un effet positif sur la production de café au Mexique, une baisse de rendement

n'étant observée qu'au-delà de 50 % d'ombrage pour des essences ligneuses. La différence entre notre étude et celle de Soto-Pinto et al. (2000) pourrait être due à l'espèce utilisée comme plante d'ombrage. La morphologie du bananier avec des rejets aux différents stades de développement et le port érigé des jeunes feuilles pourrait augmenter l'ombrage exercé par les bananiers quand le soleil n'est pas au zénith, rendant l'ombrage réel moyen le long de la journée plus élevé que celui observé par caméra hémisphérique. Ceci est conforté par le fait que plus on s'approche du bananier, plus l'ombrage augmente pour un même niveau de LAI (Nyombi et al., 2009, Turner et al., 2007). Le bananier ne remplit pas par ailleurs les conditions selon lesquelles la meilleure plante d'ombrage ne doit pas émettre des rejets et ne doit pas être compétitif pour les éléments nutritifs (Beer, 1987). Par ailleurs, le système racinaire du bananier est principalement superficiel et donc peu complémentaire à celui du caféier. Nous n'avons pas observé de niveau d'ombrage qui n'avait pas d'effet sur le rendement de café. Cela montre que même pour la faible densité de bananiers utilisée dans cette étude, le niveau d'ombrage était toujours suffisamment élevé pour avoir un effet négatif sur le rendement de café.

La corrélation positive observée entre le poids de 100 cerises et l'ombrage confirme les résultats d'autres auteurs qui ont travaillé sur l'ombrage des caféiers (Lara-Estrada et Vaast, 2004 ; DaMatta et al., 2008 ; Bosselmann et al. 2009 ; Muschler, 2001 ; Siles et al., 2010). Cela a été confirmé par le fait que l'effet de la densité des bananiers sur le poids de 100 cerises était positif et significatif (tableau 5.4). Le poids de cerises étant un des indicateurs de la qualité de café (Bosselmann et al. 2009), l'ombrage des caféiers par les bananiers a donc contribué à l'amélioration de la qualité des cerises. Pour le moment, il n'y a pas de prime particulière offerte pour des cerises de bonne qualité. Mais, une politique visant à inciter les caféiculteurs à s'orienter plus vers la production de café de qualité semble être actuellement privilégiée par les autorités de la filière café.

Le rendement de banane ne dépendait pas de la densité des caféiers mais uniquement de la densité des bananiers. Cela peut être dû au fait que la biomasse des jeunes caféiers était faible par rapport à celle des bananiers,

quelle que soit la densité des caféiers (figure 5.9). Les bananiers ne ressentent donc vraisemblablement que peu la compétition des caféiers. Pour les jeunes plantations, la plus forte vitesse de croissance des bananiers les rend donc très compétitifs pour les ressources par rapport aux caféiers vu leur importante surface foliaire, la quantité d'éléments nutritifs immobilisés (tableau 5.6) et l'ombrage qu'ils procurent (figure 5.4)

Les rendements de banane les plus élevés ont été observés dans les parcelles avec forte densité de bananier (tableau 5.5). Le rendement en banane à Gitega au 2^{ème} cycle était plus faible que celui du 1^{er} cycle alors qu'à Kayanza où la situation était inverse (tableau 5.6). Cela pourrait être dû à la pauvreté du sol de Gitega (tableau 5.1) qui ne permettrait pas une production soutenue de banane sans apport de fertilisants organiques ou minéraux. La richesse supposée du fumier utilisé à Gitega n'a pas pu permettre de maintenir la production des bananiers car ceux-ci immobilisent et exportent beaucoup plus d'éléments nutritifs que les caféiers (tableau 5.6). La plus faible fertilité du sol à Gitega pourrait également expliquer la baisse significative du poids du régime avec l'augmentation de la densité de bananiers, alors qu'à Kayanza la densité de bananier n'a pas eu d'effet sur ce paramètre (Tableau 5.5). Une diminution du poids du régime suite à une augmentation de la densité de plantation dans des sols pauvres a également été observée par Athani et al. (2009). Le sol de Gitega était pauvre (tableau 5.1) avec une plus faible pluviométrie (figure 5.1), ce qui a entraîné une plus grande compétition entre les plants de bananiers.

5.4.4 Répartition des éléments majeurs dans le compartiment végétal

La biomasse aérienne (figure 5.9) et la biomasse de bananiers recyclée étaient très élevées, surtout dans les parcelles avec forte densité de bananiers. De même, la quantité de banane récoltée (tableau 5.5) était de loin supérieure à la quantité de café (tableau 5.4). Ainsi, les valeurs de K et de N immobilisés dans la biomasse aérienne des bananiers et ceux exportés par les récoltes étaient considérables (tableau 5.6). Les bananiers prélèvent donc beaucoup plus d'éléments nutritifs au sol. Cependant, ils ont l'avantage de recycler plus de biomasse que les caféiers. En effet, la seule biomasse de caféiers recyclée

était uniquement constituée par la chute des feuilles, ce qui est négligeable quand on sait que la biomasse foliaire représente 12,5 % de la biomasse totale (Dossa et al., 2008) et que la chute des feuilles est observé presque uniquement pendant la saison sèche (DaMatta et al., 2008). Le recyclage de la biomasse de bananiers permet donc de restituer une partie importante des éléments nutritifs qui étaient immobilisés. Mais, la quantité immobilisée reste plus ou moins stable car à l'équilibre, la biomasse aérienne des bananiers reste plus ou moins stable. Par rapport aux parcelles de bananiers en monoculture, on évite les pertes par exportations des résidus de bananiers vers les caféiers. La décomposition des résidus de bananiers est rapide car ils ne sont pas ligneux. La vitesse de décomposition de la biomasse de bananiers permet de retourner rapidement au sol les éléments qu'elle contient. Cependant, vu la quantité d'éléments nutritifs exportés et immobilisés et toutes conditions par parcelle restant égales (même lessivage, même volatilisation des éléments, etc.), il faudrait apporter plus d'éléments dans les parcelles avec bananiers pour assurer la durabilité du système. Sinon, l'épuisement du sol sera rapide. Particulièrement, le K et le N sont les éléments à apporter en priorité. D'importantes exportations et immobilisations des éléments nutritifs par les bananiers, particulièrement le K et le N, ont été rapportées par d'autres études (Lahav, 1995 ; Nyombi et al., 2010).

Les quantités d'éléments nutritifs contenus dans la biomasse de caféiers peuvent comporter des erreurs car les données de référence ont été obtenues sur du caféier *Robusta* adulte (Dossa et al., 2008). En effet, les jeunes caféiers peuvent avoir plus de feuilles que les caféiers adultes par exemple et des différences peuvent exister entre le caféier *Arabica* utilisé dans cette étude et le caféier *Robusta*. Mais, vu les faibles valeurs de biomasse de caféiers observées dans nos essais, l'impact de ces erreurs sur les quantités globales d'éléments immobilisés et exportés sera faible et ces erreurs ne pourraient pas changer les tendances observées entre les différents traitements.

5.4.5 Rentabilité de l'association des bananiers avec les caféiers

L'association des bananiers avec les jeunes caféiers semble être une bonne pratique parce que le LER était toujours supérieur à 1, que ce soit à Gitega ou Kayanza et quelles que soient les densités de bananiers ou de caféiers. Une valeur de LER supérieure à 1 signifie que les rendements étaient plus élevés en association qu'en monoculture (Willey, 1988). Elles étaient cependant inférieures à la valeur de 2,3 (van Asten et al., 2011) observée en Ouganda dans l'association des bananiers avec le café *Arabica*. La différence entre les valeurs du Burundi et les valeurs de l'Ouganda serait due au stade de développement des plants, qui avaient déjà atteint l'équilibre de production pour les deux cultures en Ouganda alors qu'au Burundi, c'était le début de la récolte de café.

Les revenus, les valeurs ajoutées (VA) et les résultats bruts de l'exploitation (RBE) étaient plus élevés dans les parcelles avec forte densité de bananiers (Tableau 5.7). La contribution de la banane dans le revenu global était très élevée, supérieure à 90 %. Ceci doit être compris uniquement dans le cas d'une première production des caféiers nouvellement plantés. En effet, le rendement à la première année de production est faible (Gaie et Flémal, 1988). Dans les parcelles avec bananiers, les valeurs de VA et de RBE étaient toujours positives. Par contre, sur base des prix moyens, les valeurs de VA et de RBE des parcelles de caféiers en monoculture étaient négatives avec plus de 1000 \$ de déficit pour la VA et plus de 2500 \$ pour le RBE (tableau 5.7). L'augmentation du prix de café ne ferait qu'atténuer faiblement ces déficits (annexe 5.7). De la sorte, les caféiculteurs ne peuvent pas couvrir le coût des intrants, et moins encore la main d'œuvre engagée sur les 3 premières années. Vus les investissements nécessaires dans les parcelles de caféiers et le déficit à combler, il est peu probable que les caféiculteurs puissent recouvrer les pertes enregistrées dans un délai raisonnable. Le paillage était l'activité la plus chère et représentait plus de 50 % des dépenses (Figure 5.14). Cela risque de s'aggraver avec la diminution des ressources de paillis (Ngayempore, 2007).

Les rendements de café présentés ici sont uniquement relatifs à la première année de production, trois ans après la plantation. Ils ne peuvent donc pas être généralisés sur plusieurs années, mais ils confirment l'important déficit qu'encourrait un producteur qui se lancerait dans la caféiculture. Cela expliquerait le faible taux de régénération de la caféière du Burundi, l'âge moyen des plantations de café étant de 29 ans (chapitre 2). L'association de bananiers avec des jeunes caféiers permettrait de rentabiliser la période de latence en procurant au producteur une source d'alimentation et de revenus. Selon le site et la densité des bananiers, cette association a cependant eu un impact plus ou moins négatif sur le développement du caféier. Il conviendrait à présent de vérifier si ces tendances se maintiennent à long termes (caféiers matures). En particulier, à long terme, l'association des caféiers avec les bananiers pourrait montrer de bons résultats suite à la réduction de la variation bisannuelle de production de café telle qu'observée dans les systèmes ombragés (DaMatta, 2004).

5.5 Conclusion

Le rendement de café a été négativement affecté par la densité des bananiers, avec un rendement plus faible dans les parcelles avec forte densité de bananiers. Les bananiers ont aussi affecté négativement les caractéristiques de croissance des caféiers comme le diamètre à la base, le rayon de la canopée et le nombre de paires de rameaux primaires. Même la hauteur, qui normalement devrait être plus élevée dans les systèmes ombragés, a été plus faible dans les parcelles avec forte densité de bananiers, ce qui pourrait résulter de la forte compétition exercée par les bananiers sur les jeunes plants de caféiers. Cependant, la réduction de l'ombrage exercé par les bananiers observé à Gitega dans la seconde moitié de la période d'observation a permis aux caféiers sous ombrage de réduire l'écart des caractéristiques de croissance avec les caféiers sans ombrage. Par ailleurs, Le poids de 100 cerises a cependant augmenté avec l'ombrage, signe que les bananiers ont permis d'améliorer une des composantes de la qualité de café.

Le rendement de banane n'a pas été affecté par la densité des caféiers, reflétant la faible compétitivité des jeunes caféiers par rapport aux bananiers.

Par ailleurs, il augmentait avec l'augmentation de la densité des bananiers. Une compétition des bananiers entre eux a été observée avec un impact sur le poids moyen du régime et la biomasse produite à Gitega où le sol était plus pauvre et la pluviométrie plus faible. Les bananiers ont affecté significativement la teneur en P dans le sol de Gitega, avec des diminutions de P plus faibles dans les parcelles avec forte densité de bananiers. Les teneurs de N et de Mg dans les feuilles augmentaient avec l'augmentation de l'ombrage. Ceci reflète une adaptation au déficit de lumière car ces deux éléments entrent dans la composition de la chlorophylle.

Les bananiers étaient plus compétitifs que les caféiers pour les éléments nutritifs. Les éléments exportés ou immobilisés par les plants de bananiers étaient considérables bien qu'il y ait un recyclage d'une partie importante de ces éléments. L'association des jeunes caféiers avec les bananiers était plus rentable que la monoculture de café ou de banane, car le LER était supérieur à 1 et les revenus, les valeurs ajoutées et les résultats bruts de l'exploitation observés dans les parcelles associés étaient significativement plus élevés. L'association des jeunes caféiers avec les bananiers pourrait être proposée à condition de bien gérer la biomasse des bananiers comme la densité et l'élagage des feuilles. En garantissant aux producteurs une source de revenus, cela pourrait faciliter l'acceptation de la culture de café par les producteurs et le renouvellement de la caféière burundaise. Il convient cependant de s'assurer que la présence des bananiers ne nuise pas à la productivité globale et à la durabilité du système sur le long terme. La compensation des éléments nutritifs exportés par les bananiers pourrait être facilitée grâce aux revenus plus élevés obtenus dans les parcelles en association. Les résultats ont été obtenus dans l'association de bananiers avec des jeunes caféiers. Une étude similaire avec des caféiers matures en production permettrait d'évaluer les interactions entre ces deux cultures à un stade avancé de développement des caféiers.

CHAPITRE 6 : LES EFFETS AGRONOMIQUES ET LA RENTABILITE DE L'ASSOCIATION DES CAFEIERS MATURES AVEC DES JEUNESANIER

Résumé

Au Burundi, le renouvellement des caféiers et la taille de régénération ne sont pas régulièrement pratiqués. De la sorte, les caféiers sont âgés. Les essais de l'association des bananiers avec les jeunes caféiers montrent que les bananiers affectent négativement la croissance et le rendement des caféiers. Ces résultats observés avec des jeunes caféiers ne seraient probablement pas les mêmes avec des caféiers en production. Pour analyser les performances agronomiques de l'association des bananiers avec des caféiers matures, des essais ont été installés à Gitega et Kayanza. Le suivi de ces essais a été réalisé sur une période de deux ans. Les caféiers de Gitega, plus âgés, ont affecté la croissance et le rendement des bananiers. Le rendement de banane à Gitega était en moyenne de 12 T/ha par cycle dans les parcelles de bananiers en monoculture contre 11 T/ha dans les parcelles de bananiers avec forte densité de caféiers. L'impact négatif des caféiers sur la croissance des rejets de bananiers émergents a été observé dans les deux sites. La croissance des caféiers et le rendement ont été négativement affectés par la présence des bananiers à Kayanza où les caféiers étaient plus courts et se retrouvaient ombragés par les bananiers. Dans ce site, le rendement était de 1,1 T de café cerise par ha dans les parcelles de caféiers en monoculture contre 0,9 T/ha dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. A Kayanza, les teneurs en N et en Mg dans les feuilles de caféiers étaient élevées dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers, ce qui constitue une réponse à l'ombrage. A Gitega, la teneur en P dans les feuilles de caféiers diminuait avec l'augmentation de la densité des bananiers. Dans les deux sites, la teneur en K dans les feuilles de caféiers était plus élevée dans les parcelles en monoculture. Il n'y avait pas eu d'effet des caféiers sur les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de bananiers. Les quantités d'éléments immobilisés ou exportés étaient élevées dans les parcelles en association et augmentaient avec l'accroissement de la densité des cultures. Les revenus, la valeur ajoutée et le résultat brut de l'exploitation étaient plus élevés dans les

parcelles de caféiers en association que dans les parcelles de caféiers en monoculture. Les interactions entre les deux cultures dépendaient du degré de développement de l'une d'elles. Quand les caféiers étaient plus âgés les bananiers étaient négativement affectés par la présence des caféiers. Lorsque les caféiers étaient jeunes ces derniers étaient négativement affectés par la présence des bananiers.

6.1 Introduction

Au Burundi, le caféiculture est recommandée en culture pure. Cependant, cette pratique fait face à plusieurs contraintes qui affectent la production de café et réduisent l'intérêt des agriculteurs pour cette culture. La production de café est cyclique avec une grande amplitude entre l'année de bonne production et l'année de mauvaise production (Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008). Cette cyclicité de production affecte non seulement les recettes du Gouvernement mais aussi les revenus des caféiculteurs (BRB, 2010). En plus de cette cyclicité, le prix de café cerise vendu par les caféiculteurs fluctue beaucoup et dépend des cours mondiaux (Ndayikengurutse, 2000). Pendant certaines périodes, le prix de café cerise est inférieur au prix des autres cultures comme le bananier (Kimonyo et Baranyizigiye, 2007 ; Faostat, 2013). Or, le caféier exige plus d'investissements en intrants et en main d'œuvre. La taille, le paillage et l'application des pesticides sont autant d'opérations indispensables dans la gestion d'une caféière (Gaie et Flémal, 1988 ; ISABU-OCIBU, 2009). Les revenus tirés de la vente des caféiers ne permettent cependant pas toujours de couvrir les dépenses engagées (Ngayempore, 2007 ; Gahungu, 2008). Afin d'augmenter la productivité des caféières, l'association des caféiers avec des cultures vivrières pendant les premières années de son installation a été testée et recommandée par la recherche au Burundi (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007). La recommandation était d'associer les caféiers avec des cultures annuelles comme le haricot, le soja, l'arachide (Gaie et Flémal, 1988 ; Nduwayo, 2007) et la tomate (Nduwayo, 2007). Or, même pendant la période de pleine production, le caféier reste peu rentable (Gahungu, 2008). L'association du caféier avec des cultures pérennes comme le bananier pourrait constituer une alternative intéressante, mais elle a été depuis longtemps

découragée par les services d'encadrement (Gaie et Flémal, 1988). Or, dans les conditions du Burundi, le bananier fait partie des cultures ayant les plus grands rendements (Faostat, 2013). La rentabilité du bananier est aussi plus élevée car il est moins exigeant, par exemple en main d'œuvre (Bagamba et al., 1998). En plus, le bananier produit beaucoup de biomasse (Rishirumuhirwa, 1998) qui peut être recyclée comme paillis dans les parcelles de caféiers (Cochet, 1996).

L'association des bananiers avec des caféiers matures crée de l'ombrage sur l'une des deux cultures en fonction du degré de développement de l'autre. Or, l'ombrage des caféiers affecte le rendement de ces derniers et leur morphologie (Montoya et al., 1961 ; Morais, 2003 ; Campanha et al., 2004). Le rendement de café est plus faible dans les caféiers sous ombrage (Campanha et al., 2004 ; Jaramillo-Botero et al., 2010 ; Siles et al., 2010). La morphologie des caféiers est aussi affectée par l'ombrage. Ainsi, l'ombrage stimule la croissance en hauteur des caféiers (Campanha et al., 2004) et ralentit la croissance des rameaux, la production de feuilles et l'accroissement de la circonférence à la base (Montoya et al., 1961; Campanha et al., 2004). Une étude détaillée de l'impact des bananiers associés aux jeunes caféiers a été réalisée dans le chapitre 5. Les résultats ont montré que les bananiers ont affecté négativement le rendement et les caractéristiques de croissance des caféiers. Néanmoins, d'autres auteurs ont trouvé que le rendement et les caractéristiques des caféiers étaient statistiquement les mêmes sous ombrage et en monoculture (Hagggar et al., 2011 ; Steiman et al., 2011), ce qui pourrait faire penser que les résultats observés dans l'association avec les jeunes caféiers pourraient être différents de ceux obtenus avec des caféiers matures. L'ombrage améliore par ailleurs la qualité du café (Guyot et al., 1996). L'effet de l'ombrage sur l'augmentation du poids des cerises et des grains, qui est un indicateur de qualité, a été montré par plusieurs auteurs (Muschler, 2001 ; Lara-Estrada et Vaast, 2004 ; DaMatta et al., 2008 ; Bosselmann et al., 2009 ; Siles et al., 2010 ; chapitre 5). D'après ces auteurs, le poids de 100 cerises et de 100 grains augmente avec l'augmentation de l'ombrage.

Aussi, comme pour le caféier, l'association du bananier avec d'autres cultures est susceptible d'affecter ses performances et son rendement. Lorsqu'il se trouve dans la strate inférieure - ce qui serait le cas de rejets de bananiers dans des plantations matures de caféiers - l'ombrage réduit la hauteur des plants, la circonférence du pseudotrunc, la surface foliaire, le nombre de feuilles et de rejets émergents (Israeli et al., 1995 ; Saleh, 2005). Il diminue aussi le poids du régime et des doigts. La matière sèche du bananier diminue également avec l'augmentation de l'ombrage (Senevirathna et al., 2008). Pour le plantain, l'ombrage augmente la durée de la période allant de la plantation jusqu'à la floraison, réduit la circonférence à la base et peut conduire à l'étiollement du plant (Norgrove et Hauser, 1998). Le développement racinaire est également négativement affecté par l'ombrage, avec une réduction de la densité racinaire du bananier lorsque l'ombrage augmente (Dreiseidler et al., 2008). Dans certaines conditions, le rendement du bananier et de la culture associée restent identiques en association et en monoculture. L'association du bananier avec l'hévéa dans des conditions humides du Sri Lanka (Rodrigo et al., 1997) par exemple a montré que le poids du régime était le même en association et en culture pure. En plus, la production de latex était plus élevée dans les parcelles où l'hévéa était associé avec le bananier (Rodrigo et al., 2000 ; Rodrigo et al., 2005).

Malgré que l'association des bananiers avec les caféiers ne soit pas recommandée, les agriculteurs trouvent leur intérêt dans l'association de ces deux cultures. Certains agriculteurs ont déjà installés des bananiers dans leurs caféières (chapitre 2) ou exploitent activement la zone tampon autour des parcelles de caféiers (chapitre 3). L'association de ces deux cultures permet d'augmenter l'efficacité d'utilisation de la terre (van Asten et al., 2011). Elle améliore aussi le sol si les résidus de bananiers sont incorporés dans ces parcelles (McIntyre et al., 2001), optimisant ainsi le recyclage des nutriments. D'une manière générale, l'association des cultures permet de réduire les intrants par une utilisation plus rationnelle des ressources disponibles (eau, nutriments, lumière, main d'œuvre) et d'obtenir une production échelonnée au niveau de la ferme (Bekunda and Woomer, 1996 ; Bekunda, 1999). Dans le cas particulier des associations banane-café, des bénéfices agronomiques et

économiques ont été observés (Chipungahelo, 2006 ; Van Asten et al., 2011). Au chapitre 5, nous avons montré que l'association des bananiers avec de jeunes caféiers permet d'augmenter sensiblement les revenus des agriculteurs. Cependant, le rendement de café était encore faible vu le jeune âge des caféiers et l'impact des caféiers sur la croissance et le rendement des bananiers était nul. Pourtant, des caféiers matures pourraient affecter la croissance et le rendement des bananiers, comme cela a été observé sous ombrage (Israeli et al., 1995 ; Saleh, 2005). En outre, les bananiers pourraient aussi affecter la croissance et le rendement des caféiers car l'augmentation de la biomasse et de la hauteur des bananiers est plus rapide (chapitre 5). Ainsi, contrairement au chapitre 5 où seuls les caféiers ont été affectés par l'association avec les bananiers, les interactions entre ces deux cultures risquent d'être fortes en présence des caféiers matures, avec des effets réciproques sur leur rendement et leur croissance. La contribution du café dans les revenus pourrait aussi être plus élevée car la production serait certainement plus élevée pour les caféiers matures que les caféiers à la première année de production.

L'objectif de ce chapitre était de montrer les performances agronomiques et la rentabilité de l'association de bananiers avec des caféiers matures. L'hypothèse de travail était que les caféiers réduisaient les performances de croissance du bananier et affectaient négativement son rendement. De même, les bananiers affectaient négativement le rendement et les performances de croissance des caféiers.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Description des sites

L'étude a été réalisée dans les sites de Gitega et Kayanza au Burundi de novembre 2009 à décembre 2011. Gitega et Kayanza sont des centres de l'ISABU spécialisés dans la recherche sur le café. Le site de Gitega est situé au centre du pays à 1651 m d'altitude à 29,93323° de longitude est et à 03,36162° de latitude sud. Le site de Kayanza quant à lui est situé au nord du Burundi à

1812 m d'altitude à 29,71292° de longitude est et à 02,90188° de latitude sud (figure 0.1). Le sol de Gitega est un Acrisol tandis que celui de Kayanza est un Ferrisol. Les caractéristiques physico-chimiques moyennes des sols des parcelles expérimentales de Gitega et Kayanza au début de l'essai sont reprises ci-dessous (tableau 6.1).

Tableau 6.1 : Les moyennes et les écart-types des résultats d'analyse du sol de Gitega et Kayanza sur deux profondeurs (0-10 cm et 10-30 cm) au début des essais. Les valeurs entre parenthèses représentent les écart-types.

	Corg	Ntotal	P	Bases extractibles (Mehlich-3)		
				K	Ca	Mg
Unités	%	%	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Gitega						
0-10 cm	3,1 (0,5)	0,2 (0,2)	3,8 (3,8)	0,3 (0,1)	0,5 (0,1)	0,3 (0,1)
10-30 cm	2,5 (0,4)	0,2 (0,3)	1,8 (1,5)	0,3 (0,1)	0,3 (0,2)	0,2 (0,1)
Kayanza						
0-10 cm	3,8 (0,5)	0,3 (0,2)	40,6 (23,7)	1,4 (0,3)	1,0 (0,3)	0,7 (0,1)
10-30 cm	2,4 (0,3)	0,2 (0,1)	22,2 (14,9)	1,1 (0,3)	0,8 (0,3)	0,5 (0,2)

Les données climatiques ont été mesurées à l'aide d'une station météorologique automatique installée dans les deux sites. La pluviométrie moyenne annuelle pendant la période de l'essai était de 1275 mm et 1535 mm respectivement à Gitega et Kayanza. La température annuelle moyenne était de 20,2°C à Gitega et 19,1°C à Kayanza. Les moyennes mensuelles des précipitations et des températures sur toute la période de collecte des données sont reprises dans la figure 6.1.

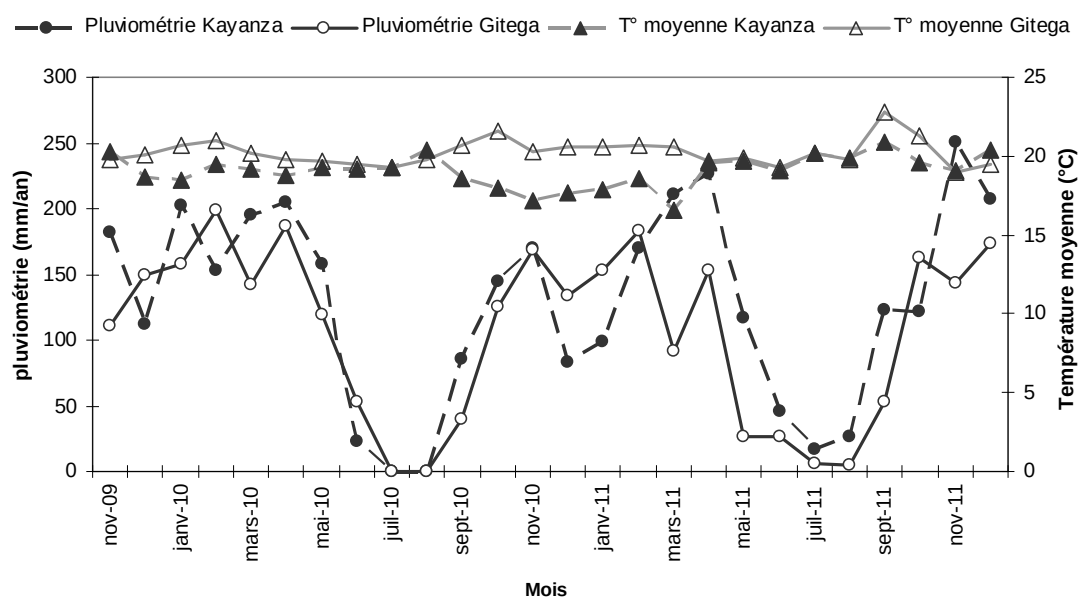


Figure 6.1 : Moyennes des précipitations (pluviométrie) et des températures mensuelles à Gitega et à Kayanza de novembre 2009 à décembre 2011.

6.2.2 Installation et entretien des essais

Des rejets de bananiers ont été installés dans des plantations existantes de caféiers au mois de novembre 2009 dans les sites de Gitega et Kayanza. Ces caféiers étaient en production. Sur les deux sites, les caféiers étaient âgés de 25 à 27 ans (photo 6.1).



Photo 6.1 : Essais d'association des bananiers avec des caféiers en productions à Kayanza (photo A. Nibasumba).

La densité de plantation de départ était de 1,5 m dans les lignes et de 2,5 m entre les lignes dans les deux sites, soit 2747 plants/ha. Les caféiers étaient conduits en multicaulie avec 3 tiges au maximum par plant. La taille de

production était effectuée par enlèvement des gourmands. Les caféiers de Kayanza étaient âgés de 4 ans après la taille de régénération et ceux de Gitega de 8 ans après la taille de régénération. Les caféiers étaient maintenus paillés tout au long de l'année avec un paillage de graminées sauvages à Gitega et du *Themeda* à Kayanza. Il n'y avait pas eu d'apport d'engrais pendant quatre années consécutives avant l'installation des essais. Le mode de gestion était homogène sur l'ensemble des parcelles.

Un même dispositif expérimental a été utilisé sur les deux sites. Le dispositif expérimental était en blocs aléatoires complets avec 3 répétitions. Chaque bloc était constitué de 8 traitements. Ces traitements étaient une combinaison factorielle de 2 densités de bananiers et deux densités de caféiers, à la fois en culture associée et monoculture. Pour installer les bananiers en monoculture, tous les plants de caféiers présents antérieurement ont été arrachés. La densité de caféiers de référence était celle de 2747 plants/ha, qui est la densité de plantation la plus pratiquée au Burundi (ISABU-OCIBU, 2009), et celle des bananiers était de 1681 plants/ha, proche de la densité observée dans les systèmes intensifs dans la Région des Grands Lacs africains (Odeke et al., 1999). La densité des traitements faible densité était la moitié de la densité haute densité, soit 861 plants de bananiers et 1394 plants de caféiers par hectare. Pour obtenir la faible densité de caféiers, la moitié des caféiers en place antérieurement a été arrachée.

La parcelle expérimentale était de 15 m x 10 m. En pratique, chaque parcelle comptait 4 lignes de caféiers ou 5 lignes de bananiers pour le cas de la monoculture. Les parcelles où ces deux cultures étaient associées comptaient 4 lignes de caféiers et 5 lignes de bananiers. Dans ce cas, les lignes de bananiers et des caféiers alternaient mais les bananiers étaient toujours placés sur les lignes des bordures. La distance entre deux lignes de la même espèce était de 2,5 m dans toutes les parcelles, quel que soit le traitement. Pour tous les traitements, la longueur des lignes était de 15 m (annexe 5.1).

Avant l'installation des bananiers, des trous de plantations ont été creusés. Chaque trou avait les dimensions de 60 cm de largeur, 60 cm de longueur et 80

cm de profondeur. Deux semaines avant l'installation des plants de bananiers, du fumier avait été appliqué dans chaque trou de plantation à raison de 10 kg de fumier. Après le sarclage de février 2010, 100 g d'urée et 50 de DAP ont été appliqués (enfoui à 5 cm de profondeur et à un rayon de 40 cm à partir du plant) au pied de chaque plant de bananier et de caféier. Dans la suite de la conduite des essais, aucune autre application d'engrais minéraux n'a été effectuée. Dans le but d'avoir la même quantité et la même distribution du fumier et des engrais dans chaque traitement, d'autres trous ont été creusés dans les rangées faible densité et la même quantité de fumier et d'engrais a été appliquée même si aucun plant n'a été installé dans ces trous. Ainsi, dans chaque parcelle, il y avait le même nombre de trous de bananiers et le même nombre de trous de caféiers même si le nombre de plants était différent. Les traitements sont décrits ci-dessous (tableau 6.2).

Tableau 6.2 : Descriptions des 8 traitements des essais

	Bananiers		Caféiers		Ecartement entre plants ⁵ (m)	
Traitement	HDB	LDB	HDC	LDC	Bananiers	Caféiers
1. HDB ¹	X				2,5	
2. LDB ²		X			5	
3. HDC ³			X			1,5
4. LDC ⁴				X		3
5. HDC + HDB	X		X		2,5	1,5
6. HDC + LDB		X	X		5	1,5
7. LDC + HDB	X			X	2,5	3
8. LDC + LDB		X		X	5	3

¹ HDB : bananiers a forte densité (« high density »); ² LDB : bananiers à faible densité (« low density ») ; ³ HDC : caféiers à forte densité ; ⁴ LDC : caféiers à faible densité. ⁵ Au sein d'une rangée

La variété de bananier utilisée était une variété à bière appelée *Igitsiri* et la variété de caféier était la variété *Jackson 2/1256*. Ces variétés étaient les

mêmes que celles utilisées dans les essais d'association des bananiers avec des jeunes caféiers (chapitre 5). L'entretien des essais consistait en un sarclage manuel chaque fois que les adventices apparaissaient. En plus du sarclage, un paillage graminéen annuel et intégral a été réalisé au mois d'avril à raison de 10 tonnes de matières sèches par hectare. Le type de paillis était choisi selon sa disponibilité dans chacun des sites. A Kayanza, le paillis était constitué par le *Themeda* et à Gitega par l'*Eragrostis*. Sur les plants de bananiers, un contrôle du nombre de rejets a été effectué, ne laissant que 3 rejets par plant : le rejet mère, le rejet fille et le rejet petite-fille. Tous les deux mois, les rejets émergents non retenus, les feuilles mortes et les résidus obtenus après la récolte des bananes ont été découpés et pesés. Une feuille était considérée comme morte lorsque plus de 50 % de la feuille était jaunie. Après le pesage, ces résidus ont été répartis sur toute la parcelle de provenance. La matière sèche de la biomasse de bananiers a été déterminée par séchage d'un échantillon composite de 5 kg par site à l'étuve pendant 96 heures à 65°C (jusqu'à poids constant). Le contrôle des insectes ravageurs des caféiers a été réalisé à l'insecticide DECIS EC avec quatre applications par campagne agricole (août-juillet): deux applications au mois de novembre et deux autres applications au mois de février. Contre les maladies des caféiers (rouilles et anthracnose) et les maladies et ravageurs des bananiers, aucune application de pesticides n'a été réalisée.

6.2.3 Détermination des rendements et des caractéristiques morphologiques des caféiers et des bananiers

Toutes les mesures de rendement et de croissance ont été réalisées sur la parcelle utile, c'est-à-dire en excluant les plants de bordures ainsi que les plants situés à l'extrémité des rangées. Pour les plants de caféiers, les mesures ont été réalisées sur 18 plants et 8 plants, respectivement pour la forte densité et la faible densité. Pour les bananiers, les mesures ont été prises sur 15 plants pour la forte densité et 6 plants pour la faible densité. Le rendement de café et de banane a été mesuré uniquement pour l'année 2011, c'est-à-dire une seule récolte de café et un seul cycle de banane. Au cours l'année 2010, les bananiers n'étaient pas encore en production. De plus, les bananiers installés

au mois de novembre 2009 étaient encore moins développés et avaient donc moins d'influence sur les caféiers. La mesure du rendement de café a été effectuée par des pesées successives des cerises de café récoltées dans chaque parcelle. La prise des mesures d'estimation du poids du régime a été réalisée entre juin 2011 et octobre 2011 et celle de café entre avril 2011 et juillet 2011. Le poids du régime de banane a été calculé en utilisant la relation allométrique proposée par Wairegi et al. (2010) reprise dans la formule 6.1 avec un R^2 de 0,73. Cette formule a été établie pour des bananiers d'altitude et a été utilisée par Wairegi et al. (2010). Les paramètres d'estimation du rendement de bananiers ont été mesurés au stade de mains femelles découvertes chaque fois que le bananier entrait en floraison.

$$\ln(\text{PR}) = - 6,795 + 0,755 \ln(\text{CRBB}) + 1,059 \ln(\text{CR1mB}) + 0,569 \ln(\text{NM}) + 0,478 \ln(\text{ND}) \quad (6.1)$$

Avec PR : poids du régime (kg), CRBB : circonférence à la base (cm) ; CR1mB: circonférence à 1 m (cm) ; NM : nombre de mains ; ND : nombre de doigts de la 2^{ème} rangée de l'avant dernière main.

Le suivi de la croissance des caféiers a été réalisé sur deux paramètres, la hauteur (HTC) et le diamètre à la base (DBC). Celui des bananiers a été réalisé sur la hauteur (HTB), la circonférence à la base (CRBB) et la surface foliaire totale (TLA). La prise des données de croissance de bananiers et de caféiers a été effectuée au mois de mars 2010, octobre 2010 et avril 2011. Les données sur les caractéristiques de croissance des bananiers ont été mesurées sur les plants-mères et les rejets ayant plus de 1 m de hauteur. La surface foliaire totale de chaque plant de bananier et de ses rejets a été calculée avec la formule (6.2) de Nyombi et al. (2010), avec un R^2 de 0,85. Cette formule a été utilisée car elle a été développée dans les conditions de l'Ouganda, proches de celles du Burundi, et sur les variétés de bananiers d'altitudes, les mêmes que celles cultivées au Burundi.

$$\text{TLA predicted} = [(0,68 \times l \times w) \times n] \quad (6.2)$$

Avec : TLA: la surface foliaire totale par plant (m²) ; l : la longueur de la feuille du milieu (m) ; w : la largeur de la feuille du milieu (m) et n : le nombre de feuilles vivantes.

6.2.4 Détermination des biomasses et de la répartition des nutriments majeurs dans le compartiment végétal

La biomasse aérienne des bananiers (matière sèche) a été calculée en utilisant l'équation allométrique entre la hauteur du plant et la biomasse aérienne totale par plant (6.3) développée par Nyombi et al. (2009) sur les bananiers d'altitude en Ouganda, et avait un R² de 0,98.

$$\text{ABG} = 9,29 \times 10^{-6} \times x^{2,301} \quad (6.3)$$

Avec ABG = la biomasse aérienne totale (kg) et x la hauteur du plant (cm).

La détermination de la biomasse aérienne (matière sèche) des caféiers a été réalisée avec la formule (6.4) de Segura et al. (2006) avec un R² de 0,94. Cette formule permet de déterminer la biomasse du caféier *Arabica*, le même que celui de notre étude. Elle a aussi été utilisée par Kuyah et al. (2012) dans une étude menée au Kenya.

$$\text{Log}_{10}(\text{BT}) = -1,113 + 1,578 \times \text{Log}_{10}(\text{d15}) + 0,581 \times \text{Log}_{10}(\text{h}) \quad (6.4)$$

Où BT = la biomasse aérienne totale des caféiers (kg/plant), d15 = diamètre du pied à 15 cm au-dessus du sol (cm) ; h = la hauteur du plant de caféier (m).

Pour les bananiers, les teneurs en éléments nutritifs ont été déterminées dans la biomasse aérienne des parcelles, dans les régimes récoltés et dans la biomasse recyclée. Dans la biomasse aérienne (sans régime), la fraction des feuilles a été supposée égale à 12 % contre 82 % pour les pseudotroncs (Yamaguchi et Araki, 2004). Pour les régimes récoltés, 86 % étaient constitués

de doigts et 14 % par des pédoncules. De plus, les doigts avaient une teneur en eau de 25 % et les pédoncules 14 % (S. Bizimana, doctorat en cours). Pour les caféiers, les teneurs en éléments nutritifs ont été déterminées dans la biomasse aérienne des parcelles et dans les cerises récoltées. Dans la biomasse aérienne, la fraction des feuilles a été supposée égale à 12,5%, celle des rameaux égale à 12,5 % et celle des tiges égale à 75 % (Dossa et al., 2008). La conversion du poids de cerises en poids de café marchand a été réalisée en divisant le poids de cerises par le coefficient de 5,82 proposé par Gaie et Flémal (1988).

Les valeurs utilisées pour calculer les teneurs en éléments nutritifs majeurs dans les différentes fractions de la biomasse de bananiers ont été celles proposées par S. Bizimana (non publié) et sont reprises dans le tableau 5.3. Les mêmes valeurs ont été utilisées pour les deux sites. Pour les caféiers, les rapports des éléments nutritifs dans les rameaux et dans les tiges par rapport aux teneurs dans les feuilles ont été calculés à partir des données obtenues par Dossa et al. (2008) sur le caféier *Robusta*. Ces rapports ont été utilisés pour déterminer les teneurs en éléments nutritifs dans les rameaux et dans les tiges à partir des données de feuilles obtenues dans nos essais. Seules les moyennes pour chaque site ont été utilisées car les différences entre les traitements étaient faibles. Pour calculer la quantité d'éléments nutritifs exportés par la récolte de café (café marchand), les valeurs proposées par Cannell et Kimeu (1971) ont été utilisées.

Pour connaître la quantité de nutriments recyclés par les caféiers, les rapports entre les nutriments absorbés (immobilisés dans la biomasse) et les nutriments recyclés dans les feuilles de caféiers ont été déterminés à partir des résultats de Malvolta et al. (1990). A partir des valeurs calculées de nutriments immobilisés par les caféiers dans chaque parcelle, la quantité de nutriments recyclés par les feuilles de caféiers a été déterminée en divisant les quantités de nutriments immobilisés par ces rapports. Ces rapports étaient de 4,4, 3,0, 3,5, 2,1 et 1,9 respectivement pour le N, le P, le K, le Ca et le Mg.

Tableau 6.3 : Teneurs de N, P, K, Ca et Mg utilisées pour le calcul des quantités d'éléments nutritifs présents dans les différentes fractions de la biomasse de caféiers et de bananiers.

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Bananier¹					
Feuilles	0,7	0,1	2,5	0,7	0,9
Pseudotrunc	1,0	0,1	3,2	0,4	0,7
Pédoncule	1,2	0,1	7,1	0,4	0,3
Doigts	1,1	0,1	3,3	0,1	0,3
Caféier					
Gitega					
Feuilles ²	3,0	0,12	3,4	0,9	0,5
Rameaux ²	1,1	0,02	2,0	0,5	0,2
Tiges ²	0,5	0,01	0,4	0,2	0,04
Café verts ^{3*}	31,4	2,4	39,4	3,6	2,7
Kayanza					
Feuilles ²	2,7	0,3	3,2	0,3	0,4
Rameaux ²	1,0	0,04	1,8	0,2	0,1
Tiges ²	0,4	0,02	0,4	0,1	0,0
Café verts ^{3*}	31,4	2,4	39,4	3,6	2,7

¹ Les données utilisées sont celles de Bizimana ; ² obtenus à partir des données de Dossa et al. (2008) ; ³ selon Cannell et Kimeu (1971) * Les valeurs données sont pour 1000 kg de café verts.

6.2.5 Détermination des caractéristiques physico-chimiques du sol et des teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles

Dans chaque parcelle, l'échantillonnage du sol a été réalisé à l'aide d'une tarière à deux profondeurs différentes (0-10 cm et 10-30 cm) sur 10 points sélectionnés au hasard. Le sol provenant de ces 10 points a été bien mélangé pour faire un échantillon composite par parcelle pour chaque profondeur. L'échantillonnage a été réalisé à deux périodes : avant l'installation des essais (octobre 2009) pour avoir la situation de référence, et au mois de mai 2012 pour voir l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du sol à la fin des essais. Après chaque échantillonnage, le sol a été séché à l'air libre dans un local couvert pendant 3 à 4 jours pour réduire son humidité.

Les analyses de sols ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Avant l'analyse, le sol a été séché et tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm de mailles. Le carbone organique (MO) du sol a été déterminé à l'aide de la méthode Walkley-Black. L'azote total a été extrait en utilisant la solution de digestion de Kjeldahl et la mesure a été faite par spectrophotométrie. Le P, Ca, Mg et K disponibles ont été extraits avec la solution Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Le P a été déterminé par colorimétrie alors que K, Ca et Mg ont été dosés à l'aide d'un spectromètre à absorption atomique.

L'échantillonnage des feuilles de bananiers a été fait en utilisant la Méthode d'Echantillonnage Internationale de Référence (MEIR) proposée par Martin-Prével (1969) d'une façon progressive à chaque fois que les bananiers entraient en floraison. La troisième feuille comptée à partir de la feuille récemment épanouie a été sélectionnée sur un plant en floraison au stade des mains femelles découvertes. Une bande de 10 cm se trouvant au milieu du limbe de part et d'autre de la nervure centrale a été sectionnée. Après élimination de la nervure, chacun des deux morceaux a été divisé en deux parties égales, parallèlement à l'ex-nervure centrale. Seules les moitiés internes ont été conservées pour les analyses au laboratoire. L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été réalisé au début des essais (octobre 2009) et à la fin du suivi des essais (octobre 2011). Cette période correspondait au début de la floraison des caféiers. L'échantillonnage des feuilles de caféiers a été fait sur la troisième ou la quatrième paire de feuilles comptées à partir de la dernière paire de feuilles récemment épanouie (Wrigley, 1988). Dans chaque parcelle de caféiers, 8 pieds ont été choisis au hasard dans la parcelle utile et sur chaque pied, 6 paires de feuilles ont été récoltées sur 5 parties différentes du plant : en bas, quart inférieur, milieu, quart supérieur et la partie supérieure. Les feuilles de bananier ou de caféier provenant de la même parcelle ont été mélangées pour avoir un échantillon composite de feuilles de bananiers et un échantillon composite de feuilles de caféiers.

Après l'échantillonnage, les feuilles ont été nettoyées manuellement à l'aide d'un tissu pour enlever les traces de poussières et séchées dans une étuve à

une température 60°C pendant 96 heures avant le stockage. Les analyses de feuilles de caféiers et de bananiers ont été réalisées au Laboratoire National de Recherche Agronomique de Kawanda en Ouganda. Les éléments analysés étaient N, P, K, Ca, Mg et Zn. Les feuilles ont été séchées à l'étuve pendant 48-96 heures, broyées et tamisées avec un tamis de 2 mm d'ouverture. Le produit obtenu a été digéré dans une solution d'acide sulfurique et sélénique. Les teneurs en N et en P ont été obtenues par colorimétrie, et la teneur en K, Ca, Mg et Zn par spectrométrie à absorption atomique.

6.2.6 Détermination de la rentabilité de l'association bananiers-caféiers

La rentabilité a été déterminée uniquement pour l'année 2011. En effet, en 2010 le bananier n'était pas encore en production, ce qui aurait conduit à une sous-évaluation de la rentabilité du système pour cette année-là. Pour analyser la rentabilité, plusieurs paramètres ont été déterminés. Le rapport d'équivalence de la terre (LER : land equivalent ratio) a été calculé avec la formule 6.5 proposée par Willey (1985). Une valeur supérieure à 1 montre que l'association des deux cultures est avantageuse par rapport aux cultures pures.

$$LER = \frac{Y_{cint}}{Y_{cmon}} + \frac{Y_{bint}}{Y_{bmon}} \quad (6.5)$$

Avec : Y_{cint} : rendement de café en association avec le bananier (T/ha) ; Y_{cmon} : rendement de café en monoculture (T/ha) ; Y_{bint} : rendement de banane en association avec le caféier (T/ha) ; Y_{bmon} : rendement de banane en monoculture (T/ha).

Le revenu par traitement et par hectare a été obtenu en multipliant le rendement rapporté à l'hectare par le prix du café et de la banane. L'évolution des prix de la banane et du café a été caractérisée pour une période de 11 ans, de 2002 à 2012. Les prix du café ont été fournis par Kimonyo et Ntiranyibagira, (2007) pour la période allant de 2002 à 2006, par Panapress (2008 et 2010) pour la période allant de 2007 à 2010, le CNAC (2011) pour l'année 2011 et InterCafé (2012) pour l'année 2012. Les prix de banane sur cette période ont

été calculés à partir des données fournies par Faostat (2012) pour la période allant de 2002 à 2010 et par Fews net (2012 ; 2013) pour les années 2011 et 2012. L'évolution des prix de café cerise et de banane pour cette période est illustrée sur la figure 6.2.

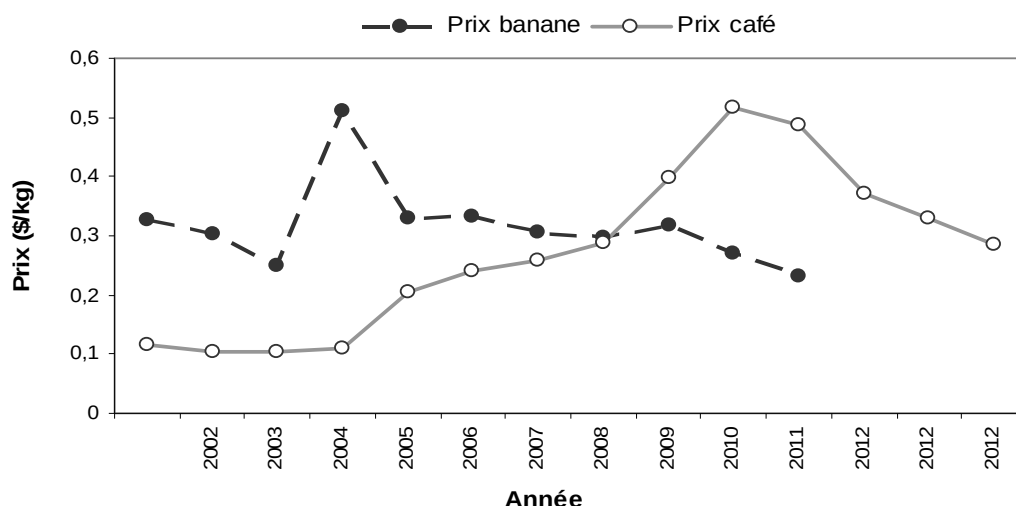


Figure 6.2 : Evolution des prix de café cerise et de banane de 2002 à juillet 2012 (\$/kg)

A partir des prix observés sur cette période, 3 valeurs de prix ont été calculées pour analyser le revenu en fonction de la variabilité des prix. Ces valeurs étaient i) le prix du quartile inférieur, ii) le prix moyen sur toute la période et iii) le prix du quartile supérieur. Pour l'année 2012, le prix du café cerise a changé quatre fois au cours de l'année, et cela a été pris en considération dans le calcul des 3 valeurs. La conversion du revenu en dollars a été faite en utilisant le taux de change proposé au mois d'avril de chaque année (Foxtop, 2012). Ainsi, pour la banane, les valeurs des prix étaient de 0,28 \$, 0,32 \$ et 0,33 \$ par kg respectivement pour le quartile inférieur, la moyenne et le quartile supérieur. Pour le café, les valeurs respectives de ces prix par kg étaient de 0,12 \$, 0,27 \$ et 0,37 \$.

En plus du revenu à l'hectare et du LER, deux autres paramètres ont été calculés. Il s'agit de la valeur ajoutée (VA, \$) et du résultat brut de l'exploitation (RBE, \$). Ces deux paramètres ont été calculés comme suit (équations 6.6 et 6.7 ; Gahungu, 2008).

$$VA = P - CI \quad (6.6)$$

Avec CI : valeurs des consommations intermédiaires (\$) et P : la valeur du produit (\$).

Mis à part l'achat du paillis, aucune autre fourniture n'a été comptabilisée car i) il n'y avait pas eu d'apport d'engrais ni de fumier pendant l'année 2011, ii) les insecticides et les pulvérisateurs sont fournis par les services d'encadrement et iii) les outils de récolte de café sont ceux utilisés dans la vie quotidienne du ménage. Le prix du paillis a été estimé à 0,025 \$/kg de matière sèche de paillis (30 BIF/kg de matière sèche), valeur arrondie à partir de la valeur de 0,022 \$/kg de matière sèche (27 BIF/kg) proposée par Gahungu (2008).

$$RBE = VA - (\text{Rémunération du personnel} + \text{Frais financier} + \text{Taxes}) \quad (6.7)$$

La main d'œuvre nécessaire pour les travaux caféicoles a été déterminée avec les normes du temps de travail proposées par Gaie et Flémal (1988). Les normes de travail dans les bananiers étaient celles proposées par Bagamba et al. (1998). Comme les normes de travail dans les bananiers proposées étaient exprimées en homme-heure, elles ont été ramenées en homme-jour en divisant le total des heures par 8. Pour le sarclage, les normes de Gaie et Flémal ont été utilisées pour les deux cultures (les normes de travail sont reprises en annexe 5.3). La récolte et le transport de la banane n'ont pas été comptabilisés dans le temps de travail car ils sont échelonnés dans le temps et ne demande pas une quantité élevée de main d'œuvre en même temps. En plus, comme les prix de banane sont ceux octroyés à la sortie de la ferme (Faostat, 2012), le transport n'est pas réalisé sur de longues distances. Le transport de la récolte de banane n'a pas été pris en compte pour déterminer la main d'œuvre utilisée dans les bananeraies dans une étude réalisée par Bagamba et al. (1998). La main d'œuvre nécessaire pour certaines activités dépend de la densité des bananiers et des caféiers. Cela a été pris en considération dans la détermination de la main d'œuvre et d'autres dépenses en calculant le coût des opérations en fonction de notre densité, à partir de la densité de référence. Ainsi, la main d'œuvre nécessaire pour l'arcure des caféiers et l'œilletonnage

des bananiers par exemple dépend de la densité. Par contre, les activités réalisées par parcelle (paillage, sarclage) réclament la même charge de travail en culture pure et en association. Le coût d'un homme-jour a été relativement stable comparativement au taux de change du dollar. En 2004, il était de 0,66 \$ et en 2012 il était de 0,69 \$. Le coût journalier de la main d'œuvre utilisé dans les calculs a été alors arrondi à 0,7 \$. Les frais financiers et les taxes ont été supposés égaux à 0 car les prix octroyés aux agriculteurs ne sont pas soumis aux taxes et il n'existe pas de charges financières.

6.2.7 Analyse statistique des résultats

Une première analyse de variance (ANOVA I) a été réalisée entre les sites. Si les caractéristiques des bananiers et des caféiers dans les deux sites étaient statistiquement différentes ($p \leq 0,05$), les deux sites étaient analysés séparément. Pour toutes les données analysées, il y avait des différences significatives entre les sites. Ainsi, les sites ont été analysés séparément. Dans chaque site, l'analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA II) a été utilisée. Les deux facteurs étaient la densité des bananiers et la densité des caféiers. L'effet bloc a aussi été analysé. La structure de l'analyse était croisée : densité des caféiers x densité bananiers. Cette structure permettait d'analyser l'effet de la densité de caféiers, de la densité des bananiers et de leur interaction. Pour les biomasses, la répartition des nutriments dans la biomasse des caféiers et des bananiers et les caractéristiques économiques, seul l'ANOVA II a été utilisé avec le site et les 8 traitements comme facteurs. Ceci a été réalisé pour mieux visualiser les valeurs des différents traitements entre elles. L'analyse statistique des résultats, la classification des moyennes avec le test de Tukey ont été faites avec le logiciel R version 2.13.1. Les courbes ont été tracées avec le logiciel Excel 2003.

6.3 Résultats

6.3.1 Caractéristiques morphologiques et les biomasses des bananiers et des caféiers

a) Bananiers

Mis-à-part la TLA, toutes les caractéristiques de croissance des bananiers étaient significativement plus élevées à Kayanza qu'à Gitega.

A Gitega, l'effet de la densité des caféiers sur la CRBB des plantes-mères de bananier était significatif pour les mesures obtenues au mois de mars ($p = 0.007$) et d'octobre 2010 ($p < 0.001$), mais pas pour avril 2011 (Figure 6 .2a). L'effet de la densité des caféiers sur la TLA des bananiers était uniquement significatif pour les mesures collectées au mois d'octobre 2010 ($p = 0,008$; Figure 6 .2b). Dans tous les cas où la densité des caféiers a eu un effet significatif sur les bananiers, on observe une augmentation des valeurs de la CRBB et de TLA avec la diminution de la densité des caféiers, les valeurs de CRBB et de TLA étant toujours les plus élevées pour les parcelles de bananiers en monoculture (figure 6.3a et b). Les valeurs de CRBB et de TLA observées au mois d'avril 2011 (à la fin des observations) ne différaient pas significativement ($p \leq 0,05$) en fonction de la densité des caféiers.. Il n'y avait pas d'effet significatif de la densité des bananiers sur les caractéristiques des bananiers. L'interaction densité bananiers x densité des caféiers était aussi non significative. A Kayanza, il n'y a pas eu d'effet significatif ($p \leq 0,05$) des caféiers sur la CRBB et la TLA des bananiers. La moyenne de la CRBB a seulement évolué au cours du temps. Elle était de 25,0 cm en moyenne en mars 2010, de 49,5 cm en octobre 2010 et de 67,2 cm en avril 2011. De même, la TLA a augmenté avec le temps, passant en moyenne de 0,9 m² en mars 2010 à 2,6 m² en octobre 2010 et 5,5 m² en avril 2011. De plus, la densité des bananiers n'a pas affecté significativement ($p \leq 0,05$) la CRBB et le TLA dans ce site. Dans les deux sites, les caféiers n'ont pas affecté significativement la hauteur (HTC) et la biomasse des bananiers.

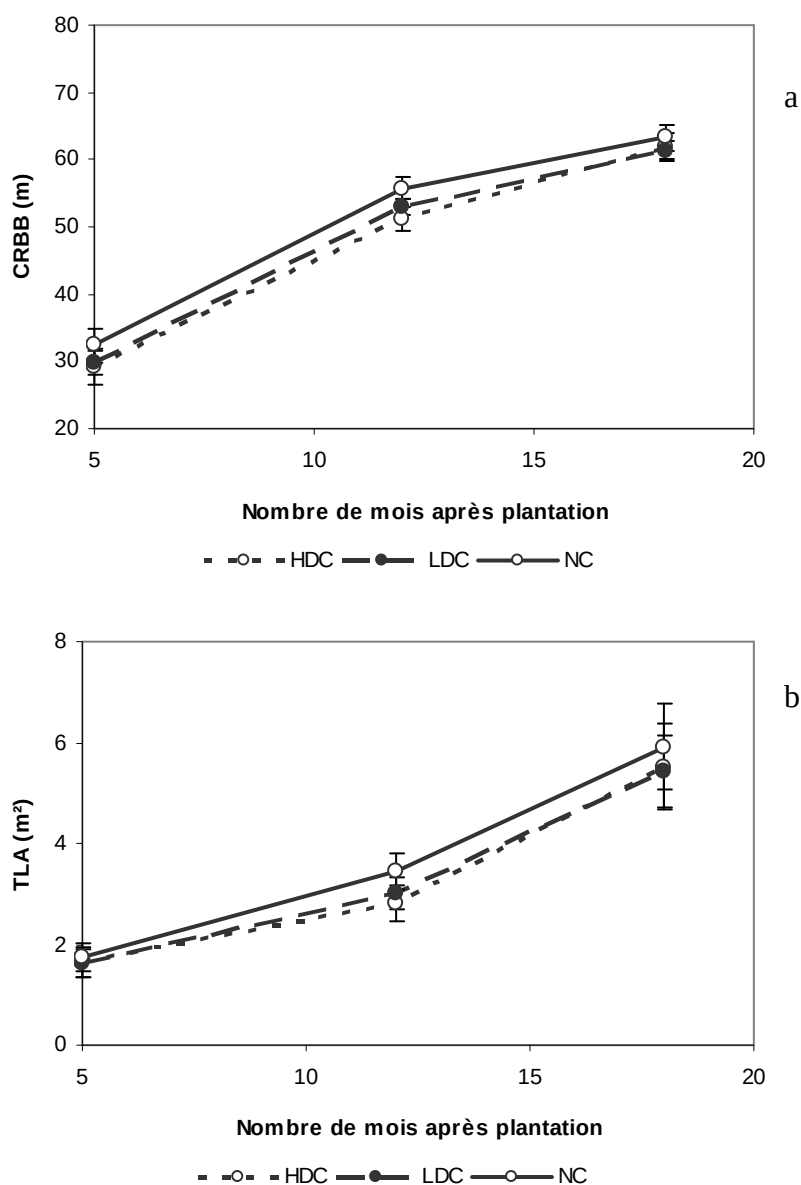


Figure 6.3 : Evolution de la circonférence à la base des bananiers (CRBB) (a) et de la surface foliaire totale par plant de bananier (TLA) (b) en fonction de la densité des caféiers dans le site de Gitega (HDC : forte densité de caféiers ; LDC : faible densité de caféiers et NC : parcelles sans caféiers). Les barres représentent les écart-types. Les résultats sont sur les plants-mères.

La densité des caféiers a significativement affecté la CRBB et TLA des rejets de bananiers pendant les deux mois de prises de mesures à Gitega (tableau 6.4). A Kayanza, seule la TLA a été significativement affectée par la densité des caféiers. On observe une diminution des valeurs de CRBB et de TLA avec l'augmentation de la densité des caféiers. A Gitega, pour le mois d'octobre 2010, la CRBB des parcelles de bananiers avec forte densité de caféiers

représentait 83 % de la CRBB des bananiers en monoculture. Ce pourcentage était de 88 % au mois d'avril 2011. La TLA des parcelles de bananiers avec forte densité de caféiers représentait 79 % de la TLA des parcelles des bananiers en monoculture au mois d'octobre 2010 contre 75 % au mois d'avril 2011. Au cours de ce même mois à Kayanza, la TLA des parcelles de bananiers avec forte densité de caféiers représentait 75 % de la TLA observée dans les parcelles de bananiers en monoculture.

A Gitega la CRBB des rejets a été significativement affectée par la densité des bananiers (tableau 6.4). A Kayanza, la CRBB et de la TLA étaient significativement différentes en fonction de la densité des bananiers. Là aussi, il y avait la diminution des valeurs observées avec l'augmentation de la densité des bananiers. A Gitega, la CRBB des rejets dans les parcelles de bananiers avec forte densité représentait 97 % de la CRBB observée dans les parcelles de bananiers avec faible densité au mois d'octobre 2010 et 93 % au mois d'avril 2011. A Kayanza, la CRBB observée dans les parcelles avec forte densité de bananiers correspondait à 87 % de celle observée dans les parcelles de bananiers avec faible densité de bananiers. Le pourcentage de TLA dans les parcelles avec forte densité de caféiers était de 74 % par rapport à la TLA observée dans les parcelles de bananiers en monoculture. L'interaction densité bananiers x densité caféiers était non significative avec des valeurs de p toujours $> 0,243$.

Tableau 6.4 : Caractéristiques morphologiques des rejets de bananiers (moyenne $\pm$ écart-types) en fonction de la densité des caféiers au mois d'octobre 2010 et avril 2011 à Gitega et au mois d'avril 2011 à Kayanza

	Densité caféiers				Densité bananiers		
	NC ¹	LDC ²	HDC ³	Valeur-P	LDB ⁴	HDB ⁵	Valeur-p
Gitega							
Octobre 2010							
CRBB ⁶ (cm)	29,99 $\pm$ 2,06	26,40 $\pm$ 1,27	25,10 $\pm$ 0,99	<0,001	27,10 $\pm$ 2,94	26,42 $\pm$ 1,99	0,035
TLA ⁷ (m ²)	1,43 $\pm$ 0,17	1,23 $\pm$ 0,12	1,12 $\pm$ 0,06	0,003	1,30 $\pm$ 0,22	1,21 $\pm$ 0,11	0,110
Avril 2011							
CRBB (cm)	56,88 $\pm$ 3,85	51,49 $\pm$ 3,32	50,07 $\pm$ 3,60	0,003	54,61 $\pm$ 5,43	51,02 $\pm$ 2,62	0,017
TLA (m ²)	4,37 $\pm$ 0,53	3,78 $\pm$ 0,60	3,30 $\pm$ 0,64	0,016	4,00 $\pm$ 0,79	3,64 $\pm$ 0,62	0,166
Kayanza*							
Avril 2011							
CRBB (cm)	45,35 $\pm$ 7,7	43,55 $\pm$ 5,95	43,1 $\pm$ 3,8	0,645	46,97 $\pm$ 6,5	41,03 $\pm$ 2,9	0,026
TLA (m ²)	3,90 $\pm$ 0,95	3,53 $\pm$ 0,75	3,00 $\pm$ 0,60	0,032	3,99 $\pm$ 1,07	2,97 $\pm$ 0,47	<0,001

¹ NC : parcelles sans caféiers ; ² LDC : faible densité de caféiers ; ³ HDC : forte densité de caféiers ; ⁴ LDB : faible densité de bananiers ; ⁵ HDB : forte densité de bananiers ; ⁶ CRBB : circonférence à la base des bananiers ; ⁷ TLA : surface foliaire total par plant. * Il n'y a pas de données pour octobre 2010 à Kayanza car les rejets faisaient encore moins de 1 m de hauteur.

b) Caféiers

Toutes les caractéristiques de croissance des caféiers étaient significativement plus élevées à Gitega qu'à Kayanza (tableau 6.5). En utilisant les valeurs enregistrées en début d'essais comme covariables, la densité des bananiers a eu un effet significatif sur le diamètre à la base des caféiers (DBC) à Gitega et sur le DBC et sur la hauteur (HTC) des caféiers à Kayanza (tableau 6.5). Le DBC diminue avec l'augmentation de la densité des bananiers alors que la HTC augmente avec l'augmentation de la densité des bananiers. Les différences de DBC étaient cependant faibles, avec des différences de quelques mm. L'interaction densité bananiers x densité des caféiers était non significative avec des valeurs de $p > 0,332$.

Tableau 6.5 : Valeurs du diamètre à la base (DBC) et de la hauteur (HTC) des caféiers à la fin des essais (moyenne $\pm$ écart-types) en fonction de la densité des bananiers et des caféiers. L'ANOVA a été réalisée en utilisant les valeurs du diamètre à la base et de la hauteur observées au début des essais comme covariables.

	Densité des bananiers				Densité des caféiers		
	NB ¹	LDB	HDB	Valeur-P	LDC	HDC	Valeur-p
Gitega							
DBC ² (cm)	4,38 $\pm$ 0,34	4,11 $\pm$ 0,22	4,23 $\pm$ 0,14	0,019	4,34 $\pm$ 0,30	4,14 $\pm$ 0,20	0,009
HTC ³ (m)	2,78 $\pm$ 0,19	2,77 $\pm$ 0,11	2,79 $\pm$ 0,09	0,768	2,77 $\pm$ 0,12	2,80 $\pm$ 0,16	0,228
Kayanza							
DBC (cm)	3,97 $\pm$ 0,33	3,83 $\pm$ 0,21	3,68 $\pm$ 0,13	0,047	3,88 $\pm$ 0,27	3,78 $\pm$ 0,22	0,218
HTC (m)	2,11 $\pm$ 0,10	2,18 $\pm$ 0,10	2,27 $\pm$ 0,10	0,004	2,16 $\pm$ 0,12	2,21 $\pm$ 0,12	0,162

¹ NB : parcelles sans bananiers ; ² DBC : diamètre à la base des caféiers ; ³ HTC : hauteur des caféiers.

6.3.2 Biomasse totale aérienne (bananiers + caféiers) et la biomasse de bananier recyclée dans les sites de Gitega et Kayanza

Il y avait des différences significatives de biomasse totale aérienne (biomasse caféiers + biomasse bananiers) en fonction des traitements (figure 6.4). Dans les deux sites, les valeurs de biomasse les plus élevées ont été observées dans les parcelles de caféiers à forte densité associés aux bananiers à forte densité. Venaient ensuite les parcelles de caféiers à forte densité associés avec les bananiers à faible densité. La part de la biomasse de caféiers dans la biomasse totale était plus élevée à Gitega qu'à Kayanza. Dans les parcelles en association, l'augmentation de la densité de l'une des cultures conduisait à une augmentation significative de la biomasse totale. En monoculture et à niveau de densité égal, la biomasse de caféiers était équivalente ou supérieure à celle des bananiers à Gitega, inférieure ou égale à celle des bananiers à Kayanza.

L'accroissement de la biomasse de bananiers était rapide car, en une année et demi de suivi de leur croissance, cette biomasse est passée en moyenne de 0

à 6 T/ha de matière sèche à Gitega et à 7 T/ha de matière sèche à Kayanza. 31 % de cette biomasse était constitué par la biomasse des rejets à Gitega, contre 12 % à Kayanza. Pendant cette période, la biomasse de caféiers a augmenté en moyenne de 0,4 T/ha de matière sèche à Gitega et de 1 T/ha à Kayanza.

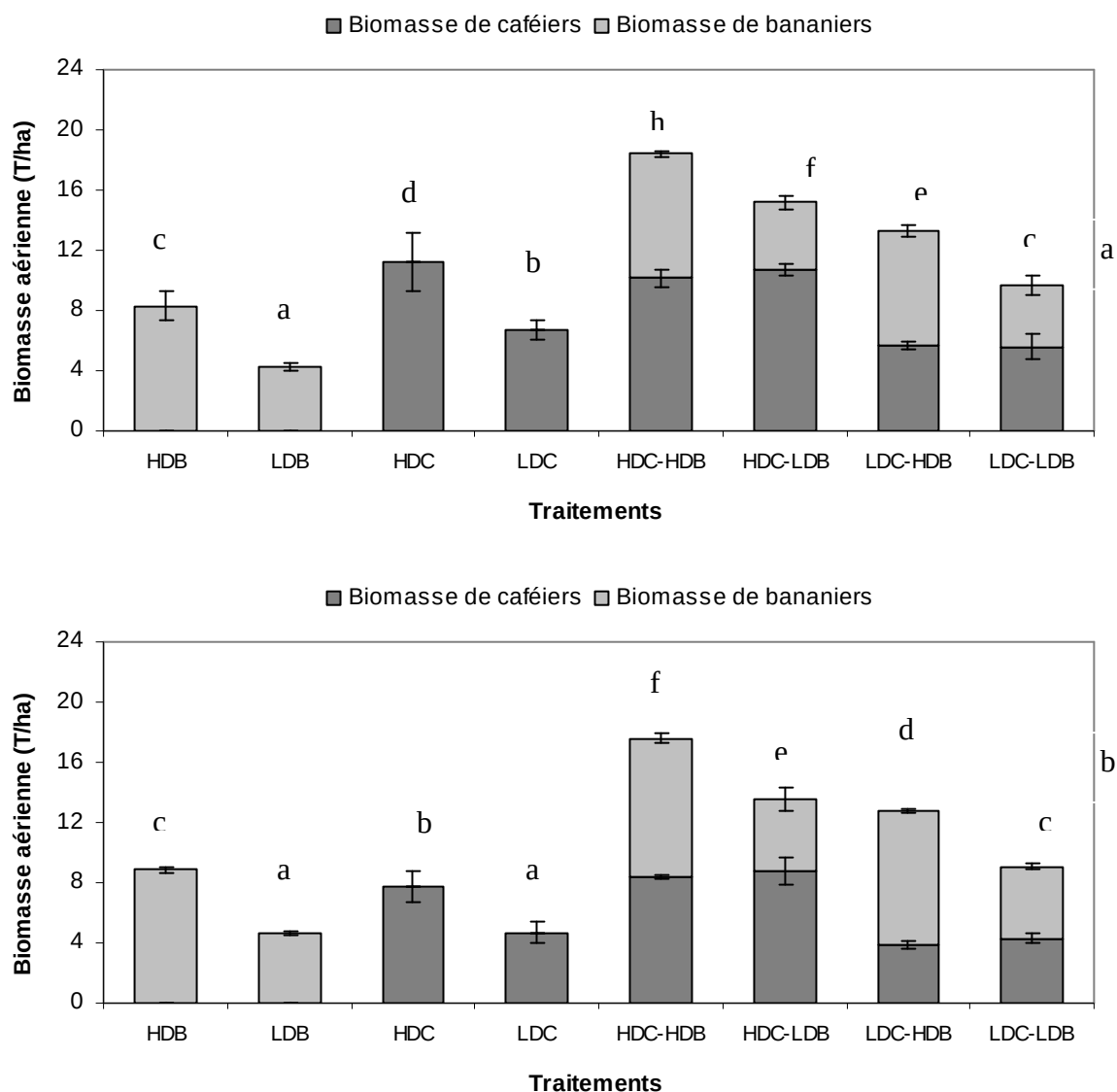


Figure 6.4 : Biomasse aérienne des bananiers et des caféiers en fonction des traitements dans le site de Gitega (a) et de Kayanza (b).

En comparant les deux régions naturelles, la biomasse de bananiers recyclée était plus élevée à Gitega ($p < 0,001$). En plus, la biomasse de bananier recyclée était statistiquement plus élevée ($p < 0,001$) dans les parcelles de bananiers avec forte densité (HDB) dans les deux sites. A Gitega la quantité de biomasse recyclée (matière sèche/ha) était de 3,2 T/ha dans les parcelles LDB

et de 5,0 T/ha dans les parcelles HDB. A Kayanza, la biomasse recyclée était de 1,8 et de 3,0 T/ha respectivement dans les parcelles LDB et HDB. L'augmentation de la densité de caféiers n'a pas affecté significativement la quantité de biomasse de bananiers recyclée (p toujours supérieur à 0,602).

6.3.3 Caractéristiques physico-chimique du sol et les teneurs en éléments majeurs dans les feuilles de bananiers et de caféiers

En utilisant les valeurs des caractéristiques physico-chimiques du sol mesurées au début de l'installation des essais comme covariables, il n'y a pas eu de différences significatives entre les teneurs en éléments nutritifs des différents traitements pour les deux sites. De même, l'effet de la densité des caféiers sur les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de bananiers n'était pas significatif dans les deux sites. Par contre, en utilisant les données obtenues au début des essais comme covariables, l'effet de la densité des bananiers sur la teneur en éléments nutritifs dans les feuilles de caféiers était significatif pour certains éléments. A Gitega, des différences significatives ont été enregistrées pour le P et le K, et à Kayanza des différences significatives ont été observées pour le N, le K et le Mg (tableau 6.6). Pour le P à Gitega, il y avait une diminution de la teneur en cet élément avec l'augmentation de la densité des bananiers. Pour le N et Mg à Kayanza, leurs teneurs augmentaient avec l'augmentation de la densité des bananiers. Ainsi, la teneur en P observée à Gitega dans les parcelles de caféiers en monoculture était de 0,13 % contre 0,11 % dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. Ces différences étaient faibles bien que significatives. A Kayanza, la teneur en N était de 2,6 % dans les parcelles de caféiers en monoculture contre 2,9 % dans les parcelles associées avec les bananiers, quelle que soit la densité. Dans ce même site, la teneur en Mg était de 0,3 % dans les parcelles de caféiers en monoculture contre 0,5 % dans les parcelles associées avec les bananiers, quelle que soit la densité. Pour les deux sites, des valeurs de K plus élevées ont été observées dans les parcelles de caféiers en monoculture.

A Gitega, la densité des caféiers a eu un effet significatif ($p \leq 0,038$) sur la teneur en N dans les feuilles de caféiers avec des teneurs plus élevées dans les parcelles de caféiers à faible densité (tableau 6.6).

Tableau 6.6 : Teneur en N, P, K et Mg (moyenne $\pm$ écart-type) dans les feuilles de caféiers en fonction de la densité des bananiers et des caféiers. L'ANOVA a été réalisée en utilisant les données obtenues au début des essais comme covariables. Les valeurs de Mg à Gitega et de P à Kayanza n'ont pas été montrées car les différences n'étaient pas significatives à $p \leq 0,05$.

	Densité bananiers				Densité caféiers		
	NB	LDB	HDB	Valeur-P	LDC	HDC	Valeur-p
Gitega							
N (%)	3,07 $\pm$ 0,20	3,09 $\pm$ 0,11	3,13 $\pm$ 0,41	0,877	3,24 $\pm$ 0,24	2,95 $\pm$ 0,25	0,038
P (%)	0,13 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,02	0,11 $\pm$ 0,03	0,047	0,12 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,02	0,602
K (%)	2,67 $\pm$ 0,71	2,00 $\pm$ 0,56	2,44 $\pm$ 0,29	0,030	2,29 $\pm$ 0,56	2,45 $\pm$ 0,64	0,317
Kayanza							
N (%)	2,59 $\pm$ 0,15	2,94 $\pm$ 0,22	2,87 $\pm$ 0,27	0,017	2,80 $\pm$ 0,31	2,80 $\pm$ 0,21	0,925
K (%)	4,41 $\pm$ 0,39	3,77 $\pm$ 0,20	3,86 $\pm$ 0,41	0,029	3,91 $\pm$ 0,41	4,12 $\pm$ 0,43	0,230
Mg (%)	0,28 $\pm$ 0,17	0,52 $\pm$ 0,17	0,53 $\pm$ 0,19	0,045	0,40 $\pm$ 0,22	0,48 $\pm$ 0,19	0,317

6.3.4 Effet des densités de bananiers et de caféiers sur les rendements et ses composantes

A Gitega, la densité des caféiers a affecté significativement ($p \leq 0,05$) le poids du régime (PR) et le rendement des bananiers (RDTB). Dans ce site, il y a eu diminution du poids du régime et du rendement avec l'augmentation de la densité des caféiers (tableau 6.7). En effet, les valeurs de rendement les plus élevées ont été observées dans les parcelles de bananiers en monoculture et les plus faibles dans les parcelles de bananiers avec la forte densité des caféiers. Ainsi, le PR et le RDTB étaient de 10 kg et 12 T/ha en monoculture, contre 9 kg et 11 T/ha dans les parcelles de bananiers avec forte densité de caféiers, et la chute du rendement était de 7 %. A Kayanza, bien que la diminution de PR et RDTB en fonction de la densité de caféiers fût du même ordre qu'à Gitega, ces différences étaient non significatives.

La densité des bananiers a affecté significativement le rendement dans les deux sites, avec des rendements plus élevés dans les parcelles de bananiers à forte densité. A Gitega, le PR a été négativement et significativement affecté par la densité des bananiers, avec des valeurs plus faible dans les parcelles à forte densité de bananiers. L'interaction densité bananiers x densité caféiers était non significative avec une valeur minimale de $p = 0,377$.

Tableau 6.7 : Rendement de bananiers (RDTB) et poids du régime (PR) en fonction de la densité de caféiers et des bananiers à Gitega et à Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type).

	Densité caféiers				Densité bananiers		
	NC	LDC	HDC	Valeur-P	LDB	HDB	Valeur-p
Gitega							
PR (kg)	9,89 $\pm$ 0,64	9,36 $\pm$ 0,45	9,02 $\pm$ 0,67	0,04	9,76 $\pm$ 0,78	9,09 $\pm$ 0,31	0,02
RDTB (T/ha)	12,35 $\pm$ 3,71	11,75 $\pm$ 3,74	11,41 $\pm$ 3,93	0,02	8,40 $\pm$ 0,67	15,27 $\pm$ 0,51	<0,001
Kayanza							
PR (kg)	12,23 $\pm$ 2,60	11,74 $\pm$ 2,59	11,34 $\pm$ 2,55	0,728	12,20 $\pm$ 2,67	11,33 $\pm$ 2,38	0,352
RDTB (T/ha)	15,30 $\pm$ 5,57	14,73 $\pm$ 5,49	14,32 $\pm$ 5,61	0,80	10,50 $\pm$ 2,30	19,07 $\pm$ 4,02	<0,001

Un effet significatif de la densité des bananiers sur le rendement de café (RDTC) et le poids de cerises par plant (PC/PL) a été observé uniquement à Kayanza. Dans ce site, l'augmentation de la densité des bananiers a eu comme effet une diminution de RDTC et du PC/PL (tableau 6.8). Le RDTC était de 1,1 T/ha dans les parcelles en monoculture contre 0,9 T/ha dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. Cette chute de rendement représentait 23 %. Le PC/PL était de 0,53 kg et 0,42 kg respectivement pour les parcelles en monoculture et les parcelles avec forte densité de bananiers. Dans les deux sites, la densité des caféiers a uniquement affecté le rendement de café à l'hectare et non la production par plant. Des rendements significativement plus élevés ont été enregistrées dans les parcelles avec forte densité de caféiers. Le poids de 100 cerises n'a pas été significativement affecté par la densité des bananiers, ni par celle des caféiers.

Tableau 6.8 : Rendement de caféiers (RDTC) et poids de cerises/plant (PC/PL) en fonction de la densité de bananiers et des caféiers à Gitega et à Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type).

Densité des bananiers					Densité des caféiers		
	NB	LDB	HDB	Valeur-P	LDC	HDC	Valeur-p
Gitega							
PC/PL (kg)	1,36 $\pm$ 0,14	1,34 $\pm$ 0,27	1,29 $\pm$ 0,22	0,856	1,39 $\pm$ 0,25	1,27 $\pm$ 0,15	0,294
RDTC (T/ha)	2,75 $\pm$ 0,82	2,80 $\pm$ 1,13	2,60 $\pm$ 0,82	0,665	1,94 $\pm$ 0,35	3,50 $\pm$ 0,42	<0,001
Kayanza							
PC/PL (kg)	0,53 $\pm$ 0,04	0,44 $\pm$ 0,01	0,42 $\pm$ 0,02	<0,001	0,46 $\pm$ 0,04	0,47 $\pm$ 0,07	0,205
RDTC (T/ha)	1,11 $\pm$ 0,46	0,92 $\pm$ 0,33	0,87 $\pm$ 0,30	<0,001	0,64 $\pm$ 0,05	1,30 $\pm$ 0,19	<0,001

A Kayanza, il y avait une interaction significative ($p = 0,001$) entre la densité des bananiers et la densité des caféiers sur le rendement des caféiers. En effet, l'augmentation de la densité des bananiers a significativement diminué le rendement de café dans les parcelles de café haute densité uniquement. Les rendements obtenus dans les parcelles de caféiers à faible densité étaient compris entre 0,6 et 0,7 T/ha, quelle que soit la densité de bananier. Par contre, les rendements observés dans les parcelles de caféiers à forte densité différaient significativement quand la densité de bananiers augmentait. Ainsi, des rendements statistiquement plus élevés ont été enregistrés dans les parcelles de caféiers en monoculture avec forte densité. Ce rendement était de 1,5 T/ha. Les plus faibles valeurs ont été enregistrées dans les parcelles avec faible ou forte densité de bananiers. Ces valeurs étaient respectivement de 1,2 T/ha et 1,1 T/ha.

6.3.5 Répartition des éléments nutritifs majeurs dans le compartiment végétal en fonction de la densité de bananiers et de caféiers

Dans les deux sites, des quantités immobilisées, exportées ou recyclées significativement plus élevées ($p < 0,001$) ont été obtenues dans les parcelles de caféiers avec forte densité associés avec des bananiers avec forte densité (tableau 6.9). Les valeurs de K dans chacune des différentes fractions

végétales étaient les plus élevées, suivies par les valeurs de N tandis que les valeurs de P étaient les plus faibles.

A Gitega, la comparaison des parcelles de bananiers et de caféiers en monoculture a montré qu'aux mêmes niveaux de densités (LDC et LDB ; HDC et HDB) les quantités de N immobilisées étaient statistiquement plus élevées dans les parcelles de caféiers que dans les parcelles de bananiers. Cette même tendance a été observée pour le Ca et le Mg. Par contre, à Kayanza, à densité égale, les quantités de N immobilisées étaient statistiquement plus élevées dans les parcelles de bananiers. Pour le K, les valeurs les plus élevées ont été observées dans les parcelles de bananiers. La quantité d'éléments nutritifs exportés ou recyclés était plus élevée dans les parcelles avec forte densité de bananiers.

Dans les parcelles de caféiers associés aux bananiers, l'augmentation de la densité de chacune des deux cultures conduisait à une augmentation significative de la quantité d'éléments nutritifs immobilisés. A Gitega, cette même tendance a été observée pour les éléments exportés et recyclés. A Kayanza, la quantité d'éléments nutritifs exportés ou recyclés dépendait de la densité de bananiers. Ainsi, les parcelles de caféiers en monoculture (faible et forte densité) avaient statistiquement les mêmes valeurs d'éléments nutritifs exportés ou recyclés. Les détails de la répartition des éléments nutritifs sont repris dans l'annexe 6.1 et annexe 6.2.

Tableau 6.9 : Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Gitega et Kayanza. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

Gitega					Kayanza			
Nutriments	HDC	HDB	HDC-HDB	HDC-LDB	HDC	HDB	HDC-HDB	HDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	97,0 $\pm$ 16,6	79,4 $\pm$ 9,5	166,0 $\pm$ 3,7	134,9 $\pm$ 7,1	66,4 $\pm$ 8,5	84,8 $\pm$ 1,8	159,8 $\pm$ 2,7	120,7 $\pm$ 3,2
P (kg/ha)	2,7 $\pm$ 0,5	6,6 $\pm$ 0,8	9,0 $\pm$ 0,1	6,1 $\pm$ 0,4	1,9 $\pm$ 0,2	7,0 $\pm$ 0,2	9,3 $\pm$ 0,2	5,9 $\pm$ 0,4
K (kg/ha)	109,3 $\pm$ 18,7	257,1 $\pm$ 30,6	353,4 $\pm$ 4,9	241,5 $\pm$ 16,8	74,9 $\pm$ 9,6	274,7 $\pm$ 5,9	365,1 $\pm$ 9,5	232,1 $\pm$ 16,0
Ca (kg/ha)	32,8 $\pm$ 5,6	36,1 $\pm$ 4,3	65,3 $\pm$ 1,2	50,6 $\pm$ 2,9	22,5 $\pm$ 2,9	38,5 $\pm$ 0,8	64,2 $\pm$ 1,3	46,1 $\pm$ 1,4
Mg (kg/ha)	12,7 $\pm$ 2,2	58,5 $\pm$ 7,1	70,5 $\pm$ 1,2	43,9 $\pm$ 3,5	12,7 $\pm$ 2,2	58,5 $\pm$ 7,1	70,5 $\pm$ 1,2	43,9 $\pm$ 3,5
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	18,7 $\pm$ 1,7	42,2 $\pm$ 1,4	57,7 $\pm$ 4,3	41,5 $\pm$ 2,7	8,3 $\pm$ 0,5	63,0 $\pm$ 3,9	66,3 $\pm$ 4,6	39,0 $\pm$ 2,6
P (kg/ha)	1,4 $\pm$ 0,1	4,1 $\pm$ 0,1	5,2 $\pm$ 0,4	3,6 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,0	6,1 $\pm$ 0,3	6,3 $\pm$ 0,2	3,6 $\pm$ 0,2
K (kg/ha)	23,5 $\pm$ 2,1	134,7 $\pm$ 4,5	150,2 $\pm$ 7,8	93,0 $\pm$ 7,7	10,3 $\pm$ 0,6	200,9 $\pm$ 12,5	199,8 $\pm$ 14,3	111,7 $\pm$ 9,9
Ca (kg/ha)	2,1 $\pm$ 0,2	4,5 $\pm$ 0,1	6,2 $\pm$ 0,5	4,6 $\pm$ 0,3	0,9 $\pm$ 0,1	6,7 $\pm$ 0,4	7,1 $\pm$ 0,5	4,2 $\pm$ 0,3
Mg (kg/ha)	1,6 $\pm$ 0,1	9,3 $\pm$ 0,3	10,3 $\pm$ 0,5	6,4 $\pm$ 0,5	0,7 $\pm$ 0,0	13,8 $\pm$ 0,9	13,7 $\pm$ 1,0	7,7 $\pm$ 0,7
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	21,7 $\pm$ 3,7	25,5 $\pm$ 4,1	38,7 $\pm$ 1,2	32,4 $\pm$ 1,9	14,9 $\pm$ 1,9	31,4 $\pm$ 9,4	51,6 $\pm$ 2,2	41,1 $\pm$ 2,9
P (kg/ha)	0,9 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,3	2,2 $\pm$ 0,1	1,7 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	2,3 $\pm$ 0,5	3,3 $\pm$ 0,2	2,5 $\pm$ 0,2
K (kg/ha)	30,7 $\pm$ 5,3	88,5 $\pm$ 14,2	114,1 $\pm$ 2,0	69,7 $\pm$ 5,3	21,0 $\pm$ 2,7	108,7 $\pm$ 32,7	145,5 $\pm$ 6,9	107,7 $\pm$ 7,5
Ca (kg/ha)	15,8 $\pm$ 2,7	25,4 $\pm$ 4,1	33,3 $\pm$ 0,9	26,7 $\pm$ 1,7	10,8 $\pm$ 1,4	31,2 $\pm$ 9,4	46,9 $\pm$ 2,1	36,3 $\pm$ 2,5
Mg (kg/ha)	6,8 $\pm$ 1,2	30,9 $\pm$ 5,0	29,4 $\pm$ 0,5	20,6 $\pm$ 1,7	4,7 $\pm$ 0,6	38,0 $\pm$ 11,4	48,0 $\pm$ 2,3	34,6 $\pm$ 2,5

HDC : forte densité café ; LDB : faible densité bananiers ; HDB : forte densité banane.

6.3.6 Rentabilité de l'association des bananiers avec les caféiers

Les LER étaient supérieurs à 1 pour toutes les associations et dans les deux sites. Dans les deux sites, il n'y avait pas de différences significatives entre les LER des différents traitements. De plus, les LER n'étaient pas significativement différents entre les sites. A Gitega, les LER étaient compris entre 1,83 et 1,97. A Kayanza, les valeurs des LER étaient comprises entre 1,71 et 1,88.

A Gitega comme à Kayanza, les revenus, les VA et les RBE les plus faibles ont été observés dans les parcelles de caféiers en monoculture à faible densité, suivi par les caféiers en monoculture à forte densité (tableau 6.10, annexe 6.3). Les valeurs les plus élevées de revenus, de VA et de RBE ont été enregistrées dans les parcelles de caféiers avec forte densité de bananiers. Des valeurs intermédiaires ont été enregistrées dans les parcelles de caféiers avec faible densité de bananiers. Ces différences étaient significativement différentes à $p < 0,001$. Les revenus, la valeur ajoutée et le résultat dépendaient fortement de la densité des bananiers, avec une réduction de 40 % au minimum lorsque la densité des bananiers diminue de moitié.

Les détails pour les traitements sont repris dans l'annexe 6.3.

Les revenus (valeurs positives) étaient élevés dans les parcelles avec forte densité de bananiers et faibles dans les parcelles de caféiers en monoculture plus particulièrement dans les parcelles avec faible densité de caféiers. Les dépenses (valeurs négatives) étaient élevées dans les parcelles avec forte densité de caféiers et de bananiers. Le gros des dépenses étaient liées à l'achat et à l'application du paillis (figure 6.5). La contribution du café dans les revenus était plus élevée à Gitega.

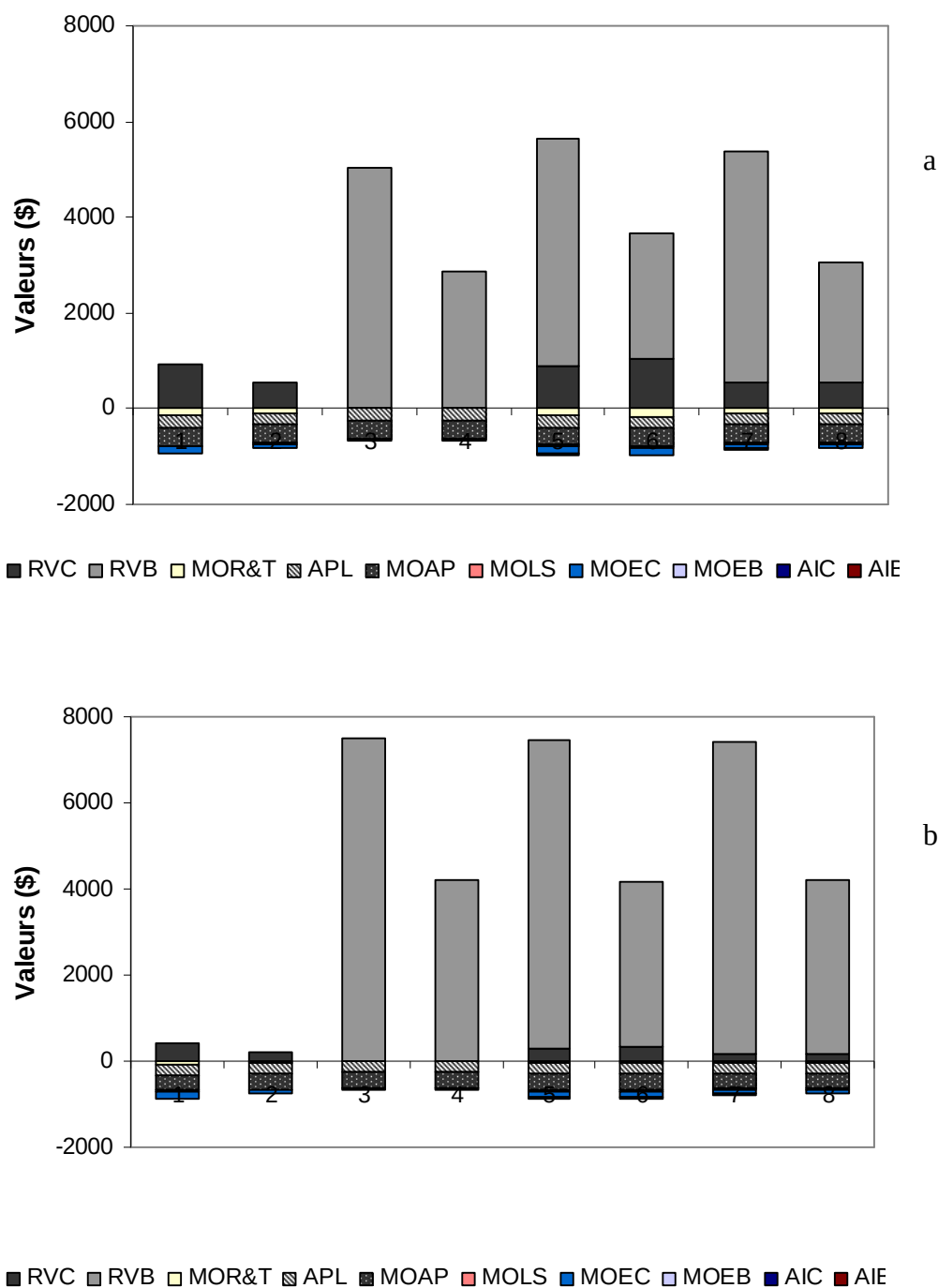


Figure 6.5 : Les dépenses et les revenus en fonction des traitements à Gitega (a) et Kayanza (b). D'à gauche à adroite : HDC ; LDC ; HDB ; LDB ; HDC-HDB ; HDC-LDB ; LDC-HDB ; LDC-LDB. RVC : revenu café ; RVB : revenu banane ; MOR&T : main d'œuvre récolte et transport café ; APL : achat paillis ; MOAP : main d'œuvre application paillis ; MOLS : main d'œuvre labour et sarclage ; MOEC : main d'œuvre entretien caféiers (arcure ; taille ; application pesticides et engrais) ; MOEB : main d'œuvre entretien bananiers ; AIC : achat intrants café ; AIE : achat intrant banane.

Tableau 6.10: Les valeurs du revenu, de la valeur ajoutée (VA) et du résultat brute de l'exploitation (RBE) en fonction des traitements dans les sites de Gitega et de Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type). Les valeurs sont en \$.

Traitement	RM	VAM	RBEM	RM	VAM	RBEM
Gitega				Kayanza		
HDC	938	688	-7	413	163	-447
LDC	549	299	-259	187	-63	-563
HDB	5029	4779	4345	7499	7249	6815
LDB	2874	2624	2209	4192	3942	3528
HDC-HDB	5662	5412	4689	7475	7225	6594
HDC-LDB	3538	3288	2561	4182	3932	3317
LDC-HDB	5376	5126	4532	7414	7164	6630
LDC-LDB	3166	2916	2348	4233	3983	3467

HDC : forte densité caféiers ; HDB : forte densité bananiers ; LDB : faible densité bananiers ; RM : revenu calculé avec le prix moyen ; VAM : valeur ajoutée calculée avec le prix moyen ; RBEM : résultat calculé avec le prix moyen.

6.4 Discussions des résultats

6.4.1 Caractéristiques de croissance

Les caféiers ont affecté le développement végétatif des bananiers à Gitega. Pendant la période de croissance, l'augmentation de la densité de caféiers a eu pour conséquence la diminution de la CRBB et de la TLA par plant sur les plantes mères (figure 6.3) et sur les rejets (tableau 6.4). A Kayanza, on observe le même effet négatif et significatif des caféiers sur la circonférence à la base des rejets (tableau 6.4), mais pas sur les plantes-mères. Cet effet négatif des caféiers sur les rejets de bananiers à Kayanza pourrait être dû à l'accroissement de la biomasse des caféiers au cours de l'essai. Ceci montre qu'à court terme (1^{er} cycle, plantes-mères), l'effet des caféiers sur la croissance des bananiers dépend du site, mais qu'à moyen terme (2nd cycle, rejets), les

jeunes caféiers ont fini par affecter négativement les caractéristiques de croissance des bananiers qui leurs sont associés à Kayanza. La diminution de la CRBB et de la TLA avec l'augmentation de l'ombrage a été observée par plusieurs auteurs (Israeli et al., 1995 ; Norgrove et Hauser, 1998 ; Saleh, 2005), et cette diminution est plus élevée au deuxième cycle (Israeli et al. 1995), donc sur les rejets. Ainsi, dans l'association bananiers et caféiers, les caractéristiques de croissance des bananiers de 1^{er} cycle ont été affectées par les caféiers (tableau 6.4) quand ces derniers étaient âgés avec une grande biomasse (figure 6.4). Quand la biomasse de caféiers était plus faible, comme pour le site de Kayanza (figure 6.4), l'effet des caféiers sur la croissance des bananiers ne commence à s'observer qu'à partir du deuxième cycle, c'est-à-dire sur les rejets. La compétition des plants de bananiers entre eux a été observée sur les plantes-mères et les rejets car les valeurs de CRBB et de TLA étaient en général statistiquement plus faibles dans les parcelles avec forte densité de bananiers (tableau 6.4). La diminution de la CRBB et du nombre de feuilles fonctionnelles (proportionnelle à la TLA) avec l'augmentation de la densité des bananiers a aussi été observée par Athani et al. (2009).

L'augmentation de la densité des bananiers a affecté significativement le DBC à Gitega et Kayanza et la HTC à Kayanza, avec une diminution du DBC et une augmentation de la HTC. La stimulation de la croissance en hauteur des caféiers (Campanha et al., 2004) et le ralentissement de l'accroissement du DBC (Montoya et al., 1961; Campanha et al., 2004) ont également été observés ailleurs dans des systèmes de cafiers sous ombrage. A Gitega, uniquement le DBC a été affecté significativement par la densité des caféiers. Cela pourrait être dû à l'âge des caféiers, plus élevé qu'à Kayanza, ayant eu pour conséquence une biomasse de caféiers plus élevée par parcelle et donc une plus grande compétition inter-plant (figure 6.4).

6.4.2 Caractéristiques physico-chimiques du sol et teneurs en éléments majeurs dans les feuilles des bananiers et des Caféiers

Sur la période de novembre 2009 à mai 2012, les caractéristiques physico-chimiques du sol n'ont pas été influencées par la densité des bananiers ou des

caféiers dans les deux sites. La biomasse de bananiers qui a été recyclée n'a pas modifié significativement les caractéristiques du sol en fonction de la densité de ces derniers. De même, les teneurs en éléments nutritifs dans les feuilles de bananiers n'ont pas été affectés par la densité des caféiers, signe que les caféiers étaient moins compétitifs pour les éléments nutritifs que les bananiers. Israeli et al. (1995) ont observé une augmentation de la teneur en chlorophylle dans les feuilles de bananiers sous ombrage. Dans la présente étude, les éléments impliqués dans la composition de la chlorophylle comme le N et le Mg n'ont pas augmenté avec l'augmentation de la densité des caféiers, même à Gitega où les caféiers étaient plus âgés avec une plus grande hauteur et donc plus d'ombrage pour les bananiers (tableau 6.4). Cela pourrait être dû au fait que la hauteur des bananiers finissaient par dépasser la hauteur des caféiers qui était autour de 2,8 m à Gitega, alors que celle du bananier était de 3m dans ce même site.

Alors que la densité des caféiers est restée sans effet sur la composition des feuilles de bananier, la densité des bananiers a influencé significativement les teneurs en P et K des feuilles de caféiers à Gitega et les teneurs en K à Kayanza. A Gitega, les teneurs en P étaient plus élevées dans les parcelles de caféiers en monoculture et plus faible dans les parcelles de caféiers en association avec les bananiers (tableau 6.6). Cela est conforme aux résultats de Sajan Kurien et al. (2006) qui ont montré que le bananier était plus compétitif pour le P dans le cas de cultures associées. En plus, les teneurs en P observées dans les feuilles de caféiers étaient inférieures à la valeur seuil normale de 0,15 % proposée dans la littérature (Snoeck et Lambot, 2009). Cette compétition a été observée à Gitega où le sol était pauvre en P (tableau 6.1). Cette compétition des bananiers pour le P pourrait être renforcée par sa capacité élevée à s'associer avec les mycorhizes (Rufyikiri et al., 2000, Rufyikiri et al., 2004). A Gitega et à Kayanza, les teneurs en K les plus élevées ont été enregistrées dans les parcelles de caféiers en monocultures (tableau 6.6). Les deux cultures sont très exigeantes en K (Carvajal, 1984 ; Lahav, 1995), mais le bananier semble avoir été plus compétitif pour cet élément. Cela est confirmé par le fait que la densité des caféiers n'a pas affecté significativement la teneur en cet élément dans les feuilles de bananiers.

Des augmentations significatives en N et Mg dans les feuilles de caféiers dans les parcelles associées avec les bananiers ont aussi été observées à Kayanza. Dans ce site, les caféiers étaient nettement ombragés par les bananiers avec une hauteur des bananiers à maturité de 3,1 m contre 2,2 m pour les caféiers. Les teneurs plus élevées en ces deux éléments dans les feuilles de caféiers dans les parcelles en association pourraient être dues à l'adaptation à l'ombrage par l'augmentation de la teneur en chlorophylle dans les feuilles de caféiers (Muschler, 1999). En effet, la teneur en chlorophylle est corrélée avec la teneur en N et Mg dans les feuilles (Shadchina et Dmitrieva, 1995). Plus précisément, la formation de la chlorophylle nécessite de N et du Mg (Niinemets et Tenhunen, 1997 ; Rodrigues et al., 2009). A Gitega, l'adaptation à l'interception de la lumière n'a pas été observée car les bananiers et les caféiers avaient presque la même hauteur.

6.4.3 Rendement de banane et de café

Le rendement de caféiers à forte densité en monoculture, densité la plus observée au Burundi (ISABU-OCIBU, 2009), était supérieur à la moyenne nationale à Gitega et inférieur à cette moyenne à Kayanza. Avec une moyenne nationale de 2,7 T/ha de café cerise pour les années de bonne production (Gaie et Flémal, 1988 ; Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, 2008 ; OCIBU, 2008), les valeurs enregistrées à Gitega étaient de 3,5 T/ha et de 1,5 T/ha à Kayanza. Comme la production de café au Burundi est caractérisée par une forte variabilité bisannuelle, ces valeurs mesurées étaient supérieures à la moyenne nationale pour les années de mauvaise production, qui est de 0,7 T/ha (OCIBU, 2008 ; Gaie et Flémal, 1988 ; Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, 2008).

Dans notre essai, le rendement des bananiers et le poids du régime étaient affectés négativement quand la biomasse de caféiers était élevée (figure 6.4). Ainsi, le poids du régime diminue avec l'augmentation de la densité des caféiers à Gitega (tableau 6.7) où les caféiers étaient plus âgés et donc présentaient une biomasse plus élevée. A Kayanza où les caféiers étaient plus jeunes, la diminution du rendement de bananiers et du poids du régime avec

l'augmentation de la densité des caféiers n'était pas significative. Cela signifie que la biomasse des caféiers était trop faible (figure 6.4) pour influencer significativement le rendement et le poids du régime des bananiers. De plus, la hauteur était plus faible à Kayanza, avec une valeur de 2,2 m contre 2,8 m à Gitega, mettant automatiquement les caféiers en-dessous des bananiers qui avaient 3,1 m de hauteur en moyenne dans ce site. A Gitega, la densité des bananiers a réduit significativement le poids du régime (tableau 6.7), et cela a été observé dans la littérature (Athani et al., 2009).

Le poids de cerises par plant et le rendement de café étaient négativement et significativement ($p \leq 0,05$) affectés par la présence des bananiers uniquement à Kayanza (tableau 6.8). Dans ce site, le poids de cerises par plant et le rendement par hectare diminuaient avec l'augmentation de la densité des bananiers (tableau 6.8). L'impact négatif des bananiers sur la production des caféiers n'a donc été observé que sur les caféiers jeunes (âgés de 4 ans après la taille de régénération) avec une plus faible biomasse (figure 6.4). Une diminution de la production de café dans les systèmes ombragés a été rapportée par plusieurs auteurs (Campanha et al., 2004; Jaramillo-Botero et al., 2010). A Gitega par contre, les caféiers plus âgés avec plus de biomasse (figure 6.4) n'ont pas été sensibles à la compétition avec les bananiers. La présence des bananiers n'a eu aucun effet sur le poids de 100 cerises dans les deux sites. Cela peut suggérer que le rendement est le premier à être affecté par l'ombrage et que le poids de 100 cerises n'est pas affecté à court terme. En effet, l'accroissement du poids de 100 cerises suite à l'ombre rapporté dans la littérature (Muschler, 2001 ; Lara-Estrada et Vaast, 2004 ; DaMatta et al., 2008 ; Bosselmann et al. 2009 ; Siles et al., 2010) et observé sur les jeunes caféiers (chapitre 5) n'a pas été confirmé par les essais sur des caféiers matures même dans le site de Kayanza où les bananiers étaient dans la strate supérieure.

6.4.4 Répartition des éléments majeurs dans le compartiment végétal

La quantité d'éléments nutritifs immobilisés par les biomasses aériennes de bananiers et de caféiers était plus élevée dans les parcelles en association avec les fortes densités des deux cultures (tableau 6.9). En particulier, les

valeurs de K et de N immobilisées dans la biomasse aérienne des bananiers et ceux exportées par les récoltes étaient considérables (tableau 6.9). D'importantes exportations et immobilisations des éléments nutritifs par les bananiers, particulièrement le K et le N, ont été reportées dans d'autres études (Lahav, 1995 ; Nyombi et al., 2010). Le flux des éléments nutritifs (du sol à la biomasse aérienne et de la biomasse aérienne à la récolte et au recyclage des résidus) était plus rapide pour le bananier.

Avec autant d'éléments nutritifs exportés et immobilisés, il faudra apporter plus d'éléments dans les parcelles avec bananiers pour maintenir la durabilité du système prioritairement le K et le N. Si non, l'épuisement du sol sera rapide. Les éléments pris au sol (immobilisés et exportés) devront être compensés par l'application du paillis ou d'engrais. Vu la forte rentabilité observée dans les parcelles de caféiers associées avec les bananiers, il est donc possible d'investir dans ces intrants et de garder un profit.

6.4.5 Rentabilité de l'association bananiers-caféiers

Déjà à première vue, l'association des bananiers avec les caféiers était très bénéfique. Les rapports d'équivalence de la terre (land equivalence ratio : LER) étaient partout supérieurs à 1 (Willey, 1985), avec un minimum de 1,71 et un maximum de 1,97. Même s'il y avait une compétition entre les deux cultures, les rendements ont été maintenus à un niveau acceptable car si le rendement de chaque culture était resté le même en association ou en monoculture le LER aurait été égal à 2 (Willey, 1985).

Les revenus sont plus élevés dans les parcelles associées (tableau 6.10). Pour chaque niveau de densité des caféiers (faible densité, forte densité), les revenus augmentaient significativement avec l'augmentation de la densité des bananiers. La part du bananier dans les revenus était très élevée dans les deux sites bien que plus importante à Kayanza comparativement à Gitega. Une augmentation du revenu dans les parcelles de caféiers associés avec des bananiers a aussi été rapportée dans d'autres pays comme en Ouganda (Van Asten et al. 2011) et en Tanzanie (Chipungahelo, 2006). De même, la VA

augmentait avec l'augmentation de la densité des bananiers dans chaque catégorie de prix des caféiers. Pour le prix correspondant au quartile inférieur, la VA était négative dans les parcelles de caféiers à Kayanza (tableau 6.10). Cela montre que quand le rendement et les prix sont faibles, les revenus tirés de la vente de café ne permettent même pas de couvrir le coût du paillis. En utilisant le prix du quartile inférieur dans les calculs, le RBE était négatif dans les deux sites dans les parcelles de caféiers en monoculture (tableau 6.10). Même les rendements élevés observés à Gitega n'ont pas permis d'avoir un RBE positif avec ce prix. Avec la forte cyclicité de production de café entre deux années successives (Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008) et la faiblesse des prix de cerises, tous les caféiculteurs vivent cette situation (RBE négatif) au moins une année sur deux. Mais avec l'introduction des bananiers, les RBE étaient partout positifs et maintenus à plus de 1500 \$ même avec la faible densité. Ainsi, les bananiers ont permis d'augmenter significativement la rentabilité et de stabiliser les revenus. La stabilisation des revenus des caféiculteurs est un défi car le prix de café cerise est passé de 0,51 \$ en 2011 (CNAC, 2012) à 0,28 \$ à la fin de la campagne de 2012 (InterCafé, 2012). Avec un rendement moyen de 3,5 T/ha et 1,3 T/ha enregistré dans les parcelles de caféiers avec forte densité de caféiers à Gitega et à Kayanza, il faudrait un prix de 0,27 \$ à Gitega et de 0,67 \$ à Kayanza pour couvrir toutes les dépenses (RBE = 0). Le premier prix a été atteint en 2009 mais le second prix n'a pas été enregistré au cours des 12 dernières années. Les bananiers associés aux caféiers permettraient donc d'augmenter la VA et le RBE pendant les années de bonne production et d'éviter le RBE négatif pendant les années de mauvaise production. En effet, même sans production de café, la VA et le RBE restent toujours positifs dans les parcelles avec bananiers. La réduction de rendement suite à l'accroissement de la densité des caféiers est très faible (7 %) pour influencer significativement les revenus. L'association des deux cultures permettrait en outre d'optimiser l'utilisation de la main d'œuvre, car certains travaux sont communs aux deux cultures (paillage, sarclage). Les rendements obtenus à Gitega et Kayanza correspondent à l'année faible production, avec des chutes de rendement plus marquées à Kayanza. En effet, la production par plant qui est de 1,4 kg dans les parcelles sans bananiers à Gitega (tableau 6.8) était de 1,8 kg/ha en 2010 lors de la prise des données sur les modèles de prédiction

des rendements des caféiers (chapitre 4 ; caféiers âgés de 4 ans après la taille de régénération). La production par plant à Kayanza était de 0,6 kg en 2011 (tableau 6.8) contre 3,3 kg en 2010 (chapitre 4).

6.4.6 Interactions entre les bananiers et les caféiers

Aucune des deux cultures ne s'est avérée systématiquement plus compétitive par rapport à l'autre. Tout dépendait du stade de développement de l'une d'elles. Quand les caféiers étaient plus développés (hauteur élevée, grand diamètre à la base) comme c'est le cas à Gitega (tableau 6.5), la croissance et le rendement des bananiers étaient négativement affectés (figure 6.3 ; tableau 6.4 ; tableau 6.7). Lorsque les caféiers étaient jeunes avec une faible biomasse (figure 6.4), ce qui était le cas à Kayanza, le rendement et la croissance de ces derniers étaient négativement affectés par les bananiers (tableau 6.5 ; tableau 6.8). Ainsi, les caféiers et les bananiers sont en perpétuelle compétition et la culture qui est la moins affectée est celle qui, au départ, était suffisamment développée. La fertilité des sols pourrait aussi avoir joué un rôle dans la compétition entre ces deux cultures. En effet, le sol de Kayanza était globalement plus fertile que celui de Gitega (tableau 6.1) et aurait pu favoriser la croissance des bananiers qui sont plus compétitifs en terme de production de biomasse et d'absorption d'éléments nutritifs (chapitre 5 ; tableau 6.9). De la sorte, il n'y a pas de synergie entre les bananiers et les caféiers comme c'est le cas par exemple dans l'association entre les légumineuses et les céréales (Andersen, 2004). Le maintien de la production de l'une des deux cultures dépend de la gestion de la biomasse de l'autre culture.

6.5 Conclusion

Les bananiers et les caféiers étaient en compétition. Cependant, il n'y avait pas une culture qui dominait toujours sur l'autre, le développement de chacune des deux dépendant du développement de l'autre. A Gitega où les caféiers étaient plus développés, les bananiers ont été affectés négativement. Par contre, à Kayanza où les caféiers étaient jeunes, les performances de ces derniers ont été négativement affectées par les bananiers. Chaque culture a affecté les

caractéristiques de croissance de l'autre, et cela s'était répercuté sur la production par plant et le rendement par hectare. Mais, les chutes de rendement étaient nettement faibles pour décourager l'association des caféiers avec les bananiers. Une compétition pour le P au détriment des caféiers a été observée à Gitega où le sol était pauvre en cet élément. De même, une compétition pour le K au détriment des caféiers a été observée dans les deux sites. L'adaptation des caféiers à l'ombrage leur a permis d'être plus compétitifs pour le N et le Mg à Kayanza, où les caféiers étaient en dessous des bananiers. Les quantités d'éléments nutritifs exportés ou immobilisés étaient plus élevées dans les parcelles en association. Les rapports d'équivalence de la terre (LER) étaient proches de 2, signe que les rendements n'avaient pas de façon importante chuté suite à l'association. Les bananiers ont permis d'augmenter les revenus, la valeur ajoutée et le résultat brut de l'exploitation. Les revenus tirés de la banane ont permis d'éviter un RBE négatif à Kayanza. Cette forte rentabilité de l'association des caféiers avec les bananiers pourrait permettre aux producteurs d'investir dans l'achat d'intrants (paillis et engrais par exemple) et de rendre le système plus durable.

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

7.1 Situation de la caféiculture au Burundi

La caféiculture burundaise est soumise à plusieurs contraintes qui affectent sa rentabilité. La cyclicité de la production (chapitre 2) et le faible prix à l'achat des cerises figurent parmi les plus importantes (Ngayempore, 2007). Malgré, sa faible productivité, le caféier reste une culture stratégique pour le pays car il est la première source de devises et procure une part non négligeable du PIB (Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, 2008 ; BRB, 2010). On observe par ailleurs une baisse de la production des denrées alimentaires et une augmentation des prix des denrées alimentaires (Fews net, 2010) Ceci pousse les petits producteurs à négliger leurs parcelles de caféiers et à investir dans les productions vivrières, dont la banane. Ce délaissement des caféières s'observe par exemple au niveau du faible renouvellement des plantations, de l'absence de fertilisation autre que via le paillage, ou encore par la taille de régénération pratiquée à des intervalles souvent trop longs (Chapitre 2).

Pour permettre aux caféiculteurs d'accroître la production de denrées alimentaires et d'avoir des revenus intermédiaires, la pratique de l'association des caféiers avec des cultures annuelles a été proposée par la recherche (Nduwayo, 2007), mais sans que cela n'ait fait l'objet d'une large diffusion, sans doute par crainte de l'Etat de voir baisser la production nationale de café. Cependant, dans la situation actuelle de manque de terres cultivables (Gouvernement du Burundi, 2011), l'association des caféiers avec d'autres cultures est l'une des voies pour augmenter la productivité des exploitations et assurer la sécurité alimentaire. Plutôt que d'opposer cultures vivrières et cultures de rente (café), l'association de culture pourrait donc constituer une alternative pour assurer la pérennité du système café.

7.2 Système de culture et de production de banane et de café

Alors que le caféier est une culture stratégique pour l'Etat burundais, la culture de la banane joue quant à elle un rôle central dans l'alimentation des ménages

et dans la vie sociale. Par ailleurs, c'est une source importante de revenu pour les ménages. En effet, en moyenne sur les 10 dernières années, les prix de vente au kilo du café cerise et de la banane ne sont pas tellement différents, mais la production de banane à l'hectare est nettement plus élevée que celle du café (chapitre 2, 3, 5 et 6). Le bananier est cultivé plus ou moins loin des habitations, avec des incidences directes sur leur productivité. En effet, les rendements de banane sont meilleurs près des habitations que loin des habitations (chapitre 2), en particulier en raison des apports directs d'amendements organiques sous forme de déchets ménagers près des habitations. L'application de fertilisants organiques et minéraux n'est par contre réalisée que dans les parcelles où le bananier est associé avec d'autres cultures. Cela a été observé dans les parcelles éloignées des habitations (chapitre 2) et dans les sous-parcelles de bananiers éloignées des caféiers (chapitre 3). L'association des cultures, dans les parcelles éloignées des habitations, inciteraient donc les agriculteurs à investir dans l'engrais.

La vulgarisation a toujours promu la monoculture de café, mais un lien fort unit ces deux cultures. En effet, les caféiers font l'objet d'un paillage intensif, constitué en grande partie par des résidus de bananiers (Cochet, 1996 ; Chapitre 2 et 3). Ceci conduit à un transfert de fertilité depuis les parcelles de bananiers vers les parcelles de caféiers, menant à l'enrichissement des parcelles de caféiers au détriment des parcelles de bananiers.

Vu la valeur alimentaire et économique des bananes, la faible rentabilité économique du café et le manque d'espace agricole, on observe une complexification du système banane-café. En effet, les agriculteurs ont commencé à investir l'espace tampon situé autour des parcelles de caféiers en y plantant des bananiers. Cette pratique, a priori déconseillée par les services de vulgarisation car pouvant potentiellement porter préjudice à la productivité du caféier, présente plusieurs avantages. Le transfert de matière (résidus de culture) des bananiers vers les caféiers pour le paillage est facilité, vu la proximité. Cela permet aussi aux bananiers proches des caféiers de bénéficier de l'amélioration de la fertilité des parcelles de caféiers, avec de meilleurs rendements (chapitre 3). Contrairement à ce qui pouvait être attendu, cette proximité n'induit pas de baisse de rendement chez le caféier. Au contraire, le

rendement en café cerise est maintenu avec une amélioration de la qualité (cerises plus grosses), vraisemblablement liée à un effet d'ombrage (chapitre 2). Il est cependant possible que, vu la meilleure fertilité du sol dans les sous-parcelles de caféiers proches des bananiers, le rendement de café aurait vraisemblablement pu être meilleur sans la proximité des bananiers (chapitre 3). Néanmoins, cette proximité entre les deux cultures au niveau des bordures de parcelles apparaît donc comme une première étape vers une plus grande intégration des caféiers et des bananiers.

Les caféiers adjacents aux bananiers se trouvent sur des parcelles plus riches que la moyenne des parcelles de caféiers. Les teneurs en C et N sont plus élevées dans les parcelles de caféiers adjacentes aux parcelles de bananiers que dans la moyenne des parcelles de caféiers (chapitre 2 ; chapitre 3). Cela pourrait être dû à l'extension de la culture de café qui a été réalisée dans les années 1980-1990 sur des sols marginaux (Ngayempore, 2007 ; OCIBU, 2008 ; Hatungimana, 2009). Cela pourrait aussi être dû à un meilleur paillage lorsque les caféiers sont proches de bananiers. En effet, même si la méthode d'estimation du paillis n'était pas la même dans les deux études, toutes les parcelles de caféiers adjacentes aux parcelles de bananiers étaient moyennement et suffisamment paillées (chapitre 3). Ce bon niveau de paillage a été observé au mois de février-mars, période pendant laquelle le paillage intensif n'est pas recommandé en caféiculture (Gaie et Flémal, 1988). Cela laisse supposer que pendant la période de paillage intensif (juillet-août) (chapitre 2), ces parcelles seraient encore mieux paillées. La carence en N observée dans les parcelles de caféiers en général (chapitre 2) n'a pas été observée dans les parcelles de caféiers adjacentes aux parcelles de bananiers (chapitre 3), démontrant encore une fois le meilleur niveau de fertilité des parcelles de caféiers proches des bananiers. Néanmoins, dans les deux études, la carence en Zn a été toujours observée (chapitre 2, chapitre 3).

7.3 Prédiction de la production de cerises de café par plant

Les relations allométriques utilisant les caractéristiques de croissance des caféiers (longueur du rameau, hauteur et diamètre à la base de la tige et le

nombre de rameaux primaires par tige) ne permettent pas d'estimer à elles seules et de façon fiable les rendements de café cerise pour une diversité de situations rencontrées au Burundi (chapitre 4). Cependant, pour des caféiers qui se trouvent dans des conditions similaires (même âge après la taille de régénération, même site), des relations allométriques significatives peuvent parfois être trouvées entre les caractéristiques morphologiques des plantes et les composantes de rendement (chapitre 3 et 4). Ainsi, la circonférence à la base des caféiers était significativement corrélée avec le nombre de rameaux fructifères pour les caféiers de Gitega, et le nombre de nœuds du plus long rameau était significativement corrélé avec le nombre de nœuds fructifères par rameau pour les caféiers de Kayanza (chapitre 4). Cette difficulté à établir des relations allométriques est liée en partie au mode de gestion des caféiers au Burundi, comme le retard dans la taille de régénération, ainsi que des conditions de croissance sous-optimales et variables (chapitre 2). Ainsi, dans les conditions de forte variation bisannuelle de production de café (OCIBU, 2008 ; chapitre 2), des modèles allométriques ne sont pas bien indiqués pour estimer le rendement de café cerises par plant. Les modèles non allométriques basés sur les composantes de rendement sont plus facilement généralisables et permettent d'avoir un meilleur ajustement du rendement par plant. Ils présentent une grande utilité pour l'estimation du rendement en un seul passage avant la récolte, par exemple à des fins scientifiques ou dans un but de planification. Ils peuvent également être utilisés pour estimer les pertes de rendements associées à certaines maladies affectant les caféiers après le début de la récolte.

7.4 Association bananiers-caféiers

Bien que déconseillée, la pratique de l'association de caféiers et de bananiers tend à se répandre (chapitre 2). Il convient donc de s'intéresser aux effets de l'introduction de bananiers dans des caféiers, tant pour des jeunes plantations que des plantations âgées.

Dans les jeunes plantations, il n'y a pas eu d'effet des caféiers sur la croissance et le rendement des bananiers (chapitre 5), mais les caféiers ont été fortement

affectés par les bananiers (chapitre 5). Dans les anciennes plantations de caféiers, aucune des deux cultures ne s'est avérée systématiquement plus compétitive par rapport à l'autre. Tout dépendait du stade de développement de l'une et l'autre. Quand les caféiers sont plus développés (hauteur élevée, grand diamètre à la base) comme c'était le cas à Gitega, la croissance et le rendement des bananiers sont négativement affectés (chapitre 6). Lorsque les caféiers sont plus jeunes avec une faible biomasse, ce qui était le cas à Kayanza, le rendement et la croissance de ces derniers sont négativement affectés par les bananiers (chapitre 6).

Le poids de cerises (un des indicateurs de la qualité de café) était plus élevé dans les parcelles ou les sous-parcelles de caféiers ombragées par les bananiers. Cela a été observé dans les essais avec les jeunes caféiers (chapitre 5) et dans les parcelles de bananiers et de caféiers adjacentes (chapitre 3). L'obtention de cerises plus lourdes pourrait être un des avantages de l'association des caféiers avec les bananiers. Dans des observations réalisées en milieu rural, il y avait une meilleure maturation des cerises chez les caféiers ombragés par les bananiers comparativement aux caféiers sans ombrage (photo 7.1). Cela permet de confirmer d'avantage l'hypothèse comme quoi l'association des caféiers avec les bananiers permettrait d'augmenter la qualité de café. Cela pourrait être pris en compte dans la rémunération des caféiculteurs car la privatisation en cours vise à permettre une concurrence dans l'achat de cerises et une spécialisation pour certains dans le café de haute qualité. Cette augmentation du poids moyen de cerises n'a cependant pas pu être mise en évidence dans les essais réalisés avec des caféiers matures (chapitre 6).



a



b

Photo 7.1 : vue des cerises de caféiers prises dans une même parcelle et au même moment sur un plant de caféier sans ombrage (a) et sur un plant de caféier sous ombragé de bananier (b) à Kayanza dans la région naturelle de Buyenzi, province de Kayanza (photo A. Nibasumba).

La croissance des caféiers est affectée par l'ombrage. Pour les caféiers adultes, l'ombrage a conduit à une augmentation de la hauteur (chapitre 3 ; chapitre 6) et des entrenœuds des rameaux (chapitre 3). Par contre, le diamètre à la base était plus faible chez les caféiers ombragés (chapitre 3 ; chapitre 6). Quand les caféiers sont jeunes, l'augmentation de la hauteur des caféiers suite à l'ombrage n'est plus observée. Toutes les caractéristiques de croissance sont plus faibles sous ombrage (chapitre 5). La compétition pour la lumière a été particulièrement détaillée dans les essais avec jeunes caféiers. Avec ces caféiers, l'ombrage dû aux bananiers réduit les performances de croissance et le rendement (chapitre 5).

La présence des bananiers à proximité ou dans les parcelles de caféiers permet de recycler des quantités importantes de résidus de bananiers. Dans le cas des parcelles adjacentes de bananiers et de caféiers, le paillis était constitué presque exclusivement par des résidus de bananiers dans les parcelles de caféiers proches des bananiers (chapitre 3). Dans les essais, la quantité de biomasse de bananiers recyclée augmentait avec l'augmentation de la densité de bananiers (chapitre 5 ; chapitre 6). Les éléments nutritifs immobilisés ou exportés étaient plus élevés dans les parcelles de caféiers associés avec des bananiers (chapitre 5 ; chapitre 6). Pendant les premiers mois de croissance, les bananiers absorbés plus d'éléments nutritifs que les

caféiers. Pour maintenir la production, il donc faut apporter les éléments nutritifs exportés sous forme de paillis externe ou de fertilisants organiques ou inorganiques. L'effet négatif des bananiers sur le rendement et la croissance des caféiers pourrait se renverser à long terme au profit des caféiers si un apport constant en éléments nutritifs n'est pas réalisé. Les bananiers ayant plus de besoins en éléments nutritifs que les caféiers pendant les premières années de plantation, l'appauvrissement du sol va réduire leur biomasse et partant son effet négatif sur les caféiers. Cela a été observé à Gitega où le sol était pauvre. Au deuxième cycle de production, le rendement et la croissance des bananiers ont chuté et les caféiers en association ont rattrapé les caféiers en pure pour certaines caractéristiques de croissance (chapitre 5).

La teneur des éléments nutritifs dans les feuilles de caféiers semble dépendre de leur stade de développement et de la présence des bananiers. La teneur en N dans les feuilles était plus élevée dans les caféiers ombragés. En effet, dans les sous-parcelles de caféiers proches des bananiers, la teneur en N était plus élevée (chapitre 3). Dans les jeunes plantations de caféiers, la teneur en N augmentait avec l'augmentation de l'ombrage (chapitre 5). A Kayanza, dans les anciennes plantations de caféiers avec des caféiers moins développés, les teneurs en N dans les feuilles étaient également plus élevées en présence d'une forte densité de bananiers (chapitre 6). Dans nos essais, les tendances étaient les mêmes pour les teneurs en Mg dans les feuilles de caféiers. Ainsi, sous ombrage, les caféiers ont tendance à concentrer plus de N et de Mg dans leurs feuilles, éléments impliqués dans la fabrication de la chlorophylle (Rodrigues et al., 2009), pour mieux intercepter la lumière (Evans, 1993; Niinemets, 2007). Par contre, les teneurs en K observées dans les feuilles de caféiers diminuaient avec l'augmentation de la densité de bananiers (chapitre 5 ; chapitre 6). La grande quantité de K absorbée par les bananiers (Lahav, 1995) pourrait être la cause de ces plus faibles valeurs de K observées dans les feuilles de caféiers en association avec les bananiers. Dans les sols pauvres en P, l'augmentation de la densité de bananiers a conduit à une diminution de cet élément dans les feuilles de caféiers (chapitre 6). Ainsi, l'augmentation de la densité de bananiers dans les parcelles de caféiers doit être accompagnée par une augmentation de la quantité de K apportée, et dans

les sols pauvres en P par un apport de P. Les caféiers n'ont pas affecté significativement l'absorption des éléments nutritifs chez les bananiers, même dans les anciennes plantations de caféiers comme à Gitega, où les caféiers étaient plus âgés, avec plus de biomasse et une hauteur proche de celle des bananiers (chapitre 6).

L'association bananiers-caféiers qui apparaît comme une association entre deux cultures pérennes est très dynamique dans le temps. Les plants de bananiers se renouvèlent à chaque fin de cycle qui dure autour de 18 mois dans les conditions du Burundi. Les plants de caféiers subissent une taille de régénération tous les 7 ans. La culture récemment renouvelée devient donc moins compétitive que la culture qui reste sur terrain. Cela a été observé dans les jeunes plantations de caféiers (chapitre 5), les caféiers récemment taillés à Kayanza (chapitre 6) et les bananiers plantés dans des caféiers à la fin du cycle à Gitega (chapitre 6).

L'association des caféiers avec les bananiers s'est avérée bénéfique. Les valeurs de LER (land equivalent ratio) étaient toujours supérieures à 1 dans l'association des bananiers avec les jeunes caféiers (chapitre 5), et proches de 2 dans l'association des bananiers avec les caféiers matures (chapitre 6). Dans les parcelles avec caféiers en monoculture, les revenus obtenus étaient souvent faibles. Chez les jeunes caféiers, sur les 3 premières années, la valeur ajoutée et le résultat brut de l'exploitation étaient négatifs. C'est donc pendant les premières années de l'installation des caféiers que l'agriculteur a besoin de revenus complémentaires. En effet, les investissements surtout en main d'œuvre, sont très élevés pendant cette période alors qu'il n'y a pas de production (Gaie et Flémal, 1988). L'association des bananiers avec les caféiers a permis d'augmenter les revenus et d'éviter des valeurs de résultats bruts d'exploitation souvent négatifs dans les parcelles de caféiers en monoculture (chapitre 5). Chez les caféiers matures, le rendement plus élevé observé à Gitega a permis de générer des résultats positifs dans les parcelles de caféiers. Mais, l'introduction des bananiers a permis d'augmenter considérablement le résultat brut de l'exploitation. Il est probable que la caféiculture en monoculture ne continue à être pratiquée qu'en raison de

l'implication directe de l'Etat dans cette culture pendant de nombreuses décennies compte tenu de sa contribution dans la balance commerciale nationale et de l'apport en devises étrangères qu'elle génère. La forte contribution de la banane dans les revenus observés dans les parcelles en association est due au faible rendement de café, au prix élevé de la banane et au faible prix d'achat des cerises. Ainsi, les résultats observés au Burundi pourraient être différents dans d'autres pays où le prix de la banane serait plus faible et le prix de cerises et le rendement de café seraient plus élevés.

La compétition pour l'eau n'a pas été analysée suite à des problèmes avec l'instrument de mesure.

7.5 Réalisation des objectifs et vérification des hypothèses

Les objectifs fixés au début de la thèse ont été réalisés. L'effet de l'ombrage procuré par les bananiers sur la croissance des caféiers a été montré au chapitre 5. Nous avons remarqué que les caractéristiques de croissance des caféiers diminuaient avec l'augmentation de l'ombrage. Dans les chapitres 5 et 6, les éléments nutritifs absorbés, exportés ou recyclés par les deux cultures ont été quantifiés. Avec ces résultats ci-haut, le premier objectif qui était d'étudier les effets réciproques des bananiers et des caféiers a été réalisé. Les effets de ces interactions sur le rendement des bananiers et des caféiers (deuxième objectif) et la rentabilité de l'association bananiers-caféiers (troisième objectif) ont été aussi analysés dans les chapitres 5 et 6.

L'hypothèse selon laquelle les bananiers affectent négativement la croissance et le rendement de caféiers a été vérifiée uniquement lorsque les caféiers étaient encore jeunes, c'est-à-dire à la plantation (chapitre 5) ou après une récente taille de régénération comme c'était le cas à Kayanza (chapitre 6). Chez les caféiers, beaucoup plus âgés, cette hypothèse n'est pas vérifiée car les caféiers affectent négativement la croissance et le rendement de bananiers (chapitre 6). L'hypothèse selon laquelle les bananiers affectent positivement la qualité de café a été vérifiée dans les parcelles de caféiers proches des bananiers (chapitre 3) et dans les jeunes plantations de caféiers (chapitre 5).

L'association des caféiers avec les bananiers était plus rentable que la caféiculture en monoculture et cela d'après les résultats des chapitres 5 et 6.

7.6 La problématique de diffusion et transférabilité de la technologie

Le système de caféiers et bananiers en association ne sera pas difficile à diffuser. De nombreux agriculteurs exploitent déjà les interactions en plantant des bananiers à proximité des caféiers (chapitre 3), et même actuellement, certains agriculteurs associent déjà les caféiers avec les bananiers (chapitre 2). Cela a été observé dans différentes régions naturelles, notamment à Mumirwa (photo 7.2). D'autres agriculteurs sont prêts à appliquer la technique s'il y a accord des services d'encadrement.



Photo 7.2 : Parcelles avec caféiers et bananiers associés à Bukinanyana dans la région naturelle de Mumirwa, province Cibitoke (photo A. Nibasumba).

D'après nos résultats, les agriculteurs pourraient mettre les caféiers dans les parcelles de bananiers existantes parce que ces caféiers n'ont pas affecté les performances de croissance des bananiers et leurs rendements quand les caféiers étaient encore jeunes (chapitre 5). Cette introduction de caféiers pourrait se faire dans les parcelles de bananiers proches des habitations pour ne pas concurrencer les cultures associées avec les bananiers comme le haricot cultivé dans les parcelles éloignées des habitations (chapitre 2). Les parcelles proches des habitations sont aussi plus fertiles et donc plus à même

de subvenir aux besoins accru en éléments nutritifs qu'implique l'association bananiers-caféiers. L'introduction des caféiers dans les parcelles de bananiers pourrait permettre l'extension de la culture de café dans les conditions actuelles de faible disponibilité en terre cultivable (Gouvernement du Burundi, 2011). Cette extension permettrait d'augmenter la production de café, qui a beaucoup stagné (OCIBU, 2008). Pour augmenter le rendement de café, le contrôle de la biomasse de bananiers par la réduction de la densité, l'œilletonnage et l'élagage des feuilles pourrait permettre de réduire les compétitions entre les deux cultures. Par ailleurs, l'introduction de bananiers dans les anciennes plantations de caféiers permettrait d'augmenter sensiblement les revenus et les profits des petits producteurs, incitant les caféiculteurs à investir dans les parcelles de caféiers en termes de temps et d'intrants (chapitre 6). Dans les anciennes plantations de caféiers, l'effet négatif du bananier sur les rendements des caféiers était élevé à Kayanza où l'âge des caféiers et leur biomasse étaient inférieurs à ceux de Gitega (chapitre 6). Ainsi, les compétitions et les interactions observées quand les bananiers sont associés avec des jeunes caféiers peuvent également être observées pour les vieux caféiers récemment régénérés. Là aussi, un contrôle adéquat de la biomasse des bananiers sera donc nécessaire, surtout dans les premières années qui suivent la taille de régénération.

Vu les bénéfices de l'association des les caféiers avec les bananiers, les principes de l'association bananiers-caféiers seraient i) d'introduire les caféiers dans les plantations existantes de bananiers. Le rendement de café sera faible mais constituerait une source supplémentaire de revenus (chapitre 5). La perte de rendement pourrait partiellement être compensée par un gain de qualité du café. ii) d'introduire les bananiers dans les plantations existantes de caféiers. La faible densité utilisée dans les essais pourrait être proposée dans ce cas car cette densité a eu un faible impact sur le rendement de café. D'autres techniques permettant de réduire sensiblement l'ombrage exercé par les bananiers comme la réduction du nombre de rejets et le nombre de feuilles par plant de bananiers seraient nécessaires pour éviter la compétition pour la lumière ainsi que pour l'eau et les nutriments. iii) de mettre les caféiers dans les nouvelles extensions de parcelles de bananiers et de caféiers. Les bananiers et

les caféiers pourraient être plantés en même temps comme pour les essais du chapitre 5. Dans cette association, les densités maximales de bananiers et de caféiers pourraient être gardées. Comme pour le point i), une chute de rendement de café sera attendue.

Les résultats obtenus dans cette thèse ne permettent pas de proposer une densité de bananiers qui n'affecte pas la production de café. Pour maintenir un bon niveau de rendement de café, la forte densité de caféiers est à maintenir (chapitre 5 ; chapitre 6).

L'association des caféiers avec les bananiers permettrait de motiver les caféiculteurs. Dans certaines études réalisées en milieu rural en Ouganda, le rendement de café et les caractéristiques physico-chimiques du sol étaient plus élevés dans les parcelles en association avec les bananiers qu'en monoculture (van Asten, 2011). Cela pourrait être dû, en partie, à l'intérêt que les agriculteurs apportent à ce système. Ainsi, ils investissent en intrant (engrais, paillis) et en main d'œuvre car ce système est plus rentable (chapitre 5 ; chapitre 6). Cette situation pourrait se reproduire au Burundi, permettant de porter le rendement de café en association à un niveau supérieur à celui observé actuellement en monoculture.

La diffusion des résultats de l'association des caféiers avec des bananiers comportent des risques. Les autorités de la filière café doivent se préparer techniquement pour accompagner les caféiculteurs dans cette association. Il faut d'abord assurer des formations aux encadreurs et produire des manuels techniques. Si l'association des caféiers avec des bananiers venait à être autorisée, les caféiculteurs risquent de prendre une avance sur les services d'encadrement. Cela aurait comme conséquence une association incontrôlée qui affecterait négativement la production de café. Les caféiculteurs pourraient être enclin à favoriser les bananiers qui sont plus productifs. De plus, dans le contexte actuel d'insécurité alimentaire et de pauvreté (Zoyem et al., 2008 ; Fewes net, 210), la banane intéresse plus les agriculteurs que le café. Il serait alors important que le gouvernement investisse dans la production vivrière pour assurer la sécurité alimentaire.

7.7 Perspectives de recherche

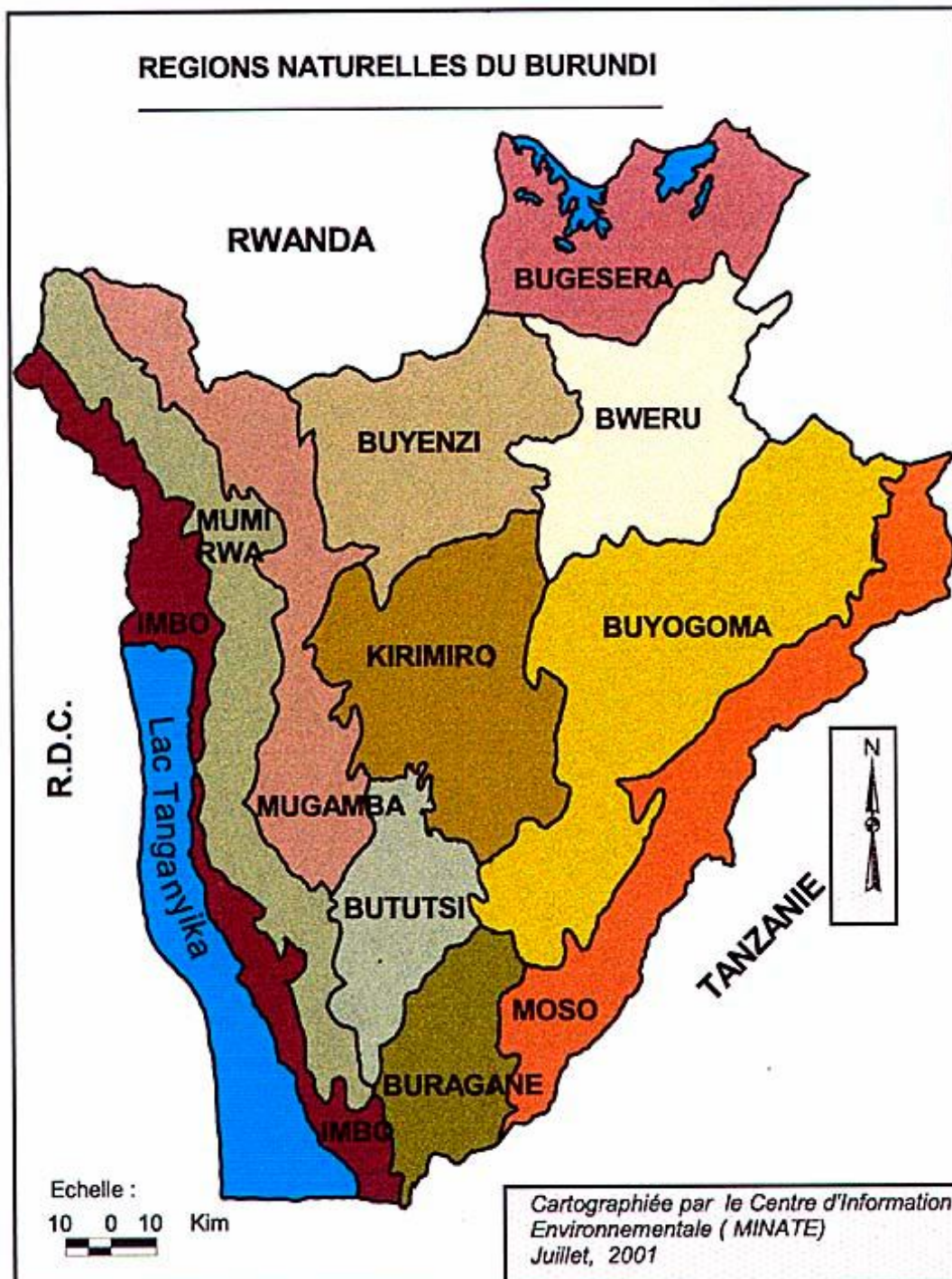
Cette thèse n'a fait que défricher un vaste terrain de recherche et plusieurs questions restent sans réponses. C'est pour cela qu'une série de recherches ultérieures est proposée.

- 1) L'association bananiers-caféiers exportent beaucoup de nutriments, surtout quand les deux cultures sont présentes à forte densité. Une étude sur la fertilisation organo-minérale et de son opportunité économique pour le maintien de la production des deux cultures est nécessaire.
- 2) La faible rentabilité de la caféiculture au Burundi est reconnue par tous les intervenants de la filière. Peu d'études ont été réalisées. Ainsi, une étude économique détaillée est indispensable pour montrer la rentabilité des caféiers et là où il faut agir pour augmenter cette rentabilité.
- 3) L'étude de la qualité du café n'a pas été réellement réalisée dans cette thèse. Seul l'impact sur le poids de cerises a été montré. Une étude détaillée de l'effet des densités croissantes de bananiers sur la qualité de café est à faire.
- 4) Dans l'association bananier-caféier, il est important d'étudier le meilleur type de taille de formation du caféier. C'est-à-dire qu'il faut étudier l'effet de garder une seule tige ou plusieurs tiges de caféier dans le système associé. En effet, en Tanzanie, il est recommandé de garder une seule tige dans les systèmes ombragés mais plusieurs tiges (3 ou 4) en monoculture (Baijukya et al., 2006). En plus, la taille apicale des caféiers permettrait de maintenir une plus grande distance entre la canopée du bananier et les caféiers.
- 5) Les densités utilisées dans cette étude étaient élevées. Ainsi, les essais utilisés dans cette thèse ne permettent pas de faire une proposition claire de la densité de bananiers à mettre dans les caféiers. Mais, comme nous avons vu que l'augmentation de la densité de caféiers permet d'augmenter le rendement de café, un essai en série additive (Connolly et al., 2001) avec l'augmentation de la densité de bananiers en utilisant la densité maximale de caféiers permettra de répondre à cette question ;

- 6) D'autres paramètres pourraient affecter le rendement de café dans le système associé. Ce sont notamment l'orientation des lignes de bananier par rapport à la trajectoire du soleil, le nombre de feuilles à garder sur le plant de bananier, la différence de hauteur entre le plant de bananier et le plant de caféier, la pente, etc. Ces paramètres pourront faire objet d'une étude dans une enquête diagnostique en milieu rural.
- 7) Les résultats de cette étude se sont basés sur seulement une année de récolte de café. Un suivi des essais sur une période de 5 à 7 ans est nécessaire pour montrer les vraies tendances sur l'ensemble d'un cycle de taille, surtout que les conclusions d'une recherche de café nécessitent au moins 7 ans.

ANNEXES

Annexe 0.1 : Régions naturelles du Burundi

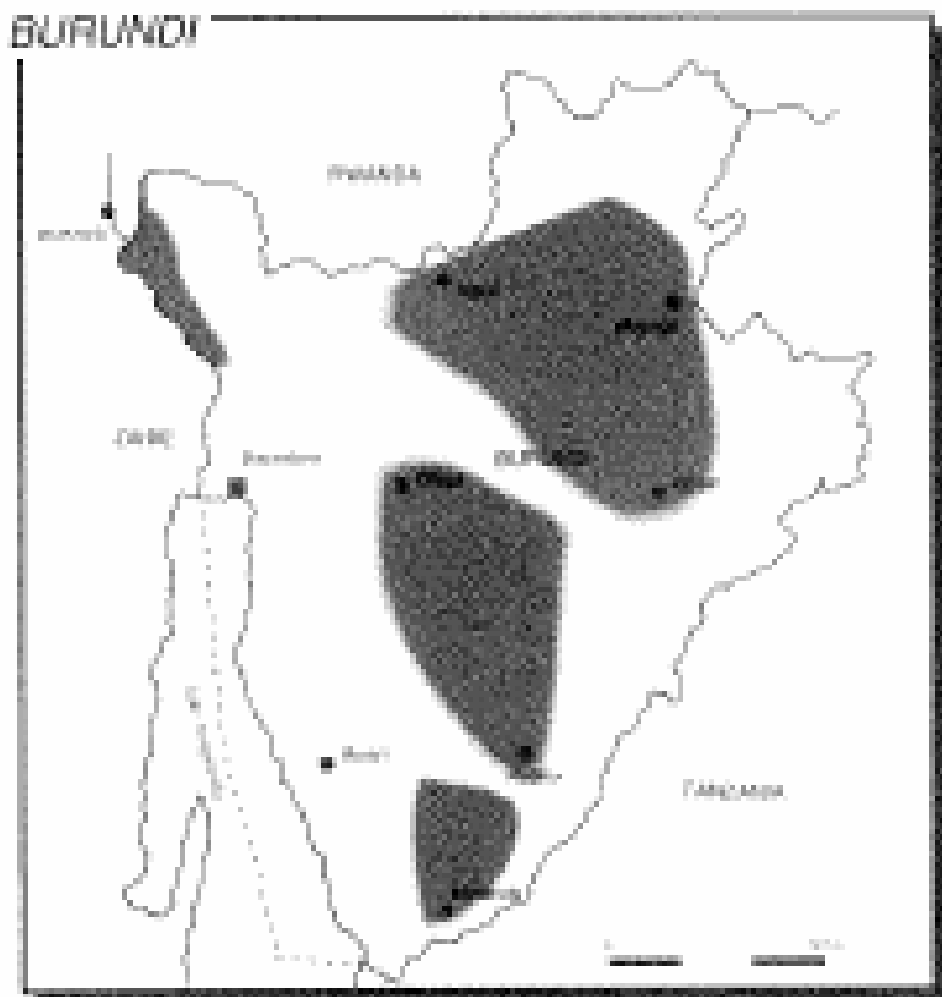


Carte des régions naturelles

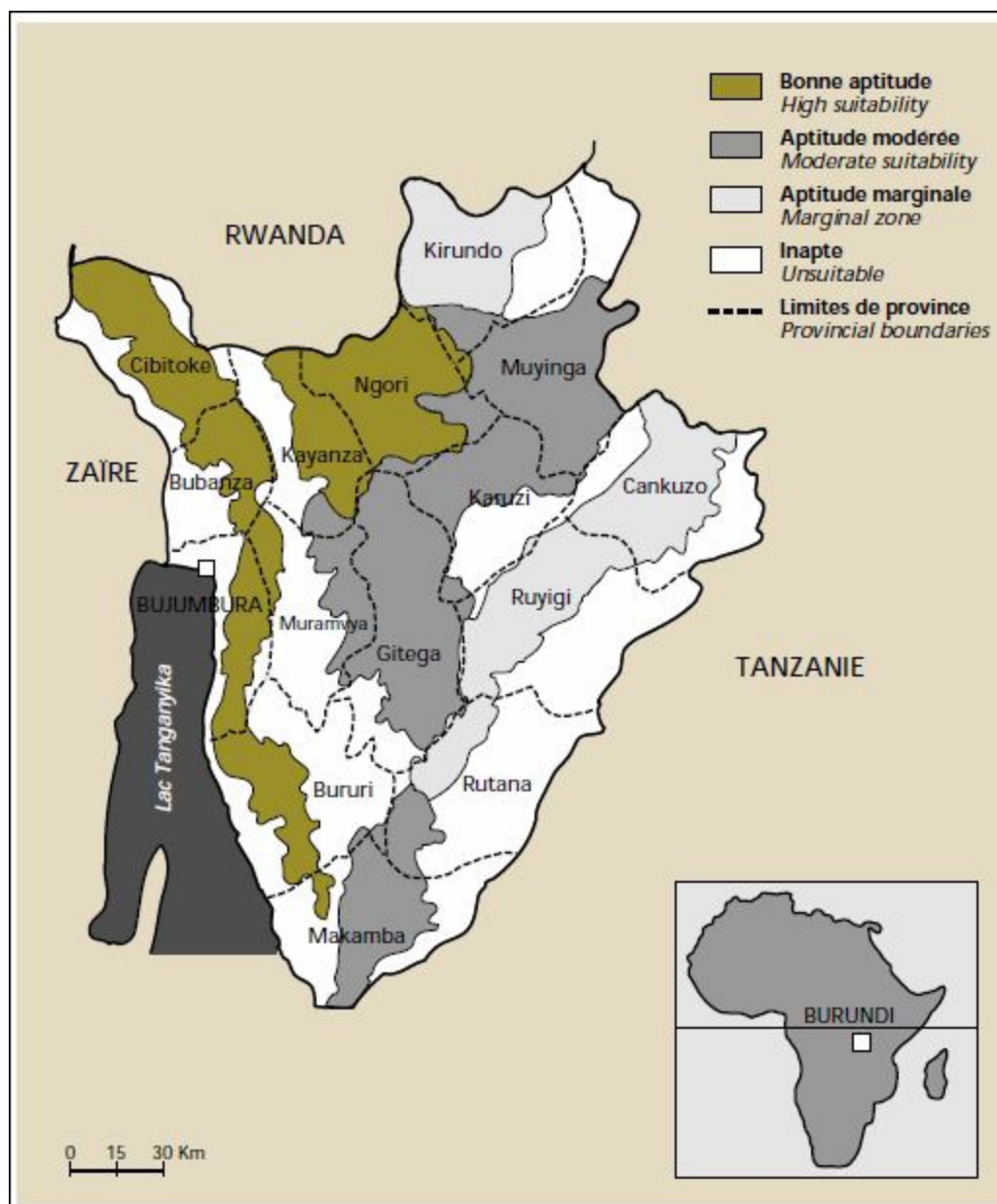
Source : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MINATE), 2001

Annexe 1.1 Régions de culture du bananier et du caféier

Zones de bonne aptitude du bananier au Burundi (Davies, 1995)



Zone d'aptitudes du caféier au Burundi (ISABU, 1984)



Annexe 2.1 : liste chronologique des grands événements du Burundi servant comme repère pour déterminer l'âge des caféiers et des bananiers

1962 : Indépendance du Burundi

1966 : Avènement de la république et abolition de la monarchie

1972 : Crise de 72

1976 : Avènement de la deuxième république

1984 : Les premières élections présidentielles et législatives sous parti unique

1987 : Avènement de la troisième république ;

1992 : Multipartisme ;

1993 : Crise de 1993 ;

1997 : Embargo sur le Burundi ;

2000 : Fin de l'embargo ;

2005 : Les élections générales

2010 : Les dernières élections générales

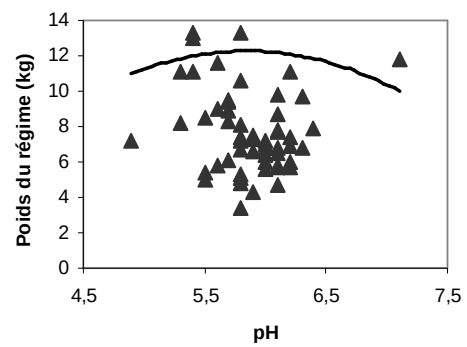
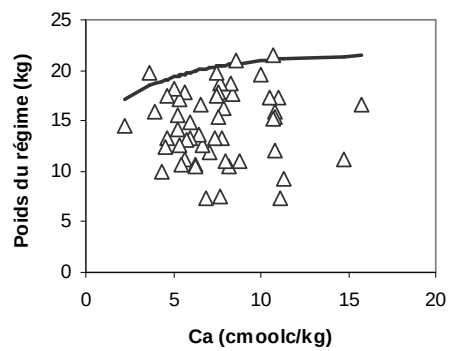
Annexe 2.2. Normes d'interprétation des résultats d'analyse du sol selon Snoeck et Lambot (2009)

pH : 5,5 ; Ca : 5,75 ; Mg : 1,26 ; K : 0,42 ; CEC : 10, 0 ; Mg/K : 2-5 ; (Ca+Mg)/K : 10 :20

Annexe 2.3. Normes CND pour les bananiers et les caféiers (Wairegi et al. 2010 ; Wairegi et al. 2012)

Elément	Bananiers		Caféiers	
	Normes CND	Teneurs correspondant dans les feuilles (%)	Normes CND	Teneurs correspondant dans les feuilles (%)
N	0,302	2,79	0,381	2,96
P	-2,312	0,21	-2,204	0,23
K	0,607	3,79	0,347	2,87
Ca	-0,859	0,91	-0,722	0,99
Mg	-1,546	0,44	-1,630	0,40

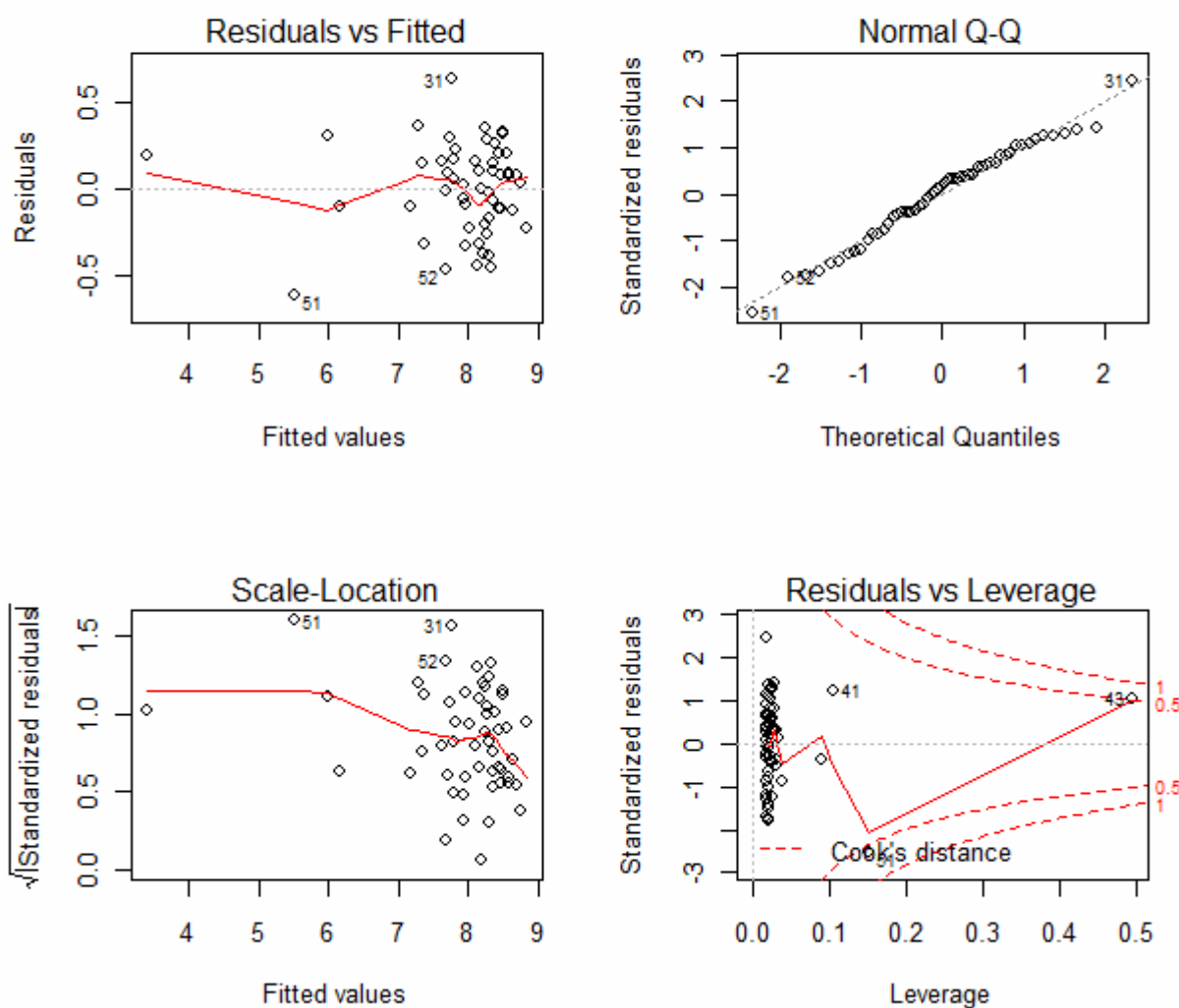
Annexe 3.2 Les courbes des facteurs non retenus pour l'analyse des courbes limites

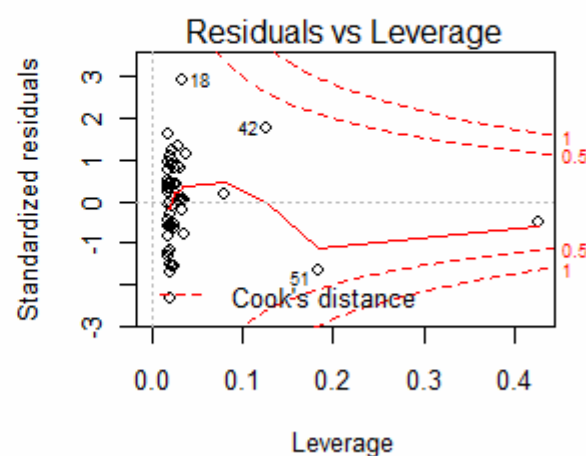
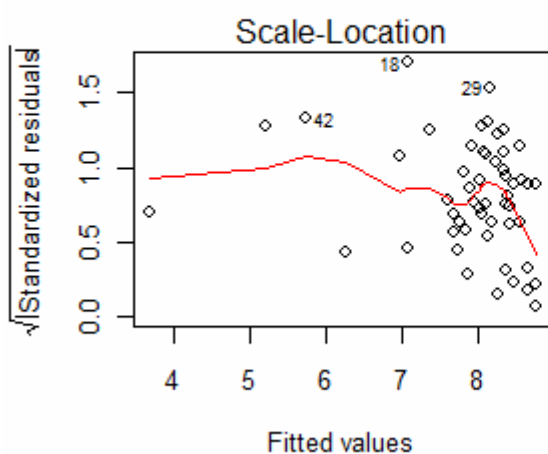
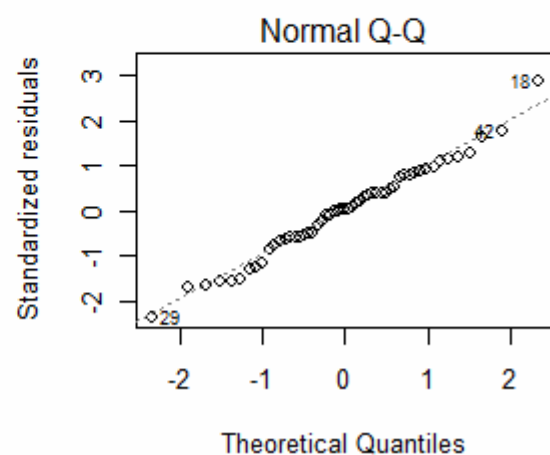
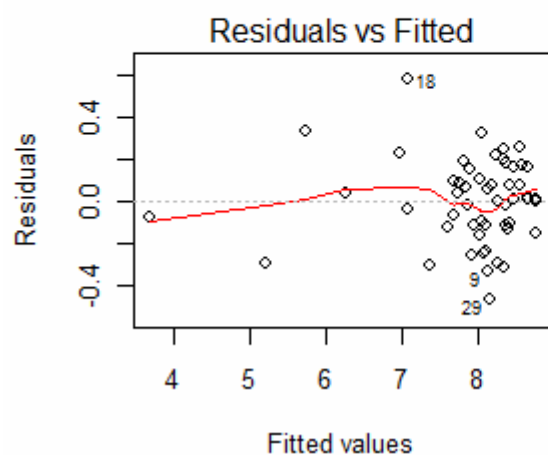


4.1 : Diagnostique graphique des modèles

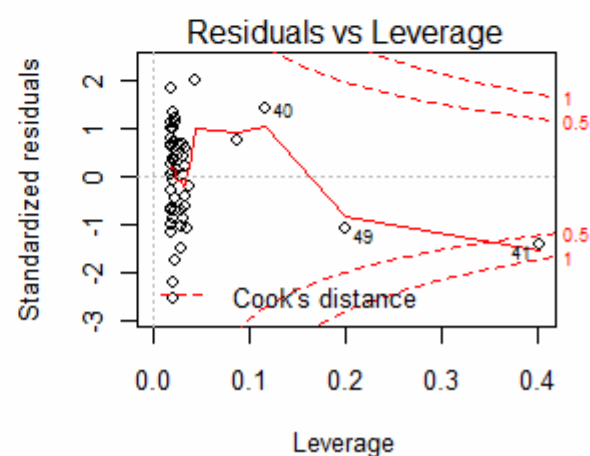
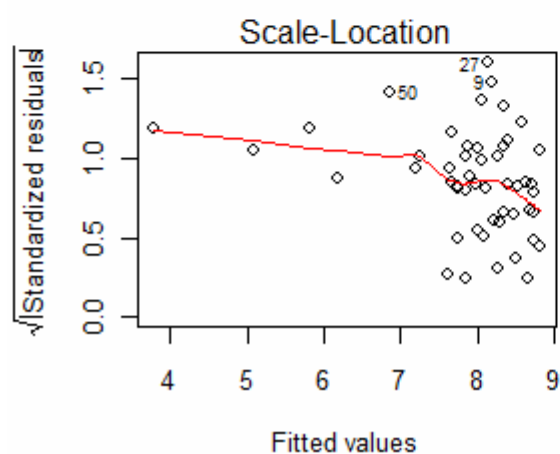
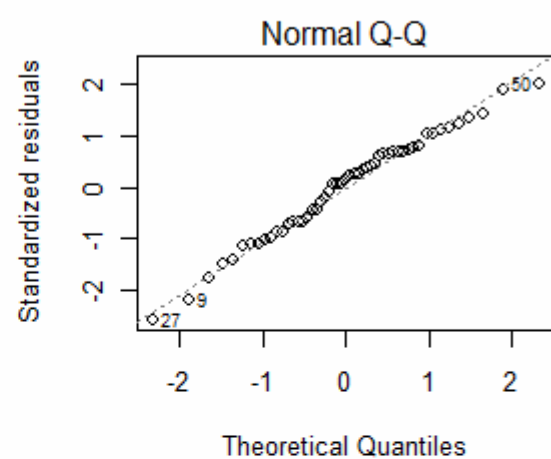
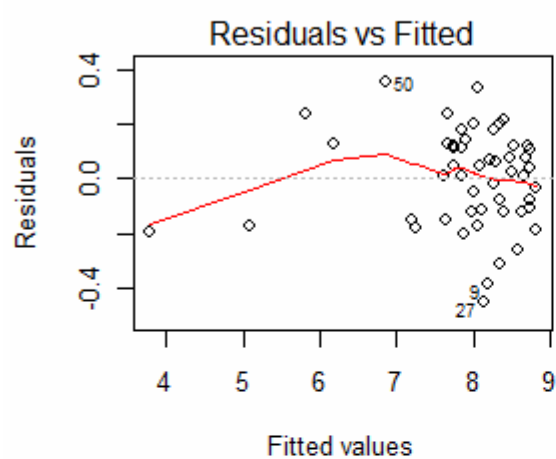
Modèle1

$\text{lm}(\text{LRDM} \sim \text{LRDC})$



$\text{lm}(\text{LRDM} \sim \text{LRDC})$ 

lm(LRDM ~ LRDC)



Annexe 4.3 Feuille de prise de données

a) Modèle 1

Tige plus productive	N° rameau	Nombre de nœuds fructifères	Moyenne cerises sur 3 nœuds
Caractéristiques sur rameau	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
Nombre de rameaux fructifères sur la tige			
Nombre de tiges			
Poids de 100 cerises sur le plant			

Modèle 2

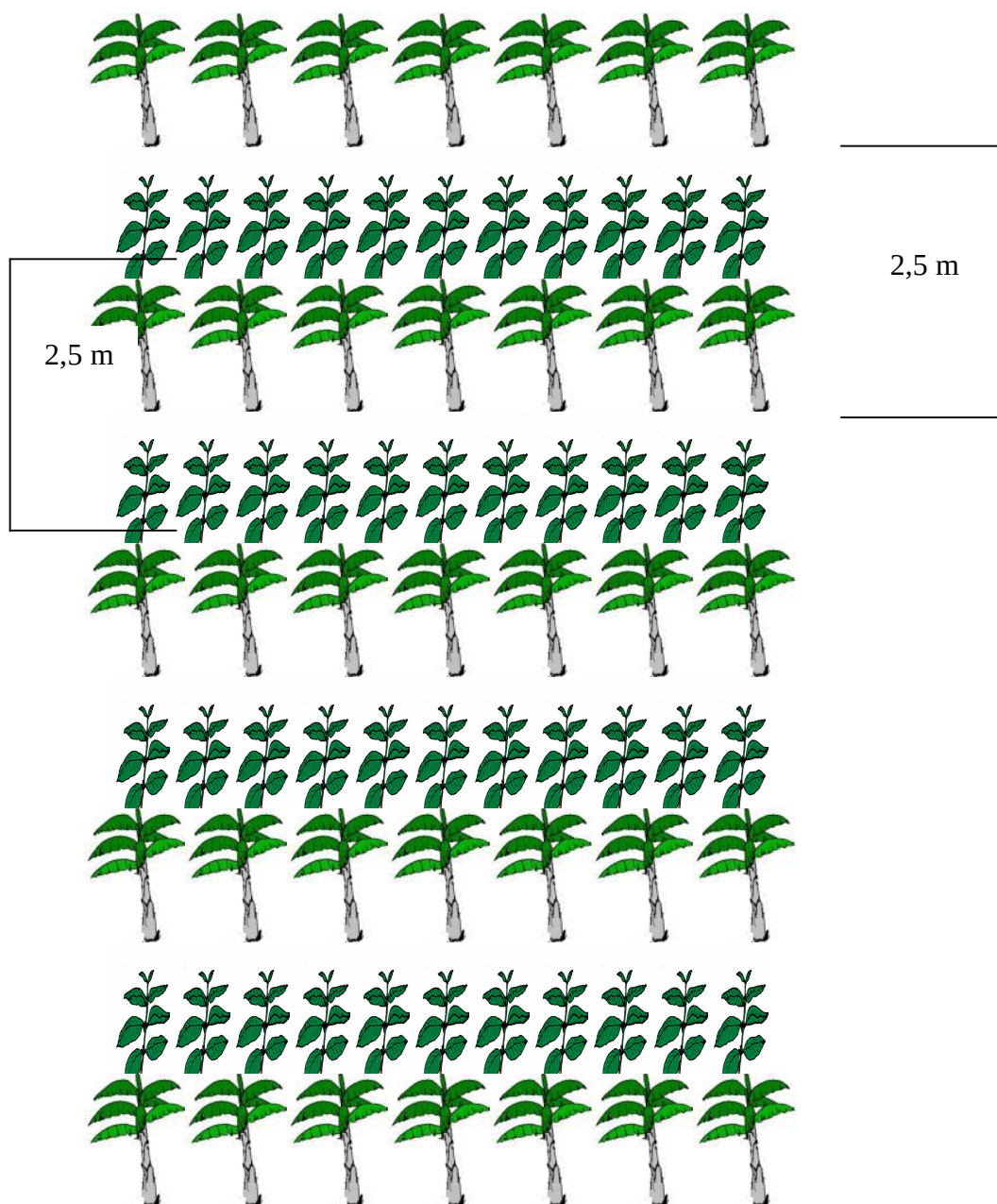
Plant	N° tige	rameau	Nombre nœuds fructifère s	Moyenne cerises sur 3 nœuds
	1	1		
	1	2		
	1	3		
	1	4		
	1	5		
	Nombre de rameaux fructifères			
	2	1		
	2	2		
	2	3		
	2	4		
	2	5		
	Nombre de rameaux fructifères			
	3	1		
	3	2		
	3	3		
	3	4		
	3	5		
	Nbre rameaux fructifères			
Poids 100 cerises				

Modèle 3

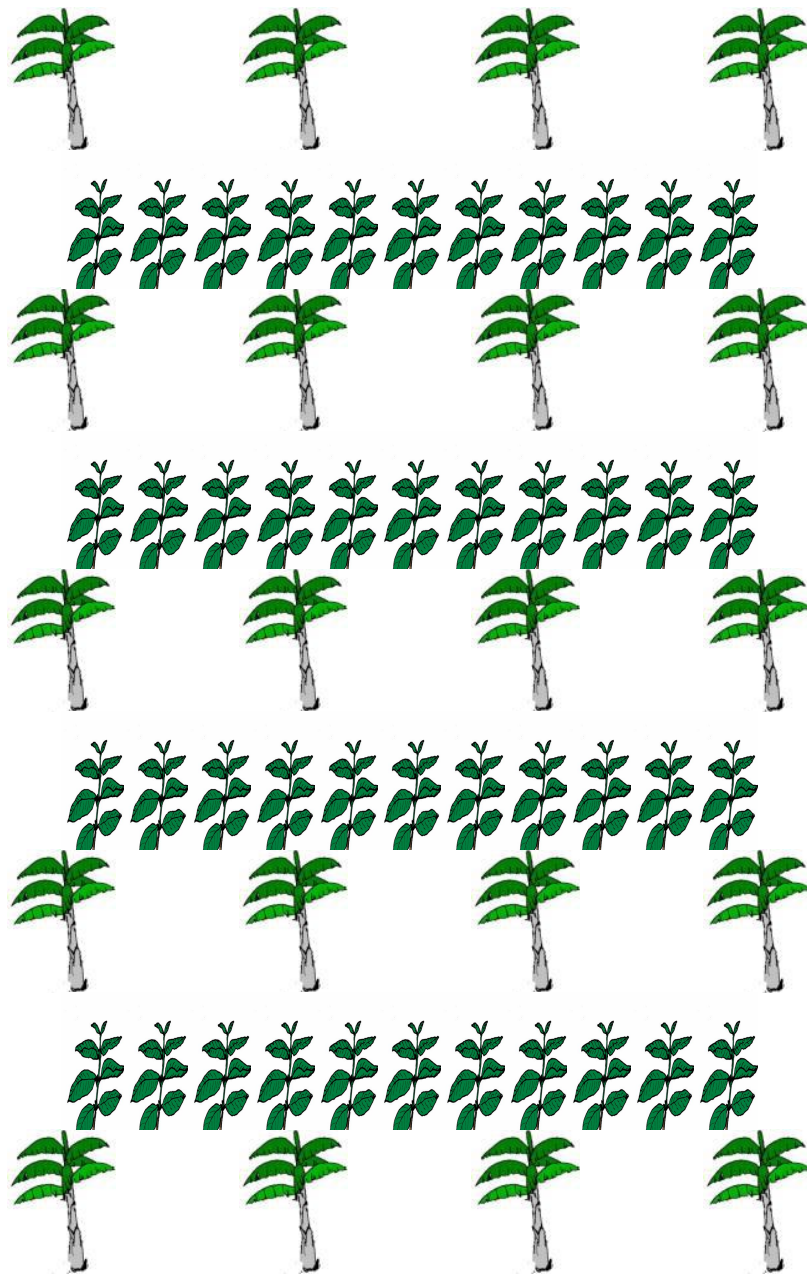
Plant	N° tige	N° rameau	Nombre de cerises par rameau
	1	1	
	1	2	
	1	3	
	1	4	
	1	5	
	Nombre de rameaux fructifères		
	2	1	
	2	2	
	2	3	
	2	4	
	2	5	
	Nombre de rameaux fructifères		
	3	1	
	3	2	
	3	3	
	3	4	
	3	5	
	Nombre de rameaux fructifères		
Poids 100 cerises			

Annexe 5.1 Représentation schématique des traitements

A. Forte densité de bananiers + forte densité de caféiers. La distance entre les plants dans les lignes était de 2,5 m et 1,5 m respectivement pour les bananiers et pour les caféiers. Pour chaque culture, les parcelles en monocultures étaient disposées de la même manière sans contenir l'autre culture.



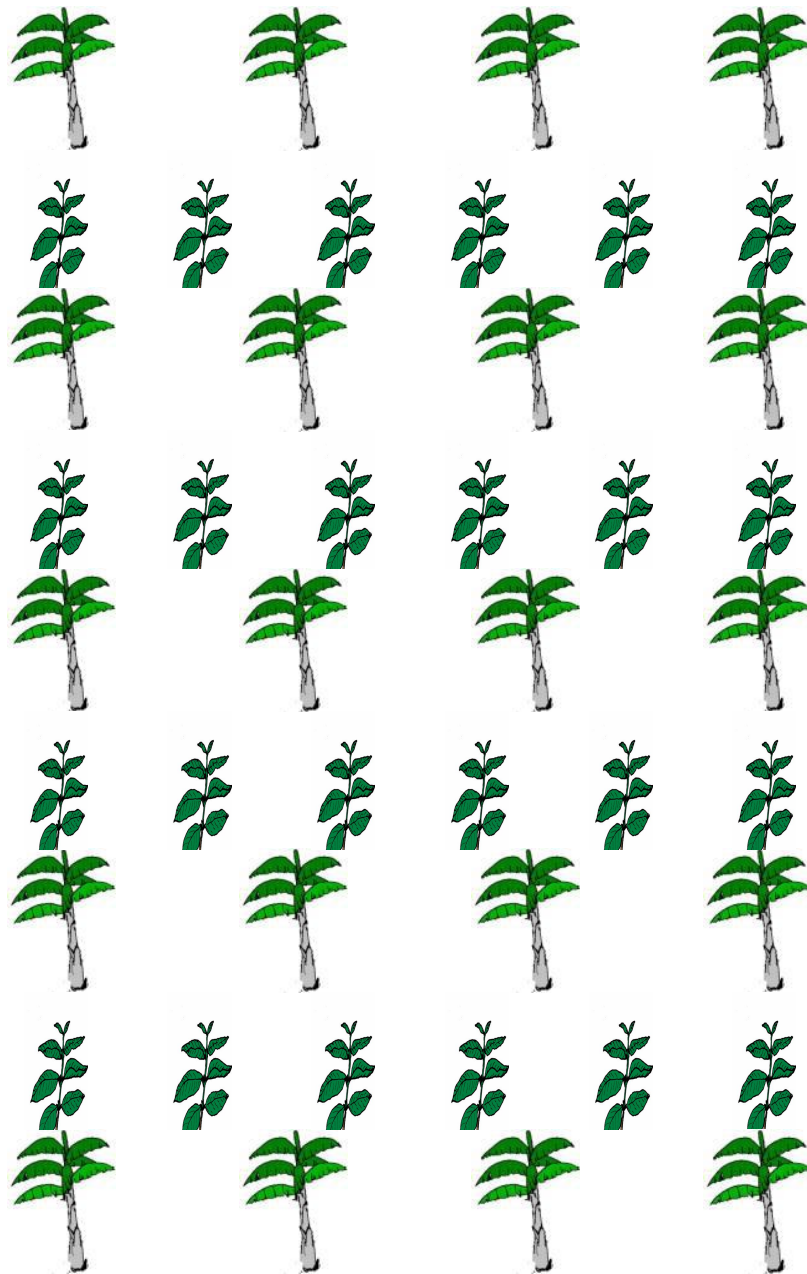
B. Faible densité de bananiers + forte densité de caféiers. Les mêmes distances entre les lignes de bananiers et de caféiers. Mais dans les lignes, la distance entre deux plants de bananiers avait doublé passant de 2,5 m à 5 m.



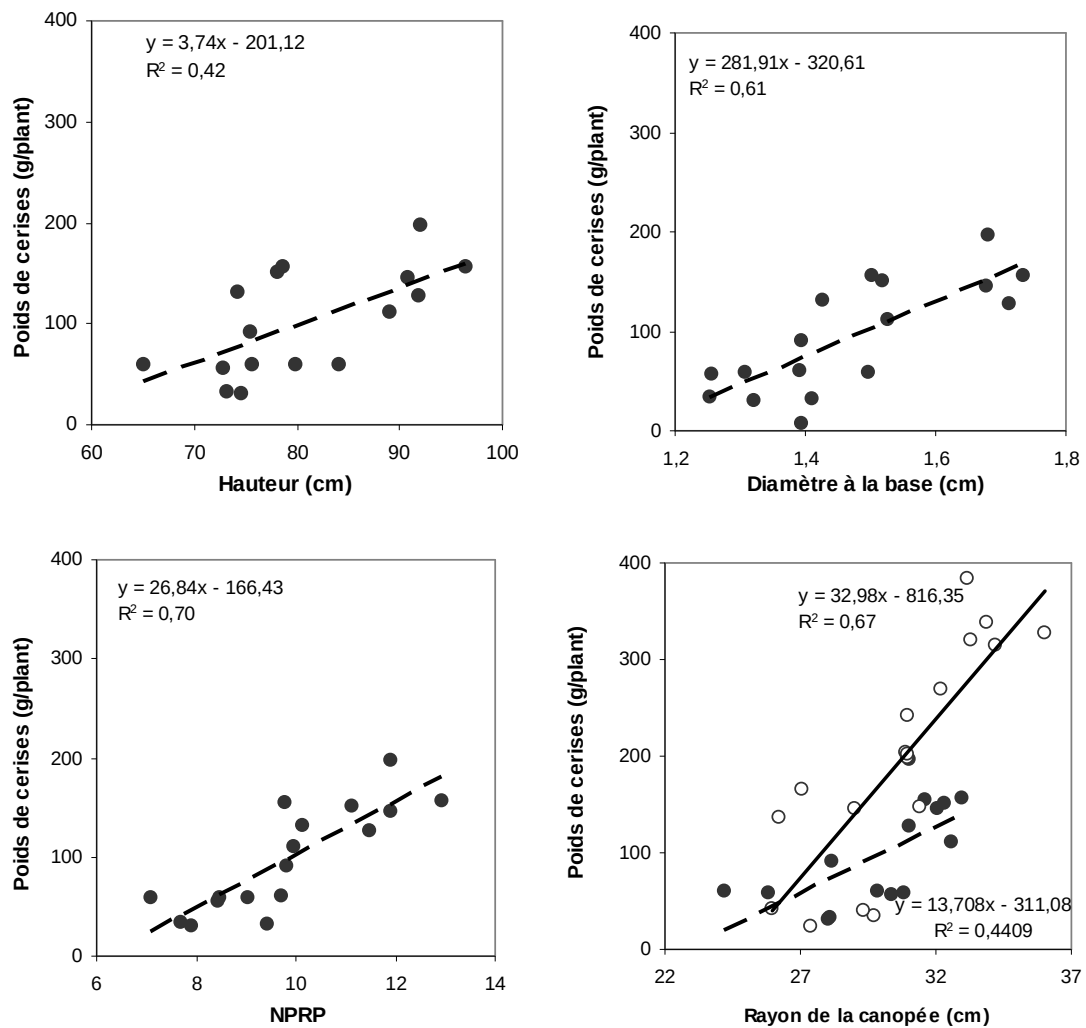
C. Forte densité de bananiers + faible densité de caféiers. Même distance entre les lignes de bananiers et de caféiers, la distance entre deux plants de bananiers était de 2,5 m contre 3 entre 2 plants de caféiers



D. Faible densité de bananiers + faible densité de caféiers. La distance entre les plants dans les lignes était de 5 m et 3 m respectivement pour les bananiers et pour les caféiers. Pour chaque culture, les parcelles en monocultures étaient disposées de la même manière sans contenir l'autre culture.



Annexe 5.2 Relation entre les caractéristiques de croissance des caféiers et la production de café par plant



Corrélation entre les caractéristiques de croissance des caféiers et le rendement en cerises par plant. Les cercles noirs remplis et la ligne continue représentent le site de Gitega et les cercles remplis et la ligne discontinue le site de Kayanza. NPRP : nombre de paires de rameaux primaires.

Annexe 5.3 Normes de travail

a) Dans les caféiers : densité de 2,5m*1,5m (Gaie et Flémal, 1988).

Installation de la caféière

Labour du terrain défriche : 50 à 67 journées/ha
Piquetage : 12 à 15
Trouaison : 135 à 200
Fumure organique et remblayage des trous : 33 à 45
Réalignement des piquets : 10 à 12 ;
Transport des plants : 15 à 20 ;
Plantation : 30 à 40
Paillage léger des lignes de caféiers : 65 à 85

Entretien avant l'entrée en rapport

Première année

Regarnissage : 6 journées/ha
Sarclage manuel des assiettes : 28
Taille de formation : 67 ;
Paillage sur une largeur de 1 m des lignes de caféiers : 250 ;
Fumure minérale : 10 ;
Arcure : 20 à 26
Choix des rejets (2 passages) : 4

Deuxième année

Entretien : sarclage 40 journées/ha
Paillage sur une largeur de 1 m des lignes de caféiers : 250 ;
Egourmandage : 22
Fumure minérale : 10

Entretien des caféiers en rapport

Egourmandage (5 passages) 37 à 45 journées/ha
Taille de production : 60 à 67 ;
Désinsectisation : 30 à 50 ;
Paillage de toute la surface : 450 à 600 ;
Récolte : 20 kg/jour
Transport de la récolte vers les stations de lavage : 80 kg/jour ;
Récolte sanitaire : 83 à 100 ;

b) Dans les bananiers : pour une densité de 1666 plants

Split pseudostems : 39,5 (mean man-hours.ha-1)

Chop stamps: 45,6

Cover corms : 51,2

Remove corms: 88,9

De-leafing: 63,7

De-suckering: 66,2.

Annexe 5.4 : Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers en novembre 2011, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Gitega pour la période de mars 2009 à avril 2012. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

Nutriments	HDC ¹	LDC ²	HDB ³	LDB ⁴	HDC-HDB	HDC-LDB	LDC-HDB	LDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	6,4 $\pm$ 1,7 a	3,0 $\pm$ 0,7 a	26,3 $\pm$ 12,0 b	26,1 $\pm$ 4,3 b	38,2 $\pm$ 5,1 b	35,0 $\pm$ 4,2 b	48,4 $\pm$ 12,9 c	28,5 $\pm$ 4,6 b
P (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,0 a	0,1 $\pm$ 0,02 a	2,2 $\pm$ 1,0 b	2,2 $\pm$ 0,4 b	2,9 $\pm$ 0,4 bc	2,6 $\pm$ 0,3 b	3,8 $\pm$ 1,0 c	2,2 $\pm$ 0,4 b
K (kg/ha)	7,2 $\pm$ 1,9 a	3,3 $\pm$ 0,8 a	85,3 $\pm$ 38,9 b	84,6 $\pm$ 13,9 b	113,9 $\pm$ 15,4 bc	102,3 $\pm$ 13,3 b	150,0 $\pm$ 40,0 c	84,8 $\pm$ 13,9 b
Ca (kg/ha)	2,2 $\pm$ 0,6 a	1,0 $\pm$ 0,2 a	12,0 $\pm$ 5,5 b	11,9 $\pm$ 2,0 b	16,8 $\pm$ 2,3 bc	15,3 $\pm$ 1,9 b	21,6 $\pm$ 5,8 c	12,5 $\pm$ 2,0 b
Mg (kg/ha)	0,8 $\pm$ 0,2 a	0,4 $\pm$ 0,1 a	19,7 $\pm$ 9,0 b	19,6 $\pm$ 3,2 b	25,8 $\pm$ 3,5 bc	23,0 $\pm$ 3,1 b	34,3 $\pm$ 9,2 c	19,2 $\pm$ 3,2 b
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	4,8 $\pm$ 0,2 a	2,4 $\pm$ 0,4 a	51,0 $\pm$ 6,3 bc	35,2 $\pm$ 2,0 b	45,2 $\pm$ 2,1 b	41,8 $\pm$ 2,9 b	57,6 $\pm$ 11,7 c	35,4 $\pm$ 5,1
P (kg/ha)	0,4 $\pm$ 0,0 a	0,2 $\pm$ 0,03 a	4,9 $\pm$ 0,6 bc	3,4 $\pm$ 0,2 b	4,3 $\pm$ 0,2 b	4,0 $\pm$ 0,3 b	5,5 $\pm$ 1,1 c	3,4 $\pm$ 0,5
K (kg/ha)	6,1 $\pm$ 0,2 a	3,1 $\pm$ 0,5 a	162,6 $\pm$ 20,2 bc	112,5 $\pm$ 6,4 b	141,3 $\pm$ 6,2 b	127,1 $\pm$ 9,6 b	183,3 $\pm$ 37,5 c	110,5 $\pm$ 16,4
Ca (kg/ha)	0,6 $\pm$ 0,0 a	0,3 $\pm$ 0,01 a	5,4 $\pm$ 0,7 cd	3,7 $\pm$ 0,2b	4,8 $\pm$ 0,2 bc	4,4 $\pm$ 0,3 b	6,1 $\pm$ 1,2 d	3,8 $\pm$ 0,5
Mg (kg/ha)	0,4 $\pm$ 0,0 a	0,2 $\pm$ 0,02 a	11,2 $\pm$ 1,4 cd	7,7 $\pm$ 0,4 b	9,7 $\pm$ 0,4 bc	8,7 $\pm$ 0,7 b	12,6 $\pm$ 2,6 d	7,6 $\pm$ 1,1
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	-	-	83,3 $\pm$ 7,7 bc	60,3 $\pm$ 10,6 a	92,8 $\pm$ 6,9	69,8 $\pm$ 7,6 b	88,9 $\pm$ 17,2 c	55,1 $\pm$ 3,0 a
P (kg/ha)	-	-	6,9 $\pm$ 0,6 b	5,0 $\pm$ 0,9 a	7,7 $\pm$ 0,6 b	5,8 $\pm$ 0,6 a	7,4 $\pm$ 1,4 b	4,6 $\pm$ 0,2 a
K (kg/ha)	-	-	269,6 $\pm$ 25,1 b	195,2 $\pm$ 34,3 a	300,5 $\pm$ 22,3 c	226,2 $\pm$ 24,7 ab	287,9 $\pm$ 55,7 bc	178,5 $\pm$ 9,6 a
Ca (kg/ha)	-	-	37,8 $\pm$ 3,5 b	27,4 $\pm$ 4,8 a	42,2 $\pm$ 3,1 c	31,7 $\pm$ 3,5 a	40,4 $\pm$ 7,8 c	25,1 $\pm$ 1,3 a
Mg (kg/ha)	-	-	62,4 $\pm$ 5,8 ab	45,2 $\pm$ 7,9 a	69,6 $\pm$ 5,2 b	52,3 $\pm$ 5,7 a	66,6 $\pm$ 12,9	41,3 $\pm$ 2,2 a

HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane. Les valeurs avec les mêmes lettres dans les lignes ne sont significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Annexe 5.5: Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers en novembre 2011, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Gitega pour la période de mars 2009 à avril 2012. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types.

Nutriments	HDC ¹	LDC ²	HDB ³	LDB ⁴	HDC-HDB	HDC-LDB	LDC-HDB	LDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	3,3 $\pm$ 0,7 a	1,5 $\pm$ 0,2 a	98,0 $\pm$ 14,1 c	48,8 $\pm$ 17,1 b	111,7 $\pm$ 4,8 c	44,2 $\pm$ 12,9 b	96,9 $\pm$ 5,1 c	42,0 $\pm$ 12,0 b
P (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,1 a	0,1 $\pm$ 0,01 a	8,1 $\pm$ 1,2 c	4,0 $\pm$ 1,4 b	9,2 $\pm$ 0,4 c	3,6 $\pm$ 1,1 b	8,0 $\pm$ 0,4 c	3,5 $\pm$ 1,0 b
K (kg/ha)	3,8 $\pm$ 0,9 a	1,8 $\pm$ 0,3 a	317,4 $\pm$ 45,7 c	157,9 $\pm$ 55,3 b	357 $\pm$ 14,7 c	137,9 $\pm$ 41,5 b	311,7 $\pm$ 15,8 c	133,0 $\pm$ 39,4 b
Ca (kg/ha)	0,4 $\pm$ 0,1 a	0,2 $\pm$ 0,01 a	44,5 $\pm$ 6,4 c	22,2 $\pm$ 7,8 b	50,0 $\pm$ 2,1 c	19,3 $\pm$ 5,8 b	43,7 $\pm$ 2,2 c	18,6 $\pm$ 5,5 b
Mg (kg/ha)	0,3 $\pm$ 0,1 a	0,2 $\pm$ 0,02 a	73,5 $\pm$ 10,6 c	36,5 $\pm$ 12,8 b	82,3 $\pm$ 3,3 c	31,5 $\pm$ 9,8 b	72,0 $\pm$ 3,6 c	30,5 $\pm$ 9,2 b
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	2,1 $\pm$ 0,2 a	1,3 $\pm$ 0,2 a	152,2 $\pm$ 32,0 c	82,1 $\pm$ 1,2 b	149,5 $\pm$ 13,3 c	75,6 $\pm$ 18,1 b	138,0 $\pm$ 5,9 c	82,3 $\pm$ 15,3 b
P (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,0 a	0,1 $\pm$ 0,02 a	14,6 $\pm$ 3,1 c	7,9 $\pm$ 0,1 b	14,4 $\pm$ 1,3 c	7,2 $\pm$ 1,7 b	13,3 $\pm$ 0,6 c	7,9 $\pm$ 0,5 b
K (kg/ha)	2,7 $\pm$ 0,2 a	1,6 $\pm$ 0,2 a	485,5 $\pm$ 102,0 c	261,9 $\pm$ 3,7 b	476,3 $\pm$ 42,9 c	238,8 $\pm$ 57,9 b	439,3 $\pm$ 18,7 c	261,6 $\pm$ 49,3 b
Ca (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,0 a	0,1 $\pm$ 0,01 a	16,1 $\pm$ 3,4 c	8,7 $\pm$ 0,1 b	15,8 $\pm$ 1,4 c	8,0 $\pm$ 1,9 b	14,6 $\pm$ 0,6 c	8,7 $\pm$ 1,6 b
Mg (kg/ha)	0,2 $\pm$ 0,0 a	0,1 $\pm$ 0,0 a	33,4 $\pm$ 7,0 c	18,0 $\pm$ 0,3 b	32,7 $\pm$ 2,9 c	16,4 $\pm$ 4,0 b	30,2 $\pm$ 1,3 c	18,0 $\pm$ 3,4 b
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	-	-	130,3 $\pm$ 12,4 b	99,6 $\pm$ 47,1 a	171,8 $\pm$ 23,9 c	84,0 $\pm$ 18,5 a	126,5 $\pm$ 15,5 b	76,6 $\pm$ 13,3 a
P (kg/ha)	-	-	10,8 $\pm$ 1,0 b	8,2 $\pm$ 3,9 a	14,2 $\pm$ 2,0 b	7,0 $\pm$ 1,5 a	10,5 $\pm$ 1,3 b	6,3 $\pm$ 1,1 a
K (kg/ha)	-	-	422,0 $\pm$ 40,1 b	322,8 $\pm$ 152,5 a	556,3 $\pm$ 77,3 c	272,1 $\pm$ 59,8 a	409,7 $\pm$ 50,0 b	248,0 $\pm$ 43,0 a
Ca (kg/ha)	-	-	59,2 $\pm$ 5,6 b	45,3 $\pm$ 21,4 a	78,1 $\pm$ 10,8 c	38,2 $\pm$ 8,4 a	57,5 $\pm$ 7,0 b	34,8 $\pm$ 6,0 a
Mg (kg/ha)	-	-	97,7 $\pm$ 9,3 b	74,7 $\pm$ 35,3 a	128,8 $\pm$ 17,9 c	63,0 $\pm$ 13,8 a	94,8 $\pm$ 11,6 ab	57,4 $\pm$ 10,0 a

HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane. Les valeurs avec les mêmes lettres dans les lignes ne sont significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Annexe 5.6 : Les valeurs du revenu, de la valeur ajoutée (VA) et du résultat brute de l'exploitation (RBE) des deux cycles de production de banane et la première production de café en fonction des traitements dans les sites de Gitega et de Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type).

Traitement	RVQI ¹ (\$)	RVM ² (\$)	RVQS ³ (\$)	VAQI ⁴ (\$)	VAM ⁵ (\$)	VAQS ⁶ (\$)	RBEQI ⁷ (\$)	RBEM ⁸ (\$)	RBEQS ⁹ (\$)
Gitega									
HDC ¹⁰	108 $\pm$ 4 a	242 $\pm$ 9 a	332 $\pm$ 12 a	-1394 $\pm$ 4 a	-1259 $\pm$ 9 a	-1179 $\pm$ 12 a	-3161 $\pm$ 2 a	-3026 $\pm$ 7 a	-2936 $\pm$ 10 a
LDC ¹¹	54 $\pm$ 10 a	122 $\pm$ 23 a	167 $\pm$ 30 a	-1070 $\pm$ 10 a	-1002 $\pm$ 22 a	-957 $\pm$ 30 a	-2561 $\pm$ 6 b	-2493 $\pm$ 18 a	-2448 $\pm$ 26 a
HDB ¹²	5310 $\pm$ 659 d	6069 $\pm$ 754 d	6258 $\pm$ 777 d	3968 $\pm$ 659 d	4726 $\pm$ 753 d	4916 $\pm$ 777 d	2443 $\pm$ 659 e	3202 $\pm$ 753 d	3392 $\pm$ 777 d
LDB ¹³	3672 $\pm$ 210 b	4197 $\pm$ 240 b	4328 $\pm$ 248 b	2626 $\pm$ 210 c	3151 $\pm$ 240 c	3282 $\pm$ 248 c	1250 $\pm$ 210 d	1774 $\pm$ 240 c	1905 $\pm$ 248 c
HDC-HDB	4586 $\pm$ 178 c	5279 $\pm$ 182 c	5470 $\pm$ 175 c	1485 $\pm$ 178 b	2178 $\pm$ 182 b	2370 $\pm$ 175 b	315 $\pm$ 185 c	1009 $\pm$ 189 b	1200 $\pm$ 181 b
HDC-LDB	4091 $\pm$ 319 bc	4754 $\pm$ 358 bc	4956 $\pm$ 364 bc	1286 $\pm$ 319 b	1949 $\pm$ 358 b	2151 $\pm$ 364 b	251 $\pm$ 321 c	914 $\pm$ 360 b	1116 $\pm$ 367 b
LDC-HDB	4768 $\pm$ 182 c	5457 $\pm$ 208 c	5632 $\pm$ 214 c	2301 $\pm$ 182 c	2989 $\pm$ 208 c	3165 $\pm$ 214 c	1142 $\pm$ 182 d	1830 $\pm$ 208 c	2006 $\pm$ 214 c
LDC-LDB	3584 $\pm$ 536 b	4127 $\pm$ 619 b	4277 $\pm$ 627 b	1412 $\pm$ 536 b	1956 $\pm$ 610 b	2106 $\pm$ 627 b	393 $\pm$ 537 c	936 $\pm$ 611 b	1087 $\pm$ 628 b
Kayanza									
HDC	48 $\pm$ 4 a	107 $\pm$ 10 a	146 $\pm$ 13 a	-1454 $\pm$ 4 a	-1395 $\pm$ 10 a	-1355 $\pm$ 13 a	-3199 $\pm$ 3 a	-3140 $\pm$ 8 a	-3100 $\pm$ 12 a
LDC	28 $\pm$ 4 a	63 $\pm$ 10 a	86 $\pm$ 13 a	-1096 $\pm$ 4 a	-1061 $\pm$ 10 a	-1038 $\pm$ 13 a	-2578 $\pm$ 3 a	-2543 $\pm$ 8 a	-2519 $\pm$ 12 a
HDB	15854 $\pm$ 3332 c	18119 $\pm$ 3808 c	18685 $\pm$ 3927 c	14512 $\pm$ 3332 c	16777 $\pm$ 3808 c	17343 $\pm$ 3927 c	12987 $\pm$ 3332 c	15252 $\pm$ 3808 c	15818 $\pm$ 3927 c
LDB	8589 $\pm$ 105 b	9816 $\pm$ 120 b	10122 $\pm$ 124 b	7542 $\pm$ 105 b	8769 $\pm$ 120 b	9076 $\pm$ 124 b	6166 $\pm$ 105 b	7393 $\pm$ 120 b	7699 $\pm$ 124 b
HDC-HDB	15547 $\pm$ 1403 c	17777 $\pm$ 1599 c	18338 $\pm$ 1645 c	12446 $\pm$ 1403 c	14676 $\pm$ 1599 c	15238 $\pm$ 1645 c	11286 $\pm$ 1405 c	13516 $\pm$ 1600 c	14077 $\pm$ 1647 c
HDC-LDB	10481 $\pm$ 2752 b	12010 $\pm$ 3153 b	12407 $\pm$ 3257 b	7677 $\pm$ 2752 b	9205 $\pm$ 3153 b	9602 $\pm$ 3257 b	6657 $\pm$ 2750 b	8185 $\pm$ 3150 b	8582 $\pm$ 3254 b
LDC-HDB	14693 $\pm$ 8 c	16803 $\pm$ 9 c	17336 $\pm$ 9 c	12226 $\pm$ 8 c	14336 $\pm$ 9 c	14869 $\pm$ 9 c	11065 $\pm$ 8 c	13175 $\pm$ 9 c	13708 $\pm$ 9 c
LDC-LDB	9369 $\pm$ 732 b	10720 $\pm$ 840 b	11065 $\pm$ 868 b	7197 $\pm$ 732 b	8649 $\pm$ 840 b	8894 $\pm$ 868 b	6183 $\pm$ 732 b	7535 $\pm$ 839 b	7879 $\pm$ 867 b

RVQI : revenu calculé avec le prix quartile inférieur, RVM : revenu calculé avec le prix moyen ; RVQS : revenu calculé avec le prix quartile supérieur ; VAQI : VA calculée avec le prix quartile inférieur ; VAM : VA calculée avec le prix moyen, ; VAQS : VA calculée avec le prix quartile supérieur ; RBEQI : RBE calculé avec le prix quartile inférieur ; RBEM : RBE calculé avec le prix moyen ; RBEQS : RBE calculé avec le prix quartile supérieur ; HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane.

Annexe 6.1 : Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Gitega. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types

Nutriments	HDC ¹	LDC ²	HDB ³	LDB ⁴	HDC-HDB	HDC-LDB	LDC-HDB	LDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	97,0 $\pm$ 16,6 d	57,9 $\pm$ 5,4 b	79,4 $\pm$ 9,5 c	40,9 $\pm$ 2,1 a	166,0 $\pm$ 3,7 f	134,9 $\pm$ 7,1 e	121,6 $\pm$ 3,5 e	87,2 $\pm$ 2,8 cd
P (kg/ha)	2,7 $\pm$ 0,5 b	1,6 $\pm$ 0,2 a	6,6 $\pm$ 0,8 e	3,4 $\pm$ 0,2 c	9,0 $\pm$ 0,1 g	6,1 $\pm$ 0,4 e	7,4 $\pm$ 0,3 f	4,6 $\pm$ 0,3 d
K (kg/ha)	109,3 $\pm$ 18,7 b	65,3 $\pm$ 6,1 a	257,1 $\pm$ 30,6 e	132,4 $\pm$ 6,7 c	353,4 $\pm$ 4,9 g	241,5 $\pm$ 16,8 e	290,2 $\pm$ 10,3 f	180,7 $\pm$ 11,5 d
Ca (kg/ha)	32,8 $\pm$ 5,6 b	19,6 $\pm$ 1,8 a	36,1 $\pm$ 4,3 b	18,6 $\pm$ 0,9 a	65,3 $\pm$ 1,2 e	50,6 $\pm$ 2,9 d	49,5 $\pm$ 1,5 c	34,0 $\pm$ 0,9 b
Mg (kg/ha)	12,7 $\pm$ 2,2 a	7,6 $\pm$ 0,7 a	58,5 $\pm$ 7,1 d	30,7 $\pm$ 1,6 b	70,5 $\pm$ 1,2 d	43,9 $\pm$ 3,5 c	60,8 $\pm$ 2,4 d	35,6 $\pm$ 3,5 b
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	18,7 $\pm$ 1,7 b	11,0 $\pm$ 0,7 a	42,2 $\pm$ 1,4 e	24,1 $\pm$ 0,6 c	57,7 $\pm$ 4,3 g	41,5 $\pm$ 2,7 e	51,2 $\pm$ 0,8 f	32,3 $\pm$ 2,4 d
P (kg/ha)	1,4 $\pm$ 0,1 b	0,8 $\pm$ 0,1 a	4,1 $\pm$ 0,1 f	2,3 $\pm$ 0,1 c	5,2 $\pm$ 0,4 h	3,6 $\pm$ 0,2 e	4,7 $\pm$ 0,1 g	2,9 $\pm$ 0,2 d
K (kg/ha)	23,5 $\pm$ 2,1 b	13,8 $\pm$ 0,9 a	134,7 $\pm$ 4,5 e	77,0 $\pm$ 1,9 c	150,2 $\pm$ 7,8 g	93,0 $\pm$ 7,7 d	143,1 $\pm$ 1,3 f	84,0 $\pm$ 1,9 c
Ca (kg/ha)	2,1 $\pm$ 0,2 b	1,2 $\pm$ 0,1 a	4,5 $\pm$ 0,1 e	2,6 $\pm$ 0,1 c	6,2 $\pm$ 0,5 g	4,6 $\pm$ 0,3 e	5,5 $\pm$ 0,1 f	3,5 $\pm$ 0,3 d
Mg (kg/ha)	1,6 $\pm$ 0,1 b	0,9 $\pm$ 0,1 a	9,3 $\pm$ 0,3 e	5,3 $\pm$ 0,1 c	10,3 $\pm$ 0,5 f	6,4 $\pm$ 0,5 d	9,8 $\pm$ 0,1 ef	5,8 $\pm$ 0,1 c
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	21,7 $\pm$ 3,7 b	13,0 $\pm$ 1,2 a	25,5 $\pm$ 4,1 b	15,3 $\pm$ 3,2 a	38,7 $\pm$ 1,2 d	32,4 $\pm$ 1,9 c	30,9 $\pm$ 1,2 c	23,0 $\pm$ 5,1 b
P (kg/ha)	0,9 $\pm$ 0,2 b	0,5 $\pm$ 0,1 a	1,9 $\pm$ 0,3 d	1,1 $\pm$ 0,2 bc	2,2 $\pm$ 0,1 e	1,7 $\pm$ 0,1 d	1,9 $\pm$ 0,1 d	1,4 $\pm$ 0,3 c
K (kg/ha)	30,7 $\pm$ 5,3 a	18,3 $\pm$ 1,7 a	88,5 $\pm$ 14,2 d	53,0 $\pm$ 11,1 b	114,1 $\pm$ 2,0 f	69,7 $\pm$ 5,3 c	84,5 $\pm$ 3,9 d	107,4 $\pm$ 14,5 e
Ca (kg/ha)	15,8 $\pm$ 2,7 b	9,4 $\pm$ 0,9 a	25,4 $\pm$ 4,1 c	15,2 $\pm$ 3,2 b	33,3 $\pm$ 0,9 d	26,7 $\pm$ 1,7 c	27,8 $\pm$ 1,2 c	19,9 $\pm$ 4,7 b
Mg (kg/ha)	6,8 $\pm$ 1,2 a	4,1 $\pm$ 0,4 a	30,9 $\pm$ 5,0 c	18,5 $\pm$ 3,9 b	29,4 $\pm$ 0,5 c	20,6 $\pm$ 1,7 b	27,6 $\pm$ 1,4 c	18,1 $\pm$ 4,8 b

HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane. Les valeurs avec les mêmes lettres dans les lignes ne sont significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Annexe 6.2 : Les éléments nutritifs majeurs dans la biomasse aérienne de bananiers et de caféiers, dans les récoltes de café et de banane et dans les biomasses de bananiers recyclées en fonction des traitements à Kayanza. Les données sont des moyennes $\pm$ écart-types

Nutriments	HDC ¹	LDC ²	HDB ³	LDB ⁴	HDC-HDB	HDC-LDB	LDC-HDB	LDC-LDB
Stockés dans la biomasse aérienne								
N (kg/ha)	66,4 $\pm$ 8,5 b	40,4 $\pm$ 5,6 a	84,8 $\pm$ 1,8 c	43,9 $\pm$ 1,1 a	159,8 $\pm$ 2,7 e	120,7 $\pm$ 3,2 d	118,4 $\pm$ 2,9 d	82,3 $\pm$ 4,2 c
P (kg/ha)	1,9 $\pm$ 0,2 b	1,1 $\pm$ 0,2 a	7,0 $\pm$ 0,2 f	3,6 $\pm$ 0,1 c	9,3 $\pm$ 0,2 h	5,9 $\pm$ 0,4 e	8,0 $\pm$ 0,1 g	4,8 $\pm$ 0,2 d
K (kg/ha)	74,9 $\pm$ 9,6 b	45,5 $\pm$ 6,4 a	274,7 $\pm$ 5,9 f	142,1 $\pm$ 3,7 c	365,1 $\pm$ 9,5 h	232,1 $\pm$ 16,0 e	313,1 $\pm$ 5,1 g	189,1 $\pm$ 8,3 d
Ca (kg/ha)	22,5 $\pm$ 2,9 c	13,7 $\pm$ 1,9 a	38,5 $\pm$ 0,8 e	19,9 $\pm$ 0,5 b	64,2 $\pm$ 1,3 h	46,1 $\pm$ 1,4 f	49,9 $\pm$ 1,1 g	33,1 $\pm$ 1,6 d
Mg (kg/ha)	12,7 $\pm$ 2,2 b	7,6 $\pm$ 0,7 a	58,5 $\pm$ 7,1 e	30,7 $\pm$ 1,6 c	70,5 $\pm$ 1,2 f	43,9 $\pm$ 3,5 d	60,8 $\pm$ 2,4 e	35,6 $\pm$ 3,5 c
Exportés dans les récoltes								
N (kg/ha)	8,3 $\pm$ 0,5 b	3,7 $\pm$ 0,2 a	63,0 $\pm$ 3,9 d	35,1 $\pm$ 2,8 c	66,3 $\pm$ 4,6 d	39,0 $\pm$ 2,6 c	64,3 $\pm$ 3,2 d	37,4 $\pm$ 2,1 c
P (kg/ha)	0,6 $\pm$ 0,0 a	0,3 $\pm$ 0,0 a	6,1 $\pm$ 0,3 c	3,4 $\pm$ 0,2 b	6,3 $\pm$ 0,2 c	3,6 $\pm$ 0,2 b	6,1 $\pm$ 0,2 c	3,5 $\pm$ 0,2 b
K (kg/ha)	10,3 $\pm$ 0,6 a	4,7 $\pm$ 0,2 a	200,9 $\pm$ 12,5 c	112,1 $\pm$ 9,1 b	199,8 $\pm$ 14,3 c	111,7 $\pm$ 9,9 b	199,0 $\pm$ 9,9 c	113,0 $\pm$ 6,5 b
Ca (kg/ha)	0,9 $\pm$ 0,1 a	0,4 $\pm$ 0,0 a	6,7 $\pm$ 0,4 d	3,7 $\pm$ 0,3 b	7,1 $\pm$ 0,5 d	4,2 $\pm$ 0,3 b	6,8 $\pm$ 0,3 d	4,0 $\pm$ 0,2 b
Mg (kg/ha)	0,7 $\pm$ 0,0 a	0,3 $\pm$ 0,0 a	13,8 $\pm$ 0,9 c	7,7 $\pm$ 0,6 b	13,7 $\pm$ 1,0 c	7,7 $\pm$ 0,7 b	13,7 $\pm$ 0,6 c	7,8 $\pm$ 0,4 b
Recyclés dans les parcelles								
N (kg/ha)	14,9 $\pm$ 1,9 a	9,0 $\pm$ 1,3 a	31,4 $\pm$ 9,4 b	27,6 $\pm$ 6,9 b	51,6 $\pm$ 2,2 d	41,1 $\pm$ 2,9 c	42,6 $\pm$ 5,1 c	29,6 $\pm$ 7,6 b
P (kg/ha)	0,6 $\pm$ 0,1 a	0,4 $\pm$ 0,1 a	2,3 $\pm$ 0,5 b	2,0 $\pm$ 0,7 b	3,3 $\pm$ 0,2 c	2,5 $\pm$ 0,2 bc	2,9 $\pm$ 0,4 c	1,9 $\pm$ 0,6 b
K (kg/ha)	21,0 $\pm$ 2,7 a	12,8 $\pm$ 1,8 a	108,7 $\pm$ 32,7 b	95,8 $\pm$ 23,8 b	145,5 $\pm$ 6,9 c	107,7 $\pm$ 7,5 b	132,2 $\pm$ 16,6 c	85,9 $\pm$ 27,0 b
Ca (kg/ha)	10,8 $\pm$ 1,4 a	6,6 $\pm$ 0,9 a	31,2 $\pm$ 9,4 b	27,5 $\pm$ 6,8 b	46,9 $\pm$ 2,1 c	36,3 $\pm$ 2,5 bc	40,3 $\pm$ 4,9 c	27,3 $\pm$ 7,6 b
Mg (kg/ha)	4,7 $\pm$ 0,6 a	2,8 $\pm$ 0,4 a	38,0 $\pm$ 11,4 b	33,5 $\pm$ 8,3 b	48,0 $\pm$ 2,3 c	34,6 $\pm$ 2,5 b	44,9 $\pm$ 5,7 bc	28,5 $\pm$ 9,5 b

HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane. Les valeurs avec les mêmes lettres dans les lignes ne sont significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Annexe 6.3: Les valeurs du revenu, de la valeur ajoutée (VA) et du résultat brute de l'exploitation (RBE) en fonction des traitements dans les sites de Gitega et de Kayanza (moyenne $\pm$ écart-type).

Traitement	RQI ¹ (\$)	RM ² (\$)	RQS ³ (\$)	VAQI ⁴ (\$)	VAM ⁵ (\$)	VAQS ⁶ (\$)	RBEQI ⁷ (\$)	RBEM ⁸ (\$)	RBEQS ⁹ (\$)
Gitega									
HDC ¹⁰	417 $\pm$ 38 a	938 $\pm$ 86 b	1285 $\pm$ 118 b	167 $\pm$ 38, a	688 $\pm$ 86 b	1035 $\pm$ 118 b	-528 $\pm$ 24 a	-7 $\pm$ 72 a	340 $\pm$ 104 a
LDC ¹¹	244 $\pm$ 15 a	549 $\pm$ 34 a	753 $\pm$ 47 a	-6 $\pm$ 15 a	299 $\pm$ 34 a	502 $\pm$ 47 a	-565 $\pm$ 9 a	-259 $\pm$ 29 a	-56 $\pm$ 41 a
HDB ¹²	4400 $\pm$ 147 c	5029 $\pm$ 168 e	5186 $\pm$ 174 f	4150 $\pm$ 147 c	4779 $\pm$ 168 f	4936 $\pm$ 174 f	3716 $\pm$ 147 e	4345 $\pm$ 168 d	4502 $\pm$ 174 d
LDB ¹³	2514 $\pm$ 61 b	2874 $\pm$ 69 b	2963 $\pm$ 71 c	2264 $\pm$ 61 b	2624 $\pm$ 69 c	2713 $\pm$ 71 c	1850 $\pm$ 61 c	2209 $\pm$ 69 b	2299 $\pm$ 71 b
HDC-HDB	4577 $\pm$ 196 c	5662 $\pm$ 301 f	6136 $\pm$ 363 h	4177 $\pm$ 191 c	5412 $\pm$ 301 g	5886 $\pm$ 363 h	3454 $\pm$ 166 d	4689 $\pm$ 275 e	5163 $\pm$ 338 e
HDC-LDB	2657 $\pm$ 2445 b	3538 $\pm$ 287 d	3993 $\pm$ 302 e	2328 $\pm$ 236 b	3288 $\pm$ 287 e	3743 $\pm$ 302 e	1602 $\pm$ 235 b	2561 $\pm$ 285 c	3017 $\pm$ 299 c
LDC-HDB	4477 $\pm$ 63 c	5376 $\pm$ 44 ef	5722 $\pm$ 40 g	4075 $\pm$ 59 c	5126 $\pm$ 44 g	5472 $\pm$ 133 g	3482 $\pm$ 70 d	4532 $\pm$ 51 d	4879 $\pm$ 41 e
LDC-LDB	2558 $\pm$ 35 b	3166 $\pm$ 81 c	3433 $\pm$ 133 d	2224 $\pm$ 33 b	2916 $\pm$ 81 d	3183 $\pm$ 40 d	1655 $\pm$ 44 bc	2348 $\pm$ 60 b	2614 $\pm$ 109 b
Kayanza									
HDC	184 $\pm$ 11 a	413 $\pm$ 25 a	566 $\pm$ 34 a	-67 $\pm$ 11 a	163 $\pm$ 25 a	316 $\pm$ 34 a	-676 $\pm$ 7 a	-447 $\pm$ 21 a	-294 $\pm$ 30 a
LDC	83 $\pm$ 4 a	187 $\pm$ 10 a	256 $\pm$ 13 a	-167 $\pm$ 4 a	-63 $\pm$ 9,5 a	6 $\pm$ 13 a	-667 $\pm$ 3 a	-563 $\pm$ 8 a	-495 $\pm$ 12 a
HDB	6561 $\pm$ 398 c	7499 $\pm$ 455 c	7733 $\pm$ 469 c	6311 $\pm$ 398 c	7249 $\pm$ 455 c	7483 $\pm$ 469 c	5877 $\pm$ 398 e	6815 $\pm$ 455 c	7049 $\pm$ 469 c
LDB	3668 $\pm$ 276 b	4192 $\pm$ 315 b	4323 $\pm$ 325 b	3418 $\pm$ 276 b	3942 $\pm$ 315 b	4073 $\pm$ 325 b	3004 $\pm$ 276 c	3528 $\pm$ 315 b	3659 $\pm$ 325 b
HDC-HDB	6408 $\pm$ 454 c	7475 $\pm$ 523 c	7812 $\pm$ 543 c	6158 $\pm$ 454 c	7225 $\pm$ 523 c	7562 $\pm$ 543 c	5528 $\pm$ 453 d	6594 $\pm$ 522 c	6932 $\pm$ 541 c
HDC-LDB	3516 $\pm$ 268 b	4182 $\pm$ 306 b	4425 $\pm$ 315 b	3266 $\pm$ 268 b	3932 $\pm$ 306 b	4175 $\pm$ 315 b	2651 $\pm$ 269 b	3317 $\pm$ 306 b	3560 $\pm$ 315 b
LDC-HDB	6418 $\pm$ 302 c	7414 $\pm$ 348 c	7701 $\pm$ 361 c	6168 $\pm$ 302 c	7164 $\pm$ 348 c	7451 $\pm$ 361 c	5634 $\pm$ 301 d	6630 $\pm$ 347 c	6916 $\pm$ 360 c
LDC-LDB	3631 $\pm$ 216 b	4233 $\pm$ 251 b	4423 $\pm$ 262 b	3381 $\pm$ 216 b	3983 $\pm$ 251 b	4173 $\pm$ 262 b	2865 $\pm$ 214 bc	3467 $\pm$ 250 b	3657 $\pm$ 261 b

RQI : revenu calculé avec le prix quartile inférieur, RM : revenu calculé avec le prix moyen ; RQS : revenu calculé avec le prix quartile inférieur ; VAQI : VA calculée avec le prix quartile inférieur ; VAM : VA calculée avec le prix moyen ; VAQS : VA calculée avec le prix quartile supérieur ; RBEQI : RBE calculé avec le prix quartile inférieur ; RBEM : RBE calculé avec le prix moyen ; RBEQS : RBE calculé avec le prix quartile supérieur ; HDC : forte densité café ; LDC : faible densité café ; HDB : forte densité banane ; LDB : faible densité banane.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akram-Ghaderi, F., Soltani, A., 2007. Leaf area relationships to plant vegetative characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) grown in a temperate subhumid environment. *Int. J. Plant Prod.* 1: 63-78.
- Anderson, M. K. Competition and complementarity in annual intercrops – the role of plant available nutrients. Dissertation thesis, The Royal Veterinary and Agricultural University ,Denmark.
- Anim-Kwapong, E. Adomako B. 2010. Genetic and environmental correlations between bean yield and agronomic traits in *Coffea anephora*. *J. Plant. Breed. Crop Sci.* Vol 2: 064-072.
- Athani S. I., Revanappa & Dharmatti P. R.. 2009. Effect of plant density on growth and yield in banana. *Karnataka J. Agric. Sci.* 22(1) : 143-146.
- Autrique, A. Perreaux, D. 1989. Maladies et ravageurs des cultures de la région des grands lacs d'Afrique Centrale. ADCD. pp. 24. 232p.
- Avilán R.L., R. Meneses & R.E. Sucre. 1982. Distribución radical del banano bajo diferentes sistema de manejo de suelos. *Fruits* : 37 : 103-109.
- Avelino, J. Willocquet, L. Savary, S. 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. Letter to the editor. *Plant Pathology* 53 : 541–547.
- Avelino, J. Barboza, B. Araya, J.C. Fonseca, C. Davrieux, F. Guyot, B. Cilas, C. 2005. Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terraces of Costa Rica, Orosi and Santa Maria de Dota. *Sci Food Agric* 85:1869–1876.
- Bagamba, F. Ssenyonga, J.W. Tushemereirwe, W.K. Gold C.S.1988. Performance and profitability of the banana sub-sector in Uganda farming systems. *Banana and food security-session 4*: 729-739.
- Baijukya, F. P. de Ridder, N. Masuki, K. F. Giller, K. E. 2005. Dynamics of banana-based farming systems in Bukoba district, Tanzania: changes in land use, cropping and cattle keeping. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 : 395–406.
- Barampama, D. Flémal, J. 1986. La recherche agronomique en caféiculture au Burundi : thèmes de recherche, acquis, transfert des acquis et contraintes. ISABU, Division cultures industrielles, 25p.

- Barradas, V.L. and Fanjul, L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agric For Meteor* 38: 101–112.
- Bart, F. 2007. Café des montagnes, café des plaines. *Etudes rurales* 180 : 35-48.
- Beer J. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cocoa and tea. *Agroforestry Systems* 5: 3–13.
- Beer, J. Muschler R. Kass, D. Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139–164.
- Bekunda, M. Woomer, P.L. 1996. Organic resource management in banana based cropping systems of the Lake Victoria basin, Uganda. *Agric. Ecosyst. Environ.* 59 : 171–180.
- Bekunda, M. 1999. Farmers responses to soil fertility decline in banana-based cropping systems in Uganda. *Managing Africa's Soils* No. 4 Russel Publishers No Hingham 2 p.
- Bellow, J.G. Nair P.K.R. 2003. Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology* 114: 197–211.
- Bidou, J. E. 1994. Burundi : l'engrenage caféier. In : *Paysanneries du café des hautes terres tropicales*, sous la direction de J.C. Tulet et al., 146-176.
- Bitoga, J. P. Flémal, J. 1992^a. Historique de la recherche caféicole au Burundi. In : *Deuxième symposium sur la recherche caféière au Burundi* : 4-10.
- Bitoga, J. P. Lambot, C. 1992^b. La problématique du paillage au Burundi, les recherches en cours et leur état d'avancement. In : *Deuxième symposium sur la recherche caféière au Burundi* : 31-44.
- Bosselmann, A.S. Dons, K. Oberthur, T. Olsen, C.S. Ræbild, A. Usma, H. 2009. The influence of shade trees on coffee quality in small holder coffee agroforestry systems in Southern Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129 : 253–260.
- Bouharmont, P. 1979. L'utilisation des plantes de couverture et du paillage dans la culture du caféier arabica au Cameroun. *Café, Cacao, Thé* 23 (2) : 75-101.

- Bouwmeester, H. van Asten, P. Ouma, E. 2009. Mapping key variables of banana based cropping systems in the Great Lakes Region Partial outcomes of the baseline and diagnostic surveys. Technical report 11 CIALCA-IITA 42p.
- Bouyjou, B.1992. La lutte chimique contre la punaise du caféier *Antestiopsis orbitalis*. In : Deuxième symposium sur la recherche caféière au Burundi : 71-86.
- Boyer, J. 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides. Initiations - Documentations Techniques no 35. ORSTOM, Paris, 173p.
- BRB. 1991. Rapport annuel 1990. Bujumbura. 211p.
- BRB. 2007. Rapport annuel 2006. Bujumbura. 198p.
- BRB. 2008. Rapport annuel 2007. Bujumbura. 206p.
- BRB. 2009. Rapport annuel 2009. Bujumbura. 189p.
- BRB. 2010. Rapport annuel 2010. Bujumbura. 218p.
- Brenda B. L. 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. Agricultural and Forest Meteorology 144: 85–94.
- Brenda B. L., Perfecto, I. Vandermeer, J. 2008. Synergies between agricultural intensification and climate Change could Create surprising vulnerabilities for crops. BioScience 58(9):847-854.
- Brenda B. L. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. Agricultural and Forest Meteorology article in press.
- Buyckx, E. J. E. 1962. Précis des maladies et insectes nuisibles rencontrés sur les plantes cultivées au Congo, au Rwanda et au Burundi. Publication INEAC, hors séries 708p.
- Campanha, M. M. , Silva Santos R.H. Bernardo de Freitas, G. Martinez, H.E.P.Garcia S.L.R. & Finger, F.L. 2004. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. Agroforestry Systems 63: 75–82.

- Cannell, M. G. R. Kimeu, B. S. 1971. Uptake and distribution of macro-nutrients in tree of coffee Arabica L. in Kenya as affected by seasonal climatic differences and the presence of fruits. *Annals of Applied Biology* 68: 213-230.
- Cannell M.G.R. 1973. Effects of Irrigation, Mulch and N-Fertilizers on Yield Components of Arabica Coffee in Kenya. *Experimental Agriculture* 9: 225-232.
- Cannell, M.G.R., 1976. Crop physiological aspects of coffee bean yield—a review. *Kenya Coffee* 41: 245–253.
- Cannell M.G.R. 1985. Physiology of the coffee crop. In: Clifford MN, Willson KC (eds), *Coffee -Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*, pp.108-134. Crom Helm, London.
- Carvajal, J. F. 1984. Cafeto, cultivo y fertilización. 2^{ème} Edit., Instituto Internacional de la Potasa, Berna, pp. 254.
- Chave, J. Andalo, C. Brown, S. Cairns, M. A. Chambers, J. Q. Eamus, D. Fölster, H. Fromard, F. Higuchi, N. Kira, T. Lescure, J. P. Nelson, B. W. Ogawa, H. Puig, H. Riéra, B. Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 78-99.
- Chipungahelo, G. S. Teri, J. M. Matowo, P. Msaky, J. F.L. Magina, F. L. Malinga, S. Mbowe, D. Kimaro, W. Review of Coffee-Banana Based Cropping Systems in Tanzania: the Economics.
- CIALCA, 2013. http://www.cialca.org/files/files/extension_materials/fertilite_nutrients1_english.pdf. Lu le 02 avril 2013.
- Cilas, C. Bar-Hen, A. Montagnon, C. Godin, C. 2006. Definition of architectural ideotypes for good yield capacity in *Coffea canephora*. *Annals of botany* 97: 405-411.
- Cilas, C. Descroix, F 2009. Yield estimation and harvest period. In *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, WeinHeim pp 601–609.
- Clowes, M. St. J. Wilson, J. H. H. 1977. The growth and development of lateral branches of *Coffea arabica* L. in Rhodesia. *Rhodesia J. Agric. Res.* 15:171-185.

- CNAC, 2011. Contraintes de l'achat de la production de café. Communiqué de presse.
- Cochet, H. 1996. Gestion paysanne de la biomasse et développement durable au Burundi. *Cah. Sci. Hum.* 32 : 133-151.
- Cong, P., Sat, C., Härdter, R. 2001. Response of selected crops to K fertilization on major soil types in South Vietnam. *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*.
- Connolly, J. Goma, H.C. Rahim, K. 2001. The information content of indicators in intercropping research. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87 : 191–207.
- Coppens, F. Garnier, P. De Gryze, S. Merckx, R. Recous, S. 2006. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. *European Journal of Soil Science* 57: 894–905.
- Coste, R. 1989. *Caféier et café*. Publication technique d'outre mer. Paris 288p.
- Crawley, M.J. 2005. *Statistics an introduction using R*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, southern Gate, Chichester, England. 327p.
- DaMatta F.M., Rena A.B. 2002. Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno Sol. In: Zambolim L (ed), *O Estado da Arte de Tecnologias na Produção de Café*, pp.93-135. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- DaMatta F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86: 99–114.
- DaMatta, F.M. Ramalho, J.D.C. 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Braz. J. Plant Physiol.*, 18 :55-81.
- DaMatta F.M. Ronchi, C.P. Moacyr Maestri, M. et Barros ,R. S. 2008. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol.*, 19(4): 485-510.
- Dauzata J. Eroy M.N. 1997. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. *European Journal of Agronomy* 7: 63–74.
- Davies G. 1995. *Banana and plantain in the East African highlands in Banana and plantains*. INIBAP, Chapman & Hall. London, Glasgow, Weinheim, New York... 493-508.

- Debashis Chakraborty, Shantha Nagarajan, Pramila Aggarwal, Gupta, V.K. Tomar, R.K. Garg, R.N. Sahoo, R.N. Sarkar, A. Chopra, U.K. Sundara Sarma, K.S., Kalra, N. 2008. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment. *Agricultural water management* 95 : 1323 – 1334.
- De Freitas, Z. M. T. S. De Oliveira, F. J. De Carvalho, S. P. Dos Santos, V. F. De Oliveira Santos J. P. 2007. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de Porte Baixo. *Bragantia*, Campinas 66 : 267-275.
- Delstanche, S. 2011. Drivers of soil fertility in smallholder banana systems in the African Great Lakes Region. Thesis dissertation, UCL, 459 p.
- Deraeck, J. 2011. Le potentiel de l'association banane-café au Rwanda : une analyse systémique. Mémoire de maîtrise. UCL, Belgique.
- Döring, T.F. Brandt, M. Jürgen, H. Frinckh, M.R. Saucke, H. 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Research* 94 : 238–249
- Dossa, E.L. Fernandes, E.C.M. Reid, W.S. Ezui, K. 2008. Above-and belowground, nutrient and carbon stocks contrasting on open-grown and shaded coffee plantation. *Agroforest syst.* 72: 103-115.
- Dreiseidler, C. Burkhardt, J. Bustamante, O. Siles, P. Staver, C. Valdivia, E.P. The response of *Musa* cultivar root systems to a tree shade gradient. Poster.
- Drion, A. 1992. La place de café dans le système traditionnel du Buyenzi. In : Deuxième symposium sur la recherche caféière au Burundi : 131-147.
- Eskes, A. B. Leroy, T. 2009. Coffee selection and breeding. In *Growing, Processing, Sustainable Production*. Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim pp 61–87.
- Evans J.R.1993. Photosynthetic acclimation and nitrogen partitioning within a Lucerne canopy. I. Canopy characteristics. *Aust J Plant Physiol* 20:55–67.
- FAO, 2012. Système d'alerte précoce, surveillance de la sécurité alimentaire au Burundi. Bujumbura, 5p.
- FAO-ISABU, 2012. L'incidence du BXW au Burundi et les moyens de lutte mise en œuvre. Rapport.

- Faostat. 2010. <http://www.fao.org/docrep/meeting/004/ab443f.htm> (visité, le 12 décembre 2010).
- Faostat, 2011. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, lu le 03 décembre 2011.
- Faosta, 2013. <http://faostat.fao.org/site/613/DesktopDefault.aspx?PageID=613#ancor>. Lu le 7 février 2013.
- Favarin, J. L. Neto, D.D., García, A. G. Villa Nova, N. A. Favarin, M. G. G. V. 2002. Equa   es para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília 37 (6) : 769-773.
- Fermont, A.M., van Asten, P.J.A., Tiftonell, P., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2009. Closing the cassava yield gap: an analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Res.* 112: 24–36.
- Fews net, 2010. BURUNDI: Alerte sur la Sécurité Alimentaire ; Déficit hydrique dans Kirundo accroît l'insécurité alimentaire.
- Fews net, 2012. Burundi bulletin des prix, septembre 2012.
- Fews net, 2013. Burundi bulletin des prix, janvier 2013.
- Flémal, J. 1985. La vulgarisation en caféiculture au Burundi. Communication présentée au séminaire sur la recherche et le développement en caféiculture africaine, Lomé, 17p.
- Fogain R., Gowen R.S. 2005. Root morphology and development of banana and plantain root systems in relation to nematode population. *Fruits* 60: 297–302
- Foxtop, 2013. <http://fxtop.com/fr/conversion-devises-date-passee.php> . Lu le 7 février 2013.
- Frison, E., Sharrock, S., 1998. Introduction: The economic, social and nutritional importance of banana in the world. In: Picq C., Four   E., Frison E.A. (Eds.), *Bananas and Food Security. Proceedings of the International Symposium, Cameroon, 10-14 Nov 1998. The International Network for the Improvement of Banana and Plantain, Montpellier*, pp 21- 35.
- Gahungu, A. 2008. Etude de rentabilité de la fil  re café au Burundi. Rapport, Bujumbura, 78p.
- Gaidashova, S.V. Okech S.H.O. Golg, C.S. Nyagahungu, I. 2005. Why beer bananas? The case for Rwanda. *Infomusa* 14 (1): 2-6.

- Gaidashova S.V., Germeau G., van Asten P. J. A. And Delvaux B. (2007). Identification of constraints to banana production in three ecoregions of Rwanda). In: Sustainable productivity for improved food security and livelihoods (R.W. Njeru, D.M. Kogabo, T. Ndabamenye, D. Kayiranga, P. Ragama, P.Y.K. Sallah, D. Nkerabahizi, A. Ndayiragije, L. Ndiramiye, G. Night, S.O.S. Akinyemi, N. Kanuya, M.C. Bagabe, J. Mugabe (eds.)). Proceedings of ISAR National Conference, 26-27 March 2007, ISAR, Kigali, Rwanda, pp. 97-105.
- Gaie, W., Flémal, J., 1988. La culture du caféier d'Arabie au Burundi. AGCD. Publication du service agricole N° 4. 196p.
- Gay, C. Estrada, F. Conde, C. h. Eakin, H. Villers, I. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in veracruz, mexico. Climatic Change 79: 259–288.
- Godefroy J., Rutunga V.& Sebahutu A. 1991. Les terres de bananeraies dans la région de Kibungo au Rwanda: Résultantes du milieu physique et des systèmes de culture. Fruits 46 : 109-124.
- Gouvernement du Burundi, 2011. Cadre Stratégique de la croissance et la Lutte contre le Pauvreté – Deuxième Génération. Bujumbura, 145p.
- Goderris W., 1995. Ibiharage, la culture du haricot au Burundi. Publication AGDCD, Bruxelles, 163p.
- Gousseland J. 1983. Etude de l'enracinement et de l'émission racinaire du bananier 'Giant Cavendish' (*Musa acuminata* AAA, sous-groupe Cavendish) dans les andosols de la Guadeloupe. Fruits 38: 611-623.
- García-Fernández, J. L. Valdez-Cepeda, R. D. Avila-Serrano, N.Y. Murillo-Amador, B. Nieto-Garibay, A. Magalalanes-Quintanar, R. Larringa-Mayoral, J. Troyo-Diéguéz, E. 2005. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata*) grown on desert calcareous soil. Plant and Soil 271 : 297-307.
- Guyot, B., Gueule, D., Manez, J.C., Perriot, J.J., Giron J. & Villain, L.1996. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualite des cafes Arabica. Plantations, recherche, developpement (Juillet-Aout): 272–283

- Hagggar, J.M. Barrios;M. Bolanos,M., Merlo,P., Moraga R., Munguia A., Ponce S., Romero G., Soto C., Staver E. & Virginio M. F. 2011. Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforest Syst* 82: 285–301.
- Hatungimana, A. 2008. Le café et les pouvoirs au Burundi. *Les Cahiers d'Outre-Mer* 243 : 1-17.
- Heather, L. Reynolds Keith, M. Vogelsang Anne, E. Hartley, James, D. Bever, D, Schultz, A. 2006. Variable responses of old-field perennials to arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus source. *Oecologia* 147: 348–358.
- Hemp, A. 2006. The banana forests of Kilimanjaro: biodiversity and conservation of the Chagga homegardens. *Biodiversity and Conservation* 15:1193–1217.
- Hillocks, R. Chanika, C. Phiri, N. Oduor, G. Chalabesa, A. 2002. IPM for smallholder coffee farmers in Malawi. *Africa*: 45-46.
- Hubert J.P., 1989. Réflexion sur l'évolution des systèmes d'exploitation agricole au Burundi, à partir d'une typologie des exploitations dans la région naturelle de Kirimiro. ISABU Publication n°140. 24p.
- Hubert, J. P. Maganda, F. 1992. Evolution de l'application des thèmes de conduite de la caféiculture en milieu paysan de 1987 à nos jours. Province de Ngozi. In : Deuxième symposium de la recherche caféière au Burundi : 105-117.
- Hundera, A. R. Berecha, K. Gijbels, G. Baeten, P. Mechelen, M. VanHermy, M. M.Muys, M. Honnay, O. B. 2011. Semi-forest coffee cultivation and the conservation of Ethiopian Afromontane rainforest fragments. *Forest Ecology and Management* 261 : 1034-1041.
- Huxley, J. S. 1924. Constant differential growth-ratios and their significance. *Nature* 114, 895.
- Huxley, J. S. 1932. Problems of relative growth. Methuen & Co, Ltd, London.
- IGEBU, 2008. Base de données interne des données climatiques des différentes stations météorologiques du Burundi de 1976 à 2007. Institut géographique du Burundi, Gitega, Burundi.

- InterCafé, 2012. Communiqué de presse sur le prix du café cerise pour la campagne café 2011-2012.
- InterCafé, 2011. <http://www.cafeduburundi.com/production/production-data>. Lu le 12 décembre 2011.
- InterCafé, 2012. <http://www.cafeduburundi.com/production/production-data>. Lu le 17 février 2012.
- IPGRL 1996. Descripteurs du caféier (*Coffea* spp. et *Psilanthus* spp.). Institut international des ressources phylogénétiques, Rome, Italie. 39p.
- Ired, 2011. Les caféiculteurs du Burundi face à la Banque Mondiale : Luttés pour une réelle participation dans les privatisations. Genève, 24p.
- ISABU, 1996. Bilan de la recherche sur le caféier arabica : période 1988-1995. Bujumbura, 146p.
- ISABU, 2008. Rapport annuel de la composante café.
- ISABU-OCIBU, 2009. Rapport de l' « Etude des causes profondes de la cyclicité de production de café au Burundi.
- ISTEEBU, 2006. Bulletin mensuel des prix : mois de juillet 2006.
- ISTEEBU, 2007. Bulletin mensuel des prix : mois de juillet 2007.
- ISTEEBU, 2010. Bulletin mensuel des prix : mois de juillet 2010.
- ISEEBU, 2011. Bulletin mensuel des prix : mois de juillet 2011.
- Israeli, Y. Plaut, Z. Schwartz, A. 1995. Effect of shade on banana morphology, growth and production. *Scientia Horticulturae* 62 : 45-56.
- Jaramillo, J. Chabi-Olaye, A. Kamonjo, C. Jaramillo, A. Vega, F. E. et al. 2009. Thermal tolerance of the Coffee Berry Borer *hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PloS one* 4 e 6487.
- Jaramillo-Botero, Catalina et al. 2010. Production and vegetative growth of coffee trees under fertilization and shade levels. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*. 67 (6) : 639-645.
- Jassogne, L. van Asten, P. J. A. Wanyama, I. Philippe, V. B. 2012. Perceptions and outlook on intercropping coffee with banana as an opportunity for smallholder coffee farmers in Uganda. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 1: 1-15.

- Kabonyi, S., 1985. Production et recherche sur la banane en Afrique de l'Est et en Afrique centrale. Dans Aperçu sur la culture du bananier et ses problèmes dans la communauté économique des grands lacs (CEPGL). Acte du colloque régional, Bujumbura, Burundi.
- Kelly, V. A. 2006. Factors affecting demand for fertilizer in Sub-Saharan Africa. Agriculture and Rural Development. World bank, 72p.
- Khiari, L. Parent, L.E. Tremblay, N. 2001. The phosphorus Compositional Nutrient Diagnosis Range for Potato Agron. J. 93: 815-819.
- Kibuzi, M. Odeke, P.R. Rubaihayo, Osiru, D.S.O. 1999. Effect of spacing, stage and method of desuckering on bunch size and yield of banana cultivar (AAA-EA). Department of Crop Science, Makerere University, P.O Box 7062 Kampala, Uganda. African Crop Science Journal 7: 349-353.
- Kimonyo, J. P. Ntiramyibagira, D. 2007. Réformes de la Filière Café au Burundi: Perspectives d'Avenir pour la Participation, la Prospérité et la Paix. Bujumbura 52p.
- Kuyah, S. Dietz, J. Muthuri, C. Jamnadass, R. Mwangi, P. Coe, R. Neufeldt, H. 2012. Allometric equations for estimating biomass landscapes: I. Aboveground biomass. Agriculture, Ecosystems & Environment 158 : 216-224.
- Laamouri, A. Chtourou, A. Ben Salem, H. 2002. Prédiction de la biomasse aérienne d'*Acacia cyanophylla* Lindl. (syn. *A. saligna* (Labill.) H. Wendl) à partir de mensuration dimensionnelles. Ann. For. Sci. 59: 335-340.
- Laderach, P. van Asten, P. 2011. Coffee and Climate change: coffee suitability in East Africa. Poster.
- Lahav, E.; Turner, D.W. 1983. Banana nutrition. International Potash Institute. Bern 62p. (IPI. Bulletin, 7).
- Lahav, E. 1995. Banana nutrition in Banana and plantains. INIBAP, Chapman & Hall. , Glasgow, Weinheim, New York... 259-316.
- Lambot, C. Snoeck, D. 1992. La nouvelle stratégie de recherche sur la fertilisation du caféier Arabica au Burundi et ses premiers résultats. In : Deuxième symposium de la recherche caféière au Burundi : 13-30.
- Lambot, C. Bouharmont P. 2009. Pruning. In Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 288–311.

- Lara-Estrada Leonel, Vaast Philipp, 2004. Effects of altitude, shade, yield and fertilization on coffee quality (*Coffea arabica* L. var. Caturra) produced in agroforestry systems of the Northern Central Zones of Nicaragua.
- Lima filho, O. F. & Malavolta, E. 2003, Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*coffea arabica* l. cv. catuaí vermelho) : remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and efficient plants. braz. J. boil. 63 : 481-490
- Lipchitz, A. Pouch, T. 2007. Les mutations des marchés mondiaux du café et du cacao. Géoéconomie, 44 : 1-21.
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solutetransport models: overview and application. J. Contam. Hydrol. 7 : 51–73.
- Loveridge S. 1992. Sources of Agricultutural Household Revenue, Exports, and their Impact Food Availability in Rural Rwanda (Agricultural Year 1990). Kigali, 1992. 38p.
- Lyngbæk, A. E. Muschler, R. G. and Sinclair, F. L.. 2001. Productivity and profitability of multistrata organic versus conventional coffee farms in Costa Rica. Agroforestry Systems 53: 205–213.
- MacVan, C. 1997. Coffee Growing: Sun or Shade? Letters. Science 275: 1401-1404.
- Marta dos Santos Freire Ricci, Janaina Ribeiro Costa Rouws, Nelson Geraldo de Oliveira, Marinete Bezerra Rodrigues. 2011. Vegetative and productive aspects of organically grown coffee cultivars under shaded and unshaded systems. Sci. Agric. 68: 424-430.
- Martinez, Herminia Emilia Prieto et al. 2003. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. Pesq. Agropec. Bras. 38 : 703-713.
- Martin–Prével, P., 1969. Echantillonnage du bananier pour l'analyse foliaire, conséquences des différences de techniques ; Fruits 32 : 151-166.
- Mcintyre, B. D. Gold, C. S. Ssali, H. Riha, S. J. 2003. Effects of mulch location on banana weevil, soil and plant nutrients, soil water and biomass in banana fields. Biology and fertility of soils 39 : 74-79.

- Mehlich, A., 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15: 1409-1416.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage. 2008. *Stratégie Agricole Nationale 2008-2015*. Bujumbura 156p.
- Ministère de l'Intérieur 2009. Recensement national de la population burundaise. Rapport. Bujumbura, 312 p.
- Ministère de la planification. 2006. *Monographie des provinces de Gitega, Muramvya, Ngozi et Kayanza*.
- Montes, F.a., Agustín Rubio a, Ignacio Barbeito b, Isabel Canéllas b, . Characterization of the spatial structure of the canopy in *Pinus silvestris* L. stands in Central Spain from hemispherical photographs. *Forest Ecology and Management* 255: 580–590.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A., 1992. *Introduction to Linear Regression Analysis*, 2nd edition. John Wiley, New York.
- Montoya L.A., Sylvain P.G., Umaña R. 1961. Effect of light intensity and nitrogen fertilization upon growth differentiation balance in *Coffea arabica* L. *Coffee* 3: 97-104.
- Morais H. Paulo Henrique Caramori, P.H. Mirian Sei Koguish, José Carlos Gomes, Ana Maria de Arruda Ribeiro. 2009. Sombreamento de cafeeiros durante o desenvolvimento das gemas florais e seus efeitos sobre a frutificação e produção. *Ciência Rural*, Santa Maria 39 : 400-406.
- Morais, H. Caramori, P.H. de Arruda Ribeiro, A.M. Gomes J. C. Mirian Sei Koguish, M.S. 2006. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil *Pesq. agropec. Bras.*, Brasília 41: 763-770.
- Mouen Bedimo, J. A Njiayoum, I. Bieysse, D. Ndoumbè Nkeng, M. Cilas, C. and Nottéghem J. L. 2008. Effect of Shade on Arabica Coffee Berry Disease Development: Toward an Agroforestry System to Reduce Disease Impact. *Ecology and Epidemiology* Vol. 98 (12): 1320-1325.
- Mouen Bedimo, J. A. Bieysse, D. Njiayoum, I. Deumeni, J. P. Cilas, C. Nottéghem, J. L. 2007. Effect of cultural practices on the development of Arabica coffee berry disease, caused by *Colletotrichum kahawae*. *Eur J Plant Pathol* 119: 391–400.

- Muller, R. A. Berry, D. Avelino, J. Bieysse, D. 2009. Coffee disease. In Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim pp 495–556.
- Muschler R.G. 1999. Arboles en cafetales. Proyecto agroforestal CATIE/GTZ. Modulo de enseñanza No. 5. CATIE/GTZ, Turrialba, p 60.
- Muschler R.G. 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 85: 131–139.
- Mussche, G. Bagambake, D. Perreaux, D. 1992. Le problème de l'antracnose et de la rouille orange du caféier au Burundi. In : Deuxième symposium sur la recherche caféière au Burundi : 62-70.
- Nations Unies, 1992. Rapport sur le secteur agro-alimentaire et le cadre du transfert de la technologie au Burundi. New York, 1992. 83p.
- Ndayikengurutse, C. 2000. La gestion de risque de prix liée à la commercialisation du café au Burundi. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'Etudes Supérieures en Gestion d'Entreprise. Université de Genève.
- Ndayiragije, P. 2007. Historique de la recherche café. In : Atelier de réflexion sur les contraintes de la caféiculture et les résultats de la recherche café : 20-26.
- Ndimurirwo, L., 1992. Les données brutes sur la production et la commercialisation des produits agricoles de 1980-1990. ISABU, publication n° 152, 42p.
- Nduwayo, G. 2007. Développement des cultures d'association et génératrices de revenus. In : Atelier de réflexion sur les contraintes de la caféiculture et les résultats de la recherche café : 46-52.
- Ngayempore, E. 2007. Contraintes de la caféiculture burundaise. In : Atelier de réflexion sur les contraintes de la caféiculture et les résultats de la recherche café ; 9-19.
- Ngendakumana, D. La privatisation au Burundi : dépasser l'émotionnel. Classification JEL : L32, L33, L39.
- Nibasumba, A. 2008. Garniture cationique des sols et des racines dans des systèmes de culture bananière du Burundi et du Rwanda. Mémoire de DEA, UCL, Belgique.

- Niko, N. Ndayihazamaso, P. Niyongere, C. Nibasumba, A. Bizimana, S. Lepoint, P. Kaboneka, S. Sakayoya, E. Jogo, W. Tinzaara, W. et Karamura, E. 2012. Impacts of banana xanthomonas wilt disease on banana productivity and livelihoods of farm households in Burundi. Soumis à la publication.
- Niklas, K. L. 1993. The allometry of plant reproductive biomass and stem diameter. *American journal of botany*, 80: 461-467.
- Niklas, K. L. 2004. Plant allometry: is there a grand unifying theory? *Biol. Rew.* 79: 871-889.
- Niinemets, Ü. 1997. Role of foliar nitrogen in light harvesting and shade tolerance of four temperate deciduous woody species. *Funct Ecol* 11: 518–531.
- Ninemets, Ü. 2007. Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. *Plant Cell Environ* 30: 1052–1071.
- Niinemets, Ü. 2009. A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecol Res* 25: 693–714.
- Niyongere, C^a. Niyongere, C. Ndayihanzamaso, P. Niko, N. Bizimana, S. Nibasumba, A. Lepoint, P. Kaboneka, S. Sakayoya, E. Karamura, E. Jogo, W. Tinzaara, W. 2012. Farmers' knowledge about banana crop management as related to the control of banana diseases in Burundi. Soumis à la publication.
- Niyongere, C^b. 2012. Occurrence; characterization and screening for resistance to banana bunchy top virus in Burundi, Democratic Republic of the Congo and Rwanda. Thesis dissertation. Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, Kenya.
- Njoroge, J. M. Waithaka, K. Chweya, J. A. 1993. Effect of intercropping young plants of compact Arabica coffee hybrid cultivar Ruiru 11 with potatoes, tomatoes, beans and maize on coffee yield and economic returns in Kenya. *Expl. Agri.* 29: 373-377.
- Norgrove, L. Hauser, S. 1998. Effects of tree density and crop management upon growth of plantain in a low-input agrisilvicultural system. *Acta Horticulturae* 490: International Symposium on Banana in the Subtropics.

- Nutman F.J. 1933. The root system of coffee Arabica L. Root systems in typical soils of British East Africa. *Emp J Exp Agr* 1: 271-285.
- Nyamoya, P. Kasungu, C. Akilimali, J. 1986. Le financement du développement au Burundi : la filière café. *Tiers-Monde* 106 (27) : 357-374.
- Nyombi, K. van Asten, P.J.A. Leffelaar, P.A. Corbeels, M. Kaizzi, C.K. & Giller, K.E. 2009. Allometric growth relationships of East Africa highland bananas (*Musa* AAA-EAHB) cv. Kisansa and Mbwazirume. *Ann Appl Biol* 155 : 403–418.
- Nyombi, K. van Asten P.J.A. Corbeels, M. Taulya, G. Leffelaar, P.A., Giller, K.E. 2010. Mineral fertilizer response and nutrient use efficiencies of East African highland banana (*Musa* spp., AAA-EAHB, cv. Kisansa). *Field Crops Res.* 117 : 38-50.
- OCIBU, 2007. Recensement des caféiers. Bujumbura Burundi.
- OCIBU, 2008. La base de données interne.
- OCIBU, 2011. www.burundicoffee.com (site visité le 22 février 2011).
- Oduol, P.A. Aluma, J.R.W. 1990. The banana (*Musa* spp.) – coffee Robusta: traditional agroforestry system of Uganda. *Agroforest. Syst.* 11: 213–226.
- Okalebo, J.R. Gathua, K.W. Woomer, P.L. 1993. Laboratory Methods of Soil and Plant Analysis: A Working Manual. Tropical Soil Biology and Fertility Institute, EPZ Printers, Nairobi.
- PAGE, 2008. Consolidation des réformes. PAGE infos N° 36. 4p.
- Panapress, 2008.
http://capcomespace.net/fre/actualites/economie/0805131639_Hausse_des_prix_du_cafe_au_producteur_au_burundi. Lu le 21 février 2013.
- Panapress, 2010. www.panapress.com/pana-pagination-61-3186-2-lang1-AGC-index.html - . Lu le 21 février 2013.
- Parent, L.E. Dafir, M. 1992. A theoretical concept of Compositional nutrient Diagnosis. *J. Am. Sc. Hort.Sc.* 117: 239-242.
- Peters, R.H. Clontier, Dub S D. A. Evans, S. A. Hastings, P. H. Kaiser, H. Kohn, D. et Sarwer-Foner B. 1988. The allometry of the weight of fruit on trees and shrubs in Barbados. *Oecologia* 74: 612-616.

- Pezzopane, J. R. M. Pedro, J. R. Mário J. Gallo, P. B. 2007. Caracterização microclimática em cultivo consorciado café/banana. *Rev. bras. eng. agríc. Ambient* 11: 256-264.
- Phiri, N. A. Hillocks, R. J. P. Jeffries, P. 2001. Incidence and severity of coffee diseases in smallholder plantations in northern Malawi. *Crop Protection* 20: 325-332.
- Pozy, P. Dehareng, D. 1996. Composition et valeur nutritive des aliments pour animaux au Burundi. AGCD-ISABU, Publication agricole n° 37. 59p.
- Ricci, Marta dos Santos Freire; Rouws, Janaina Ribeiro Costa; Oliviera, Nelson Geraldo de and Rodrigues, Marinete Bezerra. 2011. Vegetative and productive aspects of organically grown coffee cultivars under shaded and unshaded systems. *Sci. agric. Piracicaba, Braz.* 68 : 424-430.
- Rishirumuhirwa, T. 1993. Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol. *Bulletin –Erosion* 9: 63-70.
- Rishirumuhirwa, T. & Roose E. 1996. Productivité de biomasse et gestion durable des exploitations dans le cas des plateaux à forte population du Burundi.
- Rishirumuhirwa, T. et Roose, E., 1997. - Productivité de biomasse et gestion durable des exploitations dans le cas des plateaux à forte population du Burundi.- Communication à la réunion conjointe du Réseau Erosion et de l'Association Québécoise de Sciences du Sol, Québec, 25-28 août, 1997. *Bul. Erosion* n° 18, p. 306-314. IRD, Montpellier.
- Rishirumuhirwa T. & Roose E. 1998. The contribution of banana farming systems to sustainable land use in Burundi. *Adv GeoEcol* 31: 1197–1204.
- Rishirumuhirwa, T. et Roose, E., 2002. Influence de la gestion de la biomasse sous bananeraie sur l'érosion hydrique, le carbone et les propriétés d'un sol ferrallitique acide des hauts plateaux du Burundi. *Bul. Erosion* n° 23, p. 250-261. IRD-CIRAD, Montpellier.
- Robinson, J. B. D. Hosegood, P. H. 1965. Effects of Organic Mulch on Fertility of a Latosolic Coffee Soil in Kenya. *Experimental Agriculture* 1: 67-80.
- Robinson, J.B.D, 1961. Lyamungu Research Report, 1961. Pge 313.

- Rodrigo, V.H.L. Stirling, C.M. Teklehaimanot, Z. Nugawela, A. 1997. The effect of planting density on growth and development of component crops in rubber/banana intercropping systems. *Field Crops Research* 52 : 95-108.
- Rodrigo, V.H.L. Stirling, C.M. Teklehaimanot, Z. Nugawela, A. 2000. Intercropping with banana to improve fractional interception and radiation-use efficiency of immature rubber plantations. *Field Crops Research* 69 : 237-249.
- Rodrigo, V.H.L. Stirling, C.M. Silva, T.U.K. Pathirana, P.D. 2005. The growth and yield of rubber at maturity is improved by intercropping with banana during the early stage of rubber cultivation. *Field Crops Research* 91 : 23–33.
- Rodrigues, A. R. Favarin, J. L. Malavolta, E. Junior, J. L. and Moraes, F. M. 2009. Photosynthesis, Chlorophylls, and SPAD Readings in Coffee Leaves in Relation to Nitrogen Supply. *Soil Science and Plant Analysis*, 40: 1512–1528.
- Rugalema, G. H. Johnsen, F. H. Rugambisa, J. 1994. The homegarden agroforestry system of Bukoba district, North-Western Tanzania. 2. Constraints to farm productivity. *Agroforestry Systems* 26: 205-214.
- Rufyikiri, G. Declerck, S. Dufey, J.E. Delvaux, B. 2000. Arbuscular mycorrhizal fungi might alleviate aluminium toxicity in banana plants. *New Phytol* 148: 343-352.
- Rufyikiri, G. Declerck, S. Thiry, Y. 2004. Comparison of ^{233}U and ^{33}P uptake and translocation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* in root organ culture conditions. *Mycorrhiza* 14: 203-207.
- Sajan Kurien, Paickattumana Suresh Kumar, Nerukavil Varieth Kamalam and Pallacken Abdul Wahid. 2006. Relative efficiency of ^{32}P uptake in a banana-based intercropping system. *Fruits* 61: 353-366.
- Saleh, M. M. S. 2005. Growth and Productivity of Williams Banana Grown Under Shading Conditions. *Journal of Applied Sciences Research* 1: 59-62.
- Schmitt; C.B. Feyera Senbeta, Manfred Denich, Helmut Preisinger. 2009. Wild coffee management and plant diversity in the montane rainforest of southwestern Ethiopia. *Afr. J. Ecol.*, 48 : 78–86.

- Schnug, E. Heym, J. Achwan, F. 1996. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (Bolides). *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 2738–2739.
- Serrano, E. 2003. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica in Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 23-33.
- Senevirathna, A. M. W. K. Stirling, C. M. Rodrigo, V. H. L. 2008. Acclimation of photosynthesis and growth of banana (*Musa* sp.) to natural shade in the humid tropics. *Expl Agric.* 44 : 301–312
- Shadchina, T. M. Dmitrieva, V. V. 1995. Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. *Journal of plant nutrition*, 18 : 1427-1437.
- Shatar, T.M., McBratney, A.B., 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *J. Agric. Sci.* 142 : 553–560.
- Siles, P. Harmand J.M. Vaast, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforest Syst* 78: 269–286.
- Smith, J. J. Jones, D.R. Karamura, E. Blomme, G. Turyagyenda, F. L. 2008. An analysis of the risk from *Xanthomonas campestris* sp. *musacearum* to banana cultivation in Eastern, Central and Southern Africa. Bioversity International, Montpellier, France.
- Snoeck, D. Bitoga, J.P. Barantwaririje, C. 1993. Avantages et inconvénients de l'utilisation des divers modes de couverture dans les caféières au Burundi In : Quinzième colloque scientifique international sur le café, Montpellier (France), 6-11 juin 1993. Paris : ASIC, 793-795.
- Snoeck, D. 1995. Interactions entre végétaux fixateurs d'azote et non fixateurs en culture mixte: cas des *Leucaena* spp. associées à *Coffea arabica* L. au Burundi. Thèse de doctorat. Université de Lyon1, Lyon, France.
- Snoeck, J. Lambot, C. 2009. Coffee nutrition in: Coffee growing, processing sustainable production. Seconde edition. Wiley-vch, Weinheim: 250-273.

- Soares, Frederico Antonio Loureiro et al. 2008. Acúmulo, exportação e restituição de nutrientes pelas bananeiras "Prata Anã" e "Grand Naine". Cienc. Rural 38: 2054-2058.
- Soto-into, L. Perfecto, I. Castillo-Mermandez, J. Cballero-Niéto, J. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. Agriculture, Ecosystems and Environment 80 : 61–69.
- Sottiaux, G. Oldecamp, L. Bigura, C. Frankart, R. 1988^a. Carte des sols du Burundi. Echelle 1/250000. Notice explicative. AGCD, Bruxelles, publication du service agricole, N° 9, 142 p + annexes.
- Sottiaux, G. Oldecamp, L. Bigura, C. Frankart, R. 1988^b. Carte des sols du Burundi, Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (1988). AGCD, Bruxelles, publication du service agricole, N° 9, 83 p.
- Staver, C. Guharay, F. Monterroso, D. and Muschler, R.G. 2001. Shade-grown coffee in Central America. Agroforestry Systems 53: 151–170.
- Steiman, S. Travis Idol B, H.C. Bittenbendera, Loren Gautzc. Shade coffee in Hawaii– Exploring some aspects of quality, growth, yield, and nutrition. Scientia Horticulturae. Scientia Horticulturae 128 : 152–158.
- Tibaijuka, A. K. 984. An Economic Analysis of Smallholder Banana-Coffee Farms in the Kagera Region, Tanzania: Causes of the Decline in Productivity and Strategies for Revitalization. Published Ph.D. dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Economics and Statistics, Uppsala.
- Turner, D.W. 1995. The response of the plant to the environment. In Banana and Plantains: 206-229.
- Turner, D.W. Fortescue, J.A. Thomas, D.S. 2007. Environment physiology of the bananas (*Musa* spp.). Braz. J. Plant Pysiol., 19: 463-484.
- Tushemereirwe W.K. D. Karamura, H. Ssali, D. Bwamiki, I. Kashaija, C. Nankinga, F. Bagamba, A. Kangire R. Ssebuliba. 2001. Bananas (*Musa* spp.) 2 : 281-321. Agriculture, Fountain Publishers, Kampala, Uganda.
- Upreti, G. Bittenbender, H. C. Ingamells, J. L. 1991. Rapid estimation of coffee yield. ASIC, 14e Colloque, San Francisco: 585-593.

- Vaast, P. Cilas, C. Perriot, J. J. Davrieux, F. Guyot, B. Bolaño, M. 2004. Mapping of coffee quality in Nicaragua according to regions, ecological conditions and farm management. 20th International Conference on Coffee Science, Bangalore, India. 842-850.
- van Asten P.J.A, Wairegi L.W.I., Mukasa D., Uringi N.O. 2011. Agronomic and economic benefits of coffee–banana intercropping in Uganda's smallholder farming systems. *Agricultural Systems* 104: 326–334
- van der Vossen, H.A.M. 2005. A critical analysis of the agronomic and economic sustainability of organic coffee production. *Exp. Agric.* 41: 449-473.
- Vernon, A.J. 1967. Yield and light relationship in cocoa. *Trop Agric* 44: 22-38.
- Wairegi, L.W.I. Van Asten, P.J.A. Tenywa, M., Bekunda, M. 2009. Quantifying bunch weights of the East African highland banana (*Musa* spp. AAA) using non-destructive field observations. *Scientia Horticulturae* 121 : 63–72.
- Wairegi, L. W.I. Van Asten, P. J.A. Tenyab, Moses M. Mateete Bekundab, A. 2010. Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. *Field Crops Research* 117: 146–153.
- Wairegi, L.W.I. & van Asten, P.J.A., 2010. Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in the East African highland bananas (*Musa* spp. AAA). *Journal of Plant Nutrition*.
- Wairegi, L.W. van Asten, P.J.A. 2010. The agronomic and economic benefits of fertilizer and mulch use in banana systems in Uganda. *Agricultural Systems*. 103 (8), 543-550.
- Wairegi, L.W.I. van Asten, P.J.A., 2012. Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in Arabica and Robusta coffee in the East Africa highlands. *Expl. Agri.* 48: 448-460.
- Walkley, A. Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-263.
- Walyaro, D. J. Van Der Vossen, H. A. M. 1979. Early determination of yield potential in arabica coffee by applying index selection. *Euphytica* 28 : 465-472.

- Weiner, J. Thomas, S.C. 1992. Competition and allometry in three species of annual plants. *Ecology*, 68: 813–821.
- Wiersum, K.F. 1984. Surface erosion under various tropical agro-forestry systems. In: O'Loughlin C L, Pearce AJ, eds, Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, pp231–239. Honolulu/Hawaii. East-West Center
- Willey, R.W., 1985. Evaluation and presentation of intercropping advantages. *Exp. Agric.* 21: 119–133.
- Wintgens, J. N. 2009. Coffee: Growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders and researchers. Wiley-Vch.
- Wortmann, C. S. Sengooba T. et Kyamanywa S. 1992. Banana and Bean intercropping : factors affecting bean yield and land use efficiency. *Expli. Agr.* 28: 287-294.
- Wrigley, G., 1988. Coffee in Tropical Agriculture Series. New York, 639p.
- Yamaguchi, J. Araki, S. 2004. Biomass production of banana plants in the indigenous farming system of the East African Highland A case study on the Kamachumu Plateau in northwest Tanzania. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 102: 93–111.
- Youkhana A., Idol T. 2009. Tree pruning mulch increases soil C and N in a shaded coffee agroecosystem in Hawaii. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 2527–2534
- Zegada-Lizarazu, W. Yasuhiro Izumin, Morio Iijima. Water Competition of Intercropped Pearl Millet with Cowpea under Drought and Soil Compaction Stresses. *Plant Prod. Sc.* 9(2): 123-132.
- Zoyem, J. P. Evaline Diang'a, E. Wodon, Q. 2008. Mesures et déterminants de l'insécurité alimentaire au Burundi selon l'approche de l'apport calorifique. *The African Statistical Journal* 6: 35-66.