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

Dynamique des éléments nutritifs et de l’eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Ndihokubwayo, Soter

2025
UB, Ecole Doctorale
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1495

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

ECOLE DOCTORALE

FACULTE D'AGRONOMIE ET DE BIO-INGENIERIE

CENTRE DE RECHERCHE EN SCIENCES DES PRODUCTIONS ANIMALES, VEGETALES ET ENVIRONNEMENTALES (CRAVE)



Thèse présentée et soutenue publiquement par Soter Ndihokubwayo en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences agronomiques et Ingénierie biologique

Spécialité : Agroforesterie et Fertilité des sols

Co-promoteurs :

Prof. Dr. Ir. Bernadette Habonimana, Université du Burundi
Prof. Dr. Ir. Salvator Kaboneka, Université du Burundi
Prof. Dr. Heidi Megerle, Rottenburg University of Applied Forest Sciences, Allemagne

Bujumbura, Janvier 2025

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

JURY

Prof. Dr. Ir. Séverin Nijimbere, Université du Burundi	Président
Dr. Ir. Anaclet Nibasumba, Université du Burundi	Secrétaire
Prof. Dr. Ir. Bernadette Habonimana, Université du Burundi	Co-Promoteur
Prof. Dr. Ir. Salvator Kaboneka, Université du Burundi	Co-Promoteur
Prof. Dr. Heidi Megerle, Rottenburg University of Applied Forest Sciences, Allemagne	Co-Promoteur
Prof. Dr. Ir. Sanctus Niragira, Université du Burundi	Membre
Prof. Dr. Sebastian Hein, Rottenburg University of Applied Forest Sciences, Allemagne	Membre

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Table des matières

Liste des tableaux vi

Liste des figures viii

Sigles et abréviations x

Dédicace xii

Remerciements xiii

Résumé xvi

Summary xvii

Introduction générale 18

Contexte et problématique de l'étude 19

Objectifs 23

Questions de recherche 23

Hypothèses 23

Architecture de la thèse 24

Chapitre 1. Importance de la culture du caféier 25

1.1. Introduction 25

1.2. Le caféier : caractérisation et croissance 25

1.3. Exigences édaphoclimatiques du caféier 27

1.4. Le caféier dans le monde 28

1.5. Le caféier au Burundi 29

1.5.1. Importance du caféier au Burundi 29

1.5.2. Evolution du verger, de la production et du prix du café au producteur au Burundi 30

1.5.3. Gouvernance du secteur café au Burundi 33

1.5.4. Evolution des systèmes de production du caféier au Burundi 34

1.5.5. Principales contraintes de la caféiculture au Burundi 36

1.6. Qualité du café burundais 39

1.7. La pratique de l'ombrage du caféier 40

1.8. Conclusion partielle 43

Chapitre 2. Etat des lieux du caféier dans la zone des plateaux centraux 44

2.1. Introduction 44

2.2. Matériels et Méthodes 45

2.2.1. Caractéristiques de la zone d'étude 45

2.2.2. Enquête ménage 48

2.2.3. Analyse statistique des résultats de l'enquête ménage 50

2.3. Principaux résultats et discussion 50

2.3.1. Les ménages et leurs exploitations caféicoles 51

2.3.2. Conduite des exploitations caféicoles 52

2.3.3. Le système agroforestier dans les caféiers et perceptions des caféiculteurs 57

2.3.4. Le processus de certification 62

2.3.5. Principaux problèmes rencontrés par les caféiculteurs 64

2.4. Conclusion partielle 65

Chapitre 3. Les arbres d'ombrage du caféier améliorent la fertilité et les conditions hydriques du sol 67

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

3.1. Introduction 67

3.2. Matériels et Méthodes 70

3.2.1. Choix des plantations de caféier et des arbres d'ombrage 70

3.2.2. Profils de sols 73

3.2.3. Mesure de l'humidité du sol 73

3.2.4. Mesure de la fertilité du sol 74

3.2.5. Echantillonnage et caractérisation des litières 76

3.2.6. Installation de l'essai sur le soja fertilisé avec les litières 76

3.2.7. Analyses statistiques des données 78

3.3. Résultats et discussion 79

3.3.1. Caractérisation des plantations retenues 79

3.3.2. Qualité chimique des litières 91

3.3.3. Réponse du soja à l'application des litières 93

3.3.4. Effet des arbres d'ombrage sur l'humidité du sol 99

3.3.5. Effet des arbres d'ombrage sur la fertilité chimique du sol 102

3.4. Conclusion partielle 112

Chapitre 4. Les arbres d'ombrage influencent la production du caféier 114

4.1. Introduction 114

4.2. Le rayonnement solaire et la production de biomasse 115

4.3. Matériels et Méthodes 117

4.3.1. Choix des plantations de café et des caféiers 117

4.3.2. Choix des caféiers à suivre 117

4.3.3. Mesure de la pénétration lumineuse 118

4.3.4. Suivi de la production du café 121

4.3.5. Analyses statistiques des données 122

4.4. Résultats et discussion 122

4.4.1. Evolution journalière de l'intensité moyenne du PAR incident 122

4.4.2. Pénétration lumineuse à travers les différentes essences d'arbres 123

4.4.3. Auto-ombrage du caféier combiné à l'ombrage des arbres 125

4.4.4. Effet des paramètres dendrométriques des arbres d'ombrage sur le PAR absorbé par les caféiers 126

4.4.5. Effet des arbres d'ombrage sur la floraison et la fructification des caféiers 128

4.4.6. Effet des arbres d'ombrage sur la production par tige de café 130

4.5. Conclusion partielle 133

Chapitre 5. Quelle est la meilleure essence à proposer pour l'ombrage du caféier : application d'outils d'aide à la prise de décision multicritère 135

5.1. Introduction 135

5.2. Matériels et Méthodes 136

5.2.1. Revue de la littérature sur les méthodologies de prise de décisions multicritères 140

5.2.2. Quelques outils d'aide à la prise de décisions basées sur plusieurs critères et leurs domaines d'application 140

5.2.3. Mise en marche des modèles VIKOR et TOPSIS 144

5.2.4. Modèle de classement moyen 145

5.3. Résultats et commentaire 145

5.3.1. Résultats du modèle (additif) des classements moyens 145

5.3.2. Résultats des modèles de prise de décision multicritères 150

5.4. Discussion 151

5.5. Conclusion partielle 154

Conclusion générale 155

Etat général de la caféiculture 155

Les arbres d'ombrage et le sol 157

Ombrage et production des caféiers 158

Quel est le meilleur arbre d'ombrage pour la zone de travail ? 159

Défis et Perspectives 160

Références bibliographiques 162

Annexes 192

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des zones agroécologiques du Burundi 44

Tableau 2 : Classes d'âge des exploitants enquêtés 51

Tableau 3 : Niveaux de formation des chefs de ménage 52

Tableau 4 : Arbres d'ombrage des champs de caféiers 57

Tableau 5 : Exploitations retenues et espèces d'arbres suivis pour l'étude de la fertilité du sol 72

Tableau 6 : Description des sols des plantations retenues pour l'étude de la fertilité du sol ... 80

Tableau 7 : Caractéristiques dendrométriques des arbres des plantations retenues pour l'étude de la fertilité du sol 91

Tableau 8 : Composition chimique des litières issues des arbres d'ombrage du caféier 92

Tableau 9 : Ratios entre éléments des litières issues des arbres d'ombrage du caféier 92

Tableau 10 : Taux moyens de germination du soja 94

Tableau 11 : Nombre et poids moyens des nodules par plant 95

Tableau 12 : Nombre de gousses par plant, nombre de grains par gousse, poids de mille grains, et rendement en grains de soja 98

Tableau 13 : Productions par tige des caféiers sous ombrage et en plein soleil pour les années 2020, 2021 et 2022. 131

Tableau 14 : Scores par an et score moyen au classement des espèces pour ce qui est de la production par tige de café 132

Tableau 15 : Les six espèces d'arbres d'ombrage les plus présentes dans les exploitations caféicoles de la zone des plateaux centraux du Burundi 145

Tableau 16 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de leur richesse en éléments nutritifs 146

Tableau 17 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis du rendement du soja et ses composantes 147

Tableau 18 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de l'humidité dans le sol 148

Tableau 19 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la fertilité du sol..... 148

Tableau 20 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la lumière..... 149

Tableau 21 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la production du caféier..... 149

Tableau 22 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de leurs principaux usages 150

Tableau 23 : Classement des six espèces d'arbres d'ombrage par le modèle TOPSIS..... 150

Tableau 24: Classement des six espèces d'arbres d'ombrage par le modèle VIKOR 151

Liste des figures

Figure 1 : Plantation de caféiers avec des arbres d'ombrage (Ficus sp. et Grevillea robusta) à Giheta 21

Figure 2 : Deux types de bourgeons expliquent le développement des rameaux chez le caféier 26

Figure 3 : Evolution de la production du café vert et du prix au producteur au Burundi durant la période de 2007 à 2022 32

Figure 4 : Localisation des provinces et communes objet d'enquête 47

Figure 5 : Jeune caféière bien paillée avec Hyparrhenia sp. à Mparamirundi 56

Figure 6 : Pourcentages d'exploitants et les types d'entretien qu'ils font dans leurs caféières 56

Figure 7 : Cultures intercalaires associées au café 59

Figure 8 : Avantages des arbres d'ombrage au caféier reconnus par les exploitants 60

Figure 9 : Principales raisons qui poussent les caféiculteurs à avancer dans le processus de certification 64

Figure 10 : Principaux problèmes rencontrés par les caféiculteurs 65

Figure 11 : Schéma de la parcelle expérimentale 78

Figure 12 : Classes granulométriques des sols échantillonnés 100

Figure 13: Humidité du sol sous les arbres d'ombrage du caféier 101

Figure 14 : Comparaison du pH eau et de l'acidité totale du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 103

Figure 15 : Comparaison du carbone organique et de l'azote total du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 104

Figure 16 : Comparaison du phosphore assimilable du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 105

Figure 17 : Comparaison des bases échangeables du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 107

Figure 18 : Comparaison de la CEC du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 108

Figure 19 : Comparaison du rapport C/N et du pourcentage de saturation en bases du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil..... 109

Figure 20 : Comparaison entre la CEC effective et la CEC..... 110

Figure 21: Comparaison du facteur d'évaluation du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil 111

Figure 22 : Méthode des transects diagonales utilisée dans le choix des pieds de caféiers ... 118

Figure 23 : MQ-301 Line Quantum sensor with 10 Sensors and Handle held meter 119

Figure 24 : Méthodologie de prise des mesures du PAR 120

Figure 25 : Evolution journalière du PAR incident pour les quatre sites..... 123

Figure 26 : Moyennes de pénétration (%) de la lumière à travers les cimes des arbres d'ombrage, et des caféiers de plein soleil..... 124

Figure 27 : Pénétration de la lumière à travers les cimes des caféiers sous ombrage, et des caféiers de plein soleil 126

Figure 28 : Corrélations entre les paramètres dendrométriques des arbres d'ombrage et le PAR absorbé par les caféiers sous leur ombrage 127

Figure 29 : Nombre moyen de fleurs par paire de rameaux des caféiers sous ombrage et de plein soleil 128

Figure 30 : Nombre moyen de cerises par paire de rameaux des caféiers sous ombrage et de plein soleil 129

Sigles et abréviations

AFCA : African Fine Coffees Association

ARFIC : Autorité de Régulation de la Filière Café

BCC : Burundi Coffee Company

CNAC : Confédération Nationale des Associations des Caféiculteurs

COCOCA : Collectif des Coopératives de Caféiculteurs

DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies

EDS : Enquête Démographique et de Santé

FABI : Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie

FAOSTAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database

FLO : Fair Trade Labelling Organization

FNUAP : Fonds des Nations Unies pour la Population

FOMI : Fertilisants Organo-Minéraux Industries

IFOAM : International Federation of Organic Agriculture Movements

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

ISTEEBU : Institut des Statistiques et Etudes Economiques du Burundi

LAI : Leaf Area Index

LASPA : Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agroalimentaires

MINAGRIE : Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage

MINEAGRIE : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage

OCIBU : Office des Cultures Industrielles du Burundi

OCIRU : Office des Cultures Industrielles du Rwanda-Urundi

ODECA : Office de Développement du Café

OIC/ICO : Organisation Internationale pour le Café/International Coffee Organization

ORCA : Online Representations and Certifications Application

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

PACSC : Projet d'Appui à la Compétitivité du Secteur Café

PNSEB : Programme National de Subvention des Engrais au Burundi

SEZ : Stiftung Entwicklungs-Zusammenarbeit

SKAL : Certifié organique par Skal the Dutch national certifier for organic produce and products

SODECO : Société de DEparchage et de COnditionnement

SOGESTAL : Société de Gestion des Stations de Lavage

SUA : Sokoine University of Agriculture

TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

UB : Université du Burundi

UTZ : Certifié UTZ par the Utz Kapeh Foundation

VIKOR : VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

Dédicace

A mes parents, feus Nicolas Barihuta et Cécile Bansigayeko qui ont été le chemin emprunté par Dieu pour me donner la vie,

A mon grand frère, feu Charles Mpabonyimana sans qui ma scolarité aurait été un calvaire et qui est parti sans avoir goûté au fruit de ses sacrifices à mon égard,

A mon épouse Donathe Niwivugire et mes enfants, les Kubwayo Jean Jéziel, Marc Gadiel, Migisha Simona et Béni Samuel qui font partie intégrante de ma vie et sont source de toutes mes motivations,

Je dédie cette thèse

Remerciements

C'est avec beaucoup d'émotions que j'écris ces quelques paragraphes. J'aurais dû commencer par ceci, mais bon … je l'écris en dernier lieu.

Je remercie mon Doyen, Prof. Séverin Nijimbere. Vous avez accepté, malgré vos lourdes tâches de conduire la faculté, de présider le jury de cette thèse. Je vous promets de vous rendre tout ce que je vous dois, pour les encouragements à mon égard chaque fois que l'on se croisait.

Je ne sais pas quels mots utiliser pour remercier Prof. Bernadette Habonimana, co-promoteur de cette thèse. Vous m'avez très bien encadré depuis mes premières étapes de recherche pour l'obtention du grade d'Ingénieur agronome, vous avez fait de même pour les études de DEA, et voilà le sommum de l'action avec le diplôme le plus élevé de toute la scolarité, le Doctorat. Vous m'avez parlé du projet Agroforesterie dès les premières idées de sa conception, et avez soutenu ma candidature dans ce projet pour financer cette recherche. Votre dévouement au travail, vos conseils, vos orientations, votre disponibilité, … tel une maman envers sa progéniture, ont façonné ma manière de travailler. Soyez rassurée de ma profonde gratitude.

Prof. Heidi Elisabeth Megerle, vous avez spontanément accepté que je travaille sous le projet Agroforesterie et d'assurer la co-promotion de cette thèse. Il n'y a jamais eu de distance avec vous. Vos visites au Burundi ont été l'occasion d'échanger sur l'état d'avancement des travaux liés à cette thèse. Très attentive, vous êtes restée à mes côtés pour me soutenir.

Prof. Salvator Kaboneka a accepté d'assurer ma co-promotion. Toujours prêt à aider, votre disponibilité, votre bienveillance, votre humanité me marqueront pour toujours. J'ai eu de vous un encadrement tant scientifique qu'humain. Merci pour tout.

J'aimerais exprimer mes remerciements envers les membres de mon comité d'accompagnement. Prof. Sanctus Niragira, vous avez spontanément soutenu ma candidature pour travailler sous le projet Agroforesterie. Vous avez aussi accepté de faire partie de mon comité d'accompagnement. Je vous en remercie du fond de mon cœur. Malgré vos responsabilités à la charge de l'UB puis du MINEAGRIE, vous avez toujours été disponible à mes sollicitations. Prof. Sebastian Hein, vous avez accepté de faire partie du comité d'accompagnement de quelqu'un que vous n'avez jamais rencontré de visu. Vous avez toujours été disponible, positif, constructif et encourageant lors de nos échanges en ligne ou bien quand vous aviez à analyser mes modestes textes. Je vous en remercie beaucoup. Dr Anaclet

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Nibasumba, vous avez accepté de faire partie de mon comité d'accompagnement lorsque vous étiez encore à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), avant de regagner l'Université du Burundi. J'ai pu bénéficier de votre longue expérience et expertise en matière de café. Toujours prêt à m'aider, c'est vous qui me poussiez à solliciter votre aide dans l'organisation des données en vue de leur publication. Vous avez toujours été à mes côtés chaque fois que de besoin. Vous avez également accepté d'assurer le secrétariat du jury de cette thèse. Je vous en remercie infiniment.

J'en viens maintenant à mes collègues de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie. Je ne veux pas citer de noms, de peur d'en oublier les plus importants. Mais je ne peux pas ne pas citer le Doyen, Prof. Séverin Nijimbere. Vous avez participé à plusieurs réflexions quand j'en sollicitais. Je vous en remercie beaucoup. Aux autres collègues, par la création d'une bonne ambiance de travail, vous avez été d'une grande importance dans cette thèse. Vous qui avez accepté de lire quelques textes de mes manuscrits, vous qui me proposiez un verre le soir après avoir remarqué que je me fatiguais un peu plus, vous qui me souhaitiez à chaque fin d'année le vœu de me voir terminer la thèse, etc. sachez que tout cela constituait un encouragement de votre part à mon égard et que je vous en remercie beaucoup.

Mes remerciements vont également à l'endroit de la région de Baden Würtemberg, « the Land ». Le financement du projet Agroforesterie à travers le Ministère des Affaires étrangères du Land de Baden Württemberg (Allemagne) et sous la facilitation administrative de la SEZ a permis de réaliser les nombreux travaux de terrain ainsi que les analyses de laboratoire, la mobilité vers la Tanzanie, sans oublier les frais de subsistance sans lesquels la réalisation de cette thèse aurait été un calvaire pour moi. Je vous en remercie infiniment.

Les nombreux travaux de terrain ont été rendus possibles par la contribution des étudiants (Havyarimana Tharcisse, Niyongabire Rémégie et Nyandwi Fidèle) dont les travaux de fin d'étude de Master font partie intégrante de cette thèse. Je n'oublie pas le passage de Sarah Windbuehler au Burundi pour son terrain sur l'adoption de l'agroforesterie à base de café. Pendant tout le temps que nous avons passé ensemble à collecter des données sur le terrain, l'ambiance était bonne.

Je remercie le personnel de COCOCA pour son implication dès le choix des exploitants et des exploitations, jusque dans la collecte des données. Il nous aurait été difficile de prendre contact avec les exploitants sans le concours d'Aloys Misigaro, Jonas Nzohabonayo, Josias

Niyoyitungira, Eugène Sinzinkayo et bien d'autres. Je vous en remercie beaucoup. Je remercie également les agriculteurs qui nous ont accepté dans leurs caféiers et qui ont accepté des fois de ne pas récolter leurs champs sans que nos aides soient présents. Mélance Hakizimana, Anthère Simbaruhije, Laurent Nizigiyimana, et bien d'autres, vous avez aussi contribué à l'obtention des données de cette thèse.

Je remercie également vous, Dr J. Bosco Ntirandekura, Vice doyen à la FABI, pour votre implication en vue de me trouver un point focal en Tanzanie, rendant ainsi possible la procédure d'obtention d'une invitation à Sokoine University of Agriculture (SUA). Je remercie aussi tous les membres du Département des Sciences du Sol de SUA, principalement Dr Peter W. Mtakwa. Vous avez accepté d'être mon point focal et avez organisé tout pour que je sois reçu à SUA. J'ai bénéficié d'un bel environnement de travail. Je vous en remercie beaucoup.

Je remercie tout le staff de l'Ecole Doctorale : le Directeur (Prof. Juma Shabani), les Directeurs Adjoints, spécialement le Directeur Adjoint chargé du pôle Sciences Naturelles, de la Vie et de l'Ingénieur (Prof. Sébastien Manirakiza), les informaticiens et les secrétaires. Vous avez créé un environnement qui a rendu le travail des doctorants possible. A travers les différentes réunions en présentiel et en ligne, vous nous avez témoigné d'un leadership et un sens organisationnel sans égal et encourageant. Je vous en remercie beaucoup. Je remercie par la même occasion tous les enseignants qui ont dispensé des cours tant en présentiel qu'en ligne.

Je n'oublie pas mes compagnons de lutte, les doctorants de l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi en général et ceux de la deuxième cohorte en particulier. Nous avons partagé plusieurs cours ensemble, en présentiel comme en ligne. Je garde en mémoire nos encouragements mutuels. Le chemin peut être long, mais c'est à son bout que l'on réalise la mesure des efforts fournis. Aux étudiants Master à SUA, Vincent et Alexandre, merci pour l'accueil. Je n'oublie pas non plus les doctorants de SUA qui m'ont été très proches, Dr Mbwambo et Norah. Merci pour les moments agréables, surtout la sortie à Mikumi National Park.

J'aimerais terminer par ma famille. Je vous remercie beaucoup pour tout ce que vous êtes pour moi. C'est de vous que je tire toute l'énergie pour travailler sur cette thèse. J'ai eu beaucoup d'encouragement et de soutien de la part de Donathe, mon épouse. A mes enfants Jean Jéziel, Marc Gadiel, Simona et Béni Samuel. Vous avez accepté de manquer certaines occasions agréables pour raison de mon indisponibilité. Je vous en remercie beaucoup.

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Résumé

Cette étude, menée dans la zone des plateaux centraux burundais, avait pour objectif ultime de déterminer quelle serait la meilleure espèce d'arbre d'ombrage pour le caféier.

Les travaux ont d'abord consisté en une enquête pour déterminer l'état des lieux de la caféiculture, puis des analyses des échantillons de sols et de litières au laboratoire pour le diagnostic de la fertilité du sol, de l'humidité du sol et de la richesse des litières des arbres en éléments nutritifs. La lumière transmise à travers les arbres d'ombrage ainsi que la production du caféier ont été aussi suivies. Les données ont été collectées de 2020 à 2022.

Les résultats ont montré que, dans la zone de travail, les caféiers ne sont pas correctement conduits. Seulement 1/3 des exploitants pratiquent les différentes tailles du caféier. Le paillage, même s'il est pratiqué par la majorité (71%), n'est pas correctement fait. Au regard de la fertilité du sol, *Ficus thonningii* a été meilleure. L'espèce *F. thonningii* a gardé sa première place pour pratiquement tous les paramètres chimiques du sol (pH, carbone organique, azote total, les bases échangeables (Ca, Mg, K), la CEC, la SB, la CECE, le PSB et l'indice de Kamprath). Appliquées à la culture du soja (*Glycine max* L.), toutes les litières ont donné des rendements comparables à celui du fumier d'étable. Les rendements en grains de soja pour les litières étaient compris entre 475 et 750 kg/ha et de 789 kg/ha pour le fumier. Pour ce qui est de l'humidité du sol, cette thèse a montré qu'il est toujours avantageux d'associer les arbres d'ombrage au caféier. Par rapport au plein soleil, le gain peut s'élever jusqu'à 6,6% d'humidité au mieux sous *Markhamia lutea* en période sèche. Tous ces arbres ont laissé pénétrer très peu de lumière (autour de 25% au mieux). La production par tige du caféier a été meilleure sous *Grevillea robusta* (3,2 kg/tige en 2022). Le modèle VIKOR a permis de classer les espèces d'arbres étudiées au regard de tous les paramètres. Avec ce modèle, la meilleure espèce d'ombrage est *F. thonningii*. Elle est suivie par *G. robusta* puis par *Persea americana*.

La présence d'arbres d'ombrage, de par leurs usages multiples, pourrait contribuer au maintien des plantations de caféiers en place, avec la condition qu'ils soient bien gérés. Le maintien d'un ombrage ne dépassant pas 40% pourrait favoriser l'expression des intéractions positives vis-à-vis de la lumière.

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Summary

This study was carried out in the central plateaus of Burundi with the ultimate objective to determine the best coffee shade tree species.

Field works consisted of a survey to determine the state of the coffee growing, and analyzes of soil and litter samples in the laboratory for the diagnosis of soil fertility, soil moisture and the richness of tree litter in terms of nutrients. Coffee production was also monitored. Data collection was done from 2020 to 2022.

Results showed that coffee plantations are not properly managed. Only 1/3 of farmers apply different coffee pruning techniques. The majority (71%) affirmed to mulch their coffee plantations, but this is not done properly. In terms of enhancing soil fertility, *Ficus thonningii* was better. The species *F. thonningii* came first for almost all soil chemical parameters (pH, organic carbon, total nitrogen, exchangeable bases (Ca, Mg, K), CEC, SB, ECEC, PSB and Kamprath index). In the soybean trial, all litters have produced soybean yields comparable to that of cow manure. Soybean grain yields for the litters were between 475 and 750 kg/ha and 789 kg/ha for manure. Regarding soil moisture, this thesis showed the benefit to combine shade trees with coffee bushes. Compared to full sun, the gain was up to 6.6% soil moisture under *Markhamia lutea* in dry season. Light penetration was very low for all the shade trees (around 25% at best). Coffee production per stem was better under *Grevillea robusta* (3.2 kg/stem in 2022). The VIKOR model enabled to classify the tree species considering all parameters. From this model, the best coffee shade tree species is *F. thonningii*. It is followed by *G. robusta* then by *Persea americana*.

The presence of shade trees, due to their multiple uses, could contribute to maintaining coffee plantations in place, provided that they are well managed. Proper management of the trees aerial part by maintaining shade not exceeding 40% could enhance the expression of positive interactions for light.

Introduction générale

En termes de volume, le café est le deuxième produit le plus échangé dans le commerce international, et l'une des matières premières les plus précieuses échangées à l'échelle mondiale dans l'histoire de l'humanité (Pancsira, 2022).

Originaire d'Afrique (Ethiopie), le café s'est répandu dans le monde entier. Il a d'abord transité par le Yemen (Pohlan & Janssens, 2010). Le caféier a été emmené en Europe par les voyageurs vers les années 1600, d'où il a été introduit dans les colonies en Afrique et en Amérique (Mussatto et al., 2011). Actuellement, le caféier est cultivé le long de la zone intertropicale en Amérique centrale et latine (Harvey et al., 2021 ; Kutos et al., 2024), en Asie (Ehrenbergerová et al., 2021), en Océanie (Rice, 2018) et en Afrique.

Dans son aire d'origine, le caféier constituait un sous-bois. De ce fait, il est à l'aise en conditions d'ombrage. En Ethiopie, on récolte encore du café de forêt à partir des plants non gérés et ayant régénéré naturellement en forêt (Teketay, 1998).

Les systèmes agroforestiers à base de café permettent de créer un bon microclimat pour la croissance et la production du caféier à travers l'atténuation de la température (Lin, 2010), conduisant ainsi à la réduction du stress hydrique en saison sèche (Bellefontaine et al., 2001). Ils permettent également d'atténuer l'ampleur du phénomène de cyclicité du caféier, ce qui assure la durabilité de la caféière (Wintgens, 2004). A travers le recyclage des éléments nutritifs, les arbres participent à l'amélioration de la fertilité du sol en restituant au sol les éléments nutritifs à travers les litières et produits d'élagage déposés à la surface du sol, ou bien à travers la fixation biologique d'azote par les légumineuses (Sileshi et al., 2014). Par-dessus tout, les systèmes agroforestiers sont intéressants de par leur potentiel d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques (Lin, 2007).

Les plantations agroforestières de café sous des espèces ligneuses et fruitières existent un peu partout dans le monde. En Amérique latine, le Salvador vient en tête avec 100% des caféières qui se trouvent parmi les cultures pérennes, 69% au Honduras, 50% au Guatemala et seulement 16% au Panama (Bellefontaine et al., 2001). En Afrique, outre l'Ethiopie, on retrouve également du café sous ombrage dans les pays comme l'Ouganda (Sebuliba et al., 2022), le Kenya (McClelland, 1935), la Tanzanie (Wagner et al., 2019), le Rwanda (Harelimana et al., 2018), sans oublier le Burundi.

Au Burundi, à part deux régions naturelles (Buyenzi et Mumirwa), le reste des zones de culture ont une aptitude modérée ou même marginale pour le caféier (Nibasumba, 2013). Cette thèse a été conduite dans la vaste zone agroécologique des plateaux centraux du Burundi qui couvre 52% du pays (Beck et al., 2010), précisément dans les provinces Gitega, Muramvya et Ngozi. La carte élaborée par l'ISABU (annexe 1) montre que les provinces de Gitega et Muramvya se trouvent dans la zone d'aptitude modérée à la caféiculture, tandis que la province de Ngozi se trouve dans la zone de bonne aptitude à la caféiculture.

Contexte et problématique de l'étude

Le Burundi, pays d'une superficie de 27 834 km^2, est l'un des plus petits pays d'Afrique. Il est limité au nord par le Rwanda, à l'ouest par la République démocratique du Congo (RDC) et au sud et à l'est par la Tanzanie.

La population burundaise est jeune (près de 48% sont des enfants de moins de 14 ans) et présente un taux de croissance de 2,4%. La majorité de cette population (90%) vit en milieu rural, dont près de 65% vit avec un revenu inférieur au seuil national de pauvreté (Megerle & Niragira, 2020).

Le Burundi présente une topographie très diversifiée avec des zones plus plates dans la plaine de l'Imbo ainsi que de vastes plateaux. Des pentes abruptes distinctives forment la transition entre ces deux zones. En conséquence, l'altitude, les températures, les valeurs des précipitations et les sols diffèrent également considérablement. Le lac Tanganyika se situe à 775 m d'altitude, au moment où la chaîne de montagnes du bassin versant Congo-Nil atteint des hauteurs de plus de 2 600 m d'altitude (Habonimana et al., 2018). Les températures moyennes les plus élevés jusqu'à 24°C sont observées au niveau de la plaine de l'Imbo. Elles diminuent progressivement au fur et à mesure que l'on monte en altitude pour atteindre un minimum de 14°C au niveau de la crête Congo-Nil. Par contre, les précipitations évoluent en sens inverse où elles passent d'une moyenne maximale de 2 500 mm au niveau de la crête pour atteindre un minimum de 800 mm dans la plaine de l'Imbo.

Le Burundi connait des taux de déforestation extrêmement élevés. Les raisons sont entre autres : (i) la forte croissance démographique, (ii) l'aménuisement progressif des terres agricoles au fil des générations avec empiètement sur les zones forestières protégées, (iii) les besoins énergétiques toujours croissantes de la population dont le bois constitue la source d'énergie la

plus importante avec 94%, ainsi que (iv) la pauvreté et les faibles niveaux d'éducation de la population (Megerle et al., 2018). Le taux élevé de déforestation réduit le taux d'infiltration (moins de recharge des eaux souterraines) et augmente le ruissellement de surface, ce qui entraîne une érosion accrue et une perte de fertilité des sols (Megerle & Niragira, 2020).

Le Burundi est un pays essentiellement agricole. Cette agriculture est dominée par une agriculture de subsistance basée sur l'utilisation de technologies de production traditionnelles (Megerle & Niragira, 2020). Les cultures vivrières y sont très diversifiées. Il est courant de voir des champs associant haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), maïs (*Zea mays* (L.) Schott), bananiers (*Musa sp*.), colocase (*Colocasia esculenta* (L.) Schott), patate douce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.), etc. Le pays produit aussi des cultures d'exportation qui sont, par ordre d'importance, le caféier, le théier et le cotonnier (Niragira et al., 2015).

La première introduction du café au Burundi remonte aux années 1920 par les autorités allemandes (Nyamoya et al., 1986). Mais les premiers efforts de diffusion du café dans les collines du Burundi datent des années 1930 sous la supervision belge (Bidou, 1994). L'administration, de concert avec le clergé, ont tout mis en œuvre pour développer cette culture, avec coercision. Chaque home actif valide (HAV) avait l'obligation de cultiver le café en suivant un itinéraire technique qui exigeait la plantation des caféiers en culture pure, hors de toute forme de culture associée intercalaire (Hatungimana, 2008). Ce contexte de contrainte qui a toujours caractérisé la caféiculture burundaise, couplé au fait que les prix accordés aux producteurs ont toujours été plus faibles au Burundi comparativement aux pays voisins comme l'Ouganda, la Tanzanie ou le Rwanda (Hatungimana, 2008), a fait que la population manifeste un désintéressement à peine voilé face à cette culture.

Pourtant, le café est d'une importance capitale aussi bien pour le Burundi que pour les Barundi. En effet, dès son introduction, la culture du café a été vite considérée comme le socle sur lequel le Burundi devait baser son développement. Le café est vite devenu le premier pourvoyeur de devises au pays. Par contre, les caféiculteurs, bien que contents du caractère groupé des revenus issus de la vente du café, sont toujours restés insatisfaits du prix bas qui leur a été toujours versé, induisant une pénalisation plutôt qu'une incitation (Ciza et al., 2016).

Depuis les années 2000, cette organisation rigide et centralisée de la filière café a été progressivement assouplie, laissant un espace pour l'émergence d'une production caféière obéissant à d'autres méthodes de production agricole (Johnson, 2015). Cette thèse a été réalisée

à une période où le Gouvernement du Burundi, appuyé par ses bailleurs, ne ménage aucun effort pour que le café reste le pilier du développement. La monoculture du caféier n'est plus une obligation. Le projet PACSC a même installé des sites de démonstration intégrant des arbres agroforestiers au caféier, et même des cultures vivrières (MINAGRIE, 2017). Ceci permettra aux caféiculteurs et agriculteurs burundais qui sont par ailleurs caractérisés par la diversification des cultures de garder le café tout en profitant des revenus issus des autres composantes du système agroforestier associé au café.

Le paysage caféicole burundais comporte ainsi une importante proportion d'autres éléments : des bananiers, des cultures annuelles comme le haricot, le soja, diverses essences d'arbres d'ombrage (les fruitiers, les essences autochtones, les essences importées, etc.) (Figure 1).



Figure 1 : Plantation de caféiers avec des arbres d'ombrage *(Ficus sp. et Grevillea robusta) à Giheta*

Source : Auteur

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Un certain nombre de caféiculteurs burundais possèdent déjà une certaine expérience sur le café d'ombre sous l'encadrement de divers acteurs du développement du monde rural. Certains exploitants sont déjà dans une démarche d'obtention des différents certificats. Plusieurs stations de lavage sont déjà certifiées UTZ et Fairtrade. En 2014, le COCOCA a obtenu la certification de groupe, et après la mise en place d'un système de contrôle interne, il peut ainsi être le garant des coopératives certifiées par son intermédiaire (Johnson, 2015). Quatre coopératives membres de COCOCA disposent déjà d'un certificat organique (Niyonizigiye, 2022).

La plupart des essences retrouvées au niveau des exploitations agricoles sont celles qui ont fait l'objet d'une promotion par les autorités ou bien par les partenaires au développement. Il n'y a pas d'évidence qu'elles soient les meilleures. En effet, il y a un manque d'information provenant de données générées à partir d'expérimentation au niveau local.

La présente recherche a consisté en une collecte des données au niveau des exploitations caféicoles déjà existantes. La zone de travail se situe dans la région des plateaux centraux, précisément chez les caféiculteurs de la coopérative Mboneramiryango à Giheta (province de Gitega), la coopérative Nyarunazi à Rutegama (province de Muramvya) et la coopérative Ubwizabwikawa à Mparamirundi en commune Busiga (province Ngozi). Toutes ces coopératives sont sous l'encadrement de COCOCA.

On sait qu'il existe plusieurs facteurs qui concourent aux performances du caféier. Certains sont liés aux arbres d'ombrage du caféier et à leur gestion (Alemu, 2015), tandis que d'autres sont des facteurs biotiques et/ou abiotiques, tels que les maladies, les ravageurs, les contraintes liées au climat, la faible gestion de la fertilité du sol et les prix non incitatifs (Tadesse et al., 2020), sans oublier tous les inputs investis comme par exemple les fertilisants et amendements, et les semences (Bekele & Guadie, 2020). Il existe aussi des facteurs liés à l'homme et à ses aptitudes à comprendre et appliquer des techniques (Bhattarai et al., 2020). On note également une interaction complexe des facteurs naturels, environnementaux et humains dans la production de café (Bhattarai et al., 2020 ; Bekele & Guadie, 2020).

Bien évidemment, on ne peut pas aborder tous ces facteurs dans un seul travail de recherche. Les données collectées dans cette thèse sont celles qui permettent d'avoir une situation générale sur l'état de la caféiculture sous ombrage dans la zone de travail, ainsi que celles qui permettent d'appréhender les effets des arbres d'ombrage sur les conditions dans lesquelles le café est conduit (le sol, l'humidité, la pénétration lumineuse) et sur la production du café lui-même.

Objectifs

L'objectif général de cette thèse est d'analyser l'impact du système agroforestier basé sur le café sur les propriétés du sol ainsi que sur les performances du caféier.

De manière spécifique, cette thèse a comme objectifs :

- D'analyser l'impact des arbres d'ombrage sur la fertilité chimique et l'humidité du sol ;
- D'analyser l'impact des arbres d'ombrage sur le rendement et les paramètres de rendement du café ;
- D'analyser l'impact des arbres d'ombrage sur la croissance et le rendement d'une culture test via sa réponse à l'application des litières foliaires ;
- De modéliser, sur base de plusieurs critères, les meilleures espèces d'arbres d'ombrage pour la zone de travail.

Questions de recherche

Cette thèse se propose de répondre aux questions de recherche suivantes :

- Est-ce que le café sous ombrage conduit à de meilleures conditions hydriques et de fertilité du sol ?
- Est-ce que les qualités agronomiques et biochimiques des litières issues des arbres d'ombrage peuvent être révélées par leur application sur une culture test ?
- Est-ce que les arbres d'ombrage rencontrés dans les plantations de café contribuent à une production optimale du caféier ?
- Quelle est la meilleure essence d'arbre d'ombrage eu égard à tous ces paramètres ?

Hypothèses

Cette thèse se base sur les hypothèses suivantes :

- Le système agroforestier dans les caféiers améliore les conditions physicochimiques du sol ;
- Le système agroforestier dans les caféiers améliore les conditions hydriques du sol ;
- Le système agroforestier dans les caféiers améliore les productions du caféier ;

Architecture de la thèse

Cette thèse est organisée en chapitres. Certaines données de cette thèse ont déjà été publiées sous forme de deux articles (Ndihokubwayo et al., 2021) et (Ndihokubwayo et al., 2023). Certaines autres données ont constitué soit des mémoires de Master pour les étudiants qui ont réalisé leurs masters dans le cadre du projet Agroforesterie (Havyarimana, 2020) ; (Niyongabire, 2022) et (Nyandwi, 2022), soit un mémoire de baccalauréat (Windbühler, 2020).

Au total, la thèse comporte cinq chapitres. Après une introduction générale reprenant le contexte, les objectifs, les questions de recherche et les hypothèses de travail, le premier chapitre traite de l'importance du caféier dans le monde en général et au Burundi en particulier et documente la pratique de l'ombrage du caféier. Le deuxième chapitre présente l'état des lieux du café sous ombrage dans la zone couverte par cette recherche. Le troisième chapitre aborde les effets des arbres d'ombrage sur le sol : les conditions d'humidité du sol ainsi que la fertilité du sol dans les caféières. Il traite également d'une application des litières de ces arbres d'ombrage dans un essai de fertilisation du soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Le quatrième chapitre analyse les effets des arbres d'ombrage sur la production du caféier en insistant sur la pénétration de la lumière solaire à travers les cimes des arbres ainsi qu'à travers les caféiers eux-mêmes. Quant au cinquième et dernier chapitre, il identifie la meilleure espèce d'arbre d'ombrage du caféier en faisant intervenir deux modèles d'aide à la prise de décision multicritère qui sont TOPSIS et VIKOR. La thèse se termine par une conclusion générale et donne quelques perspectives de recherche.

Chapitre 1. Importance de la culture du caféier

1.1. Introduction

Le caféier est l'une des rares cultures qui prennent leur origine en Afrique. Il est originaire des montagnes d'Ethiopie, et il semblerait que le mot « *café* » fait allusion à « *Kaffa* », qui est la région d'Ethiopie où le caféier fut découvert (Alemu, 2015).

1.2. Le caféier : caractérisation et croissance

Le caféier appartient à la famille des Rubiaceae, au genre Coffea. Ce genre comporte plus de 100 espèces. Deux espèces : *Coffea robusta* et *Coffea arabica* représentent environ 99% de la production mondiale de café (DaMatta et al., 2007). A lui seul, *C. arabica* fournit 75% de la production mondiale de café, le reste revenant au *C. robusta* (Mussatto et al., 2011).

Le système racinaire du caféier est composé d'une longue racine pivotante qui peut dépasser 1 m de profondeur (Gaie & Flémal, 1988) et des racines latérales obliques qui sont généralement concentrées dans les premiers 30 cm de la couche superficielle du sol (DaMatta et al., 2007). Cette architecture racinaire du café est sous l'influence de plusieurs facteurs : l'âge du caféier, la densité de plantation, la variété, le sol, ainsi que les conditions climatiques (DaMatta et al., 2007).

La partie végétative du caféier montre un dimorphisme des branches bien fixé (DaMatta et al., 2007). Le tronc (tige orthotrope) est pourvu de rameaux latéraux (plagiotropes) flexibles, plus ou moins horizontaux. Deux types de bourgeons expliquent la forme de la partie aérienne du caféier : les bourgeons axillaires ou « sériés » et le bourgeon extra-axillaire ou « tête de série » (Figure 2). Les bourgeons axillaires des tiges orthotropes donnent lieu à de nouveaux axes orthotropes dits gourmands, tandis que les bourgeons extra-axillaires donnent les rameaux plagiotropes primaires. Ces derniers portent également les deux types de bourgeons. A ce niveau, l'extra-axillaire produira éventuellement une nouvelle pousse plagiotrope (secondaire) ayant les mêmes caractéristiques morphologiques que la primaire, tandis que la différenciation des bourgeons axillaires conduit à la formation soit des boutons floraux (Gaie & Flémal, 1988), soit des gourmands orthotropes (Krishnan, 2017).

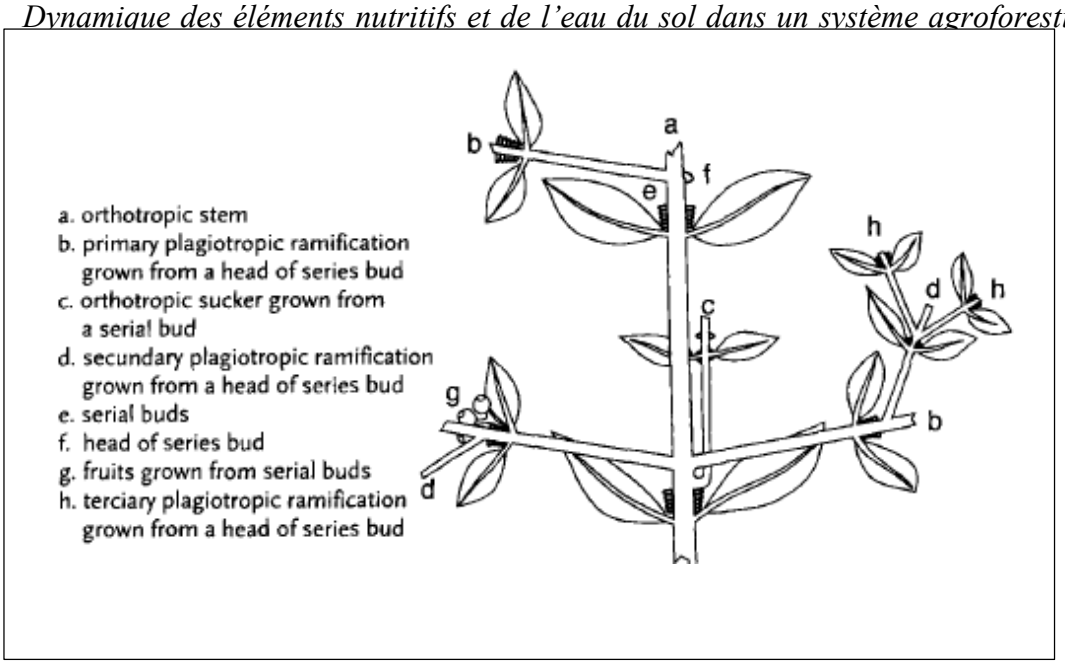


Figure 2 : Deux types de bourgeons expliquent le développement des rameaux chez le caféier

Source : (Wintgens, 2004)

Les bourgeons floraux sont normalement en dormance. Cette dormance est levée par les premières pluies après une période sèche. Il faudrait au moins 10 mm de précipitations pour obtenir les meilleurs résultats (Wintgens, 2004). A ce moment-là, les boutons floraux se développent rapidement et une à deux semaines après la levée de la dormance, l'éclosion des fleurs a lieu (Gaie & Flémal, 1988).

La pollinisation suit alors, et la fécondation est terminée 48 h après la pollinisation (Mangal, 2007). *Coffea arabica* est très fortement autogame. Pour cette espèce, 90 à 95% des fécondations résultent du pollen provenant d'un même arbre. La pollinisation par les insectes est réduite (5 à 10% uniquement) (Wintgens, 2004).

Le fruit formé va alors se développer. D'abord lentement durant les deux premiers mois, puis rapidement durant les deux autres mois qui suivent. C'est environ 7 à 8 mois après la floraison que la phase de maturation commence (Gaie & Flémal, 1988). Cette période peut aller jusqu'à 9 mois (Wintgens, 2004). Les fruits prennent alors une coloration de plus en plus rouge (Gaie & Flémal, 1988) ou jaune pour certaines variétés de Caturra (DaMatta et al., 2007). Le Caturra a été découvert en 1937 comme mutant de la variété Bourbon au Brésil, et la couleur jaune des fruits du « Caturra jaune » est due à un gène récessif (Wintgens, 2004). Il faut environ trois ans pour que le jeune plant produise ses premières fleurs et fruits (Krishnan, 2017).

Pour avoir une production de bonne qualité, il est conseillé de récolter les fruits entièrement rouges ou jaunes. Il est aussi bien connu que la qualité du café est meilleure pour des fruits ayant connu une maturation lente (DaMatta et al., 2007).

1.3. Exigences édaphoclimatiques du caféier

Le caféier préfère un sol ayant une forte aptitude à retenir l'eau, à permettre le développement tant de la racine pivotante que des radicelles superficielles, ainsi que son aptitude à fournir à la plante les éléments nutritifs dont elle a besoin. Idéalement, le sol doit être profond, de bonne structure, bien drainé, suffisamment pourvu en matière organique et avoir un bilan hydrique favorable (Gaie & Flémal, 1988). Le caféier est normalement une culture de sols légèrement acides. Le pH optimum se situe entre 5 et 6 (Gaie & Flémal, 1988).

La fourchette optimale des précipitations pour la production de *C. arabica* est de 1200-1800 mm. Il lui faut une courte saison sèche d'environ 2 à 4 mois pour stimuler la floraison. Des précipitations abondantes toute l'année réduisent les rendements de caféier (DaMatta et al., 2007). Une faible humidité relative de l'air d'environ 60% est suffisante (Gaie & Flémal, 1988).

Quant à la température, la fourchette moyenne optimale est de 18-21°C. En dessous, la croissance du caféier est largement diminuée tandis qu'au-delà, cela peut soit conduire à l'avortement des fleurs, soit affecter la maturation trop rapide des fruits, conduisant à leur perte (DaMatta et al., 2007).

L'origine du caféier se trouve en Ethiopie où il a évolué dans des écosystèmes forestiers. On l'a cru obligatoirement sous ombrage. Le caféier n'est pas très exigeant en lumière. Une étude a montré que la photosynthèse de la canopée d'un caféier adulte peut être saturée avec 600-700 µmol de photons m^{-2} s^{-1} (DaMatta, 2004 ; Araujo et al., 2008). Le caféier se prête bien aux conditions ombragées, à condition que la composante arbre d'ombrage soit bien gérée : choix des espèces d'arbres, gestion de l'appareil aérien et souterrain (DaMatta et al., 2007). Il a été montré que l'ombrage doit se situer entre 10 et 39% pour maintenir une bonne production (Koutouleas et al., 2022).

De manière générale, les conditions de vent constituent un stress qui peut être très dommageable au caféier. Ils peuvent occasionner des bris de troncs ou de branches et dans le cas de vents secs accentuer la transpiration, avec pour conséquences le flétrissement et la chute prématurée du

feuillage (Gaie & Flémal, 1988) et/ou des fleurs. Ces dommages peuvent être fortement réduits par la présence d'arbres d'ombrage (Beer, 1987).

1.4. Le caféier dans le monde

Originaire d'Ethiopie, il a par la suite été emmené par les arabes au Yemen ainsi que dans la péninsule arabique où il a contribué à la prospérité du port maritime de Mocca, d'où le nom *Mocca* pour désigner l'arabica (Pohlan & Janssens, 2010). Les plus anciens documents sur le café datent des années 575 au Yemen et uniquement au XVIème siècle en Perse. Ce sont les voyageurs qui l'ont emmené en Europe vers les années 1600, d'où le caféier a été introduit dans les colonies en Afrique et en Amérique. C'est de cette manière que le caféier s'est répandu à travers le monde entier (Mussatto et al., 2011).

Le café fait partie des produits agricoles les plus importants sur le marché mondial. Il est cultivé globalement sur environ 11 millions d'ha et constitue une importante source de revenus pour plusieurs pays en Amérique Latine, en Afrique et en Asie (DaMatta, 2004). Le café est produit et exporté par plus de 60 nations (Pohlan & Janssens, 2010). On estime à environ 120 millions de personnes qui vivent du café dans le monde (Krishnan, 2017).

L'Organisation internationale du café (OIC) est la principale organisation intergouvernementale sur le café, réunissant les gouvernements exportateurs et importateurs pour relever les défis auxquels est confronté le secteur mondial du café grâce à la coopération internationale. Les gouvernements qui en sont membres représentaient, en 2022, 93% de la production mondiale de café et 63% de la consommation mondiale. L'OIC a débuté en 1963 et réunit 49 Gouvernements dont le Burundi (ICO, 2023).

Au niveau africain on peut relever l'association africaine des cafés fins (African Fine Coffees Association, AFCA). Fondée en 2000, l'AFCA regroupe 11 pays membres dont le Burundi. Elle s'occupe des activités liées à la production et à l'amélioration de la qualité du café, ainsi que des activités d'extension des marchés, et du commerce du café (AFCA, 2022).

La production mondiale du café, qui est d'environ 9 millions de tonnes de café vert (Krishnan, 2017), est largement dominée par l'Amérique du sud (43%). Elle est suivie par l'Asie (24%), l'Amérique centrale (18%) et l'Afrique qui occupe la dernière place avec 15% (Mussatto et al., 2011). Le premier pays producteur de café au monde est le Brésil, tandis qu'au niveau africain, le premier pays producteur de café est l'Ethiopie. Il est suivi par l'Ouganda au moment où le

Burundi occupe la 15ème place (Havyarimana, 2020). Ces deux pays africains (Ethiopie et Ouganda) figurent parmi les dix premiers pays producteurs et exportateurs de café au niveau mondial (Krishnan, 2017).

1.5. Le caféier au Burundi

Comme c'est le cas au niveau mondial, le caféier occupe une grande importance en Afrique et au Burundi. Comme ce fut le cas dans d'autres pays, le caféier est arrivé au Burundi par l'intermédiaire des colonisateurs. Dans le temps, le Burundi avait quelques plantations de *C. robusta* dans la plaine de la Rusizi mais elles ont été remplacées par le palmier à huile (Ciza et al., 2016). Il n'en reste que quelques reliques « négligeables ». C'est la raison pour laquelle tous les développements futurs dans cette thèse concerneront uniquement *C. arabica*.

1.5.1. Importance du caféier au Burundi

Au Burundi, la production de *C. arabica* a depuis longtemps représenté à la fois la première source de devises (entre 60% et 85% des recettes d'exportation en fonction des années de mauvaise ou bonne production) et l'une des principales ressources budgétaires au travers des taxes et autres prélèvements effectués par l'Etat sur la filière café (Cochet & Ndarishikanye, 2000).

Dans ce pays, les agriculteurs en général et les caféiculteurs en particulier sont de petits exploitants dont la superficie est de quelques ares. La majorité des caféiculteurs possèdent entre 50 et 250 caféiers (Ciza et al., 2016). En général, les caféiers sont dispersés chez un très grand nombre de producteurs (Cochet & Ndarishikanye, 1998). Un petit agriculteur isolé se trouverait défavorisé à multiples points de vue. Pour faire entendre leurs voix, ils se sont regroupés en associations, les associations se fédérant en coopératives, et finalement les coopératives en union des coopératives. La coopérative Mboneramiryango à Giheta a été la première à voir le jour grâce à la structuration de COCOCA. Mboneramiryango a obtenu son certificat en mars 2013 (Sahinguvu, 2013).

Ces producteurs se retrouvent dans plusieurs zones agroécologiques du Burundi. L'ISABU a défini quatre zones d'aptitude des terres à l'arabicaculture au Burundi et en a même produit une carte qui a été reprise par Nibasumba (2013). Cette carte est donnée en annexe 1 de cette thèse. Il s'agit de : (i) la zone de bonne aptitude, où les limitations sont nulles à faibles (2,4 à 3,2 mois secs) ; (ii) la zone d'aptitude modérée, où les limitations sont d'ordres climatique (3,3 à 3,8

mois secs) et/ou pédologique (volume de sol réduit par le gravillonnement) ; (iii) la zone marginale, où les facteurs limitants sont plus intenses : stress hydrique de plus de 3,8 mois secs et/ou une pluviométrie inférieure à 1 000 mm et/ou localement une importante charge graveleuse dans les sols ; et (iv) la zone d'inaptitude, à cause des températures trop élevées dans le Moso, l'Imbo (propice à la culture du Robusta), ou trop basses dans le Mugamba et une fraction du Bututsi (Descroix, 1995). Alors que le nombre de ménages caféicoles était estimé à 600 000 en 2017 (République du Burundi, 2017), le recensement général des caféiers et des caféiculteurs de 2019 a dénombré au total 417 615 caféiculteurs (ISTEEBU, 2021), ce qui montre une alarmante diminution (30%). La plus forte concentration des caféiculteurs se rencontre dans la province Kayanza avec 63 347 caféiculteurs, suivie de la province Gitega avec un effectif de 59 644 caféiculteurs (ISTEEBU, 2021).

Pour l'agriculteur burundais, les revenus issus de la vente du café sont intéressants du fait de leur nature groupée. En effet, les exploitants reçoivent des montants qu'il est difficile d'épargner durant l'année. Les saisons de paie, appelée en Kirundi « *Isizeni* » (probablement de l'Anglais « *Season* ») sont réellement des moments de liesse populaire. C'est à ce moment que les épouses reçoivent de nouveaux pagnes. En plus, Kimonyo & Ntiranyibagira (2007) affirment que, avec l'avènement du système de micro-crédit rural, la possession d'une plantation de caféier constitue la principale garantie pour l'accès au crédit auprès des institutions de microfinance.

1.5.2. Evolution du verger, de la production et du prix du café au producteur au Burundi

Dès son introduction vers les années 1920 et sa vulgarisation à grande allure des années 1930-1950, chaque « indigène » devait entretenir quelques dizaines de pieds de caféiers (Hatungimana, 2008). Le verger a connu une augmentation les premières années. En 1959, le verger caféicole était estimé à 38 millions de plants. Il était à 92 millions en 1980 et est passé à 181 millions en 1990 (Nibasumba, 2013). La crise qui a suivi ces années a fortement réduit le nombre de plants de caféiers à 148 millions en 1998. Par la suite, le verger a poursuivi sa diminution. Le recensement général des caféiers de 2007 a donné 120 millions de plants de caféier (ISTEEBU, 2009) et seulement 10 ans après, le recensement général des caféiers et des caféiculteurs de 2019 a révélé 89 millions de plants de caféiers (ISTEEBU, 2021).

Quant à la production du café marchand, elle a oscillé entre 3 000 et 5 000 tonnes dans les années quarante, puis entre 5 000 et 9 000 tonnes dès le début des années cinquante, avant de dépasser 10 000 tonnes en 1957 et près de 20 000 tonnes en 1959 (Cochet & Ndarishikanye, 2000). Depuis lors, la production a évolué en dents de scie autour de 30 000 tonnes (Cochet & Ndarishikanye, 1998). Dans l'histoire de la caféiculture au Burundi, le pic de 40 000 tonnes a été atteint deux fois, en 1981 (Nibasumba, 2013) et en 1995 (Figure 3). Depuis 2007, la production du café vert est restée inférieure à 25 000 tonnes. Cette diminution se poursuit de telle sorte que, à partir de 2019, la production de café vert est en moyenne de 11 000 tonnes au Burundi (Figure 3). La plus basse production depuis 2007 a eu lieu récemment en 2021 avec environ 6 000 tonnes de café vert. C'est un très bas niveau de production qui ne suscite pas d'attractivité de ce secteur.

Le prix de la cerise a toujours été jugé trop bas par les agriculteurs. De 2007 à 2016, le plus bas prix de la cerise était de 250 Fbu/kg en 2007, tandis que le prix le plus élevé a été observé en 2011 quand il était fixé à 630 Fbu/kg (ISTEEBU, 2017). Et jusqu'en 2022, le prix au producteur n'a jamais dépassé 800 Fbu/kg de cerise (environ 0,4 USD). L'année 2023 constitue une exception où le prix d'un kg de cerise a été revu à la hausse par le Gouvernement à 1 200 Fbu (hausse apparente car cela reste équivalent à environ à 0,4 USD). Ce prix reste peu incitatif. Cela constitue également l'une des raisons du manque d'engouement, par les plus jeunes, envers la caféiculture. Une étude a montré que les producteurs subissent de plus en plus des pénalisations plutôt que des incitations par les prix au Burundi (Ciza et al., 2016). Il convient de relever que les caféiculteurs certifiés reçoivent un prix un peu plus élevé. La coopérative Mboneramiryango a réussi à donner des primes allant jusqu'à 250 Fbu s'ajoutant au prix officiel du kg de la cerise (Nsabimana, 2024, Comm. pers). Comparativement aux autres cultures (vivrières essentiellement), les caféiculteurs estiment que le prix de la cerise reste trop bas. Nous n'avons pas pu avoir le prix au producteur de 1991.

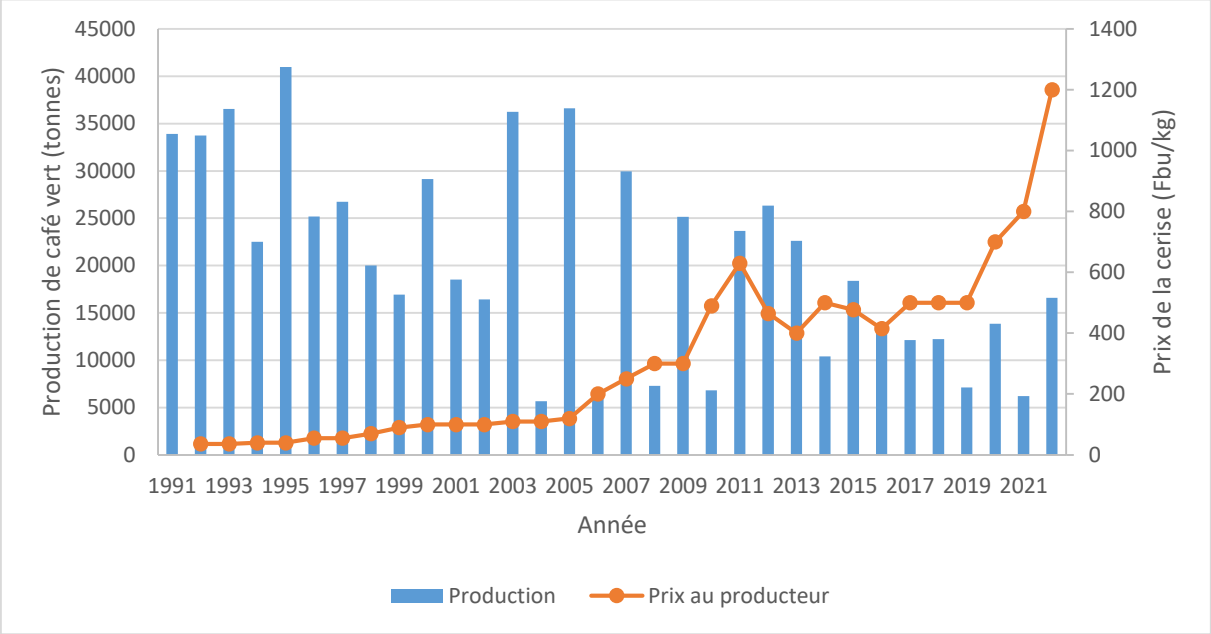


Figure 3 : Evolution de la production du café vert et du prix au producteur au Burundi durant la période de 2007 à 2022

Sources : Kimonyo & Ntiranyibagira (2007) pour les données de 1991 à 2006 ; ISTEEBU (2017) pour les données de 2007 à 2016 ; Nkurunziza (2021) pour les données de 2017 et 2018 ; Auteur à partir des données de l'INSBU pour les données de 2019 à 2022

De manière générale, la courbe de production révèle le phénomène de cyclicité qui est caractéristique de *Coffea arabica* (Wintgens, 2004). Il s'agit de cette tendance à produire de grandes quantités de fruits une année, suivies d'une faible production l'année suivante par suite d'une compétition entre la croissance des fruits et la croissance végétative (Bote, 2016). Ce phénomène est influencé par divers facteurs, notamment la prédisposition génétique et les pratiques agronomiques. Des études génomiques ont identifié des régions associées à la cyclicité et à la résistance aux stress biotiques chez *Coffea arabica* (Nonato et al., 2021). En vue d'atténuer la cyclicité, les bonnes pratiques telles que l'application d'engrais, le recours aux plantes de couverture, l'ombrage, la gestion de la densité des plantes et la taille peuvent aider via l'amélioration de la physiologie des plantes et la réduction de stress environnementaux (Merga & Etana, 2023). Comme la manifestation de la cyclicité est plus grave en plein soleil que dans les systèmes ombragés (DaMatta, 2004), ceci est une raison de plus militant en faveur de l'intégration des arbres d'ombrage avec les caféiers. Mais on pense que l'élimination complète de la cyclicité pourrait passer par l'amélioration génétique développant de nouvelles variétés non cycliques (Merga & Etana, 2023).

1.5.3. Gouvernance du secteur café au Burundi

La gouvernance du secteur café au Burundi a été très instable.

Depuis son introduction, le secteur du café a connu plusieurs régimes organisationnels. L'introduction de la culture du café par l'autorité coloniale s'est faite principalement par la coercition à travers une surveillance scrupuleuse et l'usage de la chicotte en cas de négligence présumée. L'emprise du Gouvernement était forte car le café était la source des ressources financières nécessaires à son action (Hatungimana, 2008).

Bien avant l'indépendance, le secteur café était géré par l'Office des Cultures Industrielles du Ruanda-Urundi (OCIRU). Créée en septembre 1945, l'OCIRU mena une action efficace dans le développement de la production et l'amélioration de la qualité du café (Nyamoya et al., 1986).

Avec l'indépendance du pays, les nouvelles autorités tentèrent d'abandonner les cultures « coloniales », mais ont finalement décidé de relancer la culture du café au début des années 1970. La production et l'exportation étaient privées, le gouvernement intervenant exclusivement dans la recherche et la vulgarisation, l'amélioration de la qualité et la tarification à la production. Très vite, en 1976, l'orientation a été changée : les usines privées ont été nationalisées et l'Office des Cultures Industrielles du Burundi (OCIBU) était chargé de la gestion directe de toutes les activités du secteur, sauf l'exportation qui était confiée à la Burundi Coffee Company (BCC). Des stations de lavage industrielles ont été installées au début des années 1980, permettant la production de café haut de gamme, le « fully washed ».

Avec la politique d'ajustement structurel impulsée par les bailleurs de fonds, l'État a entamé dans les années 1990 un processus de désengagement du secteur du café. Cela a pris du temps suite à l'instabilité socio-politique du pays. Les stations de lavage ont été confiées à cinq sociétés, les Sociétés de Gestion des Stations de Lavage (SOGESTAL), et les deux grandes usines de transformation ont été confiées à la Société de Déparchage et de Conditionnement (SODECO). Dans ces sociétés, les parts de l'État sont restées prédominantes. L'OCIBU jouait le rôle de régulateur en déterminant les prix et en définissant les stratégies et orientations politiques du secteur (Ciza et al., 2016). La participation des caféiculteurs était quasi inexistante sauf là où l'État leur accordait une participation symbolique (Kimonyo & Ntiranyibagira, 2007).

En 2009, une nouvelle structure a été adoptée : l'Autorité de régulation de la filière café (ARFIC) et une association interprofessionnelle, l'Intercafé. L'ARFIC remplaçait l'OCIBU. Elle était chargée de veiller au respect des règles du secteur et de collecter les informations économiques et techniques sur le secteur. Elle était chargée également de garantir la qualité du café et valoriser l'origine du café burundais. L'Intercafé a été créé par les acteurs du secteur comme un espace de dialogue pour la gestion opérationnelle du secteur. L'Intercafé s'occupait également de la promotion du produit auprès des exportateurs (Ciza et al., 2016).

Avec la privatisation, les attentes des agriculteurs étaient énormes. On attendait *in fine* que l'agriculteur puisse faire un libre choix quant à l'usage de sa terre, y compris la partie occupée par le café. Ainsi, il pourrait choisir de cultiver uniquement du café, de le combiner avec des cultures vivrières, voire d'abandonner complètement la culture du café au profit de cultures vivrières (Nibasumba, 2013).

Malgré toutes ces mesures, la production de café a continué à décliner, tant quantitativement que qualitativement. Récemment, l'État a décidé une nouvelle fois de reprendre le secteur du café en main en 2019. Les différents acteurs (SOGESTAL, CNAC Murima w'isangi, Intercafé et ARFIC) sont accusés de retirer de l'argent, ce qui fait que le prix au producteur reste très bas. De plus, le producteur n'était plus payé à temps. Le Gouvernement a alors créé l'Office de Développement du Café (ODECA) pour remplacer toutes ces organisations. Dans ce modèle, les particuliers peuvent entrer dans le secteur après paiement de garanties à l'ODECA.

1.5.4. Evolution des systèmes de production du caféier au Burundi

Dès son introduction au Burundi par les colonisateurs, le café, de par son importance du point de vue économique, était vu comme la mine d'or et a été dès le départ sous le contrôle des autorités (Hatungimana, 2008). Ces dernières avaient alors fait développer tout un itinéraire technique qui devait absolument être respecté. Les moniteurs agricoles sur toutes les collines étaient là pour faire respecter la monoculture. Il était formellement interdit d'y associer quoi que ce soit, encore moins de détruire une plantation de caféier, quelle qu'en soit la raison. Les contrevenants s'exposaient à des amendes (Nyamoya et al., 1986).

Le système de monoculture, dit également intensif, renferme en son sein beaucoup d'exigences. Il s'agit entre autres de la fertilisation minérale, de l'application des produits phytosanitaires, et du paillage. La fertilisation minérale a toujours été le maillon faible parce que les engrais étaient soit indisponibles, soit insuffisants, avec des caféiculteurs à faibles revenus et/ou qui priorisent

d'autres dépenses que celles liées à l'entretien de la caféière (Descroix, 1995). Par contre, les insecticides contre la punaise du caféier ont toujours été appliqués gratuitement dans les exploitations caféicoles lors de campagnes collectives. Seulement, les autres produits phytosanitaires contre les champignons n'étaient pas appliqués, alors que ces maladies peuvent occasionner la perte de la majorité ou la totalité de la production. Le paillage sur l'intégralité de la caféière a toujours été prôné et appliqué, jusqu'à ce que le matériel de paillage devienne un facteur limitant. L'entretien du caféier était qualifié de dur par la population et imposé par le colonisateur, puis par les autorités de la République par la contrainte (Nyamoya et al., 1986).

Du côté de la recherche, les chercheurs avaient remarqué que la monoculture connait plusieurs goulots d'étranglement depuis longtemps et ont travaillé, sans toutefois vouloir interférer avec les autorités, sur des solutions alternatives. C'est ainsi par exemple que des essais associant le caféier avec des arbres d'ombrage et/ou avec le haricot avaient été installés dès les années 1980, de même que des essais associant le caféier avec la tomate pendant les premières années (Nibasumba, 2013). Quant aux problèmes du matériel de paillage, les chercheurs ont pensé à des techniques permettant de réduire les quantités à appliquer. Il s'agit entre autres du paillage alterné des lignes de caféiers, l'installation des plantes de couverture (*Mucuna spp.*, *Desmodium spp*.) dans les caféières pour ensuite les faucher et les appliquer comme paillis (Nibasumba, 2013). Les résultats, quoi qu'encourageants, n'ont pas été vulgarisés.

Les autorités burundaises ont compris que le système de monoculture du caféier ne pouvait pas perdurer. C'est ainsi que, avec l'appui de ses partenaires techniques et financiers, le Gouvernement du Burundi a initié le Projet d'Appui à la Compétitivité du Secteur Café (PACSC). Ce dernier a entrepris, entre autres activités, l'installation de sites de démonstration sur la gestion durable d'une exploitation caféicole et en a même élaboré un guide. Dans ce guide, on retrouve comment mettre des cultures intercalaires (soja, haricot, tomate), des arbres agroforestiers et des arbres fruitiers dans un champ de caféiers (République du Burundi, 2017). Dans la même logique, l'ISABU a installé, dans ses champs à Kayanza, des essais dits « forêt productive à base de café ». Le système de forêt productive proposé intègre en son sein des caféiers, des espèces agroforestières d'ombrage, des bananiers, des fruitiers et des cultures vivrières (Nduwayo et al., 2017).

Profitant de conditions politiquement favorables, les exploitants intègrent progressivement des arbres agroforestiers, ou fruitiers, ainsi que des arbres autochtones à leurs caféières. Ceci

constitue une des voies à privilégier surtout qu'il y a des avantages qui découlent du processus de certification. La certification offre des avantages qui combinent des prix plus élevés et plus stables pour les agriculteurs, ainsi qu'un accès accru au marché et à l'assistance technique (Méndez et al., 2010).

A l'origine, la certification est née par l'exigence de certains consommateurs (américains et européens pour la plupart) de consommer des produits respectant certains standards environnementaux et sociaux (Krishnan, 2017). Il existe plusieurs types de certifications. Krishnan (2017) en a donné neuf dont nous reprenons les quatre qui sont déjà connus par les exploitants de notre zone de travail. Il s'agit de : (i) Fair Trade initié par Fair Trade Labeling Organizations International (FLO) ; du (ii) certificat organique initié par International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) ; (iii) de Eco-Ok initié par Rainforest Alliance ; et du (iv) certificat Utz initié par Utz Kapeh Foundation (Krishnan, 2017).

Il existe plus de 41 organisations qualifiées pour l'octroi de la certification organique dont Naturland pour l'Allemagne, ORCA pour les Etats Unis et SKAL pour les Pays Bas (Van der Vossen, 2005). Dans la zone de travail, toutes les usines de lavage de COCOCA sont certifiées UTZ tandis que les caféiculteurs réunis au sein du COCOCA sont avancés dans le processus d'obtention du certificat organique. C'est Naturland qui suit de près les caféiculteurs de cette zone dans ce processus. En 2014, le COCOCA a obtenu la certification de groupe, et après la mise en place d'un système de contrôle interne, le COCOCA peut ainsi être le garant des coopératives certifiées par son intermédiaire (Johnson, 2015). Quatre coopératives membres de COCOCA disposent déjà d'un certificat organique (Niyonizigiye, 2022). Il faut mentionner que, ici comme ailleurs, la motivation pour l'obtention de l'un ou l'autre certificat est liée aux avantages pécuniaires que l'on en reçoit (Van der Vossen, 2005).

1.5.5. Principales contraintes de la caféiculture au Burundi

Dans le contexte burundais où la population est à majorité agricole et vit à 90% dans un habitat dispersé en milieu rural (Niragira et al., 2015), l'agriculture en général et la caféiculture en particulier souffre de la surpopulation du pays. Les projections démographiques réalisées par l'ISTEEBU avec l'appui du FNUAP à partir des données du recensement général de la population et de l'habitat de 2008 et de l'enquête démographique et de santé (EDS) de 2010 ont produit une population totale de 12 326 311 habitants en 2030 (ISTEEBU, 2013). Ces projections ont été déjà largement dépassées. En effet, les projections journalières élaborées par

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Worldometer estiment la population burundaise à 14 203 417 habitants au 16 décembre 2024 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2024).

Cette démographie galopante conduit à une réduction des terres cultivables qui sont par ailleurs très morcelées au fil des générations avec une taille moyenne de l'exploitation inférieure à 0,5 ha (Nyamweru et al., 2024). On observe alors une surexploitation des terres. La jachère n'existe presque plus. Au regard de la forte pluviométrie au Burundi, et si l'on considère la faible utilisation des engrais et/ou de la matière organique, la fertilité des sols diminue d'année en année. Le caféier est alors relégué aux terres impropres à l'agriculture et sa production en souffre.

Une autre contrainte d'envergure mondiale s'appelle « changement climatique ». On prévoit une réduction de 50% des zones propices à la culture du café au niveau mondial (Adhikari et al., 2020). Le café burundais n'est pas à l'abri. En effet, on prévoit une augmentation des températures comprise entre 1,7 et 3°C pour le Burundi d'ici 2050. Les précipitations changeront également. On observe déjà aujourd'hui une prolongation des saisons sèches, ainsi que des phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents (Megerle et al., 2018). Le caféier (arabica et robusta) est vulnérable au changement climatique (DaMatta et al., 2019). A côté de la réduction de l'aire de culture, l'augmentation de la température influe négativement sur la production du caféier en ce sens que (i) l'incidence de certaines maladies et ravageurs est augmentée, (ii) les besoins en eau des cultures sont augmentés, (iii) la maturation des cerises est forcée, et (iv) la qualité du café produit est négativement affectée (Gokavi & Kishor, 2020). Pour atténuer ces impacts, diverses stratégies d'adaptation ont été proposées, notamment la plantation d'arbres d'ombrage, le contrôle de l'humidité du sol, l'amélioration variétale et la culture d'intercalaires (Alemu & Dufera, 2017 ; Ramadhillah & Masjud, 2024).

Le prix accordé aux producteurs ne les a jamais satisfaits. Sa revue à la hausse est une doléance qui revient sur toutes les lèvres des exploitants dans toutes les réunions. Il faut garder à l'esprit que les travaux d'entretien du caféier ont été jugés trop laborieux depuis longtemps (Nyamoya et al., 1986). Le matériel de paillage se fait de plus en plus rare et est souvent acheté. En plus, il existe une réelle compétition pour les résidus des cultures entre la fertilisation des cultures et l'alimentation animale, spécialement en cette période où le Burundi a voté une loi obligeant la conduite de l'élevage des animaux en stabulation permanente. Ainsi, les quantités de résidus de

cultures destinées aux caféières diminuent progressivement, observation par ailleurs déjà faite pour l'ensemble de la région tropicale (Palm et al., 2001).

Les caféiculteurs, déjà pauvres et qui évoluent en plus dans un environnement ne facilitant pas l'accès au crédit agricole, ont difficile à se procurer les intrants. Les engrais, même subventionnés par le PNSEB, restent soit chers ou ne sont pas disponibles pour la fertilisation du caféier. Les plants de caféier sont distribués par des projets ou alors ils doivent être achetés auprès de l'ISABU ou d'autres promoteurs privés. Quant aux produits phytosanitaires, hormis les produits contre la punaise du caféier qui sont appliqués gratuitement lors de campagnes (Nibasumba, 2013), les autres doivent être achetés. Rappelons que les pesticides ne sont pas autorisés dans l'agriculture biologique.

Or, le caféier connait, en plus des attaques par les ravageurs, des maladies fongiques. Il existe beaucoup de ravageurs du caféier, mais cinq principaux sont dommageables au Burundi. Il s'agit de : (i) la chenille défoliante (*Epicamptera andersoni* Tams), (ii) la mouche des fruits (*Trirhithrum coffeae* Bezzi), (iii) le borer noir du tronc (*Apate monachus* Fabricius), (iv) le hanneton du caféier (*Pseudotrochalus schubotzi*), et (v) la punaise du caféier (*Antestiopsis orbitalis ghesquierei* Carr.) (Dushimirimana et al., 2016). En ce qui concerne les maladies fongiques, deux sont plus importantes. Il s'agit de : (i) l'anthracnose due à *Colletotrichum coffeanum* Noak et (ii) la rouille du caféier causée par *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome.

Un des indicateurs de la non-attractivité de la caféiculture est le désintéressement des jeunes vis-à-vis de cette culture au profit des services qu'ils jugent plus rémunérateurs. Les jeunes préfèrent se lancer dans la conduite de vélo taxis ou de moto taxis plutôt que d'aller cultiver. On peut aussi relever le manque d'information dans les écoles. Dans la mesure du possible, tous les établissements scolaires devraient installer une plantation de caféier, de préférence sous ombrage. On devrait chercher de l'espace pour enseigner, dans les écoles le guide pratique pour la conduite du café d'ombre.

Avec une production insignifiante au niveau mondial (moins de 0,005% de la production mondiale), la caféiculture burundaise ne peut pas prioritairement miser sur la quantité, mais plutôt sur la qualité. Cette dernière est déjà bonne, comme le montre le point suivant. Lorsque le café est certifié, cela offre des prix concurrentiels. Mais là aussi, le système est trop exigeant et prend beaucoup de temps avant l'obtention du certificat. En effet, la qualité du produit exigé

entraine des coûts que les communautés pauvres des pays en développement n'arrivent pas à couvrir (Krishnan, 2017).

Toutes ces contraintes font que les agriculteurs soient tentés de délaisser le caféier au profit d'autres cultures qu'ils jugent plus rentables.

1.6. Qualité du café burundais

Le Burundi, dès 1989, s'est engagé dans un vaste programme d'amélioration de la qualité du café produit (Descroix, 1995). Pour garantir cette qualité, l'amélioration de la filière café a porté non seulement sur le traitement post récolte, mais aussi sur les pratiques agronomiques (carence en zinc, graines à goût de pomme de terre). Parallèlement à la construction des usines de conditionnement qui disposent d'un matériel moderne et efficace et remplacent les unités traditionnelles de déparchage et de triage, des unités de traitement par voie humide ont été multipliées dans les zones de production et ont facilité le contrôle de la qualité des cerises amenées par les petits producteurs (Vincent, 1992). A l'ISABU, un des huit grands axes de recherche qui ont été identifiés sur le caféier concernait l'amélioration de la qualité du café, l'étude des facteurs qui l'influencent et des arômes indésirables (Bitoga et al., 1994).

Dans l'ensemble, la qualité du café arabica burundais est qualifiée de « bonne » (Kimonyo & Ntiranyibagira, 2007) et même de « supérieure » (Oketch & Polzer, 2002). Le café burundais est réputé comme étant l'un des meilleurs du monde, mais l'obtention des primes à la qualité est conditionnée par l'absence du goût de pomme de terre (Bouyjou et al., 1999). A ce propos, une étude menée en 1994-1995 a confirmé que la lutte précoce contre la punaise, au moment de la formation des jeunes fruits après la floraison et un usinage rigoureux du café permettent d´obtenir un café pratiquement exempt de goût de pomme de terre (Bouyjou et al., 1999).

Lors des différentes compétitions internationales de « cup of excellence », plusieurs exploitations de café burundais obtiennent de bonnes places au classement. Pour se qualifier à ce genre de compétition, les scores minima qui étaient de 85 points en 2012 ont été revus à la hausse, passant à 86 points en 2017 et à 87 points en 2019. En 2019, il ya eu 24 exploitations burundaises qui ont dépassé le score minimum de qualification, 35 exploitations en 2018, 27 exploitations en 2015 et en 2014, 14 exploitations en 2013 et 17 exploitations en 2012 (The cup of excellence, 2024).

Une étude faite à partir des données de « cup of excellence » pour 11 pays durant la période 2004 à 2015 a conclu que les cafés en provenance de deux pays africains (Burundi et Rwanda) n'étaient pas significativement différents de ceux issus du Brésil en termes de qualité, et donc de prix (Traoré, 2018). Ceci représente un important potentiel de croissance du secteur café burundais dans un environnement modial plus demandeur de café de spécialité ou de qualité supérieure (Nillesen, 2016).

1.7. La pratique de l'ombrage du caféier

De par son origine en Ethiopie, le caféier est une plante d'ombrage (DaMatta et al., 2007). Cependant, comme conséquence de son passage dans des conditions sèches arabes au Yemen, le caféier s'est adapté aux conditions sans ombrage durant tout un millénaire (Van der Vossen, 2005), et la conduite du caféier en monoculture de manière intensive sans ombrage a permis de maximiser sa production dans plusieurs pays (Krishnan, 2017). Toutefois, même les variétés développées en conditions de plein soleil tolèrent l'ombrage, et sont donc prédisposées à être conduites dans des systèmes agroforestiers (Pohlan & Janssens, 2010).

La question des interactions entre les arbres d'ombrage et les cultures en-dessous a été depuis longtemps une préoccupation des chercheurs. Beer (1987) a effectué une revue des avantages et désavantages attribués aux arbres d'ombrage du caféier (*Coffea spp*. L.), du cacao (*Theobroma cacao* L.) et du théier (*Camellia sinensis* L. Kuntze). D'autres chercheurs s'y sont penchés en mettant l'accent sur les mécanismes écophysiologiques de production du caféier en comparant les situations sous ombrage et en plein soleil (DaMatta, 2004 ; DaMatta et al., 2007). D'autres encore ont travaillé sur des éléments précis dont entre autres les effets des arbres d'ombrage sur la lutte contre le gel (Caramori et al., 1996), sur l'agroécologie et l'agriculture durable (Leakey, 2014), sur la production et la qualité du café (Bote & Struik, 2011 ; Bosselmann et al., 2009 ; Muschler, 2001, Piato et al., 2020), sur la physiologie du café (Mayoli & Gitau, 2012), sur le microclimat et les pertes en eau (Lin, 2007 ; Lin, 2010). Sans vouloir recopier intégralement la liste de Beer (1987) ni prétendre être exhaustif, nous proposons ci-après la synthèse des avantages et inconvénients associés aux arbres d'ombrage du caféier.

1.6.1. Avantages des arbres d'ombrage du caféier

L'association du caféier avec les arbres d'ombrage conduit à plusieurs avantages, dont entre autres :

- Conservation des ressources naturelles et de la biodiversité dont les interactions peuvent être bénéfiques dans la lutte contre les maladies et ravageurs (effet répulsif de certaines espèces, ennemis naturels des ravageurs, etc.) ;
- Diversification des produits (bois, fruits par exemple) dont la mise en vente sur le marché procure du revenu supplémentaire qui peut même égaler, voire dépasser les ressources issues de la vente du café ;
- Production modérée de fleurs et donc de fruits du caféier, les protégeant ainsi du dépérissement par surproduction (die-back), tout en atténuant le phénomène de cyclicité connu au caféier ;
- Amélioration de la fertilité du sol par les feuilles mortes qui tombent à sa surface, par la fixation biologique de l'azote par les légumineuses. Les feuilles mortes constituent également une sorte de paillis, ce qui exerce une certaine action dans la réduction de l'érosion en cas de pente ;
- Recyclage des éléments nutritifs par les arbres qui, dans le meilleur des cas, explorent les horizons profonds du sol et en améliorent les conditions de drainage et d'aération ;
- Amélioration de la qualité du café produit ;
- Amélioration du microclimat dans la caféière par la réduction de l'évapotranspiration, des extrêmes de température et d'humidité de l'air et le maintien de l'humidité dans le sol ;
- Réduction des dommages causés par le vent, les fortes pluies, les forts rayonnements solaires (dommages photo-oxydatifs) ou par le gel dans certaines régions ;
- Réduction de la croissance et de l'abondance des mauvaises herbes.

1.6.2. Inconvénients des arbres d'ombrage du caféier

Toute médaille ayant son revers, les arbres d'ombrage présentent également des inconvénients dont on peut citer :

- Possibilité d'endommager les plants de caféier par les branches des arbres qui tombent naturellement ou bien lors des opérations d'élagage. Par ailleurs, ces dernières constituent des dépenses ;
- Réduction de la pénétration lumineuse à des niveaux ne favorisant pas la production du caféier, surtout pour les sols fertiles ;

- Augmentation des attaques par les maladies et ravageurs, du fait que certaines espèces d'arbres peuvent constituer des hôtes alternatifs de certaines maladies et ravageurs ;
- Altération de la qualité du café produit surtout en cas d'un ombrage excessif ;
- Possible concurrence pour des éléments nutritifs et pour l'eau, spécialement en cas des systèmes racinaires proches de celui du caféier.

Il résulte de ce qui précède que l'ombrage du caféier n'est pas une panacée. Il est d'ailleurs largement accepté que, en cas de bonnes conditions de sols et de climat, le caféier produit plus en plein soleil plutôt que sous ombrage (DaMatta, 2004 ; DaMatta et al., 2007) ; idem pour le caféier organique (Van der Vossen, 2005). C'est ainsi que l'agroforesterie à base de café a été recommandée pour des terres marginales avec un climat peu favorable (Nibasumba, 2013). Et même dans ces conditions, le niveau d'ombrage ne doit être ni excessif ni trop faible pour permettre une bonne productivité et une protection contre des conditions environnementales défavorables (DaMatta et al., 2007). Dans leur étude sur les effets des arbres d'ombrage sur le café en Ouganda, Sarmiento-Soler et al. (2020) ont conclu que la production du café diminue lorsque l'ombrage dépasse 30%. Une méta-analyse sur les effets de l'ombrage sur *Coffea arabica* impliquant 19 cultivars différents en provenance de 25 publications a conclu que le rendement du café tend à être plus élevé dans des environnements à ombrage faible à modéré (10 – 39%) et que le rendement diminue globalement à partir de 40% d'ombrage (Koutouleas et al., 2022).

Ces propos méritent bien d'être nuancés parce que tout dépend de l'objectif de l'installation de la caféière. La décision se base sur trois facteurs qui sont : (i) l'objectif de production, (ii) les facteurs environnementaux et (iii) le niveau et la qualité des intrants disponibles (Muschler, 2001). Pour le cas du Burundi, le caféier est cultivé sur des terres marginales par de petits exploitants qui, le plus souvent, n'ont pas de moyens pour se procurer des intrants nécessaires. En outre, le Burundi ne peut pas compter sur la quantité de café produit pour être compétitif sur le marché, mais bien par contre sur sa qualité, et exploiter les possibilités d'une certification de son café. C'est ainsi que l'ombrage du caféier est une voie à privilégier pour le café burundais, d'autant plus que les systèmes de certification insistent tous sur la présence de la composante boisée dans les caféiers. L'autre motif est que, en cette période de changements climatiques, considérant que l'intégration des arbres se présente comme une véritable alternative à la déforestation (Mangal, 2007), la conduite du caféier à travers un système agroforestier boisé

constitue un important puits de carbone. Dans tous les cas, il faut bien choisir les arbres à utiliser, les planter avec les meilleurs écartements et veiller à assurer une bonne gestion de l'appareil aérien des arbres d'ombrage de manière à laisser un ombrage adéquat et produire le moins de dégâts possible aux caféiers.

La gestion de l'appareil souterrain des arbres est aussi d'une grande importance. En effet, même si le système racinaire des caféiers semble être compétitif dans les couches superficielles du sol (Defrenet et al., 2016), il peut y avoir une compétition pour les éléments nutritifs et pour l'eau. La première stratégie concerne la conception du système (augmenter les distances entre les arbres) ainsi que le choix de l'espèce d'arbre à utiliser comme ombrage : un système racinaire profond (Sarmiento-Soler et al., 2019), résistance aux tailles répétées et bonne qualité de la litière (Tilander & Ong, 1999). La deuxième stratégie concerne la gestion des arbres présents comme par exemple le cernage des racines (Tilander & Ong, 1999) et le creusement des tranchées ou l'installation des barrières physiques pour modifier les schémas de fonctionnement des racines en fonction de la profondeur et de la distance horizontale par rapport à l'arbre (Isaac & Borden, 2019).

1.8. Conclusion partielle

Le caféier est une culture d'une grande importance tant au niveau mondial qu'au niveau du Burundi. Au regard de ses exigences agroécologiques, une grande partie du territoire burundais se prête tant bien que mal à la culture du caféier.

Bien qu'il y ait plusieurs contraintes à l'arabicaculture burundaise qui font que sa production diminue d'année en année sans renouvellement du verger caféicole, il y a toujours de l'espoir pour la sauvegarde du caféier qui fait encore vivre plus de 400 mille ménages burundais. Le parti au pouvoir a fait de la culture du caféier une priorité pour les prochaines années. Ne pouvant pas compter sur la quantité produite mais plutôt sur la qualité du café (qui est déjà qualifiée de bonne), le système agroforestier apparait comme étant l'une des solutions. Elle permet une diversification de la production apportant du revenu complémentaire au café et constitue la base du processus de certification.

Les arbres du paysage caféicole burundais sont pour la plupart le fruit d'introductions par les partenaires techniques et financiers et les partenaires au développement. Le chapitre suivant donne l'état des lieux de la caféiculture dans la zone de travail.

Chapitre 2. Etat des lieux du caféier dans la zone des plateaux centraux

2.1. Introduction

Le Burundi est subdivisé en cinq zones agroécologiques. Ce découpage a été fait en se basant sur l'altitude et les conditions climatiques à savoir la température et les précipitations moyennes annuelles (Tableau 1). Ces zones sont : (i) la plaine de l'Imbo, (ii) le Mumirwa, (iii) la crête Congo-Nil, (iv) les plateaux centraux et (v) les dépressions du Nord et de l'Est.

Tableau 1 : Caractéristiques des zones agroécologiques du Burundi

Zone agroécologique	Superficie occupée (%)	Altitude (m)	Température moyenne (°C)	Précipitations moyennes (mm)
Plaine de l'Imbo	7	800-1000	23	800-1100
Mumirwa	10	1000-1700	18-28	1100-1900
Crête Congo-Nil	15	1700-2500	14-15	1300-2000
Plateaux centraux	52	1350-2000	17-20	1200-1500
Dépressions du Nord et de l'Est	16	1100-1400	20-23	1100-1550

Source : (Beck et al., 2010)

D'un côté, les plateaux centraux du Burundi touchent, en partie ou en totalité les provinces qui, classées par ordre décroissant des ménages caféicoles (ISTEEBU, 2021) sont : Kayanza (15,1%), Gitega (14,5%), Ngozi (12,4%), Muyinga (11,1%), Karusi (9,2%), Mwaro (3,7%), Rutana (3,1%), Cankuzo (2%), et Ruyigi (2%). On constate que les cinq premières provinces de la zone des plateaux centraux totalisent 62,3% des ménages de caféiculteurs du Burundi.

D'un autre côté, Mboneramiryango fut la première coopérative à voir le jour dans le mouvement associatif sur le café au Burundi. Elle se trouve en commune Giheta (province Gitega). Ensemble avec la coopérative Nyarunazi de la commune Rutegama (province Muramvya), ces deux coopératives ont une longue histoire de collaboration avec 'Welt Partner' (DWP) en Allemagne qui leur achète du café de spécialité. Ce dernier achète le café de ces coopératives en quête de la certification organique avec l'appui de Naturland à un prix incitateur. Ces coopératives se sont mises ensemble avec d'autres pour former l'union des coopératives des caféiculteurs (COCOCA). Cette thèse a été conduite dans le cadre du projet « Agroforesterie »

en étroite collaboration et avec les caféiculteurs réunis au sein de COCOCA. Le projet « Agroforesterie », mis en application conjointement par l'Université du Burundi et HFR Rottenburg, est financé par la région de Baden-Württemberg. Il a entre autre objectif la formation de jeunes chercheurs tant au niveau Master qu'au niveau Doctorat.

L'expérience de la caféiculture est centennale au Burundi. Après la présentation de la culture du caféier au Burundi, il est important de se rendre compte de l'état dans lequel elle se trouve dans son monde réel. Les exploitants ont été en contact depuis un siècle avec la culture du caféier avec toute son histoire ainsi que les différentes contraintes qui ont été évoquées. La résultante produit une situation générale de la culture.

Cette situation peut être appréhendée par tout passant qui observe l'environnement dans lequel le café est produit, mais cela doit aussi être complété par les avis des caféiculteurs eux-mêmes. Ce chapitre présente les principaux résultats de ce processus, qui a été conduit dans la zone des plateaux centraux du Burundi. Il a pour objectif de décrire les caféiers de la région ainsi que leur conduite, de décrire le système agroforestier qu'on y rencontre, et aborde les principaux problèmes soulevés par les caféiculteurs.

Une partie des résultats fait partie d'un mémoire de Master (Havyarimana, 2020) et de licence (Windbühler, 2020) tandis qu'une autre a fait l'objet d'une publication sous forme d'un article (Ndihokubwayo et al., 2021).

2.2. Matériels et Méthodes

A côté des observations directes de l'environnement du café, une enquête socio-économique auprès des ménages de caféiculteurs a été conduite.

2.2.1. Caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans l'une des cinq zones agroécologiques du Burundi à savoir les plateaux centraux. Le travail s'est fait dans les communes Giheta (de la province Gitega), Rutegama (de la province Muramvya) et Busiga (de la province Ngozi) (Figure 4).

Une analyse que nous avons faite de la base de données pédologiques du Burundi pour la seule région des plateaux centraux montre, selon la classification des sols INEAC (Tessens, Sottiaux, et al., 1991), une dominance des Ferralsols qui représentent 50,5% de la superficie totale, suivis des Ferrisols avec 24,5%. Les deux types de sols appartiennent au groupe des Ferralsols selon

FAO WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). On note une présence remarquable d'affleurements rocheux jusqu'à 11,6% de la superficie totale de la zone des plateaux centraux. De manière générale, les sols du groupe des ferralsols présentent de faibles niveaux de fertilité chimique (IUSS Working Group WRB, 2015). Aussi, la surexploitation des sols sur les pentes abruptes les rend plus vulnérables à l'érosion hydrique.

Du point de vue hydrographique, la zone des plateaux centraux dispose d'un important réseau. Elle se situe dans le grand bassin hydrographique du Nil. C'est la rivière Ruvubu qui en constitue le principal drain. La Ruvubu se forme à la confluence de la Kinyankuru qui draine les provinces de Ngozi et Kayanza essentiellement et de la Gifunzo qui traverse les provinces Mwaro et Muramvya essentiellement. La Ruvubu reçoit également les eaux de la rivière Sanzu qui vient de la province Ruyigi et de la Kayongozi qui traverse les provinces Cankuzo et Ruyigi.

Comme c'est le cas pour l'ensemble du Burundi, les plateaux centraux sont dominés par une agriculture de subsistance (Megerle & Niragira, 2020) dans laquelle les cultures vivrières présentent un haut niveau de diversification. Il est fréquent de rencontrer jusqu'à cinq cultures qui coexistent sur un petit lopin de terre : haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), maïs (*Zea mays* (L.) Schott), banane (*Musa spp*.), colocase (*Colocasia esculenta* L.), manioc (*Manihot esculenta* Crantz), etc. La région produit également des cultures de rente, la plus importante étant le café, suivi du thé.

La zone des plateaux centraux est caractérisée par un climat frais, avec une température moyenne de 20°C. La région présente un climat tropical humide tempéré par l'altitude. En général, la saison des pluies dure environ 8 mois et la saison sèche 4 mois. Les précipitations annuelles varient entre 1200 et 1500 mm (Niragira et al., 2015).

La région a un régime pluviométrique bimodal qui permet trois saisons agricoles par an. La première saison (A), connue sous le nom d'*Agatasi* se produit entre septembre et janvier. La deuxième saison (B) s'appelle *Impeshi* et dure 5 mois, de février à juin. Une courte saison sèche (avec des précipitations moins fréquentes et moins intenses) peut être observée entre ces deux saisons des pluies de mi-janvier à mi-février et est appelée *Umukubezi*. La troisième saison agricole (C), appelée *Ici* se déroule entre juillet et septembre. Pendant cette période sèche, les agriculteurs cultivent principalement des légumes, du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), du maïs (*Zea mays* (L.) Schott), de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) et des cultures de contre-

saison telles que le riz (*Oryza sativa* L.) dans les zones humides et les vallées des cours d'eau (Niragira et al., 2015).

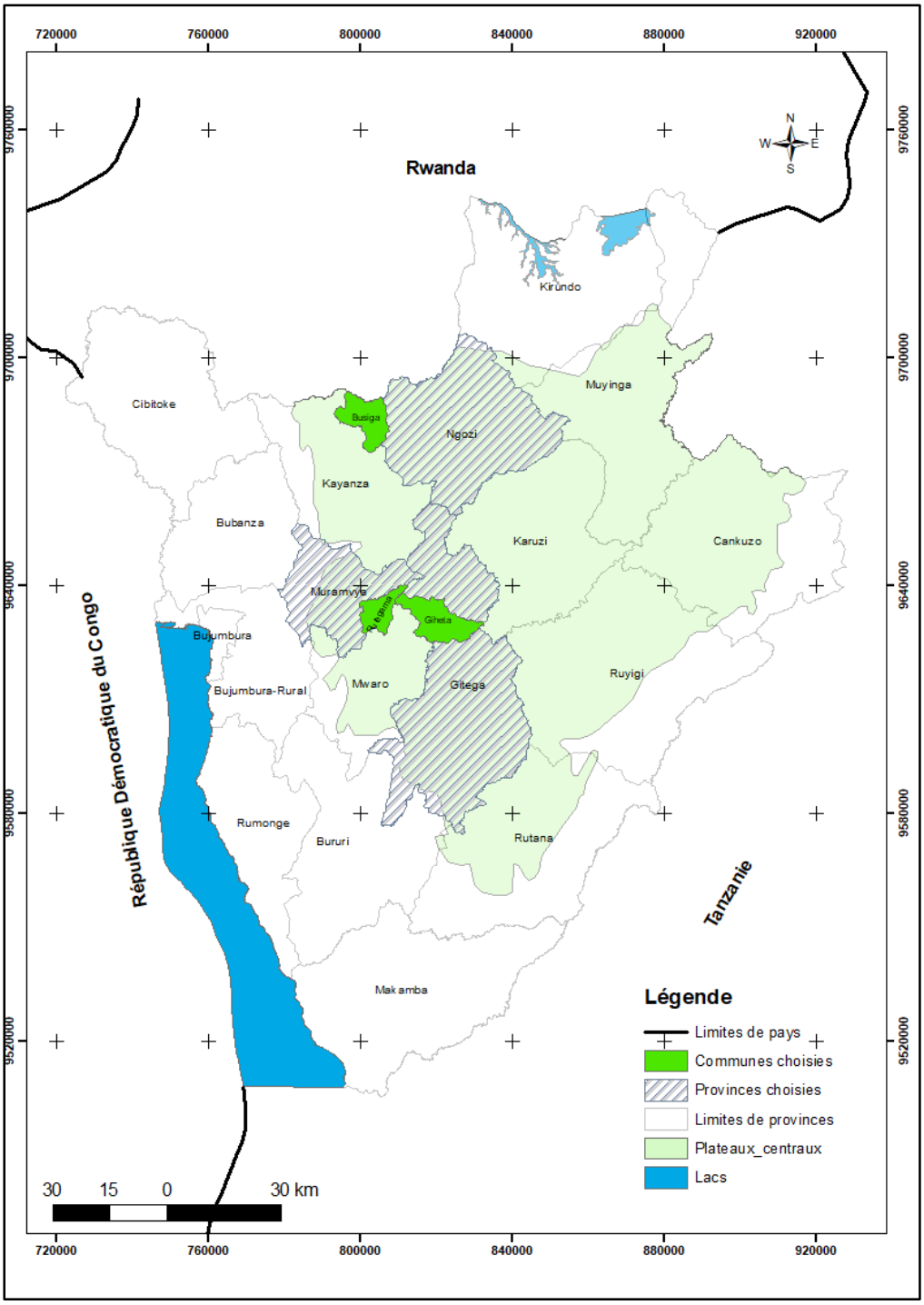


Figure 4 : Localisation des provinces et communes objet d'enquête

2.2.2. Enquête ménage

Nous avons mené une enquête auprès des ménages car c'est à ce niveau que les décisions concernant le système agricole sont prises. La technique d'échantillonnage ciblé a été utilisée. La population totale était constituée par l'ensemble des agriculteurs membres des coopératives de café regroupées au sein de COCOCA. Trois coopératives (Ubwizabwikawa, Mboneramiryango et Nyarunazi) ont été sélectionnées respectivement dans les provinces de Ngozi, Gitega et Muramvya.

a. Taille de l'échantillon

De manière générale, la détermination de la taille de l'échantillon prend en compte entre autres la taille de la population, le niveau de précision, le niveau de confiance, ainsi que le degré de variabilité des attributs qu'on veut mesurer (Israel, 1992).

L'équation suivante constitue une première estimation de la taille n_0 (Cochran, 1953) :

$$n_0 = \frac{t^2 pq}{d^2} \qquad [2.1]$$

où :

- n_0 est la taille de l'échantillon ;
- t^2 l'abscisse de la courbe normale qui laisse une aire α aux extrêmes de la courbe α. Ceci correspond au score z de 1,96. Le niveau de confiance souhaité est donc 1- α = 95% ;
- d est le niveau de précision souhaité. Dans ce travail, nous considérons 5% ;
- p est la proportion estimée d'un attribut qui est présent dans la population. Généralement, comme on ne la connait pas exactement, on prend la valeur de 0,5 (50% constitue la variabilité maximale) ;
- q est généralement pris comme étant $q = 1 - p$

On a donc

$$n_0 = \frac{t^2 pq}{d^2} = \frac{1{,}96^2(0{,}5)(0{,}5)}{(0{,}05)^2} = 385 \text{ ménages}$$

Dans ce travail, la population cible était constituée par les agriculteurs des trois coopératives retenues membres de COCOCA. Il a fallu donc demander la liste de tous les membres des coopératives. Au total, 1873 agriculteurs étaient inscrits sur les listes de la base de données de COCOCA. Par coopérative, il y avait 489 ménages pour la coopérative Ubwizabwikawa, 803

pour Mboneramiryango et 581 pour Nyarunazi. Pour cette étude, nous avons envisagé d'ajouter une population témoin composée d'agriculteurs (20%) qui ne sont pas membres de COCOCA. La population cible totale revenait alors à 2248 ménages.

Comme il s'agit d'une large population mais finie N, il existe une formule de correction (Cochran, 1953 ; Israel, 1992) qui permet de réduire la taille n de l'échantillon nécessaire (équation 2.2) :

$$n = \frac{n_0}{1+\frac{(n_0-1)}{N}} \qquad [2.2]$$

On a :

$n = \frac{385}{1+\frac{(385-1)}{2248}} = 328{,}8$ soit 329 ménages à enquêter.

Pour chaque coopérative, le nombre de ménages à sélectionner a été déterminé proportionnellement à sa contribution à la population totale. C'est ainsi que 86 ménages ont été sélectionnés dans la coopérative Ubwizabwikawa, 141 ménages dans la coopérative Mboneramiryango et 102 ménages dans la coopérative Nyarunazi. Au cours de l'enquête, comme il nous restait un peu de temps, 6 personnes supplémentaires ont été interrogées, portant le total à 334 personnes interrogées. Cela n'altère en rien le travail puisque la formule donne la taille minimale de l'échantillon à considérer.

Le choix des ménages à partir de la liste des membres de la COCOCA a été fait en utilisant la méthode d'échantillonnage systématique pour chaque coopérative. Un échantillon systématique est obtenu en sélectionnant un début aléatoire près du début de la liste de population, puis en prenant chaque unité équidistante par la suite (Bellhouse, 2014).

b. ***Conduite de l'enquête ménage***

Un questionnaire a été élaboré, pré-testé puis administré à chaque ménage. Cet instrument a été utilisé pour collecter des données sur le statut socio-économique général, les espèces d'arbres agroforestiers dans les caféières, les cultures intercalaires dans les caféières, la lutte phytosanitaire, la fertilisation du caféier, les contraintes rencontrées par les exploitants, et bien d'autres éléments de l'exploitation. Pour les questions liées à la certification, un sous-échantillon de 100 ménages (80 étant membres de COCOCA et 20 étant des non-membres) ont été sélectionnés dans l'échantillon initial sur base du volontariat lors d'une deuxième enquête.

Ce sont les chefs de ménages qui étaient qualifiés pour répondre à nos questions. En cas d'absence, leurs conjoints pouvaient les remplacer. Les guides locaux ont joué un rôle très important en emmenant les enquêteurs dans les ménages sélectionnés. Les enquêteurs (4 étudiants de niveau Master) ont été recrutés principalement sur la base de leur maîtrise de l'administration du questionnaire et de leur maîtrise des deux langues, le Français et le Kirundi. Le questionnaire était rédigé en français, les questions posées en Kirundi et les réponses transcrites en Français. La traduction était presque simultanée. Les enquêteurs ont été formés avant le travail sur le terrain et l'administration du questionnaire a été directement réalisée à l'aide de smartphones via le logiciel Kobo Collect.

Des informateurs clés ont également été contactés par le superviseur de l'enquête pour trianguler les informations provenant des ménages interrogés. Les informateurs clés étaient des personnes âgées et/ou ayant une expérience dans la culture du café sous ombrage (agronome collinaire, agriculteur modèle, Président de la coopérative, responsable de terrain de COCOCA, etc.). Au total, 8 informateurs clés ont été contactés. Les discussions portaient sur l'importance de l'agroforesterie dans les parcelles de café.

Lors des visites sur le terrain dans les ménages et les parcelles de café, des observations personnelles étaient faites. Les espèces d'arbres d'ombrage présentes dans les parcelles de café, la gestion du café en général et des arbres d'ombrage en particulier faisaient l'objet d'observations.

2.2.3. Analyse statistique des résultats de l'enquête ménage

Comme les données étaient collectées à l'aide des smartphones et stockées directement sur un serveur, leur téléchargement permet au chercheur de commencer directement leur nettoyage et leur analyse. L'analyse des données quantitatives a été réalisée à l'aide du logiciel SPSS où des statistiques descriptives (moyenne, écart type, fréquences, etc.) ont été calculées. Une analyse qualitative a également été réalisée pour les données des informateurs clés.

2.3. Principaux résultats et discussion

Les résultats présentés dans cette thèse permettent d'avoir une vue d'ensemble sur la caféiculture dans la zone d'étude, la conduite de cette culture, et la perception des caféiculteurs sur le café d'ombre.

2.3.1. Les ménages et leurs exploitations caféicoles

L'analyse des données de l'enquête révèle que l'âge moyen des exploitants qui cultivent du café dans la région est de 55 ans. Les chefs de ménage de plus de 50 ans représentent plus de 64% des exploitants enquêtés (Tableau 2).

Tableau 2 : Classes d'âge des exploitants enquêtés

Classes d'âge (ans)	Nombre	Pourcentage (%)
<20	0	0
21-30	24	7,2
31-40	43	12,9
41-50	53	15,9
51-60	79	23,7
61-70	96	28,7
71-80	33	9,9
81-90	6	1,8
Total	**334**	**100**

Le résultat sur l'âge moyen des exploitants concorde avec le recensement de 2019 qui a, au niveau national, avancé un âge moyen allant de 41 à 60 ans (ISTEEBU, 2021). Il est clair que ceux qui possèdent des caféiers sont des personnes âgées. L'agriculteur burundais, qui utilise la houe dans ses travaux quotidiens, n'a plus suffisamment de forces au-delà de la cinquantaine pour bien s'occuper de l'exploitation en général, et de la caféière en particulier. Cette situation pourrait aussi constituer une limitation à la compréhension et l'adoption de nouvelles pratiques environnementales et socialement durables dans les systèmes de café à l'avenir, dans une situation où les jeunes générations se désintéressent progressivement de la production de café.

Sur les 334 personnes interrogées, 31,1% étaient des femmes et 69,9% des hommes. Cette proportion de femmes chefs de ménage est élevée. En effet, au Burundi une femme ne devient chef de ménage qu'après le décès de son mari ou en cas d'incapacité avérée de l'homme à gérer sa famille.

Le niveau d'éducation influence le comportement des agriculteurs. Le système éducatif national au Burundi est structuré sur un modèle 9-3-3 : neuf années d'éducation de base (niveau dit fondamental), trois années d'études secondaires (niveau dit post-fondamental) et un programme de premier cycle universitaire de trois ans aboutissant au baccalauréat. Ce modèle a été introduit au cours de l'année scolaire 2013-2014. Ceux qui ne parviennent pas à passer le niveau

fondamental suivent une formation professionnelle qui leur permet de s'intégrer dans la vie socioprofessionnelle. Le tableau 3 montre les niveaux de formation des personnes interrogées.

Tableau 3 : Niveaux de formation des chefs de ménage

Niveau de formation	Nombre	Pourcentage (%)
Sans formation à l'école	80	24.0
Alphabétisation	70	21.0
Niveau primaire	161	48.2
Niveau fondamental	17	5.1
Artisanat	3	0.9
Niveau post-fondamental	3	0.9
Total	334	100.0

On constate que le niveau de formation est très bas pour les producteurs de café de la zone investiguée. Presque tous les agriculteurs (99,1%) ont le niveau inférieur ou au plus égal au primaire. On peut raisonnablement penser que les services de vulgarisation et les autres acteurs chargés du transfert de l'innovation dans les zones rurales devront déployer de gros efforts pour faire passer leurs messages.

Cette étude a été menée essentiellement auprès des exploitants propriétaires de parcelles de café. Etant donné qu'un agriculteur peut posséder plus d'une parcelle de café, 874 parcelles de café ont été enregistrées au total. En moyenne, chaque agriculteur possède 2,8 parcelles de café contre 1,7 au niveau national (ISTEEBU, 2021). Pas mal d'agriculteurs en possèdent trois (24,6%) ou quatre (12%). Certains autres possèdent plus de 4 parcelles et quelques-uns peuvent même aller jusqu'à 15 parcelles. Le nombre moyen de pieds de caféiers trouvé est de 372,5 par exploitant sur une superficie moyenne de 2309,9 m^2. La superficie moyenne par caféiculteur est élevée dans notre zone par comparaison au niveau national où elle n'est que de 980 m^2 (ISTEEBU, 2021).

2.3.2. Conduite des exploitations caféicoles

Le caféier est un arbre qui exige du soin pour pouvoir produire correctement. Les autorités, dès l'introduction du café au Burundi, ont vite rédigé un itinéraire technique que les moniteurs avaient l'obligation de faire respecter (Nyamoya et al., 1986). Cet itinéraire technique qui imposait la monoculture stricte a été revu et enrichi récemment en 2017 et inclut l'association avec des cultures annuelles pendant les premières années d'introduction du café ou de reprise après la taille de régénération (République du Burundi, 2017). De manière générale, le caféier

doit subir trois types de tailles : (i) la taille de régénération, (ii) la taille d'entretien, et (iii) la taille de production (République du Burundi, 2017). Il est aussi recommandé d'appliquer une dose de fertilisants minéraux (Gaie & Flémal, 1988). Dans le temps, il fallait obligatoirement pailler toute la surface de la caféière (Nibasumba, 2013). En réalité, il s'observe une réticence suite à la raréfaction de la matière à utiliser (feuilles et stipes de bananiers, résidus des cultures vivrières, graminées des prairies, etc.).

a. Taille

La taille de régénération, également appelée recépage, consiste en un remplacement des tiges verticales qui ne sont plus ou presque productives par suite de l'âge. Elle se fait généralement après 7 à 8 ans de production (Gaie & Flémal, 1988). En effet, lorsque les arbres ont atteint un certain âge, ce ne sont que quelques rameaux d'en haut qui produisent, rendant très difficile la récolte, car l'arbre doit être tiré vers le bas. Certaines tiges se cassent lors de cette opération. Dans ce cas, la seule solution qui reste c'est de couper l'arbre, à moins que l'on ait abandonné la culture. Sur les 334 enquêtés, 13 (environ 4%) ont déclaré qu'ils ne font aucun entretien aux caféiers, ce qui est synonyme d'abandon. L'enquête a révélé que seulement 36% des exploitants ayant affirmé entretenir leurs caféières pratiquent la taille de régénération (Figure 6). La technique de la régénération en deux étapes avait été rendu obligatoire (Gaie & Flémal, 1988). Elle fut abandonnée, coupant les trois tiges en un temps. Actuellement, elle a été reprise car il est conseillé de laisser une tige sur les trois, qu'on appelle tire sève. C'est généralement celle qui s'écarte le plus de la verticale de la souche et qui laisse tout de même l'espérance d'une petite récolte (République du Burundi, 2017).

La taille de production consiste à élaguer les branches mortes, trop touffues ou trop longues en vue de rééquilibrer le rapport feuilles/fruits. Il est conseillé de la faire une fois par an, après la récolte principale. Quant à la taille d'entretien (également appelée égourmandage), elle consiste à couper tous les gourmands ainsi que les tiges secondaires et tertiaires excessives. Les gourmands poussent la plante à consommer les éléments nutritifs pour la formation du bois et non des cerises, partie qui intéresse les caféiculteurs. Il est conseillé de faire l'égourmandage chaque mois (République du Burundi, 2017). L'enquête a révélé que seulement 32% des exploitants ayant affirmé entretenir leurs caféières pratiquent la taille de production (Figure 6).

Ces résultats concordent avec l'observation des plantations caféicoles de la zone. On constate qu'aucune de ces tailles n'est correctement faite. En effet, l'égourmandage est fait

accessoirement lors des opérations de récolte. Il y a même des exploitants qui laissent grandir les gourmands car ils en espèrent une certaine récolte. Les caféiers exhibent aussi beaucoup de rameaux secondaires et tertiaires excessives, signe d'absence de taille de production.

b. Unicaulie ou multicaulie ?

La technique unicaule consiste à ne garder qu'une seule tige orthotrope qui est graduellement étêtée pour permettre le développement de binômes orthotropes portant des rameaux plagiotropes producteurs. Dans le cas contraire, on exploite plusieurs tiges. Dès la reprise des plants, on pratique l'arcure lorsque le plant a déjà 5 ou 6 feuilles (Mangal, 2007) ou bien, après la taille de régénération, on sélectionne un certain nombre de tiges les plus vigoureuses que l'on laisse grandir. Au Burundi, chaque fois que possible, le caféier a toujours été conduit en tricaulie. Cette pratique reste actuellement recommandée (République du Burundi, 2017). C'est également ce qui s'observe dans toutes les caféières de la zone d'étude. Il est aussi courant d'avoir 4 tiges par souche, l'exploitant n'ayant pas le courage de couper une tige qu'il juge productrice. Pendant la récolte des données, nous avons pu observer un exploitant modèle à Mparamirundi qui avait commencé à expérimenter la technique de binômes orthotropes, mais qu'il a vite laissée au profit de la conduite en tricaulie.

c. Fertilisation

Comme toute autre culture, le caféier prélève au sol des éléments nutritifs pour sa croissance et sa production. Il importe donc de les apporter, ne fut-ce que pour combler les exportations prélevées lors de la récolte ainsi que lors de la taille de régénération. Des essais de fertilisation minérale du caféier ont été menés au Burundi. Il a été retenu d'appliquer uniquement l'urée. L'ISABU a proposé la dose de 50 g d'urée par caféier (Nibasumba, 2013), alors que les recherches avaient proposé des doses supérieures allant de 75 à 132 g d'urée par caféier (Gaie & Flémal, 1988). En considérant les pertes de fertilité au fil du temps qui sont par ailleurs visibles sur les cartes de fertilité du sol (MINEAGRIE, 2022), il est utile de recommander que la formule de fertilisation du caféier soit réajustée aux conditions réelles du Burundi, en pensant à une formule complète NPK qui soit bien évidemment économiquement rentable. Il est difficile de penser à une fertilisation organique, tant la concurrence tire la balance du côté des autres cultures, essentiellement vivrières. L'enquête a révélé que seulement 30% des exploitants ayant affirmé entretenir leurs caféières y appliquent des engrais (Figure 6).

d. Paillage

En plus de protéger le sol contre l'érosion et les pertes en eau par évaporation, le paillis apporte également une certaine quantité d'éléments nutritifs au sol. Les quantités proposées sont énormes : 20 à 25 tonnes de matières sèches par ha et par an ou bien garder une épaisseur de 10 à 12 cm, alors que les difficultés d'approvisionnement en paillis avaient déjà été qualifiées d'omniprésentes au Burundi (Gaie & Flémal, 1988). Cette diminution du matériel de paillage serait due à la diminution régulière de la taille moyenne des exploitations (divisions successorales), à l'accroissement du rapport surface à pailler/surface productrice de paillis, à la diminution de rendement des cultures vivrières (la quantité de résidus s'en ressent également) et à la diminution ou quasi disparition des surfaces en herbe à l'intérieur des exploitations agricoles (diminution de taille, mise en culture des derniers pâturages) ou à l'extérieur (reboisement massifs, distribution de certaines terres "communale" et mise en culture) (Cochet & Ndarishikanye, 2000).

C'est ainsi que la recherche a pensé à des solutions alternatives comme : (i) la couverture partielle du sol de la caféière par *Leucaena leucocephala* ou *Desmodium intortum*, (ii) paillage d'un interligne sur deux en alternant chaque année les apports de paillis (Gaie & Flémal, 1988). Même si l'enquête a révélé que 71% des exploitants (Figure 6) ayant affirmé entretenir leurs caféières appliquent du paillis, l'observation de ces dernières montre que le paillage n'est pas correctement fait. Ces réponses porteraient toujours le stigmate de la coercition qui caractérisait la caféiculture. On continue à observer des caféières (même jeunes) à Mparamirundi (Ngozi) qui continuent d'être paillées à la traditionnelle, c'est-à-dire sur toute la surface avec *Hyparrhenia sp*. (Figure 5). Les habitants de Mparamirundi apprécient très bien la caféiculture. Nous avons pu identifier trois caféiculteurs modèles. Ils pourraient être une source d'inspiration pour le reste de la population.

e. Lutte contre les maladies et ravageurs

Les maladies et ravageurs sont responsables des pertes de la production chez le caféier ou de la dépréciation de sa qualité. Au Burundi, les campagnes de désinsectisation contre la punaise du caféier sont conduites afin de maintenir ses populations à un niveau aussi faible que possible (Gaie & Flémal, 1988). L'enquête a révélé que seulement 34% des exploitants ayant affirmé entretenir leurs caféières font la lutte phytosanitaire (Figure 6).



Figure 5 : Jeune caféière bien paillée avec Hyparrhenia sp. à Mparamirundi

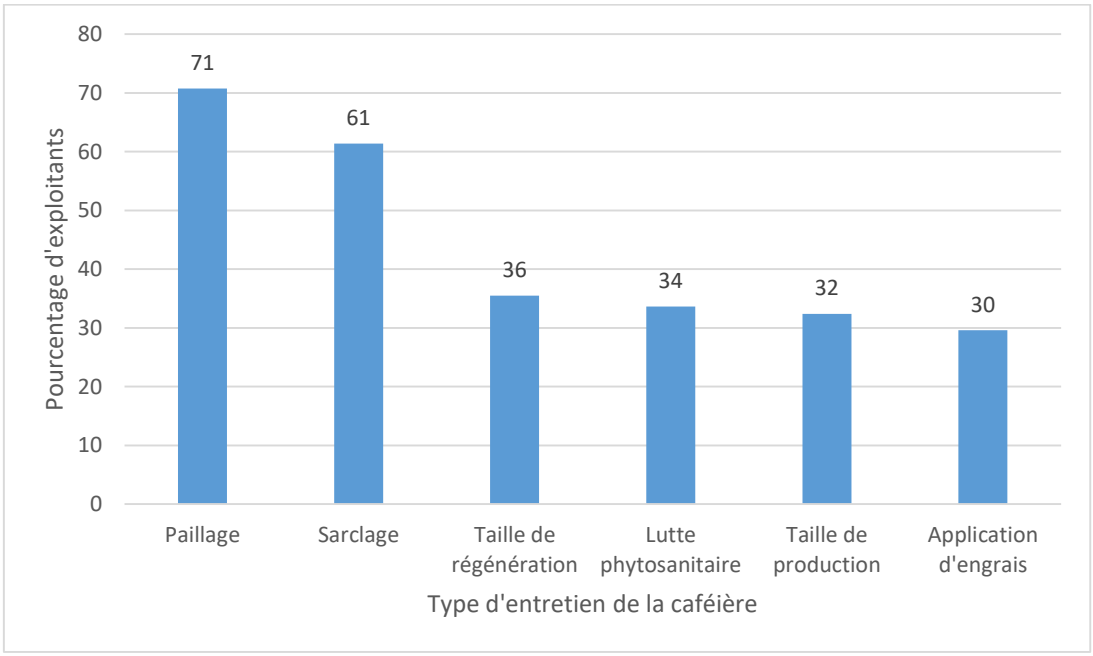


Figure 6 : Pourcentages d'exploitants et les types d'entretien qu'ils font dans leurs caféières

2.3.3. Le système agroforestier dans les caféiers et perceptions des caféiculteurs

Ce travail a ciblé les exploitants qui possèdent du caféier. Sur le total de 874 champs de caféiers enregistrés chez les 324 exploitants enquêtés, on a pu trouver un ou plusieurs arbres d'ombrage dans 610 caféières représentant 69,8%.

a. Arbres d'ombrage et cultures intercalaires des caféières

L'enquête a permis d'établir la liste des espèces d'arbres dans les caféières (Tableau 4). Le bananier a été considéré exprès comme « arbre » d'ombrage parce qu'exerçant un certain ombrage aux caféiers. La variété locale de bananier appelée « Sohoka unture », de par ses qualités de croissance en hauteur avec des feuilles érigées, convient en association avec le caféier (Kwizera, 2020). Les exploitants donnaient le nom de l'arbre en Kirundi que les enquêteurs transcrivaient avec le nom scientifique. Ceci était facile d'autant plus que les visites antérieures de terrain avaient permis d'avoir une idée des espèces d'arbres d'ombrage présents. Quatre espèces d'arbres sont présentes dans plus de 10% des caféières. Il s'agit de : *Musa sp.* (63,5%), *Grevillea robusta* (62%), *Ficus sp.* (14,6%), et *Persea americana* (13,9%). Les autres sont dispersés dans les caféiers. Il s'agit de : *Maesopsis eminii*, *Calliandra calothyrsus*, *Markhamia lutea, Cedrela toona, Cordia africana, Leucaena diversifolia*, *Tephrosia vogelii, Polyscias fulva, Albizzia gummifera, Entandrophragma excelsum*, et même *Eucalyptus sp*. *Tephrosia vogelii* est un arbuste qui était en promotion dans la région pour ses nombreuses vertus dans la lutte contre les maladies et ravageurs du caféier, et se retrouve dans pas mal de caféières (0,5%). Il a cependant été retiré des éléments qui doivent être utilisés dans les produits à vertus phytosanitaires, du fait qu'il a un large spectre d'action.

Tableau 4 : Arbres d'ombrage des champs de caféiers

Espèce d'arbre d'ombrage	Nom vernaculaire	Champs de caféiers où l'arbre est présent (%)
Musa sp.	Igitoke	63,6
Grevillea robusta	Igereveriyo	62,1
Ficus sp.	Ikivumu	14,6
Persea americana	Ivoka	13,9
Maesopsis eminii	Umuhumure	6,7
Calliandra calothyrsus	Ikaliyandara	6,6
Markhamia lutea	Umusave	4,3
Cedrella toona	Isederera	3
Cordia africana	Umuvugangoma	0,7

Espèce d'arbre d'ombrage	Nom vernaculaire	Champs de caféiers où l'arbre est présent (%)
Leucaena leucocephala	Ilesena	0,5
Tephrosia vogelii	Ntiruhunwa	0,5
Polyscias fulva	Umwungo	0,3
Albizia gummifera	Umusebeyi	0,3
Entandrophragma excelsum	Umuyove	0,2
Eucalyptus sp.	Umukaratusi	0,2

Par souci de sécurité alimentaire, les agriculteurs laissent volontiers des bananiers (*Musa sp*.) dans leurs parcelles de café, ainsi que des avocatiers (*Persea americana*). Les bananes sont consommées sous forme de vin de banane, comme dessert ou cuites. Tous ces types sont vendus sur le marché. Les bananes constituent donc une source importante de revenu familial. Les feuilles âgées ainsi que les pseudo-troncs des bananiers sont utilisés comme paillis dans les parcelles de café (transfert latéral de fertilité). Cet aspect de recyclage est très important en agroforesterie.

Grevillea robusta est présent dans de nombreuses exploitations agricoles car cet arbre est diffusé depuis longtemps par les services forestiers (Besse et al., 1991). Outre l'usage du bois, ses branches servent également de tuteurs aux cultures. C'est probablement la raison pour laquelle de nombreux arbres de *Grevillea robusta* sont ébranchés jusqu'au sommet.

Les fruits de l'avocat (*Persea americana*) sont largement consommés par la population, ce qui constitue une des solutions à la malnutrition car apportant de bonnes graisses (Ngbolua et al., 2019).

Ficus sp. est un arbre autochtone. Dans la zone d'étude, deux espèces, *Ficus thonningii* et *Ficus ovata* sont rencontrées. *Ficus sp*. a plusieurs utilisations. Durant la saison sèche, il sert dans l'alimentation des petits ruminants qui n'ont plus où brouter, les pâturages ayant séché. Les caféiers sous *Ficus thonningii* restent verts pendant la saison sèche. Culturellement, l'espèce *F. thonningii* était utilisée dans la confection de vêtements traditionnels.

Certaines cultures vivrières sont délibérément laissées dans les parcelles de café. Au total, 112 parcelles de café, soit 12,8% ont une ou plusieurs cultures associées. Les cinq premières cultures intercalaires principales (Figure 7) selon le nombre de parcelles dans lesquelles elles ont été observées sont le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) que l'on retrouve dans 67% des parcelles ayant des cultures associées, la colocase (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) dans 17%,

le maïs (*Zea mays* L.) dans 15,2%, la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) dans 9,8% et le manioc (*Manihot esculenta* Crantz) dans 8% (Figure 7). Les autres cultures sont la courge (*Cucurbita sp*.) et l'aubergine (*Solanum aethiopicum* L.).

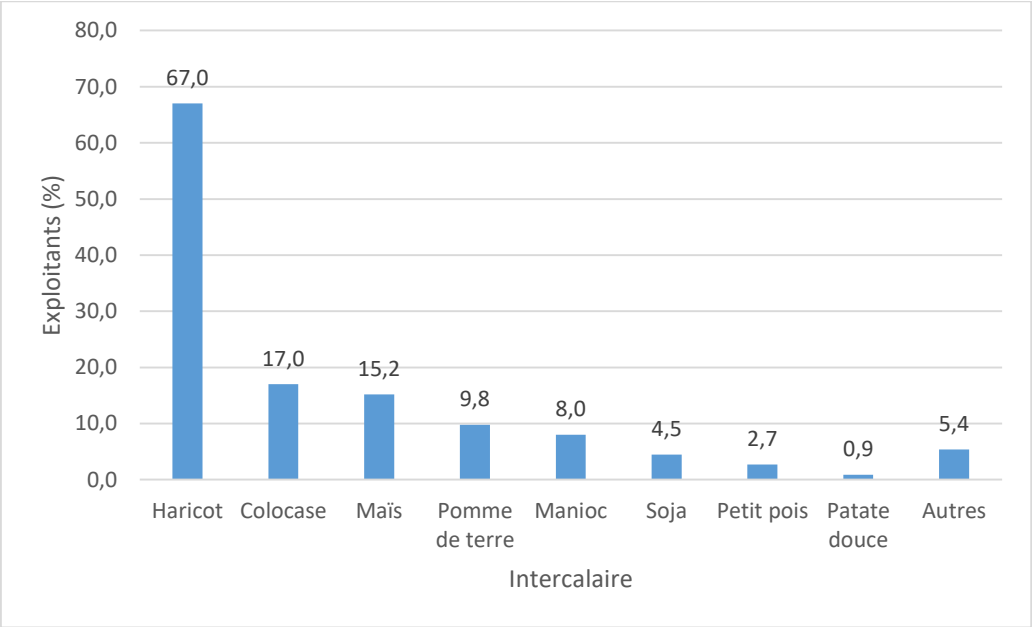


Figure 7 : Cultures intercalaires associées au café

La principale raison pour laquelle les agriculteurs conservent certaines cultures sur leurs parcelles de café serait la sécurité alimentaire. Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) est le plat le plus préféré des Burundais. Il fait toujours partie du menu. Il est servi avec de la banane (*Musa sp*.), de la colocase (*Colocasia esculenta* (L.) Schott), de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) ou du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en fonction de la culture en production pendant la saison. Le haricot est une légumineuse fixatrice d'azote fréquemment intégrée aux caféiers. Parmi toutes les céréales cultivées au Burundi, le maïs (*Zea mays* L.) occupe la première place. Il se consomme sous forme d'épis entiers rôtis ou cuits, sous forme de grains cuits souvent ensemble avec du haricot (plat appelé « Intete ») ou encore sous forme de pâte. Il peut également être consommé sous forme de bouillie. Des études intégrant le haricot et d'autres cultures vivrières dans des parcelles de café ont déjà été menées dans la région de l'EAC. Au Rwanda, par exemple, une étude a montré que le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et le soja (*Glycine max* L.) étaient les plantes les plus cultivées en association avec le café (Harelimana et al., 2018). Une expérience au Kenya a conclu que les rendements du café n'étaient pas affectés de manière significative par les rangées de haricot (Mwakha & Ngugi, 1990), tandis qu'une autre expérience au Kenya sur de jeunes caféiers a conclu que plusieurs cultures vivrières

peuvent être avantageusement intercalées avec le caféier (Njoroge & Kimemia, 1995). Cependant, cette étude a exclu la patate douce et le maïs qui avaient des effets néfastes (Njoroge et al., 1993).

b. Avantages des arbres d'ombrage du caféier sur le sol

Pour les agriculteurs, les arbres d'ombrage offrent plusieurs avantages aux caféiers. La figure 8 donne les principaux avantages de l'association arbres et café reconnus par les enquêtés (les catégories de réponses étaient prédéfinies) :

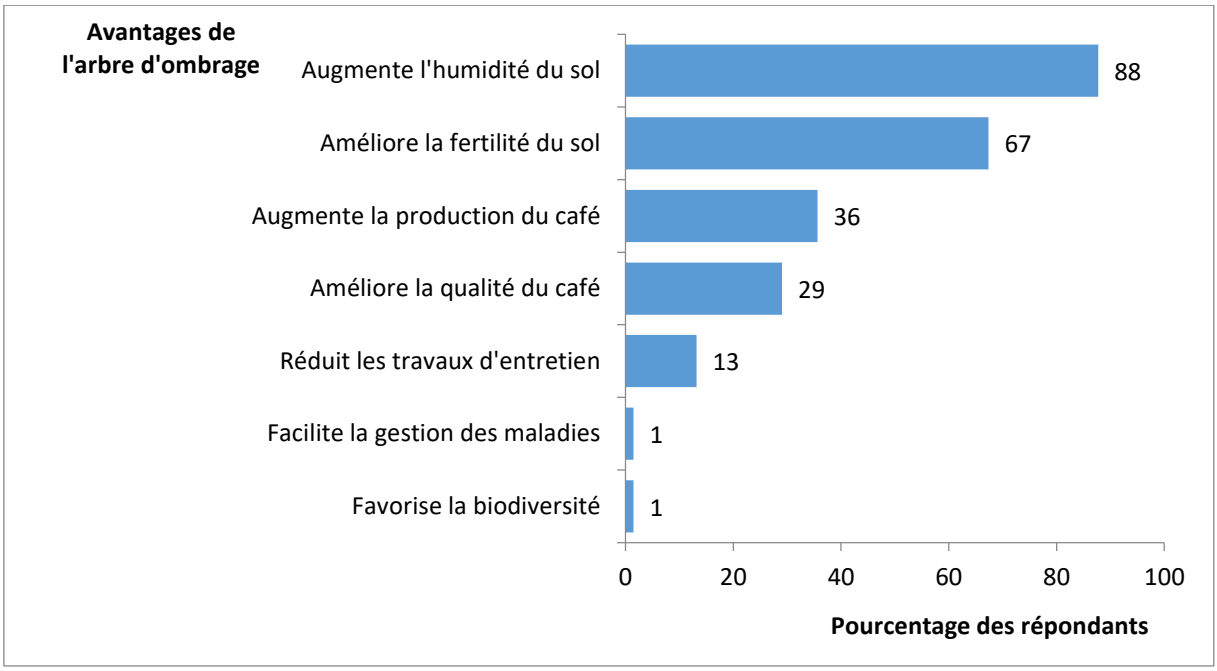


Figure 8 : Avantages des arbres d'ombrage au caféier reconnus par les exploitants

La figure 8 montre que les avantages liés aux conditions du sol, tels que l'augmentation de l'humidité du sol ainsi que l'amélioration de la fertilité du sol sont bien reconnus par les enquêtés. Par contre, les avis en rapport avec les effets des arbres d'ombrage sur l'augmentation de la production de café ainsi que sur l'amélioration de la qualité du café sont mitigés. Certains enquêtés acceptent que la présence d'arbres d'ombrage réduit le travail d'entretien des caféières, notamment dans la gestion des mauvaises herbes. Parmi les avantages possibles de l'association d'arbres d'ombrage avec les cultures pérennes figure la suppression de la croissance des mauvaises herbes (Beer, 1987). Ceci est en cohérence avec les résultats de recherches menées au Costa Rica, où les agriculteurs ont clairement indiqué l'effet des arbres d'ombrage sur la réduction de la pression des mauvaises herbes (Cerdán et al., 2012).

Les agriculteurs font preuve d'une profonde compréhension de la contribution des arbres d'ombrage à la fertilité des sols. Les feuilles qui tombent des arbres contribuent à améliorer la fertilité des sols dans les parcelles de café, car elles se décomposent sur place. Les feuilles mortes contribuent également à réduire les pertes par évaporation du sol qu'elles recouvrent. Le sol reste plus humide. L'effet est plus remarquable sous *Ficus sp*. pour lequel les interviewés affirment qu'« *il arrose les caféiers* ».

Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Lin (2010) qui concluait, dans son étude, que la couverture ombragée crée un microclimat qui favorise la réduction de la demande évaporative du système, et le maintien de l'eau du sol disponible pour les plantes. La litière et sa décomposition sont visibles dans les parcelles. Cela explique probablement pourquoi le rôle des arbres d'ombrage dans l'amélioration de la fertilité des sols est reconnu. Au Mexique, Grossman (2003) affirmait que cette compréhension par la population est probablement due à leur capacité à voir le processus de décomposition en action au fil du temps, par opposition à d'autres processus qui ne peuvent pas être observés à l'œil nu.

c. Avantages des arbres d'ombrage du caféier pour ce qui est de la qualité du café

Dès leur arrivée aux stations de lavage du café, la première évaluation de la qualité des cerises se fait par flottaison et par la couleur des cerises. Le café de meilleure qualité est celui qui est uniformément mûr et qui ne flotte pas sur l'eau. Ces cerises sont séparées des autres et produisent du café de « grade A ».

En principe, un tel café est produit sur des parcelles très fertiles et protégées contre les maladies et les ravageurs. Les personnes interrogées affirment que grâce aux meilleures conditions d'eau et de fertilité sous les arbres d'ombrage, le caféier est toujours vert. Les caféiers sous ombrage produisent chaque année, malgré la cyclicité, conduisant ainsi à une production durable. C'est probablement la raison pour laquelle nous avons observé qu'il est plus difficile pour les agriculteurs de procéder à la taille de régénération des caféiers situés sous les arbres d'ombrage. Cela concorde avec Wintgens (2004) pour qui les plants de café ombragés ont tendance à être plus grands, plus vigoureux et à avoir une rétention de feuilles plus élevée tout au long de l'année que les plants peu ou pas ombragés.

Selon une proportion importante d'agriculteurs (29%), le café mûrit mieux sous ombrage qu'en plein soleil. Ils affirment que le café produit sous ombrage pèse lourd, donne des cerises plus grosses avec beaucoup de mucilage. Les personnes interrogées ont également déclaré que les

cerises deviennent uniformément rouges et que leur qualité est améliorée sous ombrage. Ceci est conforme aux résultats d'une étude menée au Costa Rica qui a conclu à cinq principaux avantages de l'ombrage en termes de qualité : (i) un poids plus élevé de fruits frais, (ii) des fèves plus grosses, (iii) une cotation plus élevée à l'apparence visuelle des fruits verts et les fèves torréfiés, (iv) des notes plus élevées pour l'acidité, et (v) l'absence de saveurs désagréables (Muschler, 2001).

Comme pour les aspects liés au sol, les agriculteurs mentionnent des aspects visibles de la qualité, comme la taille des cerises et les cerises qui ne flottent pas dans l'eau. Ces paramètres sont vérifiés aux stations de lavage, et ils conduisent à l'acceptation ou au refus de la production de café. Ces résultats vont dans le même sens que des recherches menées au Hawaï qui ont montré que l'ombrage produit des fèves plus grosses mais n'a aucun impact sur la qualité organoleptique (Steiman et al., 2011), tandis qu'en Éthiopie, Bote & Struik (2011) ont trouvé des avantages à la fois sur le rendement et la qualité des fèves. A notre connaissance, de telles recherches n'ont pas encore été réalisées au Burundi.

2.3.4. Le processus de certification

Au Burundi le mouvement de l'agriculture biologique a émergé au cours des dix dernières années dans le contexte de la dynamique d'intégration économique de l'Afrique de l'Est, qui a l'ambition de devenir le marché le plus intégré du monde au cours des prochaines années.

Avec la privatisation du secteur café en 2009, certains caféiculteurs se sont regroupés en associations. Ils ont commencé à mettre ensemble de l'argent pour se construire des stations de lavage de café. Ils ont ainsi par la suite formé autour d'elles des coopératives. En 2012, 92 coopératives étaient agréées à travers tout le pays mais onze d'entre elles avaient pu construire leurs stations de lavage. Au cours de la campagne café 2012-2013, ces onze coopératives de caféiculteurs possédant déjà leurs stations de lavage se sont regroupées dans le consortium des coopératives de caféiculteurs (COCOCA) qui, plus tard deviendra l'union des coopératives des caféiculteurs (COCOCA). Avant 2013, la certification du café au Burundi était encore presque inconnue. Une seule station de lavage de la Sogestal Kirundo-Muyinga était certifiée UTZ (Sahinguvu, 2013). C'est en mars 2013 que trois des onze coopératives membres de COCOCA ont obtenu leur certificat UTZ.

Actuellement, avec 39 coopératives membres du COCOCA et environ 30 000 membres, l'union travaille sur la qualité du café et, en attendant l'obtention du certificat bio pour lequel elle est

très active dans l'encadrement des caféiculteurs, elle promeut le café certifié principalement sous le label de commerce « équitable » (Fairtrade) et de commerce « responsable » (UTZ), le café de spécialité ou le Café des Femmes (un café spécifique produit par des femmes membres) (Morgane, 2019). Ce café procure aux exploitants un revenu supplémentaire.

Ce revenu supplémentaire semble être un important encouragement à rester dans le processus d'obtention du certificat. Il est cité par la majorité des exploitants enquêtés (56%) comme la principale raison de continuer le processus (Figure 9). L'autre raison avancée est que, dès que les conditions d'obtention du certificat sont réunies, les conditions de production du café de qualité supérieure sont également réunies. Il convient de signaler que certains exploitants ont avancé d'autres raisons comme par exemple : le café qui reste vert même pendant la saison sèche (8,3%), d'autres exploitants (7,1%) sont en train d'essayer pour voir si le processus est concluant, tandis que seulement 2,4% ont évoqué qu'il y a des avantages sans arriver à les spécifier. Il y en a d'autres (2,4%) qui sont au bord de la réticence et qui affirment qu'ils n'ont aucune idée s'ils vont continuer ou abandonner le processus.

Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Van der Vossen (2005) qui affirme que les producteurs de café organique sont principalement motivés par les primes qu'ils reçoivent à la vente du café certifié organique. La population enquêtée affirme que la vente du café certifié procure un revenu supplémentaire variant entre 150 Fbu et 200 Fbu/kg de cerise vendu, soit 40% de plus que le prix normal. En 2001, des primes semblables de 40% avaient aussi été attribuées aux agriculteurs mexicains (Tejeda-Cruz et al., 2010). Dans le contexte burundais, cet encouragement reste minime si l'on considère les exigences du processus de certification. Ce constat d'insuffisance de la prime accordée avait été aussi relevé ailleurs par Van der Vossen (2005).

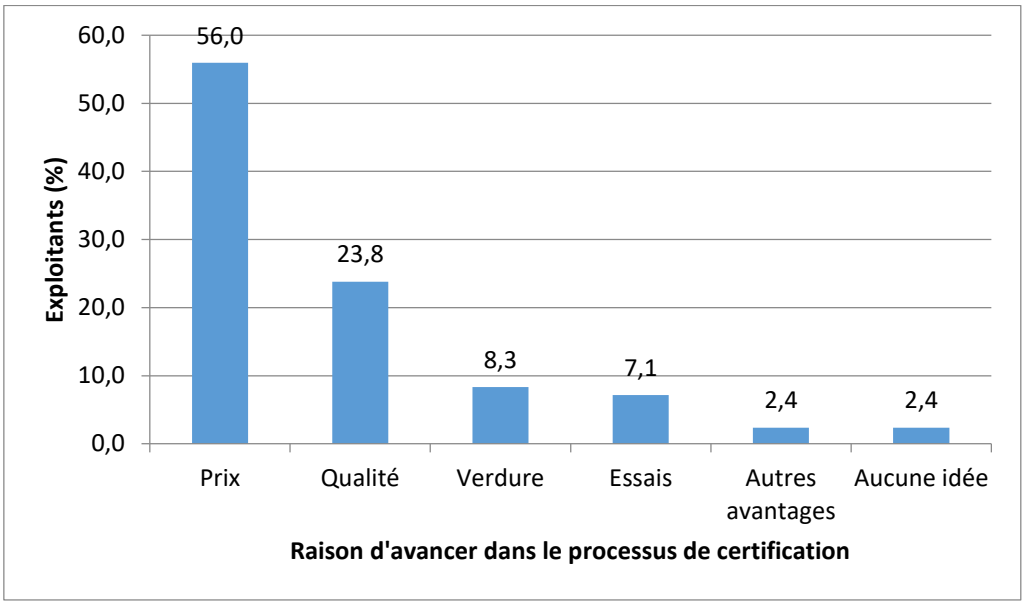


Figure 9 : Principales raisons qui poussent les caféiculteurs à avancer dans le processus de certification

2.3.5. Principaux problèmes rencontrés par les caféiculteurs

Comme tous les agriculteurs burundais, les caféiculteurs burundais font également face à plusieurs contraintes. Les problèmes communs (Figure 10) sont entre autres ceux liés à l'exiguïté des terres et des conditions de pauvreté de manière générale, surtout que le Burundi a connu plusieurs crises ayant produit des réfugiés et des déplacés intérieurs. Or, l'exposition à de tels chocs façonne la dynamique de la pauvreté des ménages et réduit leurs chances de rester durablement hors de la pauvreté (Mercier et al., 2020).

Il existe des problèmes qui sont spécifiques à la caféiculture et qui reviennent à toutes les prises de parole par les caféiculteurs burundais. Le premier à être cité concerne le prix au producteur. Sur les 334 personnes enquêtés, 326 (soit 97,6%) affirment que ce prix est trop bas (Figure 10). 225 enquêtés (67,3%) affirment que la main-d'œuvre coûte cher, tandis que 200 enquêtés (59,9%) affirment que les intrants agricoles dans leur ensemble (plants, engrais et fumure organique, produits phytosanitaires, équipements de taille, etc.) sont difficiles à trouver et coûtent aussi cher. D'autres problèmes ont également été relevés mais par un nombre relativement peu élevé : un encadrement insuffisant ou inexistant (6,2%), des problèmes liés aux conditions d'accueil aux usines de lavage du café (4%), les exigences du processus de certification (2,7%), l'inexistence des marchés d'écoulement (2%) ainsi que les exigences imposées par les coopératives (1,8%).

La question du prix au producteur est très épineuse. Une étude pour le Burundi avait recommandé entre autres (i) de revoir la manière dont ce prix est fixé tout en veillant à ce que tous les maillons de la chaine soient correctement rémunérés mais aussi (ii) d'appuyer la production afin d'augmenter l'attractivité de la culture du café pour les producteurs dès lors que le prix producteur est aligné au fonctionnement efficient du marché (Ciza et al., 2016).

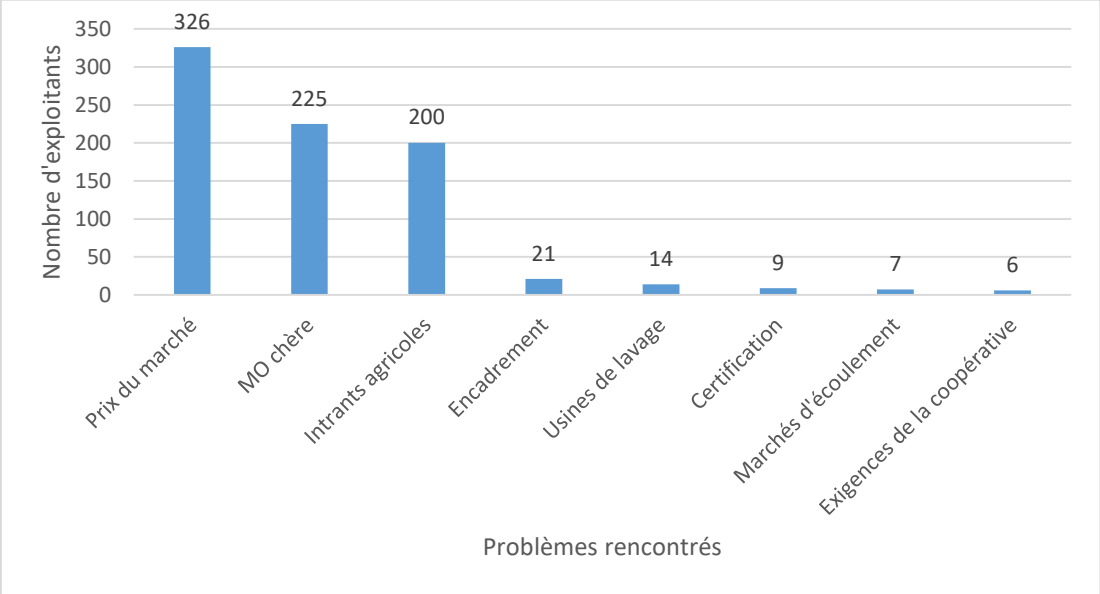


Figure 10 : Principaux problèmes rencontrés par les caféiculteurs

2.4. Conclusion partielle

La zone des plateaux centraux est densément peuplée et vient en premier lieu pour la caféiculture. Une enquête a été conduite auprès des ménages de cette région. Il a été constaté que les exploitants possèdent en moyenne 372,5 plants sur une superficie moyenne de 2 309,9 m^2, soit une densité équivalente de 1 600 plants/ha. Les exploitations de café sont associées aux arbres d'ombrage. Il existe toute une variété d'arbres. Trois essences sont présentes dans plus de 10% des caféiers de la région. Il s'agit de *Grevillea robusta*, *Ficus sp.*, et *Persea americana*. Le bananier devance toutes ces espèces. Certaines variétés de bananier produisent un ombrage suffisant, qui peut être comparé à celui de certaines espèces d'arbres. Cet effet s'intensifie si les caféiers sont encore en bas âge.

Les exploitants essaient de cultiver le café tant bien que mal, malgré l'existence de nombreuses contraintes, et une rémunération qu'ils considèrent toujours comme insuffisante. Leur regroupement en associations, puis en unions à l'instar du COCOCA crée des conditions

favorables pour l'obtention des certificats pouvant procurer des primes aux producteurs après la vente de café certifié.

Ce chapitre a identifié les essences d'arbres qui dominent l'ombrage des caféiers dans la zone des plateaux centraux. C'est sur ces dernières que vont se poursuivre les études sur leurs effets par rapport au sol, à l'eau du sol, à la transmission de la lumière ainsi qu'au rendement du café. Le chapitre suivant va analyser l'effet de ces arbres sur les conditions de fertilité ainsi que les conditions d'humidité dans les caféières.

Chapitre 3. Les arbres d'ombrage du caféier améliorent la fertilité et les conditions hydriques du sol

3.1. Introduction

De manière générale, un bon sol pour le choix d'un site pour l'installation de *Coffea arabica* devrait remplir les principaux facteurs suivants : une pente inférieure à 100%, une teneur en argile + limons supérieure à 30%, un bon drainage et l'absence de couche dure (latérite, roche) avant 2 m, une teneur en matière organique supérieure à 5%, une CEC supérieure à 10 méq/100 g de sol, une teneur en phosphore supérieure à 20 ppm, un pH eau compris entre 5,5 et 6,5 ainsi que des teneurs en Fe, Mn et Al n'excédant pas les seuils de toxicité (Wintgens, 2004).

Au niveau mondial, on assiste à une dégradation des terres agricoles. Ces dernières perdent progressivement de leur fertilité par suite de l'érosion et de la surexploitation (Sileshi et al., 2014). Le même problème se pose au Burundi mais avec un peu plus d'acuité dans un contexte de faible protection des terres et d'une sous-fertilisation des cultures. Les cartes de fertilité du sol du Burundi réalisées en 2021 montrent des déficiences en éléments nutritifs dans le sol burundais (MINEAGRIE, 2022).

La pratique de l'ombrage se remarque de plus en plus en Agroforesterie dans les caféiers au Burundi. Le chapitre précédent a relevé les arbres qui sont les plus présents dans les plantations de caféiers. On peut très raisonnablement penser que les exploitants ne les laissent pas dans leurs champs pour rien, surtout qu'il n'y a pas d'obligation de le faire. Les avantages qui ont été cités dans le chapitre précédent sont donc une réalité, surtout qu'il y avait dans le temps une interdiction d'associer quoi que ce soit aux caféiers.

Les chapitres précédents ont soulevé des contraintes qui produisent un désintéressement visible des agriculteurs (surtout les jeunes) vis-à-vis de la caféiculture. L'une des solutions pourrait être de conduire le caféier avec d'autres arbres (fruitiers ou non) ainsi que des cultures vivrières en intercalaire. En outre, l'intégration des arbres dans les caféiers constitue l'une des conditions préalables à l'obtention d'un café certifié, et donc d'un prix meilleur et incitatif.

La communauté scientifique dans son ensemble reconnait plusieurs avantages aux arbres d'ombrage du caféier. Une liste des avantages a été établie par Beer (1987). Dans ce chapitre,

l'accent est mis sur les avantages des arbres d'ombrage sur la fertilité du sol, ainsi que sur ses conditions hydriques.

Les conditions hydriques du sol des caféières sont fonction du microclimat qui y règne. Il a été observé que les arbres d'ombrage affectent plus les fluctuations des conditions du microclimat que les valeurs moyennes mesurées (Lin, 2010). L'ombrage des caféiers possède un important potentiel de réduction de l'évaporation du sol, de la transpiration des caféiers, ainsi que du maintien d'un niveau élevé d'humidité du sol (Lin, 2010).

La plupart des travaux sur le microclimat des cafés d'ombrage ont été effectué ailleurs : par exemple au Brésil (de Carvalho et al., 2021), au Pérou (Ehrenbergerová et al., 2016), au Cambodge (Ehrenbergerová et al., 2021) ou encore au Mexique (Lin, 2010) dans des conditions climatiques qui diffèrent de celles du Burundi et avec d'autres espèces d'arbres. A notre connaissance, exception faite du *Ficus thonningii* (Berhe et al., 2013), du *Markhamia lutea* (Habumugisha et al., 2019) et du *Persea americana* (Seid et al., 2024), il existe peu ou pas d'études impliquant les essences qui sont évaluées dans cette thèse.

L'agroforesterie constitue aussi une opportunité de maintien de la fertilité du sol surtout en cette période de changement climatique (Ehrenbergerová et al., 2021). En effet, en plus de la fixation biologique de l'azote par les légumineuses, les arbres contribuent à la fertilité du sol de par la litière morte qui se dépose sur le sol, mais également par les produits issus de la taille du caféier lui-même et de l'élagage des arbres lorsqu'ils sont laissés sur place. Cette matière organique apporte également des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin (Beer, 1988). Le recyclage des éléments nutritifs est un autre élément important attribué aux arbres d'ombrage. En effet, les racines des arbres agissent comme un filet de sécurité pour capter les nutriments lessivés de la couche arable et les restituer à la surface du sol par le biais de la litière (Sileshi et al., 2014).

Au Burundi, certaines essences comme par exemple *Ficus thonningii* gardent leurs feuilles durant la saison sèche ; elles sont utilisées dans l'alimentation animale en cette période où les pâturages sont secs. Aussi, les branches des arbres, surtout ceux de *Grevillea robusta* sont coupées et utilisées comme tuteurs, surtout pour le haricot volubile qui est actuellement le plus cultivé. Elles servent aussi comme bois de chauffage dans cette zone des plateaux centraux densément peuplée où les autres sources de bois deviennent rares. En outre, les arbres fruitiers produisent des fruits qui, une fois vendus, peuvent procurer un revenu qui peut être égal ou même supérieur à celui issu de la vente du café produit.

Les populations locales burundaises sont également conscientes des avantages procurés par les arbres d'ombrage. Ceux relatifs à l'augmentation de l'humidité dans la caféière et à l'amélioration de la fertilité du sol sont aussi cités (Ndihokubwayo et al., 2021). Il y a lieu de penser que ceci est beaucoup plus le résultat de la vulgarisation par les différents partenaires. En effet, il existe peu ou pas d'études spécifiques à cette pratique agroforestière en milieu réel burundais.

Au Burundi, l'utilisation de la matière organique pour améliorer la production agricole a été proposée, et la meilleure pratique est la combinaison des matières organiques et des engrais minéraux. La création de l'unique usine FOMI (Fertilisation Organo-Minérale) est un signe probant de l'engagement du Gouvernement du Burundi dans cette voie. Les recommandations d'usage au Burundi préconisent l'incorporation au sol d'au moins 10 tonnes de matière organique fraiche par ha. Ces matières organiques proviennent essentiellement des élevages ou des résidus des cultures, compostés ou non.

Or, il s'observe de plus en plus une réelle compétition pour les résidus des cultures entre la fertilisation des cultures et l'alimentation animale, spécialement en cette période où le Burundi a voté une loi obligeant la conduite de l'élevage des animaux en stabulation permanente. Ainsi, les quantités de résidus de cultures destinées aux caféières diminuent progressivement, observation par ailleurs déjà faite pour l'ensemble de la région tropicale (Palm et al., 2001).

Les arbres d'ombrage du caféier consituent une source alternative d'éléments nutritifs utile aux caféiers. Mais la qualité de la litière diffère d'une essence à une autre. En outre, peu d'études de ce genre ont été conduites au Burundi, sauf sur quelques légumineuses fixatrices d'azote (Kaboneka et al., 2021). Or, il n'est pas évident que les arbres qui ont été les plus vulgarisés en milieu rural burundais, comme par exemple *Grevillea robusta*, aient nécessairement la meilleure qualité de la litière produite. Cette étude constitue donc une contribution importante dans la connaissance de la qualité des litières des arbres agroforestiers au Burundi.

Cependant, comme le caféier est une culture pérenne et à cyclicité marquée (Wintgens, 2004), les effets de la litière sur cette culture sont difficiles à évaluer. Une culture annuelle, le soja (*Glycine max* L.), a été utilisée dans cette étude. Il a l'avantage d'être tolérant au stress hydrique. Cette culture, de grande importance mondiale, est aussi très importante pour le Burundi où le taux de malnutrition est élevé. En effet, le soja est composé d'environ 40% de protéines et de 20% d'huile. C'est un véritable producteur d'huile, loin devant les autres cultures oléagineuses

(Qiu & Chang, 2010). Sur le continent africain, l'Afrique du Sud est le plus grand producteur de soja (environ 1,5 millions de tonnes par an), au moment où le Burundi produit environ 2 500 tonnes par an (FAOSTAT, 2022).

Au moment où le soja est sensible à une forte acidité du sol, les sols du Burundi sont essentiellement acides. Or, Au Kenya, les faibles performances observées pour le soja ont été attribuées à la forte acidité qui aurait conduit à la fixation des éléments nutritifs, les rendant donc indisponibles pour la nutrition de la plante (Otieno et al., 2018). Pour de tels sols, il faut des amendements organiques car ils fournissent les éléments nutritifs nécessaires pour la nutrition des plantes et leur croissance, tout en contribuant à la détoxification en Al^{3+} et en Fe^{3+}, responsables de l'acidité des sols tropicaux (Hue, 1991). Ceci a été aussi observé dans un essai de soja où les meilleures performances de croissance et de rendement ont été obtenues pour le traitement de fumier de ferme (Mekki & Ahmed, 2005).

D'un côté, une litière de bonne qualité est celle qui contient et qui fournit à une culture donnée les éléments nutritifs dont elle a besoin, et au moment opportun. Ceci est très lié au taux de décomposition de la litière, lui-même dépendant de la composition chimique de cette litière et de l'environnement dans lequel se déroule le processus (Robertson & Paul, 2000). D'un autre côté, les analyses ont montré que les éléments nutritifs contenus dans les plantes se trouvent généralement dans une certaine fourchette et qu'il y a un mécanisme physiologique de contrôle de l'absorption, de telle sorte qu'il y existe des seuils au-delà desquels la croissance végétale est affectée (Vogt et al., 2015).

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer les effets des arbres d'ombrage du caféier sur le sol et son humidité, mais aussi d'évaluer la qualité des litières des arbres d'ombrage ainsi que la réponse du soja à leur application dans un essai en plein champ. Il est basé en partie sur les résultats publiés dans la revue Afrique Science (Ndihokubwayo et al., 2023).

3.2. Matériels et Méthodes

Tous les travaux ont été effectués dans la zone des plateaux centraux.

3.2.1. Choix des plantations de caféier et des arbres d'ombrage

Il a fallu parcourir toute la zone afin d'avoir une photo de l'organisation générale des caféiers sous ombrage. Il fallait décider quelles exploitations choisir. Le premier critère de choix était

l'appartenance à la coopérative membre de COCOCA de la localité. Cette activité a été rendue possible par la participation des cadres et des techniciens de COCOCA.

L'étude a retenu des exploitations familiales existantes des communes Giheta (province Gitega), Rutegama (province Muramvya) et Busiga (province Ngozi). Le site de l'essai sur le café d'ombre de l'ISABU à Kayanza a aussi fait objet de l'étude pour ce qui est de l'humidité du sol.

La population cible pour cette étude était constituée des exploitants membres de COCOCA, qui possèdent des caféiers avec des arbres d'ombrage. Trois coopératives ont été retenues : Mboneramiryango à Giheta, Nyarunazi à Rutegama et Ubwizabwikawa à Busiga.

Comme le travail avec des expoitations déjà existantes présente toute une diversité de situations, les critères suivants ont été retenus pour le choix des exploitations :

- La présence des arbres d'ombrage : la présence d'arbres d'ombrage (une ou plusieurs essences) constituait le premier critère de choix d'une plantation.
- L'âge de la caféière : des caféières jeunes ont été choisies. L'idée était d'avoir des plantations qui pouvaient continuer à produire pendant 2 ou 3 ans successifs sans devoir être recépées. De ce fait, les exploitations avec des plants ou tiges âgés entre 2 et 5 ans ont été sélectionnées.
- Une taille suffisante de l'exploitation permettant d'avoir d'un côté des caféiers entièrement sous ombrage, et d'un autre côté, des caféiers qu'on peut considérer comme n'étant pas sous l'influence des arbres (donc de plein soleil).
- L'homogénéité des pratiques de gestion de l'exploitation, comme par exemple la conduite du paillage.
- La pente : les exploitations sélectionnées avaient une pente comprise entre 0 et 20%. Dans ces conditions, les effets de la pente peuvent être considérés comme étant négligeables.
- La volonté de collaborer : il est très important de travailler avec des exploitants qui sont prêts à collaborer. Dans ces conditions, on est rassuré que toute activité qui sera faite dans l'exploitation sera communiquée, ce qui permet un bon suivi.

Au total, sept exploitations ont été retenues. Dans chaque exploitation, une ou plusieurs espèces d'arbres ont été retenues (Tableau 5). Ce sont les espèces d'arbres d'ombrage qui sont les plus fréquentes dans la région (présentes dans au moins 5% des exploitations enquêtées) ou bien qui

présentent un intérêt avoué par la population. Les échantillons de sols pour l'analyse de la fertilité chimique ont été prélevés dans les sept plantations retenues, c'est-à-dire sous les arbres d'ombrage qui s'y trouvent (2 *Albizia gummifera*, 1 *Markhamia lutea*, 2 *Grevillea robusta*, 1 *Persea americana*, 2 *Ficus thonningii*, 1 *Maesopsis eminii*). Quant à l'humidité du sol, l'échantillonnage s'est étendu à d'autres plantations de la zone de travail et de l'ISABU à Kayanza, de sorte que le travail s'est déroulé sous 6 *A. gummifera*, 4 *M. lutea*, 2 *G. robusta*, 3 *P. americana*, 3 *F. thonningii* et 6 *M. eminii*.

Tableau 5 : Exploitations retenues et espèces d'arbres suivis pour l'étude de la fertilité du sol

Plantation	**Espèce d'arbre**	**Coopérative**	**Province**
Plantation 1	*A. gummifera* *M. lutea*	Ubwizabwikawa	Ngozi
Plantation 2	*G. robusta* *P. americana*	Ubwizabwikawa	Ngozi
Plantation 3	*G. robusta*	Ubwizabwikawa	Ngozi
Plantation 4	*F. thonningii*	Nyarunazi	Muramvya
Plantation 5	*M. eminii*	Mboneramiryango	Gitega
Plantation 6	*F. thonningii*	Nyarunazi	Muramvya
Plantation 7	*A. gummifera*	Nyarunazi	Muramvya

Pour chaque arbre d'ombrage les paramètres dendrométriques ont été mesurés : la circonférence à hauteur de poitrine, la hauteur totale, la hauteur de la première branche, le rayon du houppier dans les deux directions (nord-sud et est-ouest), et l'âge. Le diamètre à hauteur de poitrine de même que le rayon du houppier ont été mesurés en utilisant un décamètre, la hauteur totale a été mesurée en utilisant un dendromètre Suunto tandis que l'âge était révélé par l'exploitant lui-même. La différence entre la hauteur totale et la hauteur de la première branche donne la hauteur du houppier. Le rapport entre la hauteur du houppier et le diamètre du houppier est un indicateur de la forme du houppier. Si ce rapport est de 1, alors la forme est circulaire. S'il est inférieur à 1, alors on a une forme elliptique horizontale, tandis que si ce rapport est supérieur à 1, il s'agit d'une forme elliptique verticale.

3.2.2. Profils de sols

Un profil pédologique a été creusé à l'intérieur de chacune des sept caféières retenues et sa localisation géographique prise avec un GPS type Garmin de randonnée. Pour chaque profil, la description des horizons a été faite. Les éléments suivants faisaient l'objet de la description (Annexe 2) : profondeur de l'horizon, couleur, texture, types de sables au toucher (sables fins ou sables grossiers), structure, consistance, charge pondérale, racines, état hydrique, pseudogley/gley et le matériau parental. La profondeur totale était aussi notée.

Les horizons étaient déterminés sur base de la couleur visible à l'œil nu et de la résistance à la pénétration des outils simples comme le couteau. Leur profondeur était mesurée en utilisant un ruban. Pour chaque horizon, la couleur était estimée en utilisant la charte des couleurs de Munsell. Les profils creusés ont été décrits suivant les instructions de Martin (1972) pour la notation des horizons de sols ferrallitiques. Le creusement des profils a été arrêté à 1,20 m de profondeur, sauf pour le cas où apparaissait la roche non encore altérée avant cette profondeur. Rappelons que Sys et al. (1961) limitent la profondeur du profil pédologique à 2 m tandis que Martin (1972) continue la description jusqu'à atteindre la roche mère. Des échantillons ont été pris par horizon ou en combinant ensemble deux horizons proches pour en faire des analyses chimiques au laboratoire d'analyses de sols et des produits agro-alimentaires (LASPA) de l'ISABU. Les sols ont été classés selon la classification INEAC (Tessens et al., 1991).

3.2.3. Mesure de l'humidité du sol

L'échantillonnage pour l'humidité du sol a consisté en une prise des échantillons non remaniés dans des anneaux kopeckis de 100 cm^3 de volume. Il s'agit d'une méthode destructrice, surtout dans des plantations de caféiers où les racines sont superficielles, alors que les kopeckis ne peuvent qu'échantillonner au niveau de l'horizon de surface. Les échantillons étaient pris sous chaque arbre d'ombrage retenu dans les sept plantations du point précédent, ainsi que dans les parcelles expérimentales de l'ISABU à Kayanza. Les mêmes échantillons ont été pris dans les caféiers de plein soleil.

La méthode thermogravimétrique a été utilisée pour la détermination de l'humidité du sol. Il s'agit d'une série de pesées avant et après passage à l'étuve. On obtient ainsi la masse (en g) du sol humide avant étuvage (P_H) et la masse (en g) du sol sec après passage à l'étuve (P_S).

La teneur en eau volumique (θ) est alors obtenue grâce à l'équation :

$$\theta = \frac{P_H - P_S}{P_S * \rho_{eau}} * \rho_{as} \qquad [3.1]$$

Où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau ; tandis que ρ_{as} est la masse volumique apparente sèche du sol telle que donnée par l'équation suivante :

$$\rho_{as} = \frac{P_S}{V_t} \qquad [3.2]$$

Où V_t est le volume total de l'échantillon en kopecki (100 cm^3 pour les kopeckis utilisés dans le prélèvement des échantillons).

L'interprétation des résultats d'humidité du sol est faite en prenant comme bases les taux d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Il existe des valeurs qui sont couramment données dans la littérature pour différents types de sols (STEP Systems, 2020) ; le programme Rosetta (Schaap et al., 2001) ; ainsi que Datta et al. (2017) . De ces sources, on peut raisonnablement retenir le seuil minimal d'humidité de 14% au point de flétrissement permanent et de 29,4% pour la capacité au champ. Ce sont les valeurs inférieures qui correspondent à la classe texturale « sandy clay loam ». Nous n'avons pas pu analyser la courbe caractéristique d'humidité du sol (courbe pF) pour nos sols. La classe texturale est obtenue par le report des données de l'analyse granulométrique dans le triangle textural (USDA pour cette étude)

3.2.4. Mesure de la fertilité du sol

Sous chaque arbre d'ombrage, trois échantillons de sols remaniés ont été prélevés sous la canopée à trois distances chaque fois que possible : 1/3r (le tiers du rayon), 0,5r (la moitié du rayon) et 1r (à l'extrémité de la canopée) à l'aide d'une truelle. Un échantillon composite était aussi pris en plein soleil. Ces échantillons ont été acheminés au laboratoire d'analyses de sols et des produits agro-alimentaires (LASPA) de l'Institut des sciences agronomiques du Burundi (ISABU).

Les analyses chimiques ont porté sur les paramètres suivants : pH eau, carbone organique (%), azote total (%), phosphore assimilable (mg/kg), Acidité échangeable (Al^{3+} et H^+ en méq/100 g), calcium échangeable (méq/100 g), magnésium échangeable (méq/100 g), potassium échangeable (méq/100 g), et capacité d'échange cationique (méq/100 g).

Ces analyses ont été faites en suivant les protocoles d'usage au LASPA. Comme on peut le retrouver dans Nijimbere et al. (2020), le pH a été mesuré sur des suspensions sol-eau au rapport 1/5 (w/v). Le carbone organique a été déterminé par la méthode de Walkley et Black. L'azote du sol a été dosé par la méthode de Kjeldahl. Le phosphore a été dosé par la méthode Olsen-Dabin. L'acidité d'échange (Al^{3+} et H^{+}) a été mesurée après déplacement des ions acides (Al^{3+} et H^{+}) avec du KCl, 1N. Les cations échangeables et la CEC ont été déterminés par la méthode Metson (extraction des bases échangeables à l'Acétate d'ammonium, 1M, pH 7 ; lavage de l'excès d'extractant à l'éthanol ; extraction de NH_4^{+} par KCl 1M).

Les indicateurs dérivés des résultats analytiques (rapport C/N, somme des bases échangeables, pourcentage de saturation en bases, capacité d'échange cationique effective ainsi, l'indice de Kamprath ainsi que le facteur d'évaluation du sol) ont été calculés aussi.

$$\frac{C}{N} = \frac{teneur\ en\ C\ (\%)}{teneur\ en\ N\ (\%)} \qquad [3.3]$$

La somme des bases échangeables est la quantité de cations métalliques réellement adsorbés sur le complexe argilo-humique par des liaisons électrostatiques, donc échangeables. Pour notre cas :

$$SB\ (méq/100\ g\ de\ sol) = Ca + Mg + K \qquad [3.4]$$

Le pourcentage (ou taux) de saturation en bases (PSB) est le pourcentage de la CEC qui est occupé par les cations basiques. Pour notre cas :

$$PSB\ (\%) = \frac{(Ca+Mg+K)*100}{CEC} \qquad [3.5]$$

La capacité d'échange cationique effective est la somme des bases échangeables à laquelle on ajoute l'acidité d'échange (Al^{3+} et H^{+}) :

$$CECE\ (méq/100\ g\ de\ sol) = Ca + Mg + K + Al + H \qquad [3.6]$$

L'indice de Kamprath (m%) est le taux de saturation en Aluminium. Il a été calculé selon l'équation :

$$m\ (\%) = \frac{Al\ échangeable\ (méq/100\ de\ sol)*100}{CEC\ (méq/100\ g\ de\ sol)} \qquad [3.7]$$

L'indice de fertilité chimique du sol utilise le pH, la matière organique, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, et la valeur inverse de l'aluminium (Moran et al., 2000). Cet indice connait quelques faiblesses : (i) la signification de l'indice n'est pas très claire car

différentes unités sont utilisées ; (ii) la valeur du pH n'est pas indépendante car le pH est fortement lié à la quantité de Ca, Mg et Al (Lu et al., 2002). C'est ainsi qu'un nouvel indice, le facteur d'évaluation des sols (FES) a été défini et permet d'évaluer la fertilité du sol. L'équation est la suivante (Lu et al., 2002 ; Panwar et al., 2011).

$$FES\ (méq/100\ g\ de\ sol) = [Ca + Mg + K - \log(1 + Al)] * MO + 5 \qquad [3.8]$$

Les résultats des analyses chimiques ont été interprétés en recourant aux normes établies à l'ISABU par Tessens & Gourdin (1993).

La granulométrie a aussi été analysée. Après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, la fraction fine du sol (partie ayant passé les mailles du tamis de 2 mm) a subi un tamisage. Le tamis le plus fin utilisé avait des mailles de 50 µm. Le tamisat a été ensuite mis dans des éprouvettes graduées où la méthode de la pipette de Robinson a été utilisée (prélèvements, étuvages et pesées).

Les résultats de l'analyse granulométrique ont été interprétés en recourant au triangle textural USDA. Ce triangle a été dessiné en utilisant l'application TAL4Windows, téléchargeable gratuitement en ligne.

3.2.5. Echantillonnage et caractérisation des litières

Pour chaque espèce d'arbre d'ombrage des exploitations retenues, les feuilles sèches tombées étaient soigneusement collectées.

Les feuilles d'une même essence étaient mises ensemble, puis séchées à l'air sous couvert. Elles ont été emmenées au laboratoire LASPA de l'ISABU où elles ont été réduites en poudre à l'aide du broyeur de marque REITZ.

Les analyses chimiques réalisées étaient la détermination des taux du carbone total, de l'azote total, du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium, le pH et la salinité.

L'interprétation des résultats d'analyse des litières a été faite en référence aux normes établies dans Motsara & Roy (2008) et Vogt et al. (2015).

3.2.6. Installation de l'essai sur le soja fertilisé avec les litières

Une partie de la poudre issue des litières broyées a été utilisée dans un essai de fertilisation du soja.

a. Dispositif expérimental

L'essai a été installé selon un dispositif en blocs aléatoires complet avec 4 répétitions. La parcelle expérimentale élémentaire était longue de 1,6 m et large de 0,8 m. Il y avait 0,5 m entre parcelles, tandis que la distance entre deux blocs contigüs était de 1 m. La variété de soja utilisée est Yezumutima. Dix traitements ont été testés : T_0 = Sol seul (Témoin) ; T_1 = Fumier d'étable (Fumier) ; T_2 = FOMI Imbura + fumier d'étable (FOMI) ; T_3 = Di-Ammonium Phosphate + fumier d'étable (DAP) ; T_4 = Litière de *Grevillea robusta* (Grevillea) ; T_5 = Litière de *Ficus thonningii* (Ficus) ; T_6 = Litière de *Maesopsis eminii* (Maesopsis) ; T_7 = Litière de *Markhamia lutea* (Markhamia) ; T_8 = Litière de *Persea americana* (Persea) ; et T_9 = Litière de *Albizia gummifera* (Albizia).

b. Pratiques culturales

Le labour, effectué le 20 novembre 2020, était suivi par l'application de la dolomie (39% CaO et 20% MgO) au taux de 1,5 tonnes par ha. Le semis a été fait le 30 novembre et le 1er décembre 2020. Juste avant le semis, les traitements ont été appliqués au sol : 100 kg de DAP (18-46-0) ; 150 kg de FOMI Imbura (N-P_2O_5- K_2O-CaO-MgO : 9-22-4-13-2) ; 10 tonnes de matière fraiche par ha de fumier d'étable et 2,5 tonnes par ha de matière sèche pour les litières sous forme de poudre. Ceci est l'équivalent de 10 tonnes de matière fraiche de litière. Tous les traitements étaient appliqués directement et mélangés au sol. Le semis était en ligne à raison de 3 graines par poquet. Les écartements étaient de 40 cm x 20 cm (Figure 11). Les plants ont été sarclés en février 2021, et la récolte a eu lieu le 16 mars 2021.

c. Schéma de la parcelle expérimentale et évaluation des paramètres étudiés

Pour le soja, les paramètres évalués sont le taux de germination, le pourcentage de nodulation ainsi que le rendement en grains de soja et ses composantes. Pour y arriver, un échantillonnage destructif a été réalisé selon la figure 11. Les nodules étaient manuellement séparés des racines, comptés puis séchés à l'étuve à 65°C pendant 48 heures. Ils étaient pesés à leur sortie de l'étuve. Le nombre de gousses par plant ainsi que le nombre de grains par gousse étaient aussi comptés. Les grains de chaque plante étaient pesés, tandis que le poids de mille grains était calculé en appliquant la règle de trois simple. Le rendement en grains était calculé selon l'équation ci-après :

$$Rendement\ en\ grains = \frac{Poids\ des\ grains\ de\ X\ plantes * Densité/ha}{Nombre\ de\ plants\ récoltés} \qquad [3.8]$$

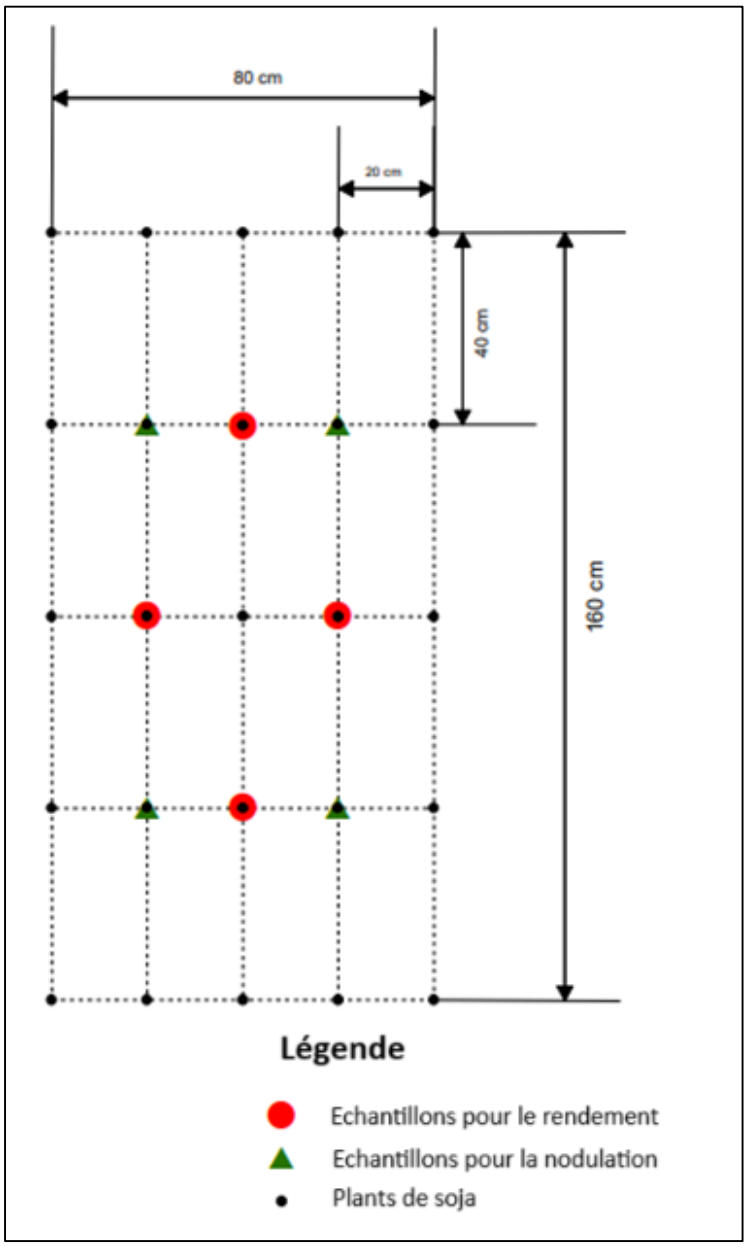


Figure 11 : Schéma de la parcelle expérimentale

3.2.7. Analyses statistiques des données

Le test de normalité des données en utilisant le test de Shapiro et Wilk. Par la suite, l'hypothèse de l'égalité des variances a été testée. Lorsque les données sont normales, le test de Bartlett a été utilisé tandis que, pour les cas des données qui ne vérifient pas l'hypothèse de normalité, c'est le test de Levene qui a été utilisé.

Lorsque l'hypothèse d'homogénéité de la variance était respectée, la comparaison des moyennes a été faite en recourant à l'ANOVA 1. Dans le cas contraire, le test robuste de Welch

a été utilisé. En cas de résultats significatifs ($p < 0,05$), la classification en groupes de moyennes homogènes a été faite en utilisant le test de Fisher. Finalement, les comparaisons par paires ont été réalisées en recourant au test de Tukey HSD. Toutes ces analyses étaient faites en utilisant le logiciel R (R Core Team, 2021).

3.3. Résultats et discussion

Les résultats portent sur la caractérisation des plantations retenues et des arbres qui s'y trouvent, l'évaluation de la qualité chimique des litières, l'analyse de la réponse du soja à l'application des litières, l'analyse des effets des arbres d'ombrage sur l'humidité du sol ainsi que les effets des arbres d'ombrage sur la fertilité chimique du sol. Les résultats sont présentés soit sous forme de tableaux de synthèse soit sous forme de figures.

3.3.1. Caractérisation des plantations retenues

Les sols des plantations retenues ont été évalués à partir des profils pédologiques qui ont été creusés. La description des profils et la classification INEAC des sols retenus dans cette thèse sont données dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Description des sols des plantations retenues pour l'étude de la fertilité du sol



Exploitant : Anthère Simbaruhije

Arbre retenu : *Albizia gummifera*

Plantation 1

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,66385 ; Latitude : -2,83174

Description :

A1 : 0-60 cm : Couleur brun-rouge foncé 5YR 3/2 ; sable limoneux; nombreuses racines moyennes (caféier); humide; sables grossiers; transition nette ; structure polyédrique faiblement développée ; faible consistance ; absence de charge pondérale ; très bon drainage ; analyses chimiques : analyses chimiques (couche 0-40 cm) : pHeau (4,45) ; CO (1,07%) ; N (0,15%) ; P (6,56 mg/kg) ; Al^{3+} (1,65 méq/100 g) ; H^{+} (0,67 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,77 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,47 méq/100 g) ; K^{+} (0,23 méq/100 g) ; CEC (9,40 méq/100 g) ; PSB (25,5%).

A3 : 60-80 cm : Couleur brun-rouge 5YR 4/3 ; sablo-limoneux ; très bon drainage ; pas de racines ; humide ; sables grossiers ; présence de petits cailloux ; analyses chimiques (couche 40-60 cm) : pHeau (4,38) ; CO (0,49%) ; N (0,13%) ; P (1,66 mg/kg) ; Al^{3+} (4,86 méq/100 g) ; H^{+} (1,08 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,37 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,13 méq/100 g) ; K^{+} (0,03 méq/100 g) ; CEC (10 méq/100 g).

B2 : 80-100 cm : Couleur : 7,5YR 6/6 ; sablo-limoneux ; très bon drainage ; pas de racines ; humide ; sables grossiers ; présence de petits cailloux ; analyses chimiques (couche 60-120 cm) : pHeau (4,45) ; CO (0,33%) ; N (0,17%) ; P (10,4 mg/kg) ; Al^{3+} (3,78 méq/100 g) ; H^{+} (0,66 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,25 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,11 méq/100 g) ; K^{+} (0,05 méq/100 g) ; CEC (9,30 méq/100 g)

Bgr : 100-120 cm : Couche de pierres de 5 cm de diamètre en moyenne. Alluvions.

	C : 120-150 cm : Couleur : 7,5YR 5/8 ; limons + micas blanc ; assez bon drainage ; pas de racines ; humide ; sables très fins. **Type de sol** : Ferralsol humifère typique (Zt)
 **Exploitant : Anthère Simbaruhije** **Arbres retenus :** ***Markhamia lutea, Grevillea robusta, Persea americana***	**Plantation 2** **Coordonnées GPS (en degrés décimaux)** : Longitude : 29,66388 ; Latitude : -2,83199 **Description :** A1 : 0-20 cm : Couleur brun-rouge foncé 5YR 3/2 ; sableux ; racines fines peu nombreuses ; humide ; sables grossiers ; structure particulaire ; cailloux petits à gros ; très bon drainage ; analyses chimiques (couche 0-50 cm) : pHeau (3,97) ; CO (0,93%) ; N (0,11%) ; P (5,97 mg/kg) ; Al^{3+} (4,19 méq/100 g) ; H^{+} (0,88 méq/100 g) ; Ca^{2+} (0,58 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,01 méq/100 g) ; K^{+} (0,05 méq/100 g) ; CEC (10 méq/100 g) ; PSB (6,4%). A3 : 20-40 cm : Couleur brun-rouge 5YR 4/3 ; sablo-argileux ; très bon drainage ; nombreuses racines fines à grosses ; structure polyédrique subangulaire peu développé ; humide ; sables grossiers ; cailloux plus gros que A1. B2 : 40-60 cm : Couleur : 5YR 6/6 ; argile sableuse ; structure massive ; bon drainage ; quelques grosses racines ; humide ; sables très fins ; pas de cailloux ; analyses chimiques (couche 50-100 cm) : pHeau (4,17) ; CO (0,5%) ; N (0,17%) ; P (10 mg/kg) ; Al^{3+} (3,61 méq/100 g) ; H^{+} (0,74 méq/100 g) ; Ca^{2+} (0,53 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,24 méq/100 g) ; K^{+} (0,12 méq/100 g) ; CEC (9 méq/100 g). C : 60-120 cm : Couleur : 5YR 7/6 ; sableux ; assez bon drainage ; une grosse racine ; cailloux de même taille qu'en A2 ;

	humide ; sables grossiers ; analyses chimiques (couche 100-120 cm) : pHeau (4,10) ; CO (0,4%) ; N (0,17%) ; P (1,52 mg/kg) ; Al^{3+} (3,46 méq/100 g) ; H^{+} (0,86 méq/100 g) ; Ca^{2+} (0,51 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,01 méq/100 g) ; K^{+} (0,02 méq/100 g) ; CEC (6,7 méq/100 g). **Type de sol** : Ferralsol humifère typique (Zt)



Exploitant : Nicodème Ngendakumana

Arbre retenu : *Grevillea robusta*

Plantation 3

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,68425 ; Latitude : -2,84781

Description :

A1 : 0-10 cm : Couleur : 7,5 YR 3/1 ; sable + matière organique ; peu de racines ; humide ; sables grossiers ; structure particulaire ; cailloux ; très bon drainage analyses chimiques (couche 0-10 cm) : pHeau (4,58) ; CO (1,92%) ; N (0,17%) ; P (27,5 mg/kg) ; Al^{3+} (0,08 méq/100 g) ; H^{+} (1 méq/100 g) ; Ca^{2+} (3,36 méq/100 g) ; Mg^{2+} (1,03 méq/100 g) ; K^{+} (0,53 méq/100 g) ; CEC (10,5 méq/100 g) ; PSB (46,8%).

B2 : 10-70 cm : Couleur : 7,5 YR 6/3 ; sableuse ; structure polyédrique très faiblement développé ; bon drainage ; pas de racines ; humide ; sables grossiers ; petits cailloux analyses chimiques (couche 10-70 cm) : pHeau (4,75) ; CO (0,77%) ; N (0,15%) ; P (4,62 mg/kg) ; Al^{3+} (2,21 méq/100 g) ; H^{+} (0,94 méq/100 g) ; Ca^{2+} (2,42 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,58 méq/100 g) ; K^{+} (0,51 méq/100 g) ; CEC (9,3 méq/100 g).

C : 70-120 cm : Couleur : 7,5YR 6/6 ; sablo-argileux ; structure polyédrique faiblement dévelopé ; drainage médiocre ; pas de racines ; pas de cailloux ; humide ; sables moyens analyses chimiques (couche 70-120 cm) : pHeau (4,49) ; CO (0,27%) ; N (0,08%) ; P (1,85 mg/kg) ; Al^{3+} (2,02 méq/100 g) ; H^{+} (1,2 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,54 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,57 méq/100 g) ; K^{+} (0,18 méq/100 g) ; CEC (6,6 méq/100 g).

Type de sol : Arénoferralsol typique (X°t)



Exploitant : Oscar Bandyatuyaga

Arbre retenu : *Ficus thonningii*

Plantation 4

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,77397 ; Latitude : -3,27385

Description :

A1 : 0-20 cm : Couleur : 2,5 YR 3/2 ; argile sableuse ; sables moyens ; structure polyédrique angulaire moyennement développé ; très faible charge ; nombreuses racines fines ; grosses racines à la limite avec l'horizon inférieur ; bon drainage ; humide ; analyses chimiques (couche 0-20 cm) : pHeau (5,73) ; CO (1,09%) ; N (0,24%) ; P (3,12 mg/kg) ; Al^{3+} (0,00 méq/100 g) ; H^{+} (0,15 méq/100 g) ; Ca^{2+} (4,03 méq/100 g) ; Mg^{2+} (1,50 méq/100 g) ; K^{+} (0,77 méq/100 g) ; CEC (8,4 méq/100 g) ; PSB (75,0%).

B2 : 20-50 cm : Couleur : 5 YR 3/3 ; sables + agrile ; sables grossiers ; structure particulaire ; petit cailloux ; très peu de racines fines à moyennes ; très bon drainage ; humide ; analyses chimiques (couche 20-50 cm) : pHeau (5,49) ; CO (0,88%) ; N (0,17%) ; P (1,85 mg/kg) ; Al^{3+} (0,28 méq/100 g) ; H^{+} (0,59 méq/100 g) ; Ca^{2+} (2,97 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,76 méq/100 g) ; K^{+} (0,64 méq/100 g) ; CEC (7,7 méq/100 g).

B3 : 50-70 cm : Couleur brun-rouge : 5 YR 4/4 ; sablo-argileux ; sables grossiers ; structure polyédrique faiblement développé ; petits cailloux ; très bon drainage ; une grosse racine ; humide ; analyses chimiques (couche 50-70 cm) : pHeau (5,01) ; CO (0,71%) ; N (0,14%) ; P (0,65 mg/kg) ; Al^{3+} (1,78 méq/100 g) ; H^{+} (0,59 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,75 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,19 méq/100 g) ; K^{+} (0,25 méq/100 g) ; CEC (7,1 méq/100 g).

C : 70-120 cm : Couleur : 5YR 5/6 ; sablo-limoneux ; sables grossiers ; structure polyédrique faiblement développé ; petits cailloux ; bon drainage ; pas de racines ; humide ; analyses chimiques (couche 70-

	120 cm) : pHeau (4,87) ; CO (0,30%) ; N (0,10%) ; P (≤0,05 mg/kg) ; Al^{3+} (1,40 méq/100 g) ; H^{+} (0,54 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,36 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,06 méq/100 g) ; K^{+} (0,12 méq/100 g) ; CEC (4,30 méq/100 g). **Type de sol** : Ferralsol humifère eutrophe (Ze)



Exploitant : Mélance Hakizimana

Arbres retenus : *Maesopsis eminii*

Plantation 5

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,80633 ; Latitude : -3,28848

Description :

A1 : 0-30 cm : Couleur rouge-brun 2,5 YR 4/4 ; limon ; sables très fins ; structure polyédrique angulaire faiblement développé ; pas de charge ; nombreuses racines fines ; bon drainage ; humide analyses chimiques (couche 0-30 cm) : pHeau (4,22) ; CO (1,35%) ; N (0,10%) ; P (1,43 mg/kg) ; Al^{3+} (1,83 méq/100 g) ; H^{+} (0,73 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,25 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,20 méq/100 g) ; K^{+} (0,23 méq/100 g) ; CEC (7,70 méq/100 g) ; PSB (21,8%).

B2 : 30-120 cm : Couleur : 2,5YR 4/6 ; limon ; structure polyédrique faiblement développé ; pas de charge ; nombreuses racines ; bon drainage ; humide analyses chimiques (couche 30-80 cm) : pHeau (4,73) ; CO (0,90%) ; N (0,15%) ; P (1,48mg/kg) ; Al^{3+} (1,60 méq/100 g) ; H^{+} (0,69 méq/100 g) ; Ca^{2+} (0,89 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,13 méq/100 g) ; K^{+} (0,10 méq/100 g) ; CEC (6,70 méq/100 g).

C : > 120 cm : Idem que B2

Type de sol : Hygroferrisol intergrade sols récents (En)



Exploitant : Jacques Nduwimana

Arbres retenus : *Ficus thonningii*

Plantation 6

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,68202 ; Latitude : -2,84624

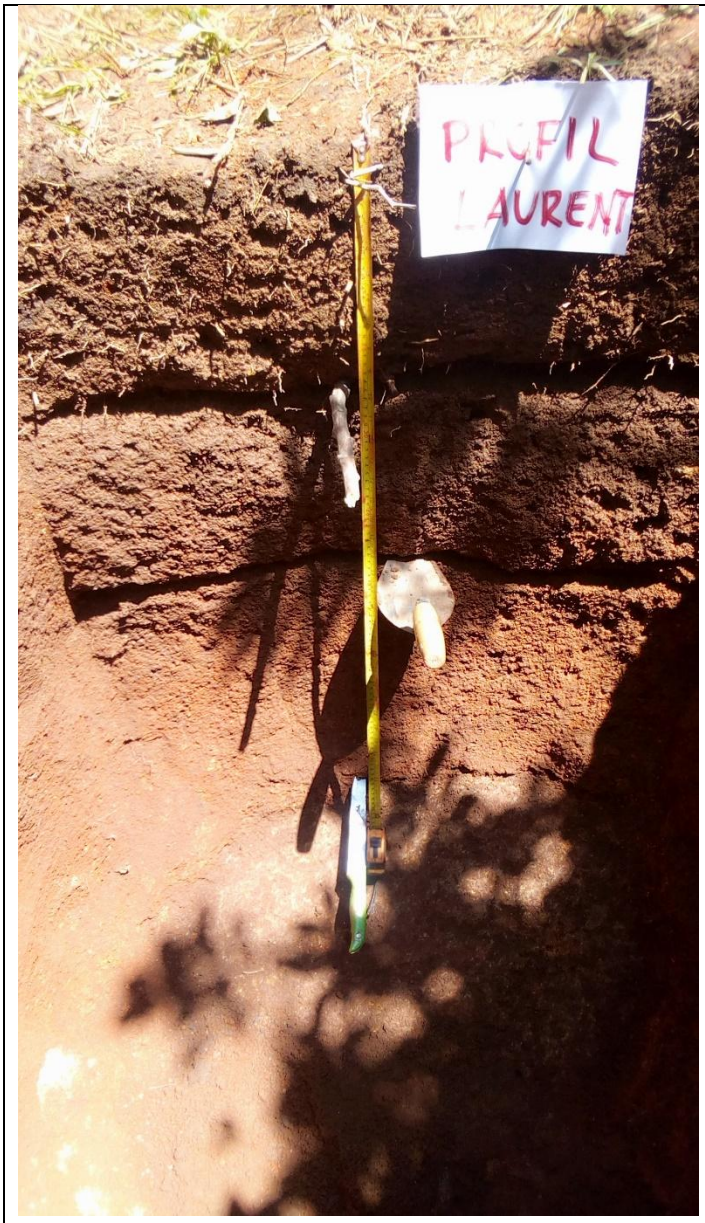
Description :

A1 : 0-40 cm : Couleur : 5 YR 3/1 ; sable + matière organique ; sables grossiers ; structure particulaire ; quelques cailloux ; petites et moyennes racines peu nombreuses ; très bon drainage ; humide ; beaucoup de micas blanc ; moins dur que l'horizon suivant ; analyses chimiques (couche 0-40 cm) : pHeau (5,33) ; CO (1,47%) ; N (0,11%) ; P (11,6 mg/kg) ; Al^{3+} (0,00 méq/100 g) ; H^{+} (0,10 méq/100 g) ; Ca^{2+} (5,30 méq/100 g) ; Mg^{2+} (1,15 méq/100 g) ; K^{+} (0,14 méq/100 g) ; CEC (11,0 méq/100 g) ; PSB (59,9%).

B2 : 40-100 cm : Couleur : 5YR 5/2 ; sables ; sables grossiers ; structure polyédrique très faiblement développé ; quelques cailloux ; pas de racines ; bon drainage ; hydromorphie ; humide ; beaucoup de micas blanc ; plus dur que l'horizon suivant ; analyses chimiques (couche 40-100 cm) : pHeau (4,52) ; CO (0,91%) ; N (0,17%) ; P (3,49 mg/kg) ; Al^{3+} (3,81 méq/100 g) ; H^{+} (0,96 méq/100 g) ; Ca^{2+} (2,60 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,65 méq/100 g) ; K^{+} (0,11 méq/100 g) ; CEC (11,3 méq/100 g).

C : 100-120 cm : Couleur : 5YR 6/6 ; argile sableuse ; sables grossiers ; structure polyédrique très faiblement développé ; pas de cailloux ; pas de racines ; drainage moyen ; humide ; beaucoup de micas blanc ; analyses chimiques (couche 100-120 cm) : pHeau (4,45) ; CO (0,27%) ; N (0,11%) ; P (3,92 mg/kg) ; Al^{3+} (2,66 méq/100 g) ; H^{+} (0,66 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,41 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,65 méq/100

	g) ; K^+ (0,11 méq/100 g) ; CEC (8,40 méq/100 g). **Type de sol** : Ferralsol humifère gleyique (Zg)



Exploitant : Laurent Nizigiyimana

Arbres retenus : *Albizia gummifera*

Plantation 7

Coordonnées GPS (en degrés décimaux) : Longitude : 29,76982 ; Latitude : -3,27651

Description :

A1 : 0-25 cm : Couleur brun-rouge foncé 5YR 3/2 ; argilo-sableux ; sables moyens ; structure polyédrique moyennement développé ; quelques cailloux ; petites et moyennes racines très nombreuses ; drainage moyen ; humide ; moins dur que l'horizon suivant ; analyses chimiques (couche 0-25 cm) : pHeau (5,47) ; CO (1,28%) ; N (0,22%) ; P (4,65 mg/kg) ; Al^{3+} (0,00 méq/100 g) ; H^{+} (0,17 méq/100 g) ; Ca^{2+} (3,65 méq/100 g) ; Mg^{2+} (1,27 méq/100 g) ; K^{+} (1,13 méq/100 g) ; CEC (8,50 méq/100 g) ; PSB (71,2%).

B2 : 25-55 cm : Couleur brun-rouge 5YR 4/4 ; sables + argile ; sables grossiers ; structure particulaire ; quelques cailloux ; pas de racines ; bon drainage ; humide ; plus dur que l'horizon suivant ; analyses chimiques (couche 25-75 cm): pHeau (4,67) ; CO (0,85%) ; N (0,12%) ; P (0,83 mg/kg) ; Al^{3+} (2,56 méq/100 g) ; H^{+} (0,57 méq/100 g) ; Ca^{2+} (1,18 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,03 méq/100 g) ; K^{+} (0,19 méq/100 g) ; CEC (8,20 méq/100 g).

B3 : 55-100 cm : Couleur : 5YR 5/6 ; sableux ; sables grossiers ; structure polyédrique faiblement développé ; quelques cailloux ; pas de racines ; bon drainage ; humide ; analyses chimiques (couche 75-100 cm) : pHeau (4,63) ; CO (0,63%) ; N (0,09%) ; P (1,15 mg/kg) ; Al^{3+} (2,26 méq/100 g) ; H^{+} (0,59 méq/100 g) ; Ca^{2+} (0,93 méq/100 g) ; Mg^{2+} (0,02 méq/100 g) ; K^{+} (0,31 méq/100 g) ; CEC (5,90 méq/100 g).

R : Roche mère.

	Type de sol : Ferralsol humifère eutrophe (Ze)

Les caféières retenues sont installées sur des ferralsols. Les ferralsols sont des sols acides. Les valeurs de pH des horizons de surface varient entre 3,97 et 5,73. Ce sont aussi des sols riches en kaolinites et qui présentent des valeurs de CEC faibles. Les valeurs de CEC des horizons de surface sont comprises entre 7,7 et 11 méq/100 g de sol. En termes de fertilité chimique, les ferralsols sont des sols pauvres qui présentent des risques de toxicité aluminique ainsi que des risques de carence en bases échangeables (Hicintuka & Masilya, 2013).

Toutes les plantations retenues étaient paillées. Bien que les matériaux utilisés pour le paillage fussent diversifiés, ils étaient principalement constitués des feuilles et pseudo-troncs de bananiers, des résidus de récolte du haricot et/ou du maïs, et des herbes du genre Hyparrhenia. Ce dernier se remarque de manière spectaculaire à Mparamirundi (coopérative Ubwizabwikawa) où il est utilisé pour pailler toute la surface de la plantation. De manière générale, le paillage était appliqué sur toute la caféière, exception faite pour la plantation de Giheta qui était jeune et était conçue pour recevoir des cultures en intercalaire. Pour cette dernière, le paillage était épandu en bandes sur les rangées des caféiers.

Les arbres retenus étaient marqués à la peinture rouge. Leurs caractéristiques dendrométriques sont synthétisées dans le tableau 7 :

Tableau 7 : Caractéristiques dendrométriques des arbres des plantations retenues pour l'étude de la fertilité du sol

Numéro plantation	**Arbre retenu**	**Age en 2020**	**Circ hauteur de poitrine (cm)**	**Hauteur totale (m)**	**Hauteur première branche (m)**	**Rayon houppier, direction NS (m)**	**Rayon houppier, direction EO (m)**
7	*A. gummifera*	32	70	14,5	5,5	5,8	6,0
4	*F. thonningii*	4	64,6	7,3	2,5	3,8	3,7
5	*M. eminii*	3	25,5	4,2	2,5	1,6	1,5
6	*F. thonningii*	45	538	25	4	14,7	15,9
3	*G. robusta*	3	36,3	11	2,8	2,3	2,0
1	*A. gummifera*	33	142,4	22,2	10,2	8,6	7,7
2	*M. lutea*	8	85	20,2	4	4,2	2,2
2	*G. robusta*	40	70,1	24,2	3,4	4,9	4,6
2	*P. americana*	44	204	17,3	6,7	7,4	6,8

3.3.2. Qualité chimique des litières

Selon les résultats d'analyses chimiques des 6 litières (Tableau 8), les teneurs en azote (N) sont comprises entre 0,82 et 2,19%, les teneurs en phosphore (P) entre 0,0125 et 0,530%, les teneurs en potassium (K) entre 0,11 et 1,46%, les teneurs en calcium (Ca) entre 0,12 et 0,52%, et les teneurs en magnésium (Mg) entre 0,09 et 0,50%. Le pH des litières est compris entre 5,22 et 7,13 tandis que le carbone (C) est compris entre 28,2 et 37,3%. La salinité est comprise entre 0,98 et 3,40 dS/m. Les ratios entre ces éléments ont été également calculés (Tableau 9) pour avoir une information supplémentaire quant aux équilibres entre éléments.

Tableau 8 : Composition chimique des litières issues des arbres d'ombrage du caféier

Espèce	**N (%)**	**P (%)**	**K (%)**	**Ca (%)**	**Mg (%)**	**pH**	**C (%)**	**Salinité (dS/m)**
Ficus thonningii	1,44	0,0445	1,46	0,52	0,46	7,13	28,2	3,40
Persea americana	1,07	0,0444	0,11	0,43	0,37	6,25	37,1	0,98
Maesopsis eminii	2,19	0,0376	0,61	0,38	0,50	6	29,3	1,55
Markhamia lutea	1,4	0,0506	0,41	0,45	0,26	6,22	33,5	1,51
Grevillea robusta	0,82	0,0125	0,26	0,28	0,09	5,22	37,3	1,79
Albizia gummifera	2,12	0,0530	0,69	0,12	0,18	5,99	30,6	2,44
Normes								
Motsara et Roy, 2008	2-5	0,2-0,5	1-5	0,1-1	0,1-0,4	7-9		
Vogt et al., 2015	1-5	0,1-5		0,2-1	0,1-0,4			

Tableau 9 : Ratios entre éléments des litières issues des arbres d'ombrage du caféier

Espèce	**C/N**	**C/P**	**Ca/Mg**	**Mg/K**	**(Ca+Mg)/K**
Ficus thonningii	19,6	633,5	1,13	0,32	0,67
Persea americana	34,6	834,7	1,16	3,36	7,27
Maesopsis eminii	13,4	779,5	0,76	0,82	1,44
Markhamia lutea	23,9	662,3	1,73	0,63	1,73
Grevillea robusta	45,5	2984,8	3,11	0,35	1,42
Albizia gummifera	14,4	576,4	0,67	0,26	0,43
Norme	20-30	200	1-2,5	0,08-0,1	0,2-0,3

On constate, de par le tableau 8, que les litières analysées présentent des valeurs de pH inférieures aux normes pour les végétaux (Motsara & Roy, 2008). Elles pourraient de ce fait avoir un potentiel acidifiant, ce qui résulterait en des effets négatifs après leur incorporation dans un sol qui est lui-même déjà acide. La valeur de pH la plus petite a été obtenue pour *Grevillea robusta*. Toutes les litières montrent des teneurs normales en azote (N) à l'exception de *G. robusta* selon Motsara & Roy (2008). A l'exception du *Ficus thonningii*, toutes les litières sont pauvres en phosphore (P) et en potassium (K), mais présentent toutes des teneurs normales en calcium (Ca). *G. robusta* est pauvre en magnésium (Mg) au moment où *F. thonningii* et

Maesopsis eminii en sont riches. La même information est confirmée par les ratios entre éléments. Le rapport C/N montre que *Persea americana* est aussi pauvre en azote.

En termes d'absence d'éléments minéraux limitants dans les litières foliaires, *F. thonningii* est le premier. Il ne présente aucune autre limitation sauf pour le P qui est déficient dans toutes les litières. Quatre espèces (*Persea americana*, *Maesopsis eminii*, *Markhamia lutea*, et *Albizia gummifera*) constituent un deuxième groupe avec trois éléments limitants (pH, K et P). Pour ce groupe, l'essence qui présente plus de K est considérée comme étant de meilleure qualité. *G. robusta* vient en dernier lieu avec cinq facteurs limitants (N, pH, K, Mg et P). On peut ainsi proposer le classement suivant pour ce qui est de la qualité chimique des litières : *Ficus thonningii* > *Albizia gummifera* > *Maesopsis eminii* > *Markhamia lutea* > *Persea americana* > *Grevillea robusta*.

En conséquence, pour assurer de bonnes conditions de croissance des végétaux, il serait intéressant de combiner l'incorporation des litières avec une fertilisation minérale surtout pour le P et le K. Aussi, il faudrait commencer par le chaulage en vue de corriger l'acidité du sol et le potentiel effet acidifiant des litières. Ceci apporterait également du Ca et du Mg surtout en ce qui concerne *G. robusta* et *A. gummifera* qui en sont pauvres. Toutefois, en cas de chaulage avec de la dolomie, comme c'est souvent le cas au Burundi, il faudrait tirer beaucoup d'attention avec la litière issue de *M. eminii* qui est riche en Mg. La dolomie burundaise qui provient de l'est du pays possède une teneur combinée en Ca et en Mg (Nijimbere et al., 2020). En l'appliquant de manière combinée à de la litière riche en Mg sur un sol, on risquerait de créer des déséquilibres entre éléments en apportant plus de magnésium (rapport Ca/Mg et rapport Mg/K). Or, le sol de Rutegama présentait des rapports optimaux entre ces deux éléments : rapport Ca/Mg de 3,5 et rapport Mg/K de 2,3 (Niyongabire, 2022). Les normes de Tessens & Gourdin (1993) qualifient d'optimal le rapport Ca/Mg compris entre 3 et 5 et le rapport Mg/K compris entre 2 et 5.

3.3.3. Réponse du soja à l'application des litières

La réponse du soja est évaluée en termes de taux de germination, du pourcentage de nodulation ainsi que du rendement du soja et de ses composantes. A la fin, une comparaison des litières est effectuée selon le score obtenu au classement.

a. Taux de germination

Persea americana a donné le taux de germination le plus élevé (64,3%) tandis que le plus faible taux a été observé pour le DAP (46,7%). Exception faite pour *Ficus thonningii*, toutes les litières ont montré des taux de germination supérieurs à celui des traitements avec fertilisants minéraux (Tableau 10). Il n'y a pas eu de différences significatives entre traitements en termes de taux de germination (p = 0,18).

Tableau 10 : Taux moyens de germination du soja

Traitement	Taux de germination (%)
T_8 (Persea)	64,3±12,9
T_6 (Maesopsis)	63,7±2,5
T_9 (Albizia)	62,3±13,2
T_0 (Témoin)	61,7±5,7
T_1 (Fumier)	61,7±2,7
T_7 (Markhamia)	59,3±14,6
T_4 (Grevillea)	54,3±16,2
T_2 (FOMI)	53,7±2,5
T_5 (Ficus)	48,0±4,9
T_3 (DAP)	46,7±14,5

Les matières organiques peuvent contribuer à la modification des conditions locales du sol. En ce qui concerne la salinité, pour des valeurs de conductivité électrique (CE) comprises entre 2 et 4 dS/m à 25°C, seules les espèces de plantes très sensibles comme le citronnier (*Citrus limon* L.) ou le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) sont affectées (Vogt et al., 2015). De manière générale, il y a eu de faibles taux de germination du soja pour tous les traitements évalués. Le plus bas taux de germination (48%) a été observé pour la litière de *Ficus thonningii*. Ceci pourrait être atttibuée à son niveau de salinité avec une CE proche de 4 dS/cm (Tableau 8). Cela avait été aussi reporté par Ahmadvand et al. (2012) et Essa (2002) dans leurs travaux traitant différents niveaux de salinité sur la germination du soja. Ces auteurs ont noté une dimininution du taux de germination avec l'augmentation du niveau de salinité, où le plus bas taux de germination de 38% était obtenu pour une CE de 4 dS/m.

L'on pourrait penser aussi aux effets allélopathiques des litières des arbres d'ombrage sur la germination des graines de soja. En effet, des études ont confirmé les effets allélopathiques des arbres agroforestiers sur les cultures (Kaboneka et al., 2020 ; Batish et al., 2008) dont le soja (*Glycine max* L.) (Tian et al., 2022 ; Kumar, 2014). Plusieurs espèces de Ficus ont montré des effets allélopathiques sur les cultures. C'est l'exemple de *Ficus carica* sur la blé (*Triticum*

aestivum L.), le maïs (*Zea mays* L.), la laitue (*Lactuca sativa* L.) et le trèfle (*Trifolium repense* L.) (Zaman et al., 2020), de *Ficus auriculata* Lour. et *Ficus semicordata* sur le haricot (*Vigna umbellata* Thumb.) et sur l'amaranthe (*Amaranthus caudatus* L.) (Satapathy et al., 2022). Cependant, en ce qui concerne *Ficus thonningii*, nous n'avons trouvé aucune étude prouvant ses effets allélopathiques. Par contre, Balehegn (2012) affirme que *Ficus thonningii* n'a pas du tout d'effets allélopathiques. Des études ont aussi confirmé les effets dépressifs de *Grevillea robusta* sur la germination des graines des cultures comme la laitue (Ranawana et al., 2024) et le blé (Batish et al., 2008). Nous n'avons pas encore trouvé d'études sur les effets allélopathiques de *G. robusta* sur le soja.

b. Nodulation

Le nombre moyen de nodules était compris entre 0,7 pour *F. thonningii* et 10,3 pour FOMI (Tableau 11). Toutefois, le nombre moyen de nodules produits n'était pas significativement différent ($p = 0,37$).

Le poids des nodules par plant était compris entre 10 mg pour *F. thonningii* et 50 mg pour le témoin (Tableau 11). Pour ce paramètre, l'homogénéité de la variance n'a pas pu être prouvée car le test de Levene était significativement différent ($F(9, 30) = 3,5$; $p = 0,004$). C'est ainsi que le test robuste de Welch a été utilisé au lieu de l'ANOVA classique. Et on n'a pas trouvé de différences significatives entre les traitements pour le poids moyen des nodules par plant ($F(9 ; 12,1) = 0,64$; $p = 0,74$).

Tableau 11 : Nombre et poids moyens des nodules par plant

Traitement	**Nombre de nodules par plant**	**Poids des nodules par plant (mg)**
T_2 (FOMI)	10,3±8,1	30,1±10,4
T_4 (Grevillea)	7,0±5,6	17,4±12,5
T_8 (Persea)	6,8±8,1	22,6±9,6
T_9 (Albizia)	6,3±7,3	20,2±8,2
T_3 (DAP)	4,6±4,1	28,1±6,9
T_7 (Markhamia)	3,9±6,7	19,4±11,6
T_6 (Maesopsis)	3,6±4,7	22,9±23,1
T_1 (Fumier)	2,1±1,9	23,5±5,8
T_0 (Témoin)	1,4±1,9	49,8±51,5
T_5 (Ficus)	0,7±0,7	12,8±15,6

Le nombre maximum de nodules produits par le soja a été de 10,3 nodules par plant pour T_2 (FOMI). Il reste bas. Dans un essai sur le soja, Cigelske et al. (2020) ont obtenu en moyenne

entre 31,8 à 44,3 nodules par plant. Le nombre réduit de nodules dans notre essai pourrait être attribué à la forte acidité du sol utilisé ainsi qu'à la tendance acidifiante des litières utilisées. Le nombre de nodules très faible pour *F. thonningii* pourrait être attribué à son niveau de salinité. En effet, la nodulation du soja est sérieusement affectée par les stress liés au sol, essentiellement l'acidité et la salinité (Miransari & Smith, 2007). Le témoin arrive en dernier lieu en produisant le plus bas nombre de nodules (1,4 nodules par plant) mais qui pèsent lourd. Ceci confirme les résultats de (Halwani et al., 2021) où, sur un sol n'ayant jamais reçu aucun précédent cultural de légumineuses, il a obtenu 2,7 nodules par plant, chacun pesant en moyenne 50 mg.

D'après notre expérimentation, *Ficus thonningi* et *Maesopsis eminiii* sont des espèces à fort potentiel fertilisant. Le rapport C/N qui caractérise le pouvoir de minéralisation de la matière organique montre que ces espèces sont les meilleures avec un rapport C/N faible par rapport aux autres espèces (Tableau 9). Mais, il y a eu production d'un faible nombre de nodules pour ces espèces, ainsi que pour le DAP (moins de 5). Ce nombre bas contraste avec les résultats obtenus au Bénin où un essai a produit en moyenne 14 nodules par plant de soja (Zoundji et al., 2015). La raison pourrait être les fortes teneurs en azote dans ces espèces. En effet, une étude sur la réponse des isolignes de soja à l'azote en conditions de sol modifiées a montré que le poids, le nombre ainsi que la taille des nodules étaient inversement liés à l'augmentation des quantités d'azote appliquées (Weber, 1966).

Dans leur étude, Kouassi et al. (2019) ont montré que le nombre et le poids de nodules les plus élevés sont obtenus avec la fertilisation organique qui augmente la population microbienne (apport en C), entraînant ainsi une augmentation du nombre de nodules. Cette observation pourrait être à la base des bonnes performances de nodulation avec le traitement FOMI qui contient de la matière organique. En comparaison avec les litières utilisées, cette matière organique de FOMI est potentiellement plus disponible pour les populations microbiennes. Il a été rapporté que, même si les organismes fixateurs d'azote (Rhizobium) peuvent certainement persister dans les sols, leur efficacité peut être améliorée par l'ajout de carbone, ce qui suggère qu'ils sont limités en C (Mohammadi et al., 2012).

c. Rendement du soja

Le rendement du soja est présenté à travers un certain nombre de paramètres de production : le nombre de gousses par plant (NGP), le nombre de grains par gousse (NGG) et le poids de mille grains (PMG) (Tableau 12).

Le nombre de gousses obtenues par plant a été significativement différent entre les traitements testés ($p < 0,0001$). Le nombre de gousses par plant va de 4,7 gousses pour le témoin à 14,2 gousses pour le traitement FOMI. Les deux traitements combinant la fumure organique et la fumure minérale viennent en tête, et sont suivis par le fumier d'étable. Les six litières suivent en bloc, tandis que le témoin vient en dernière position.

Le test de la plus petite différence significative (PPDS ou LSD : Least Significant Difference) appliqué aux traitements a montré 4 groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. La comparaison par paires selon le test de Tukey HSD a montré des différences significatives en nombre de gousses par plant entre FOMI et les traitements Ficus ($p = 0,03$), Maesopsis ($p = 0,007$), Markhamia ($p = 0,004$), Albizia ($p = 0,004$), Grevillea ($p = 0,0007$), et le témoin ($p = 0,0002$). Il n'y a pas eu de différences significatives en nombre de gousses par plant entre les autres traitements.

Pour ce qui est du nombre de grains par gousse, l'analyse de la variance n'a pas montré de différences significatives entre traitements ($p = 0,25$). Le nombre de grains par gousse va de 1,63 pour le témoin à 1,87 pour le traitement FOMI. Pour ce paramètre, la litière issue de *Markhamia lutea* s'est classée entre les traitements FOMI et DAP.

Quant au poids de mille grains (PMG), l'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les traitements ($p = 0,06$). Le PMG obtenu va de 122 g pour le témoin à 148,4 g pour le traitement FOMI.

Des différences significatives entre les traitements ont été observées pour le rendement en grains du soja ($p < 0,0001$). Les traitements combinant la fumure organique et minérale viennent en tête et constituent un groupe à part. FOMI vient en tête avec 1440,9 kg/ha. Il est suivi par le DAP avec 1207,2 kg/ha. Les litières testées sont regroupées en deux autres groupes qui se chevauchent. En dernier lieu vient le témoin (363,2 kg/ha) qui constitue un groupe à part. La comparaison par paires selon le test de Tukey HSD a montré des différences significatives en termes de rendement en grain du soja entre FOMI et les traitements Persea ($p = 0,03$), Ficus (p

= 0,003), Maesopsis (p = 0,005), Markhamia (p = 0,002), Albizia (p = 0,003), Grevillea (p = 0,01), et le témoin (p = 0,0002). Il y avait aussi des différences significatives entre le DAP et les traitements Markhamia (p = 0,04) et le témoin (p = 0,004). Il n'y avait pas de différences significatives entre les autres traitements comparés deux à deux.

Tableau 12 : Nombre de gousses par plant, nombre de grains par gousse, poids de mille grains, et rendement en grains de soja

Traitement	**NGP**	**NGG**	**PMG (g)**	**Rendement en grains (kg/ha)**
T_2 (FOMI)	14,2±2,7a	1,82±0,05	148,4±6,9	1440,9±339,4a
T_3 (DAP)	11,7±1,9ab	1,89±0,08	144,6±10,1	1207,2±277,7a
T_1 (Fumier)	9,1±4,3bc	1,76±0,13	131,1±7,1	789,0±424,4b
T_8 (Persea)	8,3±2,2bcd	1,79±0,17	132,0±10,7	750,3±277,4bc
T_5 (Ficus)	8,0±2,1cde	1,74±0,10	143,7±9,3	747,9±209,8bc
T_6 (Maesopsis)	6,9±2,2cde	1,81±0,11	130,6±21,7	613,8±238,8bc
T_7 (Markhamia)	6,5±2,3cde	1,85±0,13	122,3±18,3	549,9±224,7bc
T_9 (Albizia)	6,4±1,6cde	1,79±0,06	1315±11,2	579,2±208,5bc
T_4 (Grevillea)	5,2±3,0de	1,73±0,06	135,8±8,5	475,7±249,9bc
T_0 (Témoin)	4,7±1,8de	1,63±0,22	122,0±11,3	363,2±167,5c

Ce tableau montre que, pour les composantes du rendement, le plus grand nombre de gousses, le poids de mille grains le plus élevé ainsi que le plus grand rendement par ha ont été obtenus pour le traitement FOMI. Il est suivi par le DAP. Le fumier d'étable, dans le même groupe avec les six litières testées, vient ensuite. Le traitement Grevillea constitue une exception et partage le même groupe avec le témoin. Ils sont les derniers de la liste. La supériorité du DAP par rapport à tous les autres traitements hormis FOMI confirme les résultats de l'ISABU au Burundi (ISABU, 1990) ainsi que ceux observés en Côte d'Ivoire (Wey & Ibrahima, 2007) et au Bénin (Zoundji et al., 2015).

L'effet non significatif de ces amendements organiques pourrait être lié à la courte durée de décomposition dans cette étude du fait que les réserves en éléments nutritifs (surtout l'azote) issues de la décomposition sont insuffisantes pour assurer une bonne croissance. Ceci est confirmé par les travaux de Diallo et al. (2005) sur *Faidherbia albida* A. Chev., *Azadirachta indica* A. Juss., *Casuarina equisetifolia* Forsk., *Andropogon gayanus* Kunth., et *Eragrostis tremula* Steud *in situ* qui ont montré qu'il fallait au moins sept mois pour que l'effet de la litière soit visible et significatif. Une étude sur la décomposition des feuilles de *Cordia africana* et

Albizia gummifera en Ethiopie a montré que l'azote était immobilisé pendant les 4 premières semaines dans la plupart des traitements (Teklay & Malmer, 2004). Par conséquent, les espèces agroforestières à libération rapide de nutriments sont les meilleures. De ce point de vue, *Grevillea robusta* et *Persea americana* présentent des rapports C/N supérieurs à 25, ce qui indique une décomposition lente et un risque d'immobilisation de l'azote (Hazelton & Murphy, 2016). Sur base de leurs rapports C/N, les meilleures espèces peuvent être classées comme suit : *Maesopsis eminii* > *Albizia gummifera* > *Ficus thonningii* > *Markhamia lutea* > *Persea americana* > *Grevillea robusta*.

3.3.4. Effet des arbres d'ombrage sur l'humidité du sol

Dans cette thèse, l'humidité du sol fait référence à la teneur en eau volumétrique telle qu'obtenue avec l'équation [3.1]. Ces teneurs en eau sont analysées par rapport aux valeurs usuelles pour deux points caractéristiques pour différentes classes de sol : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

Le triangle textural USDA (Figure 12) comprend 12 classes texturales (1. Clay, 2. Silty clay, 3. Silty clay loam, 4. Sandy clay, 5. Sandy clay loam, 6. Clay loam, 7. Silt, 8. Silt loam, 9. Loam, 10. Sand, 11. Loamy sand et 12. Sandy loam). L'analyse granulométrique a montré que tous les échantillons appartiennent à deux classes texturales : sandy clay (argile sableuse) et sandy clay loam (limon argilo-sableux) comme le montre la figure 12. La teneur en eau à la capacité au champ est de 29,4% pour le limon argilo-sableux et de 33,4% pour l'argile sableuse, tandis que la teneur en eau au point de flétrissement permanent est de 14% pour le limon argilo-sableux et de 16,3% pour l'argile sableuse (STEP Systems, 2020). On peut raisonnablement considérer les teneurs en eau correspondant au limon argilo-sableux comme étant la limite inférieure, c'est-à-dire 14% en période sèche et 29,4% en période pluvieuse.

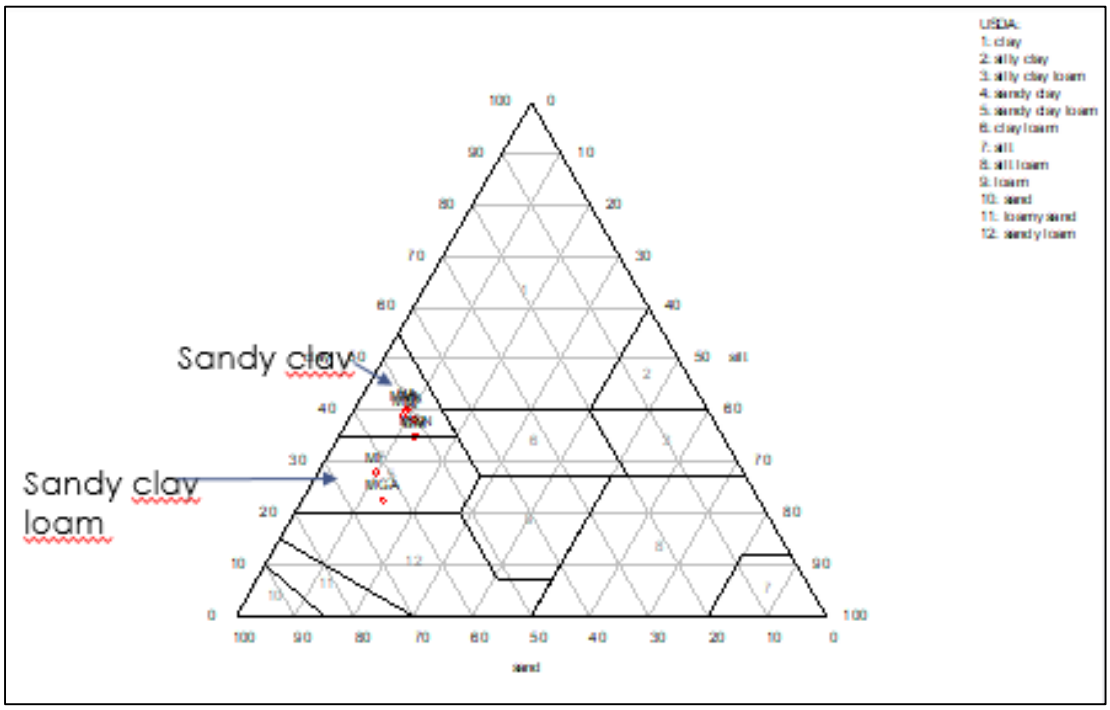


Figure 12 : Classes granulométriques des sols échantillonnés

La figure 13 donne l'humidité du sol sous les arbres d'ombrage du caféier pour la période pluvieuse et la période sèche, et les seuils d'humidité à la capacité au champ (trait bleu) et au seuil de flétrissement permanent (trait rouge). La teneur en eau du sol durant la période pluvieuse va de 19,9% sous *Grevillea robusta* à 30,3% sous *M. lutea*. Et ces différences sont significatives ($p < 0,05$). *M. lutea*, *A. gummifera*, *M. eminii* et *P. americana* constituent un groupe à part. *F. thonningii* et le caféier de plein soleil arrivent ensuite dans le second groupe. Enfin, *G. robusta* occupe à lui seul le dernier groupe.

Quant à la période sèche, la teneur en eau du sol va de 12% pour le caféier de plein soleil à 18,6% sous *M. lutea*. Pour ce cas, il y a trois groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Les différences ne sont pas statistiquement significatives.

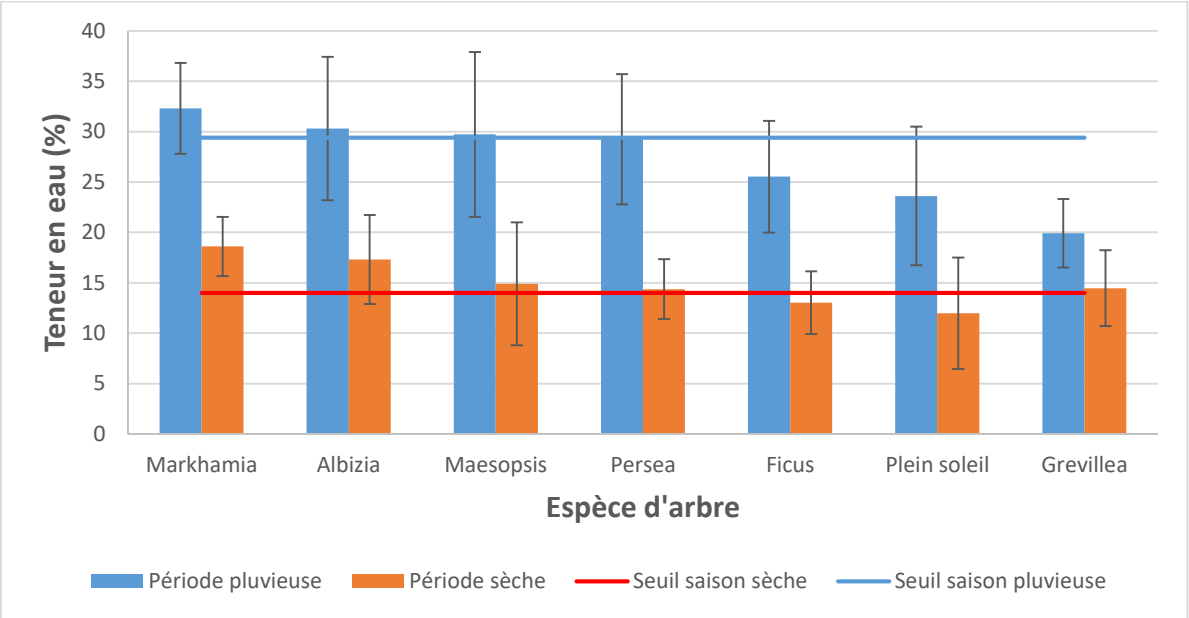


Figure 13: Humidité du sol sous les arbres d'ombrage du caféier

Pendant la période humide, l'humidité du sol dépasse, pour trois essences (*M. lutea*, *A. gummifera* et *M. eminii*), la valeur seuil de 29,4% retenue pour la capacité au champ tandis qu'elle n'atteint pas cette valeur pour deux autres essences (*F. thonningii* et *G. robusta*), et bien sûr pour le plein soleil.

Pendant la période sèche, seul le sol sous *F. thonningii* présente, aux côté du caféier de plein soleil, une humidité inférieure au seuil retenu pour le point de flétrissement permanent (14%). Ces résultats pour *F. thonningii* sont en contradiction avec les affirmations des populations locales selon lesquelles cette espèce arrose littéralement les caféiers qu'il ombrage (Ndihokubwayo et al., 2021). La raison serait à chercher du côté du feuillage dense de *F. thonningii* qui ne permet pas de laisser passer les gouttes de pluie mais également qui constitue une sorte d'écran qui favorise les pertes d'eau par interception. Pour un même épisode pluvieux, la quantité de pluie qui arrive au sol est d'autant plus petite que la surface foliaire totale du couvert végétal est importante par suite de l'interception, qui est par ailleurs meilleure s'il s'agit d'une pluie fine et faible plutôt qu'une pluie de type orageux (Musy et al., 2014). Dans leur revue sur interactions entre les arbres et les cultures dans les tropiques semi-arides, Ong & Leakey (1999) ont aussi mentionné une réduction de l'humidité du sol due à des pertes par interception. Ainsi, les bonnes conditions observées pour le caféier sous *F. thonningii* seraient principalement dues à la réduction de l'amplitude journalière d'humidité de l'air, propriété par

ailleurs déjà observée dans les systèmes agroforestiers (Lin, 2010 ; Beer, 1987 ; Ong & Leakey, 1999 ; Lott et al., 2003).

Exception faite du *Grevillea robusta*, l'humidité du sol (en période pluvieuse) dans les caféiers sous ombrage est supérieure à celle des caféiers de plein soleil. Ces résultats rejoignent ceux de de Carvalho et al. (2021) qui, dans une étude sur les arbres du système agroforestier dans les caféiers au Brésil, a conclu que l'ombrage du caféier conduit à de meilleures conditions microclimatiques comparativement au caféier conduit en plein soleil. Nos résultats montrent que ce comportement se maintient aussi bien pour la période pluvieuse que pour la période sèche au moment où de Carvalho et al. (2021) l'ont observé uniquement en période pluvieuse. D'autres recherches ont également trouvé des conditions de sol sèches surtout au début et à la fin de la période sèche sous ombrage qu'en plein soleil au Pérou (Ehrenbergerová et al., 2016), au Cambodge (Ehrenbergerová et al., 2021) mais aussi en Ouganda (Sarmiento-Soler et al., 2019).

Le comportement observé pour *G. robusta* pourrait être expliqué par son aptitude à transpirer beaucoup d'eau quand il y en a mais aussi à utiliser le peu d'eau du sol et des profondeurs dans des conditions de stress. En effet, Smith et al. (1999) ont montré que, en plus de son système racinaire profond, *G. robusta* développe aussi des racines latérales qui peuvent extraire des quantités substantielles d'eau des horizons superficiels du sol. Dans un essai au Kenya en conditions semi-arides, les arbres de *Grevillea robusta* ont transpiré environ 85% des précipitations saisonnières (Lott et al., 2003).

3.3.5. Effet des arbres d'ombrage sur la fertilité chimique du sol

a. pH et acidité d'échange

En moyenne, le pH le plus petit est de 4,4 et a été trouvé sous *Maesopsis eminii* tandis que le pH le plus élevé est de 5,3 et a été trouvé sous *Ficus thonningii*. Le niveau d'Aluminium dans le sol était à un niveau indétectable sous *F. thonningii*. C'est sous cette même essence qu'on a dosé peu d'ions H^+. Les ions Al^{3+} et H^+ ont été les plus élevés sous *Albizia gummifera* et ont été respectivement de 2,2 méq/100 g et 1,1 méq/100 g. La figure 14 montre les gains ou pertes (en %) en termes de pH et d'acidité d'échange liés à la présence de l'arbre d'ombrage.

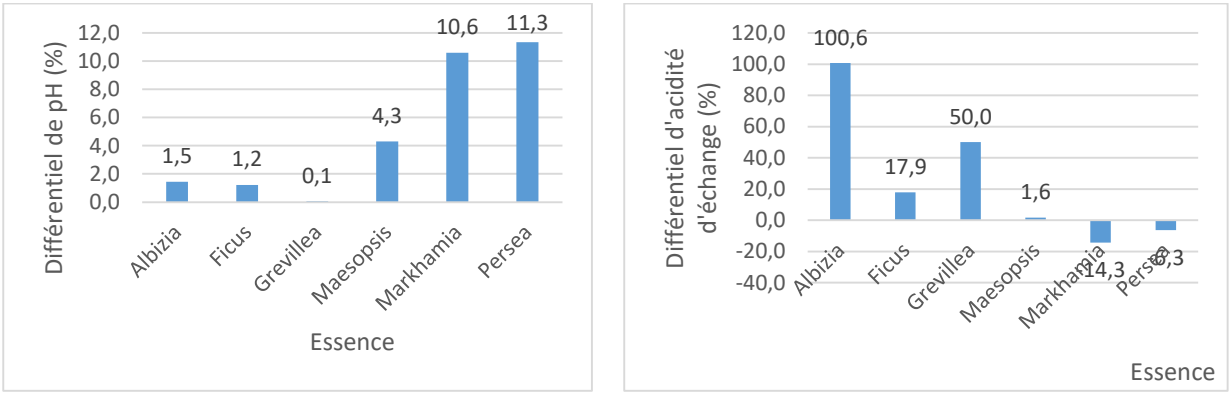


Figure 14 : Comparaison du pH eau et de l'acidité totale du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

On constate que la présence de l'arbre augmente le pH du sol comparativement au sol de plein soleil. Le pH a augmenté de 11,3% sous *P. americana*, de 10,6% sous *M. lutea*, de 4,3% sous *M. eminii*, de 1,5% sous *A. gummifera*, de 1,2% sous *F. thonningii* et seulement de 0,1% sous *G. robusta*. Dans leur travail sur *F. thonningii* en Ethiopie, Berhe et al. (2013) ont également trouvé une augmentation du pH de 4,9% sous la canopée de l'arbre par comparaison au sol en dehors de la canopée. La même observation a été faite sur *P. americana* en Ethiopie par Seid et al. (2024) qui ont observé que le pH sous avocatier était plus élevé par rapport au témoin, bien que les différences n'étaient pas significatives.

On remarque aussi que, exception faite de *P. americana* et *M. lutea* qui réduisent l'acidité d'échange, les autres espèces augmentent l'acidité d'échange du sol par rapport à la situation en plein soleil. Ces résultats sont en accord avec Habumugisha et al. (2019) qui affirme que *M. lutea* est un arbre acidifiant. Parmi les « neuf péchés » de *Maesopsis eminii*, le cinqième concerne ses effets négatifs sur les propriétés biologiques et chimiques (pH, acidité et fertilité) du sol (Msangi, 2003).

La gamme optimale de pH pour la plupart des cultures se situe entre 5,5 et 7,5 (Oshunsanya, 2018). Cependant, certaines cultures se sont adaptées à des valeurs de pH du sol situées en dehors de cette plage. Par exemple, le pH optimal pour le caféier se situe dans les niveaux acides : entre 5 et 6 (Gaie & Flémal, 1988). De manière générale, un bon pH est supérieur à 5,6, tandis qu'un sol dont le pH est inférieur à 5,2 présente des risques de problèmes graves de désaturation en bases et toxicité alumino-manganique (Tessens & Gourdin, 1993). Exception faite du sol sous *Ficus thonningii* qui en est à la limite, tous les autres sols ont des pH inférieurs à 5,2.

L'exception pour *Ficus thonningii* se maintient par des niveaux d'Aluminium indétectables dans le sol. Si l'on se rappelle que l'analyse chimique des feuilles a révélé que *Ficus thonningii* est très riche en Ca (Tableau 8), on peut émettre l'hypothèse que *F. thonningii* aurait un effet chaulant.

b. Carbone organique et azote total

En moyenne, le carbone organique du sol va de 1,0% sous *Markhamia lutea* à 2,3% sous *F. thonningii*, tandis que l'azote total va de 0,2% sous *M. eminii* à 0,3% sous *F. thonningii*. La figure 15 donne les différentiels (en %) en carbone organique et en azote du sol entre la situation sous ombrage et celle de plein soleil.

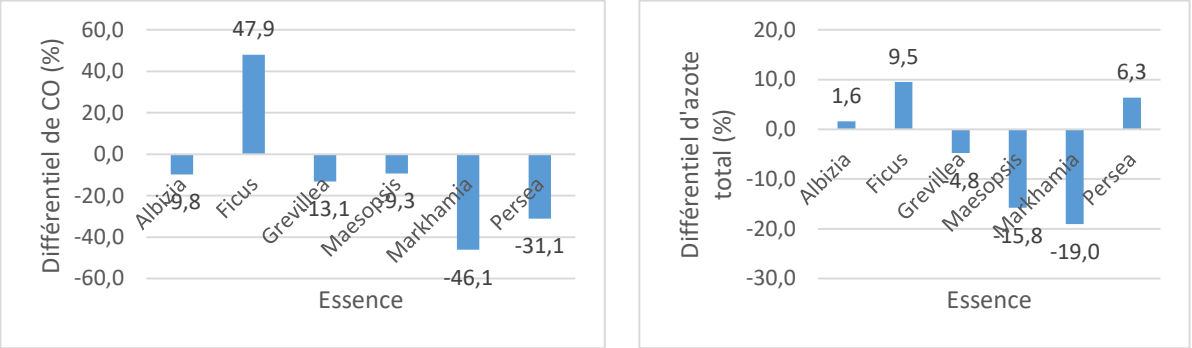


Figure 15 : Comparaison du carbone organique et de l'azote total du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

On constate que, exception faite de *F. thonningii* qui améliore la teneur en carbone organique du sol de 47,9%, les autres espèces d'arbres d'ombrage la réduisent. En Ethiopie, Berhe et al. (2013) ont également trouvé une augmentation du carbone organique dans l'horizon de surface de 54% sous *F. thonningii* par rapport au sol en dehors de la canopée. Pour *P. americana*, nos résultats sont en désaccord avec ceux de Seid et al. (2024) en Ethiopie où ils ont trouvé des teneurs en carbone organique significativement plus élevés sous l'avocatier que dans le sol témoin.

Le coefficient 1,72 permet de trouver la matière organique à partir du carbone organique (Mathieu & Piéltain, 2003). Un sol plus riche en carbone organique, et par conséquent en matière organique est qualifié de plus fertile. La matière organique du sol est une source d'éléments nutritifs pour les plantes. En effet, dans les systèmes non ou peu fertilisés, la nutrition des plantes en N, P, S et en microéléments peut dépendre fortement de la minéralisation de la matière organique du sol tandis que les cations basiques, qui ne sont

présents qu'à l'état de traces dans les substances humiques, sont fournis par la décomposition de résidus organiques frais (Herrick & Wander, 1997).

Pour la teneur en azote total, elle a augmenté sous *F. thonningii*, *P. americana* et *A. gummifera*, tandis qu'elle a diminué sous *M. lutea*, *M. eminii* et *G. robusta*. Pourtant, les teneurs en azote des litières étaient toutes normales à l'exception de *G. robusta*. Nos résultats vont dans le même sens que ceux obtenus en Ethiopie où la teneur en azote a augmenté de 36,9% sous *F. thonningii* par rapport au sol en dehors de la canopée (Berhe et al., 2013). Pour ce qui est de *P. americana*, une étude en Ethiopie a trouvé des teneurs en azote semblables sous l'avocatier que dans le sol témoin (Seid et al., 2024). L'arbre *M. eminii* était installé sur un champ en ouverture. Il faut signaler que même si *M. lutea* est une fabaceae, cet arbre ne fixe pas d'azote (Pawlick, 1989). Toutefois, nos résultats sont en désaccord avec ceux de Habumugisha et al. (2019) qui a trouvé une augmentation de l'azote total du sol sous *M. lutea* dans l'arboretum de Ruhande au Rwanda.

c. *Phosphore assimilable*

Le phosphore assimilable va de 7,5 mg/kg sous *M. lutea* à 18,8 mg/kg sous *Persea americana*. La figure 16 montre le gain ou la perte (en %) en P assimilable lié à la présence de l'arbre d'ombrage.

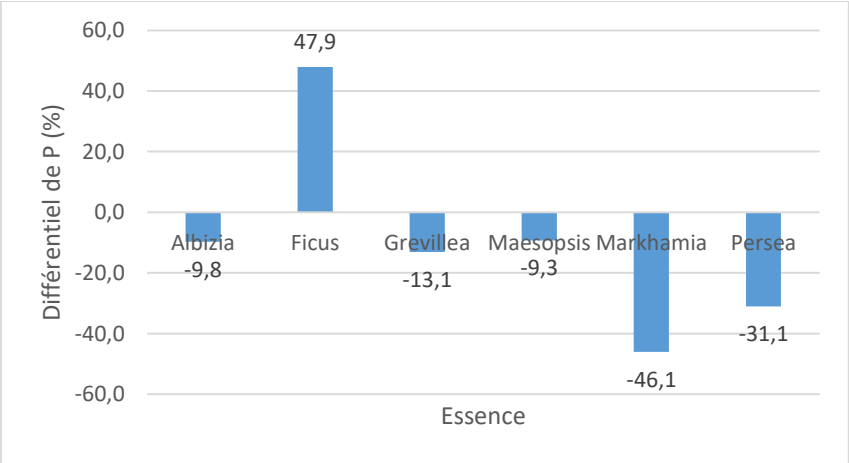


Figure 16 : Comparaison du phosphore assimilable du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

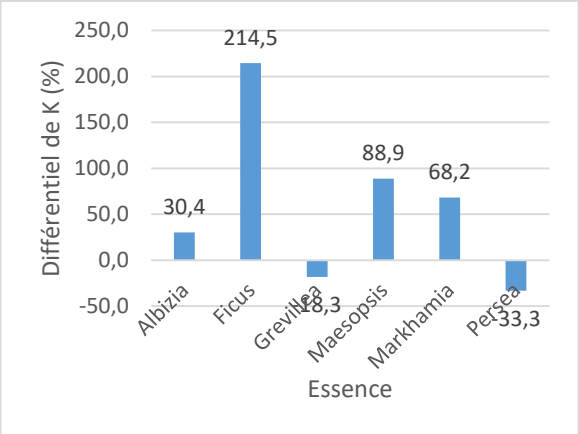
On constate que, exception faite de *F. thonningii* qui montre une augmentation de la teneur en phosphore assimilable du sol, les autres espèces d'arbres d'ombrage réduisent cette teneur. Rappelons que toutes les litières avaient des teneurs en phosphore de loin inférieures à la plus petite valeur normale de 0,2% (Motsara & Roy, 2008). Pour le cas de *F. thonningii*, ces résultats

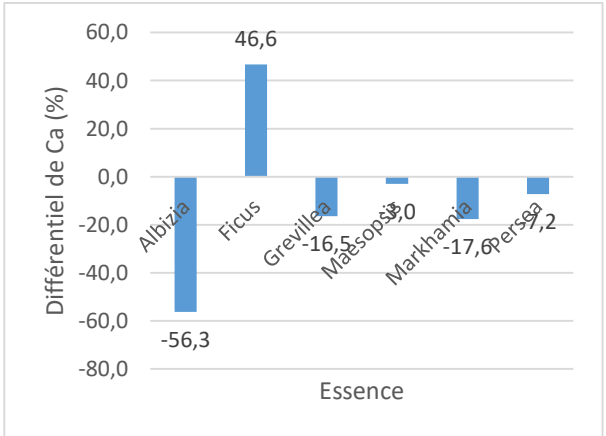
vont dans le sens de ceux de Berhe et al. (2013) en Ethiopie où ils ont trouvé une augmentation de 34,6% en phosphore assimilable du sol sous canopée par comparaison au sol en dehors de la canopée. Pour *M. lutea*, nos résultats rejoignent ceux de Habumugisha et al. (2019) au Rwanda où ils avaient également constaté une diminution de la teneur en phosphore assimilable sous *M. lutea*. En ce qui concerne *P. americana*, nos résultats sont contraires à ceux obtenus par Seid et al. (2024) en Ethiopie où les teneurs en phosphore assimilable étaient similaires sous avocatier et dans le sol témoin.

Le phosphore, bien que présent en grande quantité dans le sol, n'est généralement pas disponible pour les plantes. Il est en effet très lié, surtout en conditions de sols acides, au fer et à l'Aluminium. Dans ces sols, l'apport de matière organique peut aider à réduire les réactions de « fixation » du phosphore en liant l'aluminium, le fer et le calcium et en formant des complexes solubles avec le phosphore (Hodges, 2010). Une teneur en phosphore assimilable inférieure à 20 ppm est qualifiée de problématique (Tessens & Gourdin, 1993). En se basant sur ces normes, les sols de cette thèse présentent tous des carences en P.

d. Bases échangeables

Le potassium échangeable présente des valeurs allant de 0,14 méq/100 g sous *P. americana* à 1,31 méq/100 g sous *F. thonningii*. En ce qui concerne le calcium échangeable, les valeurs vont de 0,64 méq/100 g sous *M. eminii* à 7,07 méq/100 g sous *F. thonningii*. Pour le magnésium échangeable, les valeurs vont de 0,64 méq/100 g sous *P. americana* à 1,72 méq/100 g sous *F. thonningii*. La figure 17 montre les gains ou pertes (en %) en bases échangeables occasionnés par la présence de l'arbre d'ombrage.





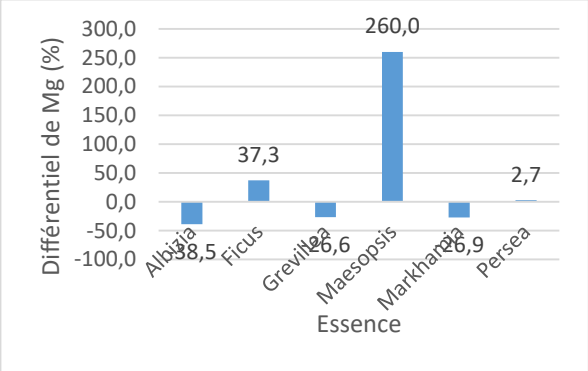


Figure 17 : Comparaison des bases échangeables du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

On constate que, exception faite de *G. robusta* et *P. americana*, la présence de l'arbre d'ombrage augmente la teneur en potassium échangeable. Pourtant, l'analyse des litières avait révélé que toutes les essences, sauf *F. thonningii*, étaient déficientes en potassium. Nos résultats pour *F. thonningii* vont dans le même sens que ceux trouvés en Ethiopie où la concentration en potassium du sol de l'horizon de surface sous la canopée de *F. thonningii* dépassait de 60% celle du sol en dehors de la canopée (Berhe et al., 2013).

En ce qui concerne la teneur en calcium du sol, exception faite de *F. thonningii* pour lequel cette teneur augmente, elle diminue pour toutes les autres espèces d'arbre. Pourtant, toutes les litières de ces arbres avaient des teneurs normales en calcium c'est-à-dire comprises entre 1,1 et 1% selon Motsara & Roy (2008).

Comparée à la situation en plein soleil, la teneur en magnésium a augmenté dans les sols sous *M. eminii*, *F. thonningii* et *P. americana* de respectivement 260%, 37,3% et seulement 2,7%. Par contre, elle a diminué dans les sols sous *M. lutea*, *G. robusta* et *A. gummifera* de respectivement 26,9%, 26,6% et 38,5%. Pourtant, toutes les litières avaient des valeurs normales en magnésium, c'est-à-dire comprises entre 0,1 et 0,4% selon Motsara & Roy (2008).

Le sol sous *F. thonningii* est plus riche en cations échangeables que les sols sous les autres arbres d'ombrage. Il convient de rappeler que les feuilles de *F. thonningii* étaient les plus riches en potassium et en calcium que les autres essences, tandis qu'il venait en deuxième position pour le Mg après *Maesopsis eminii* (Tableau 8). En se référant à Tessens & Gourdin (1993), la teneur en potassium est faible sous *M. eminii* et *P. americana*, moyenne sous *G. robusta* et *M. lutea*, et bonne à très bonne sous *A. gummifera* et *F. thonningii*. La teneur en calcium est faible pour toutes les essences (entre 0,2 et 4 méq/100 g de sol) tandis qu'elle est moyenne sous *F. thonningii*. Les normes proposent de 4 à 10 méq/100 g de sol selon Landon (1991). Les teneurs

en calcium des sols analysés sont supérieures au seuil de carence de 0,2 cmolc.kg^{-1}, limite en dessous de laquelle des applications de calcaire sont recommandées (Nijimbere et al., 2020). Selon les normes de Tessens & Gourdin (1993), la teneur en magnésium est faible à très faible sous *M. lutea* et *M. eminii*, moyenne sous *G. robusta*, *P. americana* et *A. gummifera*, et bonne sous *F. thonningii*.

e. Capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC va de 7,5 méq/100 g sous *M. eminii* à 14,2 méq/100 g sous *F. thonningii*. La figure 18 montre les accroissements ou diminutions (en %) de la CEC du sol sous ombrage par rapport à celui de plein soleil.

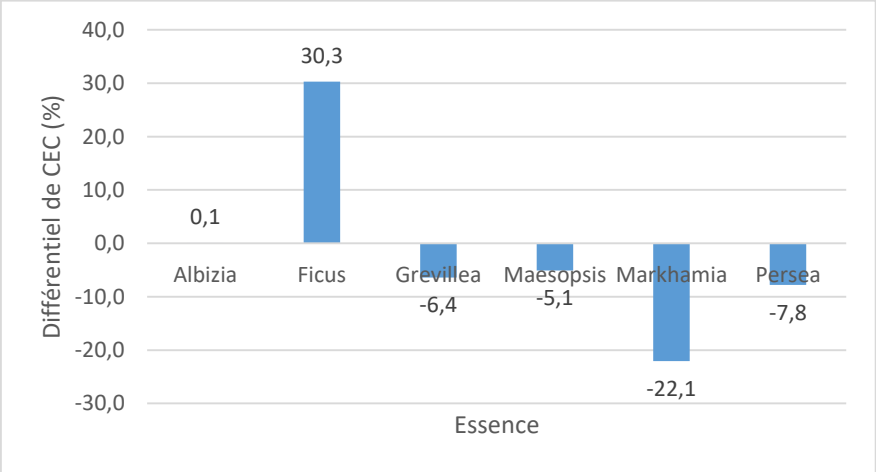


Figure 18 : Comparaison de la CEC du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

On constate que le sol sous *F. thonningii* présente une CEC supérieure à celle du sol de plein soleil de 30,3%. *A. gummifera* présente une CEC très proche de celle de plein soleil. Les sols sous les autres espèces d'arbres présentent des CEC inférieures à celles de plein soleil.

Les valeurs de CEC du sol comprises entre 5 et 15 méq/100 g de sol sont qualifiées de faibles (Landon, 1991) ou faibles à modérées (Hazelton & Murphy, 2016). Ainsi, les sols de cette étude présentent des CEC faibles à modérées selon les normes de Landon (1991). Un sol avec une CEC faible signifie généralement que ce sol présente une faible teneur en argile et en matière organique, et a une faible capacité de rétention d'eau. De ce fait, sa fertilité est très faible. Cependant, ces types de sols sont généralement plus faciles à cultiver que les sols avec une CEC plus élevée car ils se drainent plus rapidement (Hodges, 2010).

f. Indicateurs dérivés des données analytiques

Rapport C/N, pourcentage de saturation en bases (PSB) et CECE

Les rapports C/N varient de 5,9 sous *P. americana* à 7,9 sous *M. eminii*. Le pourcentage de saturation en bases varie de 23,6% sous *M. eminii* à 97,1% sous *F. thonningii* tandis que la CECE varie de 4,2 sous *M. eminii* à 10,4 sous *F. thonningii*. La figure 19 montre les gains ou pertes en termes de rapport C/N et du pourcentage de saturation en bases.

On constate que pour deux arbres, le sol sous ombrage présente un rapport C/N supérieur à celui de plein soleil. Il s'agit de *F. thonningii* et M. eminii où le gain en rapport C/N est de 26,5% et 7,7% respectivement. En sols cultivés, un rapport C/N ≤ 9 indique une bonne humification, alors que des valeurs ≥12 sont indicatrices des difficultés de minéralisation de la matière organique (Nijimbere et al., 2020). Les sols des caféières pouvant bien être qualifiés de sols cultivés, on constate que les sols analysés présentent un degré de minéralisation avancé de la matière organique.

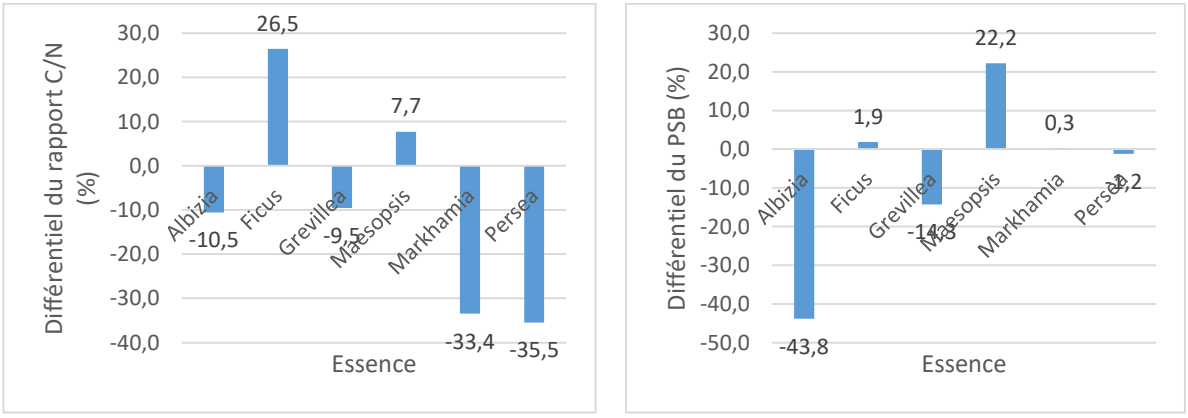


Figure 19 : Comparaison du rapport C/N et du pourcentage de saturation en bases du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

Bien que la valeur de PSB du sol sous *M. eminii* ait été la plus petite, le PSB sous l'arbre est de 22,2% supérieur au sol de plein soleil. Deux arbres permettent d'améliorer légèrement le pourcentage de saturation en bases du sol par rapport au plein soleil. Il s'agit de *F. thonningii* et de *M. lutea* pour lesquels il y a eu un gain en PSB de 1,9% et de 0,3% respectivement. Les pourcentages de saturation en bases sont compris entre 40 et 80% sont qualifiés de bons tandis qu'ils sont faibles entre 20 et 40%. Au-delà de 80%, ils sont élevés, tandis qu'ils sont très faibles en dessous de 20% (Tessens & Gourdin, 1993). On en déduit que les taux de saturation en bases sont élevés sous *F. thonningii*. Ils sont bons pour le reste des arbres d'ombrage à l'exception du sol sous *M. eminii* dont le PSB est faible.

Deux arbres permettent d'améliorer la CECE du sol par rapport au plein soleil. Il s'agit de de *F. thonningii* et de *M. lutea* pour lesquels il y a eu un gain respectif de 50,6% et de 7,3%. Sous les autres arbres, la CECE est inférieure à celle de plein soleil. Pour les sols tropicaux altérés, il est intéressant de vérifier l'égalité entre la somme des teneurs en cations échangeables, appelée aussi capacité d'échange cationique effective (CECE) et la CEC expérimentale (Nijimbere et al., 2020). La figure 20 montre que, à l'exception d'un échantillon, les CECE calculées sont largement inférieures aux CEC. En d'autres termes, la CEC expérimentale a été surestimée, ce qui indique la présence d'une grande quantité de substances à charges variables (charges qui varient avec le pH du milieu). Ces charges peuvent provenir de la kaolinite, des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et de la matière organique (Nijimbere et al., 2020).

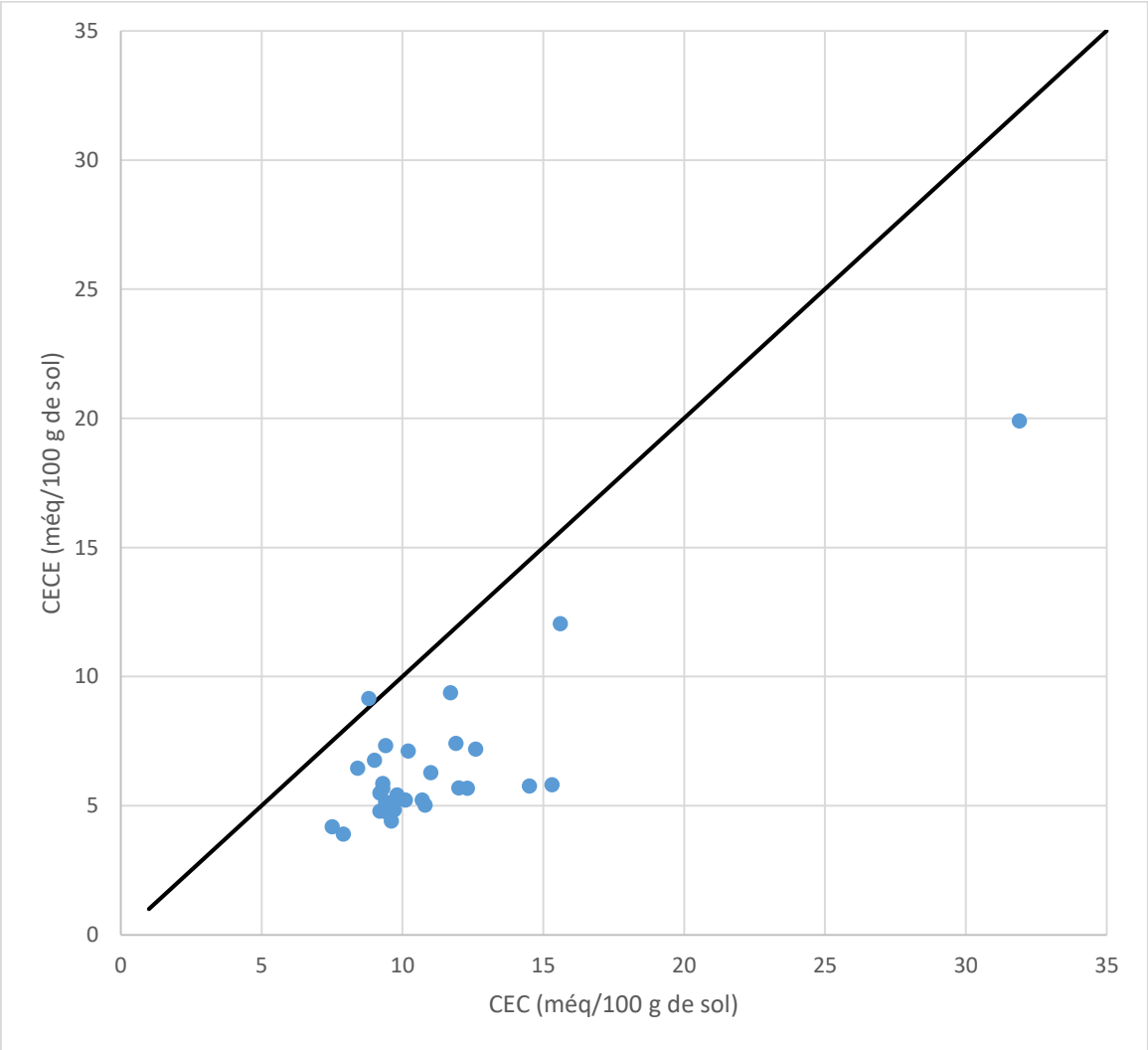


Figure 20 : Comparaison entre la CEC effective et la CEC

Le pourcentage de saturation en bases sous *F. thonningii* est supérieur à celui des autres essences. Selon les normes de Landon (1991), on remarque que le sol sous *M. eminii* présente un faible taux de saturation en bases (entre 20 et 40%). Ce dernier est élevé (> 80%) pour le sol sous *F. thonningii* tandis qu'il est bon (entre 40 et 80%) pour le reste des essences.

Indice de Kamprath (m) et facteur d'évaluation du sol (FES)

L'indice de Kamprath (ou taux de saturation en aluminium) varie entre 0% sous *F. thonningii* et 28,4% sous *M. eminii*.

L'indice de Kamprath sous *F. thonningii* est nul et est inférieur aux indices sous *M. eminii* et *A. gummifera*. La valeur la plus élevée de l'indice de Kamprath a été de 28,4%. Or, un indice inférieur à 30% indique que seules les plantes sensibles sont affectées par la toxicité en Al (Landon, 1991). Il n'y a donc pas de risque de toxicité en aluminium pour les sols analysés.

Quant au facteur d'évaluation du sol (FES), il varie entre 4,9 méq/100 g de sol sous *M. eminii* et 15,1 méq/100 g de sol sous *F. thonningii*. La figure 21 montre les gains ou perte (en %) liés à la présence de l'arbre d'ombrage en termes de facteur d'évaluation du sol.

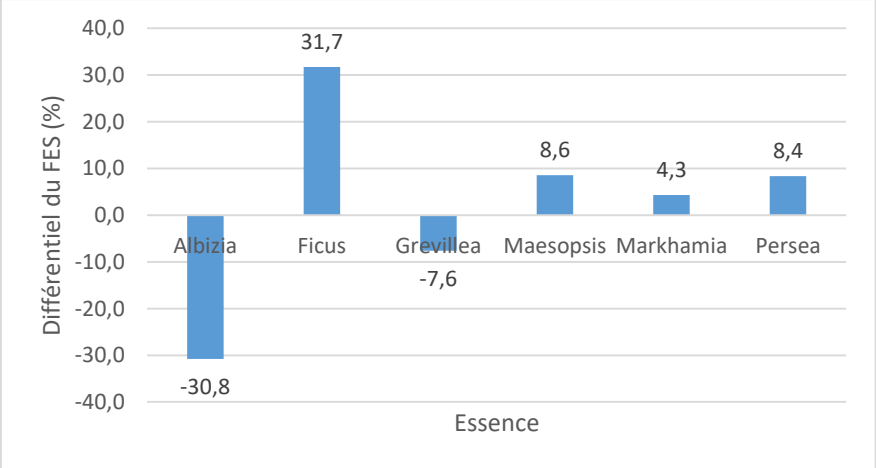


Figure 21: Comparaison du facteur d'évaluation du sol sous arbres d'ombrage du caféier et de plein soleil

Quatre arbres conduisent à des FES plus élevés par comparaison au plein soleil. Il s'agit de *F. thonningii*, *M. eminii*, *P. americana* et *M. lutea* pour lesquels le FES est amélioré respectivement de 31,7%, de 8,6%, de 8,4% et de 4,3%. Par contre, le FES est diminué sous l'ombrage d'*A. gummifera* de 30,8% et de *G. robusta* de 7,6%. Des facteurs d'évaluation du sol inférieurs à 5 indiquent une fertilité extrêmement faible du sol. Plus FES est élevée, plus élevée

est la fertilité du sol (Lu et al., 2002). On conclut que le sol sous *F. thonningii* est plus fertile que le sol sous les autres arbres d'ombrage.

3.4. Conclusion partielle

Ce chapitre avait pour objectif d'évaluer les effets des arbres d'ombrage du caféier sur le sol et son humidité, mais aussi d'évaluer la qualité des litières des arbres d'ombrage ainsi que la réponse du soja à leur application dans un essai en plein champ.

Il s'est basé sur des échantillons de sols qui étaient pris sous des arbres d'ombrage du caféier choisis dans la zone des plateaux centraux. Les espèces d'arbres concernés par cette étude étaient : *Ficus thonningii, Markhamia lutea, Maesopsis eminii, Persea americana*, *Albizia gummifera* ainsi que *Grevillea robusta*. Toutes les plantations de caféiers étaient installées sur des sols acides et pauvres en éléments nutritifs, les Ferralsols.

La qualité des litières est fonction de leur contenu ainsi que de leur aptitude à libérer les éléments qu'ils contiennent. Il a été constaté que toutes les espèces sont déficientes en P. L'espèce *F. thonningii* réunit toutes les autres qualités. Les quatre espèces (*Persea americana, Maesopsis eminii, Markhamia lutea*, et *Albizia gummifera*) suivent. Ils présentent des pH acides et sont déficients en K. *G. robusta* vient en dernière position. Il est déficient en tous les éléments analysés, à l'exception du Ca, mais aussi une décomposition lente et une immobilisation de l'azote.

De manière générale, les litières jugées de bonne qualité ont conduit à de meilleures conditions de fertilité chimique du sol. En effet, bien que tous les sols sous les arbres d'ombrage aient présenté des pH acides, il a été constaté que le pH du sol sous *F. thonningii* a été le plus élevé. Sous cette espèce, l'aluminium était à des niveaux indétectables, d'où l'hypothèse d'un probable effet chaulant du *F. thonningii* de par le fait que ses feuilles étaient aussi plus riches en Ca. L'espèce *F. thonningii* a gardé sa première place pour pratiquement tous les paramètres chimiques du sol : carbone organique, azote, les bases échangeables (Ca, Mg, K), la CEC, la SB, la CECE, le PSB et l'indice de Kamprath.

L'indice global de fertilité du sol (facteur d'évaluation du sol) a été observé sous *Ficus thonningii*. Il a également été observé que, pour quatre espèces, la présence de l'arbre d'ombrage permet d'améliorer la fertilité du sol des caféières comparativement à celui du plein soleil. Il s'agit de *Ficus thonningii, Maesopsis eminii, Persea americana* et *Markhamia lutea*.

Par contre, la fertilité du sol sous ombrage est diminuée par comparaison à celui de plein soleil pour *Albizia gummifera* et pour *Persea americana*.

Pour ce qui est de la réponse de la culture de soja, cette étude a montré que, exception faite de *G. robusta*, les rendements de cette culture obtenus après l'application des autres litières étaient comparables à celui du fumier d'étable. *Grevillea robusta* a partagé le même groupe avec le témoin, c'est-à-dire sans aucun amendement. Ces résultats confirment l'importance des dépôts de litière foliaire morte dans les exploitations en ce qui concerne la fertilité des sols en présence.

L'essai a été fait sur le soja parce que les effets étaient difficiles à évaluer sur la production du café, une culture pluriannuelle. La production de cette dernière est aussi fonction des arbres présents ainsi que la quantité de lumière reçue. Cet aspect est abordé à travers le chapitre qui suit.

Chapitre 4. Les arbres d'ombrage influencent la production du caféier

4.1. Introduction

Plusieurs facteurs influencent la production du caféier. Si la variété cultivée ne pose aucun problème, et si les conditions climatiques sont favorables, la production du caféier est directement proportionnelle au niveau des soins qui lui sont appliqués. Le caféier donne des productions variées en fonction de l'utilisation optimale ou non des ressources. Par exemple, le niveau de productivité de l'Indonésie est de 760 kg/ha, tandis que le Vietnam peut atteindre 2000 à 3000 kg/ha et le Brésil, 3000 à 4000 kg/ha (Rahmanta et al., 2019).

L'introduction des arbres d'ombrage dans les caféiers est une solution pour l'atténuation des effets des changements climatiques. Une étude au Brésil a conclu que, dans le contexte de changement climatique, l'adoption de systèmes agroforestiers avec 50 % d'ombre peut réduire les températures moyennes et maintenir 75 % des superficies propices à la production de café en 2050 (Gomes et al., 2020). En effet, en plus de leurs avantages sur la conservation de la biodiversité et de leurs services écosystémiques (Perfecto et al., 2005), les arbres d'ombrage influent sur la disponibilité des éléments nutritifs par recyclage (Piato et al., 2020). L'ombre peut aussi réduire les dommages causés par les ravageurs et les maladies grâce à différents processus physiques et biologiques tels que la conservation ou la facilitation de l'action des ennemis naturels, l'obstruction physique, les stimulants et les répulsifs, etc. (Alemu, 2015).

Les effets des arbres sont liés aux arbres en présence. En effet, les arbres diffèrent en termes de hauteur, de la forme et de l'étendue de la canopée et diffusent des quantités de lumière différentes. La gestion des arbres doit veiller à laisser un ombrage qui ne défavorise pas la production du caféier. En effet, une augmentation de l'ombrage peut affecter la physiologie des caféiers, en privilégiant la croissance végétative plutôt que la floraison ou la production des nœuds par branche (DaMatta, 2004). Alors que les niveaux d'ombre supérieurs à 50 % dans les plantations de café sont associés à une diminution de la productivité du café, les niveaux d'ombre inférieurs à 50% ne semblent pas compromettre le rendement (Alemu, 2015). Pour d'autres, une plage d'interception de la lumière par les arbres d'ombrage variant entre 40 et 75% est considérée comme étant la limite supérieure de l'ombre acceptable (Rigal et al., 2020).

Même en cas de caféiers de plein soleil, les branches de ces derniers exercent de l'auto ombrage qui n'est pas sans conséquences. En effet, il a été observé que les branches inférieures en particulier sont ombragées et ne produisent pas aussi bien qu'elles le pourraient avec une meilleure lumière et les arbres ont tendance à pousser très haut (Beaumont & Fukunaga, 1958).

Ce chapitre analyse les effets des arbres d'ombrage en insistant sur la lumière transmise par ces derniers sur la production du caféier dans les conditions des plateaux centraux burundais. A notre connaissance, une telle étude n'avait jamais été réalisée au Burundi ou bien sur les espèces d'arbres qui sont suivies dans cette recherche. Il y a une étude en Ethiopie qui a analysé les effets des arbres d'ombrage comprenant aussi *Albizia gummifera* sur la production du café (Ebisa, 2014). Une partie des résultats fait partie d'un mémoire de Master (Nyandwi, 2022).

4.2. Le rayonnement solaire et la production de biomasse

La production de biomasse par le biais de la photosynthèse a besoin de l'énergie. Cette énergie provient de la transformation de l'énergie radiante solaire en ATP qui fournit de l'énergie nécessaire aux processus vitaux dans les cellules.

La lumière est l'un des facteurs environnementaux qui joue un rôle important dans la croissance et le développement des plantes. Il existe une relation entre la matière sèche totale accumulée par un végétal et la quantité d'énergie interceptée (Negash et al., 2021).

L'énergie rayonnante totale du soleil est appelée « irradiance » solaire totale. Seulement environ 5% de l'énergie atteignant la terre peut être convertie en glucides par photosynthèse car toutes les longueurs d'onde de la lumière incidente ne peuvent pas être absorbées par les pigments photosynthétiques. Le rayonnement utile à la photosynthèse (ou Photosynthetically Active Radiation, PAR) représente la fraction de la lumière solaire de 400 à 700 nm et est la source d'énergie cruciale pour les plantes (Taiz et al., 2015).

Le PAR absorbé par un couvert végétal (PARa) est exprimé par la relation suivante (Gosse et al., 1986):

$$PAR_a = (PAR_i + PAR_{ts}) - (PAR_r + PAR_t) \qquad [4.1]$$

Avec PAR = Energie utile à la photosynthèse (en $W.m^{-2}$ ou en mole de $photons.m^{-2}.s^{-1}$) : a = absorbée ; i = incidente ; ts = réfléchie par le sol ; r = réfléchie par l'ensemble sol-culture et t = transmise au sol.

En négligeant les composantes réfléchies par le sol et par la couverture végétale, on a la relation

$$PAR_a = PAR_i - PAR_t \quad [4.2]$$

Cette relation peut aussi s'écrire :

$$PAR_a = LI * PAR_i \quad [4.3]$$

Où LI est l'efficience d'interception de la lumière par le couvert végétal. Il est calculé comme suit :

$$LI = 1 - \frac{PAR_t}{PAR_i} \quad [4.4]$$

LI intervient dans le calcul du coefficient d'extinction lumineuse de la loi de Beer selon l'équation suivante (Negash et al., 2021):

$$\frac{PAR_t}{PAR_i} = 1 - exp(-k * LAI) \quad [4.5]$$

Avec LAI = l'indice de surface foliaire

En réarrangeant cette relation, on trouve la relation suivante pour le coefficient d'extinction de la lumière de Beer (Negash et al., 2021):

$$k = \ln(T)/LAI \quad [4.6]$$

Avec T la fraction de transmittance du rayonnement incident.

$$T = \frac{PAR_t}{PAR_i} \quad [4.7]$$

Les végétaux développent des mécanismes physiologiques variés pour s'adapter au rayonnement solaire. C'est ainsi par exemple que les feuilles exposées au plein soleil n'ont pas la même structure que celles sous ombrage. Les feuilles de plein soleil sont plus épaisses et produisent plus de matière sèche par surface que les feuilles sous ombrage (Lambers et al., 2008). Une intensité de PAR trop élevée ou trop faible provoque une photoinhibition. Le PAR fluctuant en fonction de l'heure de la journée et de la couverture nuageuse (Lieffers et al., 1999), sans oublier les irrégularités et trous au sein de la canopée (Lambers et al., 2008), les plantes ont développé des mécanismes pour maintenir un équilibre entre la conversion de l'énergie du rayonnement (protégeant ainsi l'appareil photosynthétique de la photoinhibition) et la réparation des dommages possibles (Taiz et al., 2015).

4.3. Matériels et Méthodes

Cette recherche a été conduite dans la zone des plateaux centraux du Burundi. Les plantations de caféiers ont été choisies dans quatre provinces : Muramvya (commune Rutegama), Gitega (commune Giheta), Ngozi (commune Busiga) et Kayanza (commune Kayanza) dans le champ expérimental sur le café d'ombre de l'ISABU.

4.3.1. Choix des plantations de café et des caféiers

Les plantations de caféiers retenues pour l'analyse de la fertilité (chapitre trois) ont également fait l'objet de mesures de la pénétration lumineuse, mais aussi de la production du café. Les mesures de lumière ont également concerné les plantations de l'ISABU sur le café d'ombre à Kayanza.

Les essences d'arbres d'ombrage du chapitre trois de cette thèse sont les mêmes qui ont fait l'objet de mesures de la lumière. Il s'agit de : *Albizia gummifera, Markhamia lutea, Grevillea robusta, Persea americana, Ficus thonningii* et *Maesopsis eminii*. Ces arbres étaient marqués à la peinture rouge.

Comme nous avons travaillé avec les plantations existant en milieu rural, le nombre d'arbres de chaque espèce a varié avec le temps. Pour la production du café, en 2000 la collecte des données a été effectuée sur les caféiers se trouvant sous 2 *A. gummifera*, 2 *F. thonningii*, 1 *G. robusta*, 1 *M. eminii*, 1 *M. lutea* et 1 *P. americana*. En 2001 la collecte des données a été effectuée sur les caféiers se trouvant sous 1 *A. gummifera*, 4 *F. thonningii*, 6 *G. robusta*, 6 *M. eminii*, 3 *M. lutea* et 2 *P. americana*, tandis qu'en 2021, on a travaillé sous 2 *A. gummifera*, 4 *F. thonningii*, 6 *G. robusta*, 3 *M. eminii*, 2 *M. lutea* et 2 *P. americana*. Les données des fleurs et fruits ont été collectées sur les caféiers se trouvant sous 1 *A. gummifera*, 6 *F. thonningii*, 5 *G. robusta*, 5 *M. eminii*, 2 *M. lutea* et 1 *P. americana*.

4.3.2. Choix des caféiers à suivre

Que ce soit pour le suivi de la production ou pour les mesures de la pénétration lumineuse à travers le caféier lui-même, ces opérations étaient réalisées sur les mêmes pieds de caféiers identifiés sous les arbres d'ombrage.

Partout où cela était possible, la méthode des transects diagonales perpendiculaires (Figure 22) a été utilisée en prenant comme centre l'arbre d'ombrage et en sélectionnant 8 pieds de caféiers sous chaque arbre d'ombrage. Tous les pieds sélectionnés étaient marqués et numérotés à la peinture rouge. De la même manière, les pieds de café qui sont loin de l'influence de l'arbre d'ombrage étaient identifiés puis marqués et numérotés en suivant la même procédure à partir d'un arbre d'ombrage imaginaire. Ces caféiers sont considérés comme étant de plein soleil.

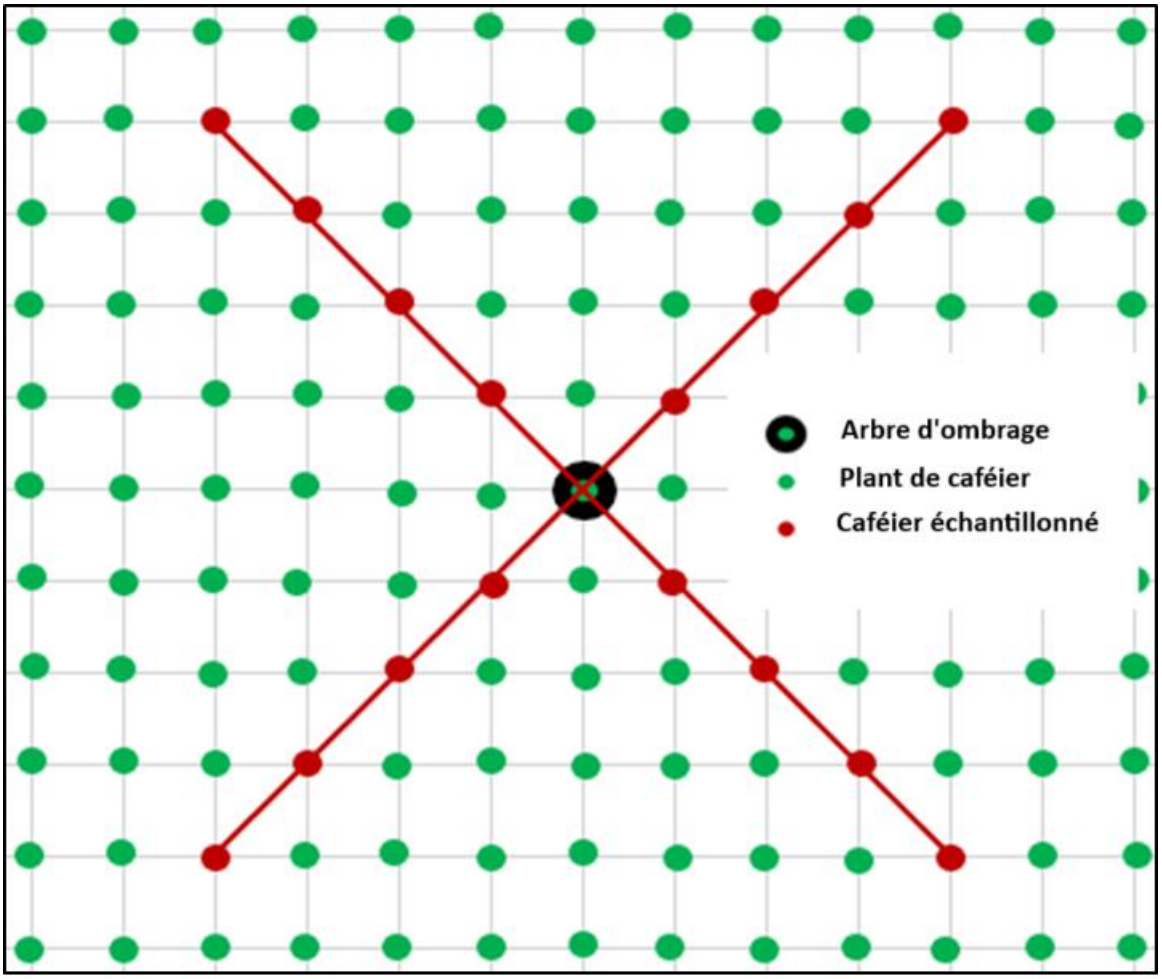


Figure 22 : Méthode des transects diagonales utilisée dans le choix des pieds de caféiers

4.3.3. Mesure de la pénétration lumineuse

La mesure de la lumière était réalisée en utilisant un capteur de quantas (line quantum sensor, modèle MQ-301) qui dispose d'une série de dix capteurs quantiques disposés linéairement (Figure 23). Cet instrument fournit des données du PAR en $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. Comme la fraction qui

pénètre un couvert végétal est proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente, il a fallu normaliser les mesures par rapport à la lumière incidente. Pour y arriver, deux capteurs étaient manipulés en même temps : un en conditions de couverture (par l'arbre seul ou en combinaison avec le caféier lui-même) et l'autre en absence de toute couverture, c'est-à-dire sans aucun ombrage. C'est une méthode qui permet de se dédouaner des conditions climatiques (Lieffers et al., 1999). Les résultats des mesures ont ainsi pu être exprimés en proportions, en pourcentage de PAR transmis par rapport à l'incident, ce qui a permis de s'affranchir des variations liées aux conditions climatiques. La prise des mesures était faite dans l'intervalle de 11 h et 13 h, période où les rayons solaires arrivent plus ou moins verticalement. Les mesures s'arrêtaient par temps nuageux.



Figure 23 : MQ-301 Line Quantum sensor with 10 Sensors and Handle held meter

Source : (Apogee Instruments, 2020)

Pour ce faire, deux opérateurs agissent concomitamment, chacun avec son capteur (L1 et L2). Une comparaison des deux instruments a montré que les lectures sur L1 étaient de 15 unités inférieures à celles de L2. C'est une erreur systématique et les calculs ont été faits après correction. Le premier se place au point A où il prend les mesures du PAR en découvert (Figure

24). Comme les capteurs sont opérés manuellement, et ne pouvant pas monter et se placer au sommet de l'arbre, le PAR reçu au sol en découvert est considéré comme étant égal au PAR au sommet de la cime de l'arbre. Le deuxième opérateur se place soit au point B soit au point C. Dans cette recherche, le PAR qui est capté au point B est considéré comme étant celui qui a traversé la canopée de l'arbre tandis que le PAR qui est mesuré au point C est considéré comme étant celui qui a traversé la canopée de l'arbre et la canopée du caféier. On peut aussi raisonnablement considérer le PAR qui arrive au point B comme étant celui qui arrive au sommet du caféier. Dans cette étude, la fraction réfléchie par le sommet des couverts végétaux n'a pas été considérée pour la simple raison que les équipements à notre disposition ne permettaient pas la mesure de cette composante. Mais de tels équipements mesurent le rayonnement solaire direct ainsi que le rayonnement diffusé (Lieffers et al., 1999).

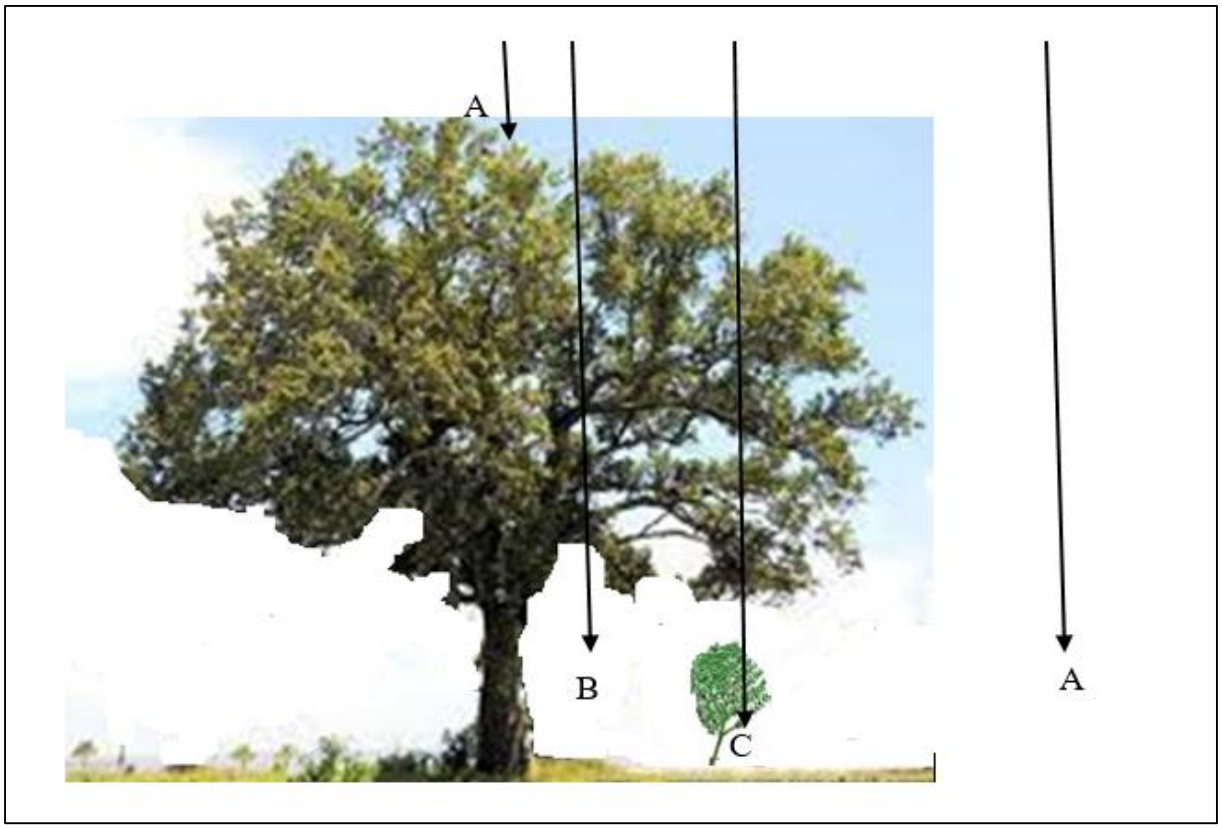


Figure 24 : Méthodologie de prise des mesures du PAR

Source : Représentation personnelle, images tirées de Google

Ainsi, on peut écrire :

L'efficience d'interception de la lumière par le couvert de l'arbre

$$LI_{arbre} = 1 - \frac{PAR_{en\,B}}{PAR_{en\,A}} \quad [4.8]$$

L'efficience d'interception de la lumière par le couvert du caféier

$$LI_{caféier} = 1 - \frac{PAR_{en\,C}}{PAR_{en\,B}} \quad [4.9]$$

Le pourcentage d'ombre n'est rien d'autre que l'efficience d'interception multiplié par 100.

Lors de la prise des mesures du PAR avec le MQ-301, l'opérateur doit veiller à ce que l'appareil reste à l'horizontal. Un niveau à bulle présent sur l'appareil l'aide dans ses vérifications. Cet équipement dispose d'un système d'acquisition des données qui permet de stocker 99 observations au maximum. L'opérateur doit télécharger les données s'il veut continuer la prise des mesures dépassant 99 observations sinon les dernières mesures écrasent les premières (Apogee Instruments, 2020).

4.3.4. Suivi de la production du café

Les pieds de caféier choisis au point 4.3.2 ont également fait l'objet de suivi de la production et des paramètres de production (floraison, fructification). Pour chaque pied de caféier choisi, une paire de rameaux fructifères était sélectionnée à trois niveaux de la tige parmi les branches du sommet, celles du milieu et celles du bas de la tige. Les rameaux sélectionnés étaient aussi marqués à la peinture rouge.

Pour chaque paire de rameaux, le nombre de fleurs et de cerises étaient comptés. Les cerises mures étaient récoltées et pesées, à l'aide d'une balance, pour chaque paire de rameaux sélectionnée. Elles étaient par la suite mises ensemble avec les cerises récoltées sur tout le pied choisi, puis données au propriétaire pour continuer le cheminement vers la station de lavage.

Connaissant le nombre total de fleurs et de cerises vertes pour chaque paire de rameaux, on peut ainsi calculer le nombre moyen de fleurs (Fl) et de cerises (Ce) par pied de caféier. Le taux de chute des fleurs (Tc) est donné par la relation :

$$T_c = \frac{Ce}{Fl} * 100 \quad [4.10]$$

4.3.5. Analyses statistiques des données

Pour chaque paramètre, les statistiques descriptives étaient calculées. La comparaison des moyennes était faite en recourant à l'analyse de la variance (ANOVA). Avant cette analyse, on vérifiait d'abord la normalité des données et l'égalité des variances.

La normalité des données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk.

- En cas de données normales, le test de Bartlett a été utilisé pour vérifier l'égalité des variances
- En cas de données qui ne vérifient pas l'hypothèse de normalité, c'est le test de Levene qui a été utilisé pour vérifier l'égalité des variances.

Pour procéder à la comparaison des moyennes, dans le cas où l'homoscedasticité (égalité des variances) est vérifié, l'ANOVA 1 a été réalisée. Au cas où l'ANOVA conclut en des différences significatives ($p < 0,05$), le test post hoc LSD (Least Significant Difference) était conduit. Dans le cas contraire, l'analyse s'arrêtait là. Si l'hypothèse d'égalité des variances n'est pas vérifiée, le test hétéroscédastique de Welch est utilisé. Il s'agit d'une alternative à l'ANOVA mais qui est robuste. Si le test de Welch est significatif, le post hoc test utilisé est Games Howell. Le test de Tukey peut aussi être utilisé et donne des résultats similaires.

Pour des données ni normales ni hétéroscédastiques, on a utilisé le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. E si le test était significatif, la comparaison par paires était faite en utilisant le test de Wilcoxon.

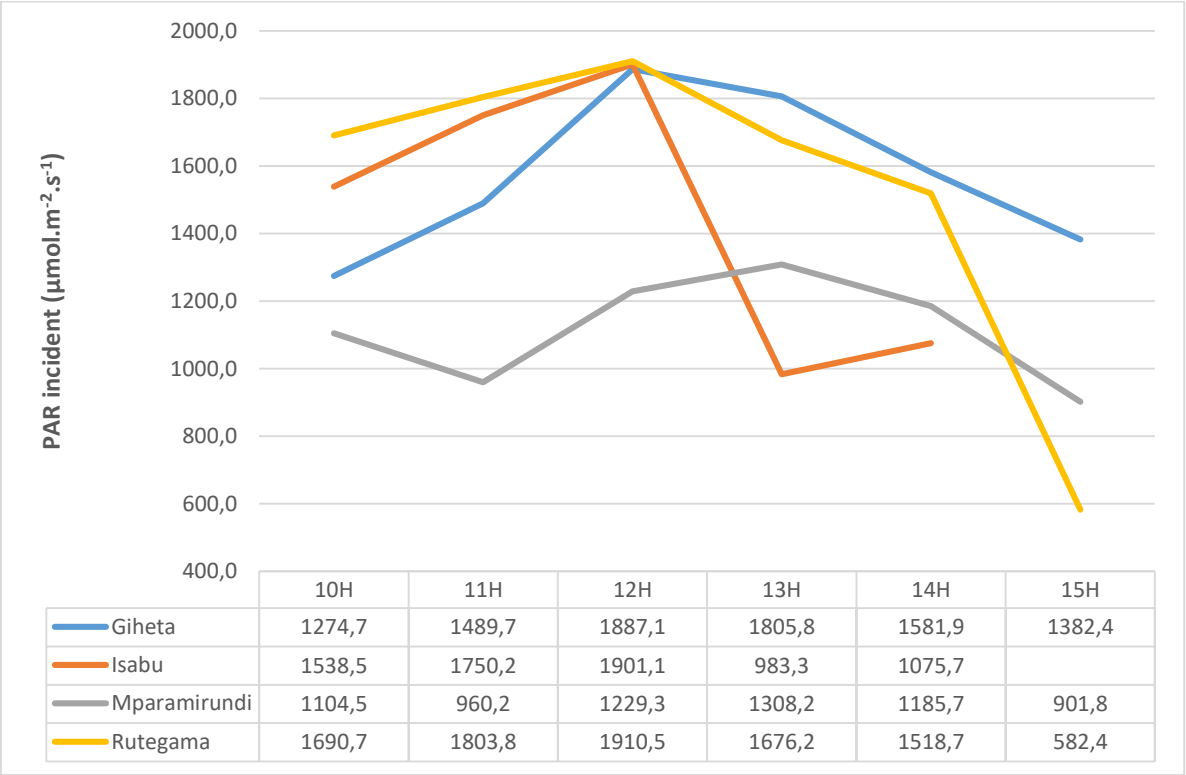
Ces analyses ont été effectuées en utilisant le logiciel R (R Core Team, 2021), tandis que les graphiques ont été tracés en utilisant Excel.

4.4. Résultats et discussion

Les résultats sont présentés soit sous forme de tableaux de synthèse soit sous forme de graphiques.

4.4.1. Evolution journalière de l'intensité moyenne du PAR incident

L'évolution du PAR incident est présentée par la figure 25. On observe une courbe en forme de cloche qui passe par un maximum à midi.



	10H	11H	12H	13H	14H	15H
Giheta	1274,7	1489,7	1887,1	1805,8	1581,9	1382,4
Isabu	1538,5	1750,2	1901,1	983,3	1075,7	
Mparamirundi	1104,5	960,2	1229,3	1308,2	1185,7	901,8
Rutegama	1690,7	1803,8	1910,5	1676,2	1518,7	582,4

Figure 25 : Evolution journalière du PAR incident pour les quatre sites

Exception faite pour Mparamirundi où le pic est atteint à 13 heures avec 1 308,2 µmol.m^{-2}.s^{-1}, le PAR incident atteint son maximum à midi (de 1 887,1 µmol.m^{-2}.s^{-1} à Giheta à 1 910,5 µmol.m^{-2}.s^{-1} à Rutegama). Ce comportement général avait déjà été décrit pour la zone équatoriale (Singapour) où plus de rayonnement était reçu dans l'heure de midi comparativement à l'heure d'avant et à l'heure d'après (Tan & Goh, 1977). Ces résultats permettent de conclure que, dans la mesure du possible, les mesures de PAR devraient s'effectuer entre 11 heure et 13 heure.

4.4.2. Pénétration lumineuse à travers les différentes essences d'arbres

Les taux moyens de pénétration de la lumière à travers les cimes des arbres d'ombrage ont été calculés à partir des mesures faites en avril, mai et juillet 2022. Une comparaison a été faite avec la pénétration à travers les caféiers de plein soleil. Les résultats sont présentés sur la figure 26.

Comme on pouvait s'y attendre, les caféiers de plein soleil laissent passer plus de lumière (35,8%). Les arbres *Maesopsis eminii*, *Albizia gummifera* et *Ficus thonningii* laissent passer autour de 25% de la lumière. *Grevillea robusta* laisse passer 23,6%, tandis que *Persea*

americana laisse passer le peu de lumière (16,2%) par rapport aux autres arbres. Le test de Kruskal-Wallis a montré des différences significatives entre les arbres en ce qui concerne le taux de pénétration de la lumière ($p < 0,05$). La comparaison par paires par le test de Wilcoxon a montré que les caféiers de plein soleil laissent passer significativement plus de lumière que tous les arbres d'ombrage sous analyse ($p < 0,05$). Il a également révélé des différences significatives entre *Persea americana* et *A. gummifera* ($p = 0,02$), entre *P. americana* et *G. robusta* ($p = 0,004$), ainsi qu'entre *P. americana* et *M. eminii* ($p = 0,003$).

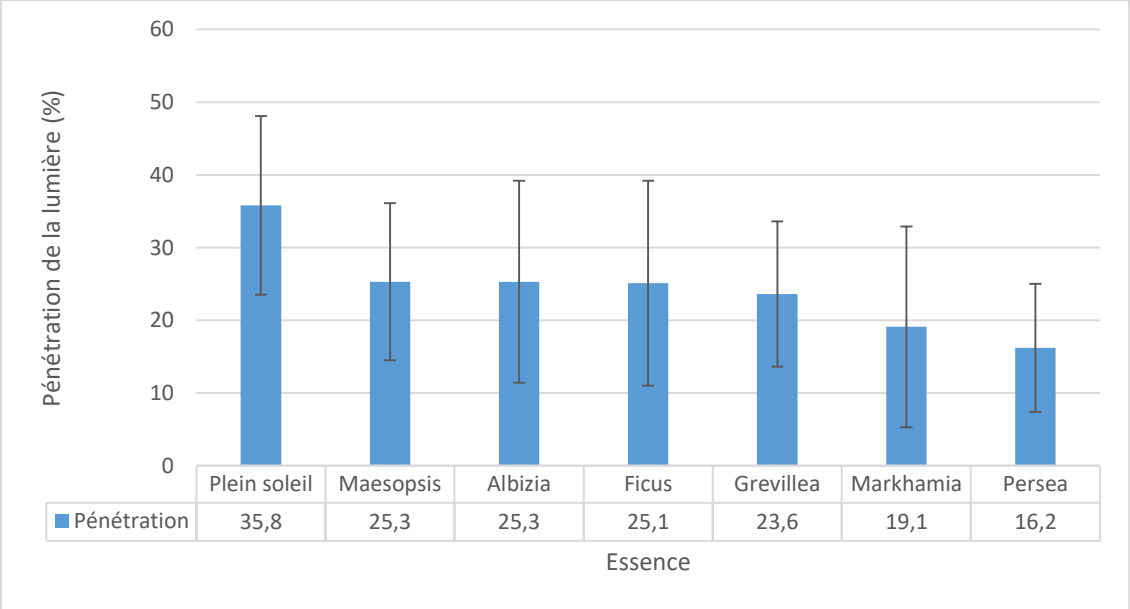


Figure 26 : Moyennes de pénétration (%) de la lumière à travers les cimes des arbres d'ombrage, et des caféiers de plein soleil

Les caféiers de plein soleil laissent passer significativement plus de lumière que les autres arbres d'ombrage. Ceci se comprend parce que le houpier du caféier des exploitations peut être considéré comme étant moins dense par rapport aux houpiers des arbres d'ombrage.

Les essences *Maesopsis eminii*, *Albizia gummifera* et *Ficus thonningii* ont donné des ombrages proches. Ils ont en commun des houppiers de forme elliptique horizontal (coefficient de forme inférieur à 1). Leurs coefficients de forme sont respectivement de 0,55 ; 0,75 et 0,66. Ils sont suivis par les essences *Grevillea robusta* et *Markhamia lutea* dont les houppiers sont de forme elliptique verticale (coefficient de forme supérieur à 1). Leurs coefficients de forme sont respectivement de 2,05 et 2,53. Par contre, l'espèce *Persea americana*, avec un coefficient de forme de 0,75 constitue une exception. Il laisse passer le peu de lumière par rapport aux autres arbres d'ombrage. Ceci serait du au fait que toutes ses branches sont gardées sur l'arbre,

probablement pour maximiser les fruits qu'il produit. Les exploitants souhaiteraient maximiser la production de fruits qui, en plus de leur consommation domestique, sont également acheminés au marché. De ce fait, il n'est jamais (ou presque) élagué, et laisse donc passer le peu de lumière.

On peut également constater des différences de pénétration lumineuse entre arbres d'âges différents, le moins âgé laissant passer plus de lumière que le plus âgé. C'est l'exemple de *F. thonningii* où le taux de pénétration lumineuse est de 35% à 4 ans et de 23% à 45 ans. Il en est de même pour *G. robusta* avec un taux de pénétration lumineuse de 24,8% pour l'arbre âgé de 3 ans et de 14,4% pour celui de 40 ans.

Dans tous les cas, la pénétration de la lumière est un processus complexe. En en plus de l'aspect forme du houppier, elle dépend entre autres de la surface des feuilles et de la manière dont elles sont disposées dans les couronnes des arbres (de Mattos et al., 2020), ce qui crée des irrégularités et trous au sein de la canopée (Lambers et al., 2008).

4.4.3. Auto-ombrage du caféier combiné à l'ombrage des arbres

Les taux moyens de pénétration de la lumière à travers les caféiers ont été calculés à partir des mesures faites en avril, mai et juillet 2022. Elles sont présentées sur la figure 27.

Les caféiers de plein soleil laissent passer plus de lumière (35,8%). Les caféiers sous *Maesopsis eminii* et *Markhamia lutea* laissent passer autour de 20% de la lumière. Les caféiers sous les autres arbres d'ombrage laissent passer entre 12% et 15% de la lumière incidente. Le test de Kruskal-Wallis a montré des différences significatives entre essences ($p < 0,05$). La comparaison par paires par le test de Wilcoxon a montré que les caféiers de plein soleil laissent passer significativement plus de lumière que les caféiers sous les autres arbres d'ombrage sous analyse ($p < 0,05$). Il a également révélé des différences significatives entre les caféiers sous *Persea americana* et les essences *M. eminii* ($p = 0,005$) et *M. lutea* ($p = 0,02$).

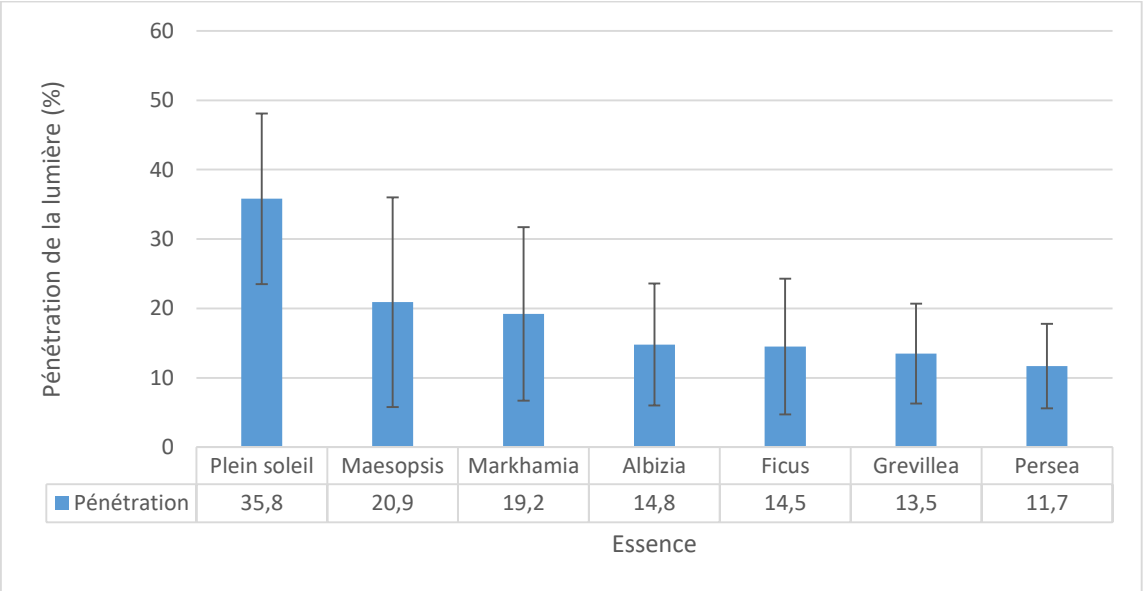


Figure 27 : Pénétration de la lumière à travers les cimes des caféiers sous ombrage, et des caféiers de plein soleil

Les caféiers de plein soleil laissent passer significativement plus de lumière que les caféiers sous ombrage. On devrait s'y attendre, à moins que les arbres d'ombrage soient complètement (ou presque) élagués, ou bien que leurs feuilles soient complètement (ou presque) tombées. Ce résultat est en accord avec Long et al. (2015) pour lequel la réduction de l'intensité lumineuse était le résultat de l'effet combiné des arbres d'ombrage et des strates des caféiers. L'auto-ombrage du caféier a entrainé une réduction de la proportion de lumière qui atteint le bas de la cime des caféiers de 10,6% sous *F. thonningii*, de 10,5% sous *A. gummifera*, de 10,1% sous *G. robusta*, de 4,5% sous *P. americana* et de 4,4% sous *M. eminii*. Par contre, il est difficile de comprendre la situation pour *M. lutea* pour lequel la proportion a augmenté, ce qui est anormal.

4.4.4. Effet des paramètres dendrométriques des arbres d'ombrage sur le PAR absorbé par les caféiers

La moyenne de PARa par caféier ainsi que la valeur moyenne du paramètre par espèce d'arbre pour chaque site était calculé. Les paramètres dendrométriques en question sont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur totale (HT), la hauteur du fût (HF), la hauteur du houppier (HP), le diamètre du houppier (DH), et le volume de la canopée (VC). La figure 28 donne le résultat de l'analyse corrélative entre le PARa et ces différents paramètres dendrométriques.

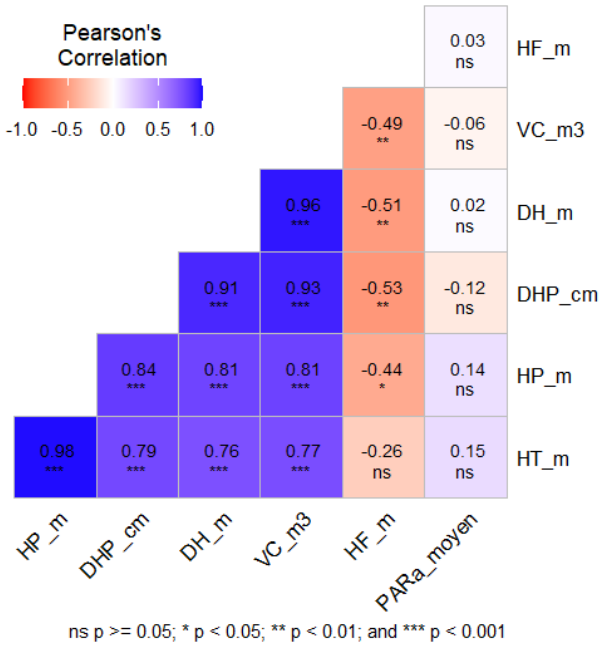


Figure 28 : Corrélations entre les paramètres dendrométriques des arbres d'ombrage et le PAR absorbé par les caféiers sous leur ombrage

On remarque que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est fortement, positivement et significativement ($p < 0,05$) corrélé avec la hauteur totale (HT), avec la hauteur du houppier (HP), avec le diamètre du houppier (DH), et avec le volume de la canopée (VC). La même corrélation fortement positive et significative s'observe entre la hauteur totale (HT) et HP, HT, DH, VC. Il en est de même entre HP et DH, VC significative ainsi qu'entre DH et VC. On observe une faible corrélation négative entre DHP et HF, entre HF et HT, DH, et VC.

Le PARa est faiblement et négativement corrélé avec le DHP et le VC. On s'attendait à ce que cette corrélation soit forte. En effet, le diamètre de l'arbre est fortement et positivement corrélé à la taille de son houppier. Plus le diamètre est élevé, plus son houppier et volumineux, et donc la lumière transmise et absorbé diminue en conséquence. La faible corrélation entre entre le PARa et les paramètres DHP et VC serait due au fait que nous avons travaillé en général sur des arbres déjà grands, et que nous n'avons pas étudié toute la courbe d'évolution PARa en fonction de la canopée. Au fait, le PARa résulte d'interactions complexes, comme avait

argumenté Montgomery & Chazdon (2001) dans son étude sur la transmission de la lumière en fonction de la structure de la forêt et de l'architecture de la canopée.

4.4.5. Effet des arbres d'ombrage sur la floraison et la fructification des caféiers

Le nombre moyen de fleurs par paire de rameau des caféiers sous ombrage et de ceux de plein soleil a été calculé en 2020. Les résultats sont représentés par la figure 29.

Sous *Grevillea robusta*, les caféiers portent le plus grand nombre de fleurs (68) par rapport aux autres arbres d'ombrage. Il est suivi par les caféiers de plein soleil avec 51 et ceux sous *Persea americana* avec 48 fleurs. Les caféiers sous *Ficus thonningii* viennent en dernier lieu avec 25 fleurs en moyenne. Le test de Kruskal-Wallis a montré qu'il y a une différence significative entre le plein soleil et *Ficus thonningii* (p=0,03) et entre *F. thonningii* et *G. robusta* (p=0,03). Toutefois, il n'y a pas de différences significatives entre les autres essences d'ombrage pour le nombre moyen de fleurs (p>0,05).

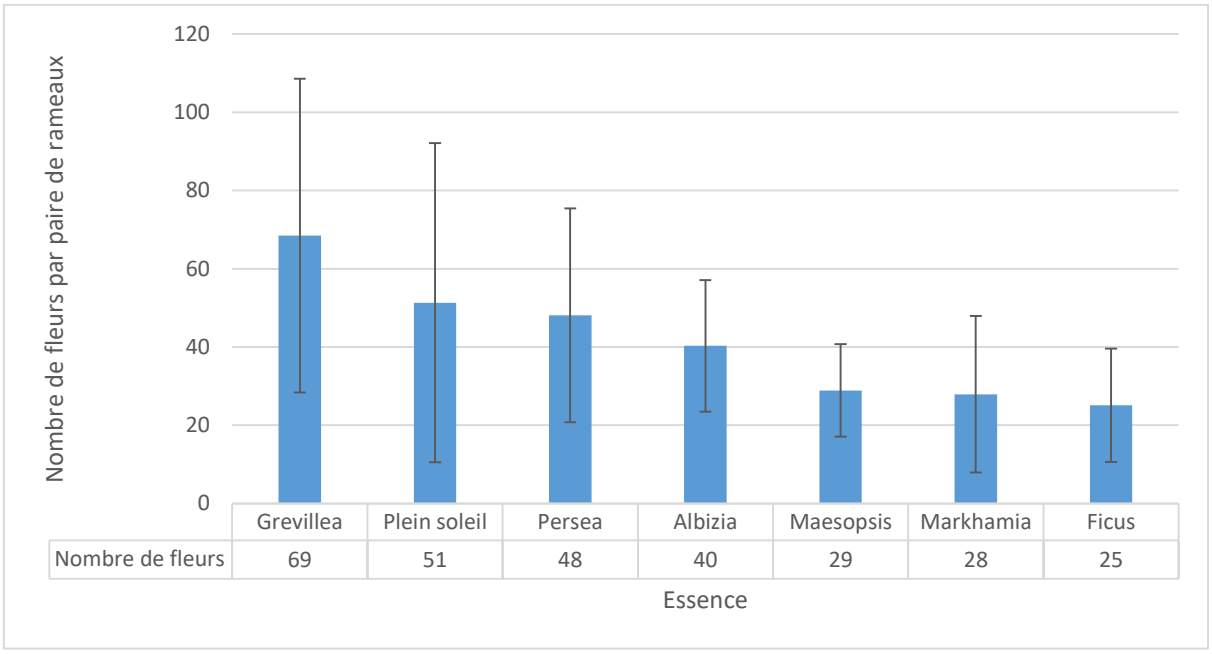


Figure 29 : Nombre moyen de fleurs par paire de rameaux des caféiers sous ombrage et de plein soleil

Quant au nombre de fruits par paire de rameaux (Figure 30), les caféiers sous *Grevillea robusta* vient en tête avec 34 cerises. Il est suivi par les caféiers sous *Persea americana* et *Albizia gummifera* avec respectivement 51 et 48 cerises. Les caféiers sous *Ficus thonningii* viennent en dernier lieu avec 25 cerises. Les données n'ayant pas pu satisfaire les conditions de normalité

($p < 0,05$) et d'égalité des variances ($p < 0,05$), le test de Kruskal-Wallis a permis de montrer que le nombre de cerises sous *G. robusta* était significativement supérieur à celui des caféiers sous *Maesopsis eminii* ($p = 0,04$) et *F. thonningii* ($p = 0,02$).

En comparant les cerises formées par rapport au nombre de fleurs, on constate que le ratio cerises/fleurs (en %) est le plus élevé pour les caféiers sous *Persea americana* où il est de 63%. Ils sont suivis par les caféiers sous *Albizia gummifera* (56%), *Grevillea robusta* (49,8%), *Markhamia lutea* (43%), le plein soleil (42,9%) et *Maesopsis eminii* (41,2%). Les caféiers sous *F. thonningii* viennent en dernier lieu avec un ratio de 40%. Plus le ratio cerises/fleurs est élevé, mieux sont les conditions de production des cerises. C'est une indication indirecte du taux d'avortement et de tout autre accident qui aurait conduit à la perte des fleurs et des jeunes fruits.

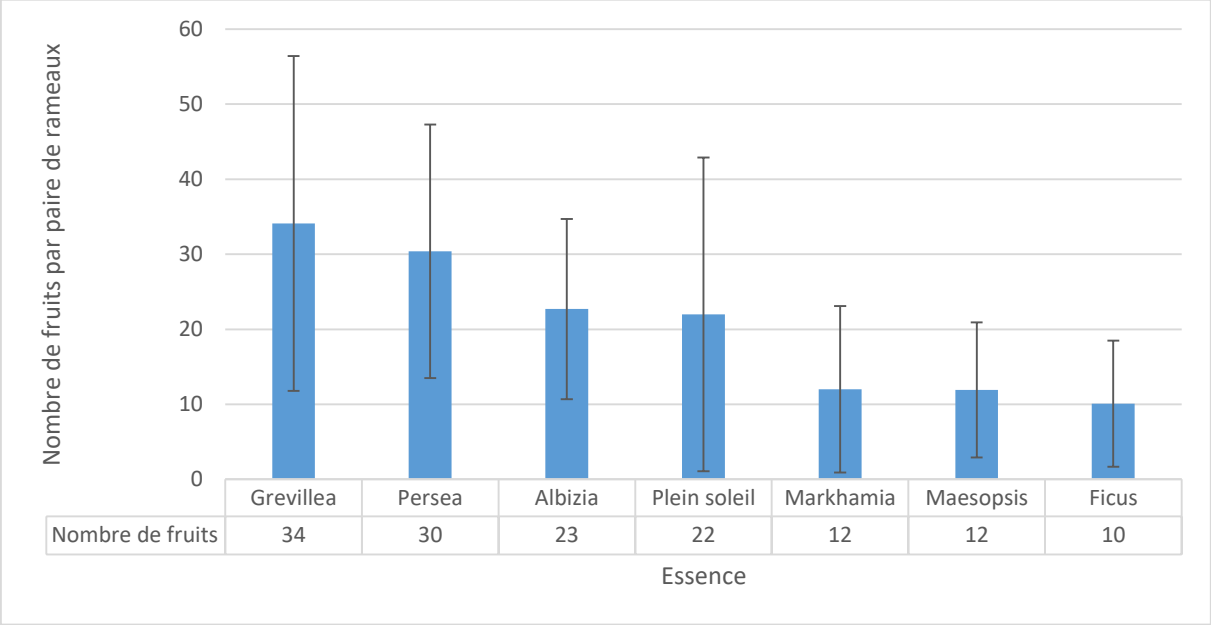


Figure 30 : Nombre moyen de cerises par paire de rameaux des caféiers sous ombrage et de plein soleil

Les caféiers de plein soleil et ceux sous ombrage de *Grevillea robusta* ont produit significativement beaucoup de fleurs que les caféiers sous *Ficus thonningii*. Le nombre de fleurs formées a augmenté faiblement avec l'augmentation du taux de pénétration de la lumière ($R^2 = 0,23$). On ne peut pas affirmer que le nombre de fleurs augmente avec le taux de pénétration de la lumière, d'autant plus que le modèle de régression linéaire construit n'était pas statistiquement significatif ($p = 0,066$). Ces résultats sont en accord avec ceux de Long et al. (2015) qui n'ont pas trouvé de différences significatives dans le nombre moyen de fleurs par branche et par pied entre les caféiers (Robusta) sous ombrage et ceux de plein soleil. La question

du nombre de fleurs obtenues sous ombrage et en plein soleil reste une controverse. Tantôt on a plus de fleurs sous ombrage (Lin, 2008), tantôt le café sous ombrage produit moins de fleurs que celui de plein soleil (Rigal et al., 2020).

Le ratio cerises/fleurs le plus élevé indique des conditions favorables au développement des fleurs en fruits, et donc moins de chute de fleurs. Les caféiers sous *P. americana*, *A. gummifera*, *G. robusta* et *M. lutea* ont donné un ratio plus élevé par rapport au plein soleil. Ces résultats sont en désaccord avec ceux de Rigal et al., 2019 pour lequel les caféiers sous ombrage ont produit moins de cerises comparativement aux caféiers de plein soleil.

4.4.6. Effet des arbres d'ombrage sur la production par tige de café

La production du café a été suivie pour les années 2020, 2021 et 2022. Les résultats sont présentés dans le tableau 13.

En 2020, la production du caféier (Tableau 13 A) a été meilleure sous *Ficus thonningii* avec 1,7 kg de cerises mures par tige. La plus faible production s'est observée pour les caféiers de plein soleil avec seulement 0,7 kg de cerises mures par tige. L'analyse de la variance montre deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. La production des caféiers sous *F. thonningii* est significativement supérieure à celle sous *Albizia gummifera*, *Markhamia lutea* et celle des caféiers de plein soleil.

En 2021, la production du caféier (Tableau 13 B) a été meilleure sous *Grevillea robusta* avec 0,6 kg par tige. Il est suivi directement par les caféiers de plein soleil avec 0,4 kg par tige. En dernier lieu vient la production des caféiers sous *Maesopsis eminii* avec seulement 0,2 kg par tige. L'analyse de la variance a montré deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent.

En 2022, la production des caféiers (Tableau 13 C) a été meilleure sous *Persea americana* avec 3,2 kg de cerises mures par tige. Il est suivi par les caféiers sous *Albizia gummifera* avec 2,6 kg de cerises mures par tige. Les deux premiers occupent le même groupe de moyennes homogènes. En dernier lieu vient la production des caféiers sous *Maesopsis eminii* avec 0,7 kg de cerises mures par tige. L'analyse de la variance a montré deux groupes différents de moyennes homogènes.

De manière cumulative, la production par tige sur les trois années (Tableau 13 D) a dépassé 3 kg sous trois espèces : *G. robusta*, *A. gummifera*, *F. thonningii* et *P. americana* où elle a

avoisiné 4 kg. Les caféiers sous *M. lutea* et ceux de plein soleil ont produit 2,5 kg par tige sur les 3 années. Le minimum a été produit sous *M. eminii* avec 2,1 kg par tige. Ces différences ne sont pas significatives.

Tableau 13 : Productions par tige des caféiers sous ombrage et en plein soleil pour les années 2020, 2021 et 2022.

Essence	Production 2020 (kg)
F. thonningii	2,2±1,7 [a]
G. robusta	1,5±0,4 [ab]
M. eminii	1,4±0,4 [ab]
P. americana	1,3±0,4 [ab]
A. gummifera	1,2±0,7 [b]
Plein soleil	1,0±0,4 [b]
M. lutea	1,0±0,5 [b]

Tableau 13 A : Production par tige en 2020

Essence	Production 2021 (kg)
G. robusta	0,6±0,5 [a]
Plein soleil	0,4±0,6 [ab]
P. americana	0,4±0,5 [ab]
M. lutea	0,3±0,02 [ab]
F. thonningii	0,2±0,1 [b]
M. eminii	0,2±0,1 [b]
A. gummifera	0,05±0,02 [b]

Tableau 13 B : Production par tige en 2021

Essence	Production 2022 (kg)
P. americana	3,2±1,5 [a]
A. gummifera	2,6±1,4 [a]
G. robusta	1,3±0,6 [b]
F. thonningii	1,3±1,0 [b]
M. lutea	1,2±0,5 [b]
Plein soleil	1,0±0,7 [b]
M. eminii	0,7±0,4 [b]

Tableau 13 C : Production par tige en 2022

Essence	Production cumulée sur les 3 ans (kg)
P. americana	3,9±2,3 [a]
F. thonningii	3,5±1,8 [a]
A. gummifera	3,3±1,6 [a]
G. robusta	3,1±0,8 [a]
M. lutea	2,5±0,9 [a]
Plein soleil	2,5±0,9 [a]
M. eminii	2,3±0,4 [a]

Tableau 13 C : Production par tige cumulée sur les 3 ans

On constate une très grande fluctuation d'année en année. L'année 2021 a été une année de non production, ce qui fait penser au phénomène de cyclicité bien connue pour le caféier (Wintgens, 2004). Pour les deux années productives, la production varie entre 1 et 1,5 kg par tige. Elle a dépassé 2 kg par tige pour les caféiers sous *F. thonningii* en 2020 et *A. gummifera* en 2022. La meilleure production a été sous *Persea americana* en 2022 avec 3,2 kg de cerises par tige en 2022. Pour le Burundi, la production moyenne du café est inférieure à 1 kg/pied : 0,8 kg/arbre (Rosenberg, 2022) et 0.9 kg par pied (ISTEEBU, 2021). Au Kenya, on produit en moyenne 2 kg de cerises par tige de caféier (Ngeywo et al., 2015). Les productions que nous avons obtenues concordent, voire dépassent la moyenne burundaise et celle du Kenya. Ces résultats concordent avec ceux de COCOCA où les exploitants rapportent des productions par tige n'excédant pas 3 kg (Nsabimana, 2024, Comm. Pers.). Toutefois, si l'on considère la productivité optimale du

caféier qui est de 10 kg par arbre de caféier (Ngeywo et al., 2015), on comprend que le chemin reste long. L'amélioration des productions passera entre autres par la bonne gestion de la fertilité des sols des caféières, l'application des tailles d'entretien et de production, la bonne gestion de l'appareil aérien et de l'appareil souterrain des arbres d'ombrage, sans oublier l'encouragement des caféiculteurs par une augmentation du prix au producteur de la cerise. Nibasumba et al. (2021) propose également la rénovation des plantations de caféiers qui sont dans l'ensemble très âgés.

A partir du tableau 13, on peut attribuer des scores au classement par année afin d'en faire un score moyen (Tableau 14) permettant d'avoir une vue par espèce d'arbre d'ombrage. La meilleure essence est celle qui obtient le plus petit score.

Tableau 14 : Scores par an et score moyen au classement des espèces pour ce qui est de la production par tige de café

Essence	**Score 2020**	**Score 2021**	**Score 2022**	**Score Pcum**	**Score moyen**	**Classement**
P. americana	4	2	1	1	2	1
G. robusta	2	1	3	4	2,5	2
F. thonningii	1	4	4	2	2,75	3
A. gummifera	5	5	2	3	3,75	4
Plein soleil	6	2	6	5	4,75	5
M. lutea	6	3	5	5	4,75	5
M. eminii	3	4	7	6	5	6

Source : Données du tableau 13

Il ressort du tableau 14 qu'en termes de production moyenne, les caféiers sous *Persea americana* viennent en tête du classement tandis, que ceux sous *Markhamia lutea* viennent en dernier lieu. La succession est la suivante : *Persea americana* > *Grevillea robusta* > *Ficus thonningii* > *Albizia gummifera* > Plein soleil = *Markhamia lutea* > *Maesopsis eminii*.

Les caféiers de plein soleil occupent la cinquième place (exaequo avec *M. lutea*). Ces résultats montrent que le débat reste toujours contradictoire en ce qui concerne l'ombrage et la production du café. Cette controverse avait déjà été relevée par Philpott et al. (2008) à propos des résultats contradictoires de la littérature. Pour certains, la production des caféiers sous ombrage est diminuée. Par exemple, dans leur étude sur la croissance et la production des caféiers sous agroforesterie et en monoculture au Brésil, Campanha et al. (2004) ont trouvé des rendements de 10 à 20% plus bas sous ombrage comparativement aux caféiers en monoculture.

Morais et al. (2006) ont également trouvé des rendements significativement bas sous ombrage par rapport au plein soleil au Brésil. Même en Ethiopie, Bote & Struik (2011) ont trouvé la même tendance mais les différences n'étaient pas statistiquement significatives. Par contre, au Cambodge, Ehrenbergerová et al. (2021) n'ont pas trouvé de différences tant en termes de production par tige ou en termes de poids de 100 cerises entre les caféiers sous ombrage et ceux de plein soleil. Il en est de même de Soto-Pinto et al. (2000) au Mexique qui n'ont constaté aucune diminution des rendements de *Coffea arabica* liée à l'ombrage, mais ont recommandé une gestion des arbres d'ombrage de manière à ce que la couverture par l'ombrage ne dépasse pas 50%. En Ouganda, une étude a conclu que la production du café diminue quand l'ombrage va au-delà de 30% (Sarmiento-Soler et al., 2020). Une méta analyse de la littérature a montré que le café produit mieux dans de faibles ombrages (10%) et que sa production commence à diminuer au-delà de 40% (Koutouleas et al., 2022).

4.5. Conclusion partielle

La lumière solaire est un facteur important de la croissance de par son intervention dans la photosynthèse et donc dans la production de la matière hydrocarbonée. C'est la partie photosynthétiquement active du rayonnement (PAR) qui s'étend sur la gamme 0,4-0,7 µm qui est impliquée.

Le Burundi étant proche de l'équateur, le soleil est au zénith à midi. Nos mesures ont permis d'observer que l'intensité de la lumière atteint son maximum à midi. Le maximum d'intensité a été de 1 910,5 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ et a été observé à Rutegama.

Cette lumière atteint directement les arbres d'ombrage et les caféiers de plein soleil qui en absorbent une partie tandis que l'autre les traverse. On comprend par là que les caféiers sous ombrage n'obtiennent que la lumière qui a traversé la canopée des arbres au-dessus. On a observé que les espèces *Maesopsis eminii, Albizia gummifera, Ficus thonningii* et *Grevillea robusta* laissent pénétrer des quantités proches de lumière (entre 23% et 25%), tandis que *Markhamia lutea* et *Persea americana* laissent pénétrer moins de lumière (19,1% et 16,2% respectivement). L'auto-ombrage entraine une réduction supplémentaire de la lumière pouvant atteindre autour de 10%.

Ces arbres « bloquent » littéralement la lumière. En effet, leurs cimes sont très étalées. Leur gestion est presque inexistante. Or la cime est négativement corrélée au rayonnement absorbé.

Bien que les arbres évalués dans cette thèse avaient des ombrages élevés (plus de 70%), les productions de café obtenues sont proches de la moyenne nationale et même celle du Kenya pour les années de bonne production. Les trois arbres qui ont donné les meilleures productions par tige de caféier sont, dans l'ordre, *Persea americana*, *Grevillea robusta* et *Ficus thonningii*. La plus faible production par tige a été observée sous *Maesopsis eminii*. Ceci laisse penser qu'une bonne gestion de l'appareil aérien pourrait améliorer significativement les productions.

Faute d'instruments, cette étude n'a pas pu mesurer le LAI pourtant très utile pour la détermination du coefficient d'extinction lumineuse de Beer. Aussi, ayant travaillé avec des arbres déjà existants, cette thèse n'a pas pu explorer toute la courbe d'évolution de la transmission lumineuse en fonction de l'évolution des caractéristiques dendrométriques. Il convient aussi de souligner que cette recherche n'est pas allée plus loin en ce qui concerne les effets des arbres d'ombrage sur la qualité du café produit.

Malgré les faibles proportions de pénétration lumineuse, ce chapitre a pu révéler les arbres qui ont permis une bonne production par tige de caféier. Ils peuvent, de ce point de vue, être considérés comme meilleurs en tant qu'arbres d'ombrage. Les performances pourraient s'améliorer avec une bonne gestion de l'appareil aérien pour réduire l'ombrage au moins à 40%. Mais, il ne faut pas oublier que la production dépend de plusieurs facteurs qui, en plus des aspects génétiques de la variété utilisée, concernent aussi de l'environnement tant biotique qu'abiotique, les paramètres liés au développement des caféiers, ainsi que l'âge des plants et des plantations.

C'est ainsi que le jugement basé sur un seul critère reste insuffisant. C'est l'objet du chapitre suivant qui fait intervenir des modèles d'aide à la prise de décision multicritère.

Chapitre 5. Quelle est la meilleure essence à proposer pour l'ombrage du caféier : application d'outils d'aide à la prise de décision multicritère

5.1. Introduction

De manière générale, le choix d'une essence agroforestière à installer est déterminé par des facteurs liés aux caractéristiques de l'exploitation agricole, aux conditions physiographiques, aux connaissances locales sur les caractéristiques des espèces d'arbres et la gestion de la fertilité des sols, ainsi qu'aux préférences des agriculteurs (de Souza et al., 2012).

Dans une étude au Brésil, les exploitants ont affirmé qu'ils gardent ou introduisent des essences d'arbres qui fournissent de multiples produits, tels que de la nourriture, du bois, des médicaments et d'autres produits (par exemple des fibres, de l'huile, des graines) (de Souza et al., 2011).

Dans une autre étude menée en Tanzanie, les résultats ont montré qu'un nombre relativement élevé (37,8%) des petits caféiculteurs préfèrent la combinaison de nourriture, du fourrage et du bois de chauffage comme produits écosystémiques issues du système agroforestier en caféiculture (Wagner et al., 2019).

Beer (1987) a donné toute une liste des caractéristiques d'une bonne espèce d'arbre d'ombrage. On peut affirmer que l'installation des caféiers sous ombrage est un principe fondamental pour plusieurs raisons dont entre autres : leur impact sur le microclimat, leur contribution à l'augmentation de la fertilité du sol, la conservation du sol et de son humidité, leur intervention dans la gestion des maladies et ravageurs, sans oublier leur contribution dans le revenu des ménages (Alemu, 2015).

Selon lui, un arbre d'ombrage idéal doit appartenir à la famille des légumineuses (pouvoir de fixation de l'azote atmosphérique) et avoir une croissance en hauteur, de petites feuilles et une bonne résistance à la verse. La compilation des résultats issus des articles publiés a permis de proposer des arbres identifiés comme adaptés aux plantations de café. Il s'agit de (Alemu, 2015) : *Albizia sp., Ficus sp., Acacia albida, Cordia africana, Leucaena leucocephala, Citrus sinensis, Sesbania sesban, Grevillea robusta, Plerocarpus marsupium, Cedrella toona, Artocarpus integrifolia, Artocarpus hirsute, Bischofia javanica, Erythirna lithosperma,*

Terminalia bellarica, etc. Cette liste mentionne non seulement des espèces qui sont connues au Burundi mais aussi qui font partie des espèces qui sont suivies dans cette recherche.

Dans cette recherche, plusieurs éléments ont été étudiés : la perception de la caféiculture par les populations, la fertilité chimique et physique des sols dans les caféiers, l'humidité dans les sols des caféiers, la pénétration de la lumière à travers les arbres d'ombrage des caféiers, etc. Pour chaque paramètre, l'étude a tiré des conclusions partielles par rapport au classement des espèces d'arbres d'ombrage.

Mais il est important d'avoir une idée globale de la meilleure espèce d'arbre d'ombrage en considérant tous les paramètres à la fois. Cela passe inévitablement par des outils qui permettent la prise de décisions en considérant plusieurs critères.

Ce chapitre fait une revue des principaux outils qui sont les plus utilisés dans les domaines variés de la recherche, les applique aux données de cette recherche et en fournit les résultats.

5.2. Matériels et Méthodes

Les espèces qui se classent devant les autres ont pu être déterminées en recourant aux modèles simples additifs des scores obtenus aux classements.

La prise de décision combinant tous les paramètres étudiés a pu se faire en recourant aux modèles de prise de décisions multicritères.

De manière générale, le processus de prise de décisions multicritères suit les 6 principales étapes suivantes (Opricovic & Tzeng, 2004) :

- Etablissement des critères d'évaluation du système reliant les capacités du système aux objectifs ;
- Développement des systèmes alternatifs pour atteindre les objectifs ;
- Evaluation des alternatives en termes de critères (les valeurs des fonctions critères) ;
- Application d'une méthode d'analyse multicritère normative ;
- Accord sur une alternative considérée comme étant optimale ou préférée ;
- Au cas où la solution finale n'est pas acceptée, rassembler de nouvelles informations et passer à la nouvelle itération de l'optimisation multicritère.

Dans ce processus, les systèmes alternatifs représentent ici les différentes espèces d'arbres d'ombrage considérés dans cette étude. Quant aux critères, il s'agit des différents paramètres qui ont été analysés dans cette recherche :

- Les préférences des exploitants ;
- La richesse des litières en éléments nutritifs ;
- Les effets sur la fertilité chimique du sol ;
- Les effets sur les conditions hydriques du sol ;
- Les effets sur la lumière transmise ;
- Les effets sur la production du caféier ;
- Les principaux usages des arbres d'ombrage.

Les préférences des exploitants ont été tirées de l'enquête ménage décrite au chapitre 2. La qualité des litières ainsi que la qualité chimique des arbres d'ombrage ont été appréhendées à partir des analyses de laboratoire décrites au chapitre 3. Les effets sur le soja ont été testés à l'aide d'un essai de fertilisation décrit au chapitre 3. Les conditions hydriques du sol ont été mesurées et présentées au chapitre 3. La lumière transmise ainsi que la production des caféiers ont été mesurées au chapitre 4.

Sans prétendre être exhaustif, les principaux usages des arbres d'ombrage qui suivent sont tirés de nos observations sur terrain, des communications personnelles avec les personnes clés de la zone de travail, et de la littérature.

Albizia gummifera (*J.F.Gmel.*) *C.A.Sm* (Fabaceae)

- Médecine traditionnelle humaine : antibactérien, malaria, douleurs d'estomac, cancer de l'ovaire (Kokila et al., 2013) ;
- Valeur rituelle ou spirituelle (Hines & Eckman, 1993) ;
- Amélioration du sol et fixation de l'azote (Hines & Eckman, 1993) ;
- Stabilisation des pentes ;
- Alimentation des animaux ;
- Bois d'œuvre (Hines & Eckman, 1993) ;
- Bois de service et/ou de chauffage ;
- Arbre mellifère (Hines & Eckman, 1993).

Ficus thonningii Blume (Moraceae)

- Médecine traditionnelle humaine (Bala et al., 2021) avec des vertus antimicrobiens, antidiarrhéiques, antihelmintiques, antioxydants, anti-inflammatoires et analgésiques (Dangarembizi et al., 2013) ; réduction du taux de glucose dans le sang (Shi et al., 2018) ;
- Médecine traditionnelle vétérinaire comme le traitement des infections des plaies (Morenike et al., 2019) ;
- Alimentation animale (Hines & Eckman, 1993) pour bovins, ovins et caprins (Asmare & Mekuriaw, 2019) avec des feuilles d'une très bonne qualité contenant des protéines, des graisses, des glucides, des minéraux ainsi que des fibres (Berhe & Tanga, 2013) ;
- Valeur rituelle ou spirituelle (Hines & Eckman, 1993) ;
- Bois de service et/ou de chauffage ;
- Ornementation, haie vive, clôture vivante ;
- Fabrication des habits traditionnels au Burundi à partir de ses écorces qui contiennent des fibres de bonne qualité. Amélioration du sol (Hines & Eckman, 1993) ;
- Matérialisation de l'origine familiale patriarcale au Burundi en plantant un *Ficus sp*. là où habitait le patriarche de la famille ;
- Bois utilisé dans la fabrication d'objets divers ;
- Amélioration de la fertilité du sol (Hines & Eckman, 1993).

Grevillea robusta A. Cunn. ex. R. Br. (Proteaceae)

- Bois de service et/ou de chauffage ;
- Bois d'œuvre ;
- Amélioration de la fertilité du sol ;
- Réduction de l'érosion ;
- Tuteurs pour le haricot volubile.

Maesopsis eminii Engl (Rhamnaceae)

- Bois d'œuvre ;
- Réduit les habitats des rongeurs (Musese et al., 2023) ;
- Les graines pourraient être utilisées en alimentation animale car contenant beaucoup de protéines (Prabhu & Theagarajan, 1986) ;
- Bois de service et/ou de chauffage (Hines & Eckman, 1993).

Markhamia lutea (Benth) K. Schum (Bignoniaceae)

- Médecine traditionnelle humaine dans le traitement des morsures de serpent, de l'anémie, de la diarrhée, des maladies du foie, de la cataracte, de l'inappétence, des maux d'estomac, des maux de tête, des maladies de la gorge, de la conjonctivite, des maux de dos et des éruptions cutanées, du paludisme, de l'asthme, de la syphilis, des infections des oreilles, des cancers colorectaux et même du VIH/SIDA pour renforcer l'immunité (Magdy et al., 2023) ;
- L'extrait de bois est utilisé comme conservateur du bois parce qu'il protège le bois contre les champignons et les attaques par les termites (Magdy et al., 2023) ;
- Bois d'œuvre, durable (modérément résistant aux termites) et facile à travailler (Orwa et al., 2009) ;
- Bois de service et/ou de chauffage (Orwa et al., 2009) ;
- Arbre ornemental (bord des routes ou de parc dans les villes et villages) (Orwa et al., 2009) ;
- Lutte contre l'érosion car ses feuilles servent de paillis (Orwa et al., 2009) ;
- Amélioration de la fertilité du sol par une augmentation de l'azote total (Habumugisha et al., 2019) ;
- Plante mellifère de par ses fleurs (Orwa et al., 2009) ;
- Brise vent de par sa croissance rapide et résistant au vent (Orwa et al., 2009).

Persea americana Mill (Lauraceae)

- Alimentation humaine ;
- Ses fruits représentent un important apport au revenu familial par leur vente au marché ;
- Alimentation animale des petits ruminants et des bovins ;
- Médecine traditionnelle humaine avec des activités antivirales, antioxydant, hypoglycémiques, dermatologiques, vasorelaxant, analgésiques et antiinflammatoires, antimicrobiennes, antiulcères, antihépatotoxiques, larvicidales, anticonvulsant et aidant dans la perte du poids (Ngbolua et al., 2019) ;
- Production du vin d'avocat ;
- Bois d'œuvre et/ou de chauffage.

5.2.1. Revue de la littérature sur les méthodologies de prise de décisions multicritères

Les recherches sur les méthodes d'aide à la prise de décisions multicritères sont récentes. Elles datent de 1977 (Basílio et al., 2022).

Plusieurs modèles de décision multicritères existent. Les modèles de prise de décisions multicritères sont des outils précieux pour résoudre des problèmes complexes dans divers domaines. On peut citer les technologies de l'information et de la communication (TIC), les sciences de l'environnement, la gestion des ressources en eau, la gestion des déchets solides, la télédétection, la gestion des risques d'inondation, les soins de santé, le transport, le changement climatique, l'énergie, le droit et la politique internationale, la gestion des ressources humaines, le commerce électronique et commerce mobile, l'agriculture et horticulture, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation et de gestion de l'énergie à petite échelle, la sécurité publique, etc. (Basílio et al., 2022).

5.2.2. Quelques outils d'aide à la prise de décisions basées sur plusieurs critères et leurs domaines d'application

Une analyse bibliométrique depuis l'utilisation des modèles d'analyse multicritère jusqu'en 2022 a montré que les cinq premières méthodes qui ont été les plus utilisées par les auteurs sont (Basílio et al., 2022) : (i) AHP = Analysic/Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1977), (ii) TOPSIS = Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Chen et al., 1992), (iii) VIKOR = VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) (Opricovic, 1998), (iv) PROMETHEE = Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation (Brans et al., 1986) et (v) ANP = Analytical Network Process (Saaty, 1996).

AHP et TOPSIS ont constitué les fondements des méthodes permettant la prise de décisions multicritères. L'ingénierie informatique continue de les utiliser en incorporant la logique floue (fuzzy logic) ou en créant des méthodes hybrides (Sahoo & Goswami, 2023).

Les modèles d'aide à la prise de décision multicritères ont été utilisés pour sélectionner la meilleure alternative à partir de plusieures alternatives parfois conflictuelles (Yap et al., 2019). Dans cette thèse, les modèles TOPSIS et VIKOR ont été utilisés pour évaluer la meilleure espèce d'arbre d'ombrage. TOPSIS est l'outil qui a été le plus utilisé dans les recherches en raison de sa solide base mathématique, de sa simplicité et de la facilité de son application (Chakraborty, 2022). VIKOR est basé sur la même philosophie que TOPSIS sur les distances

par rapport à une solution « idéale » (Jati, 2012). Une étude a même comparé les deux modèles qui ne diffèrent que par les méthodes utilisées dans la normalisation (Opricovic & Tzeng, 2004).

La version originale de TOPSIS calcule l'évaluation globale de chaque alternative (également appelée mesure de proximité) en fonction des distances euclidiennes entre l'alternative et les alternatives idéales positives et négatives. L'idée principale est de privilégier les alternatives proches de l'alternative idéale positive mais aussi celles éloignées de l'alternative négative (Pelegrina et al., 2019).

La méthode VIKOR a été développée pour l'optimisation multicritère de systèmes complexes. Elle fait le classement des compromis et donne la solution de compromis. Cette méthode se concentre sur le classement et la sélection parmi un ensemble d'alternatives ayant des critères contradictoires (Opricovic & Tzeng, 2004).

Sans prétendre entrer en détail dans les mathématiques derrière les modèles utilisés dans cette recherche, les équations suivantes sont développées dans (Opricovic & Tzeng, 2004) et par (Pelegrina et al., 2019).

A. TOPSIS

TOPSIS procède par les 6 étapes suivantes :

Etape 1 : Calculer la matrice de décision normalisée.

La valeur normalisée nij est calculée comme suit :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} (x_{ij})^2}} \qquad [5.1]$$

Avec i (nombre d'alternatives) = 1, 2, …, m et j (nombre de critères) = 1, 2, …, n

Etape 2 : Calculez la matrice de décision normalisée pondérée.

La valeur normalisée pondérée vij est calculée comme suit :

$$v_{ij} = w_j * n_{ij} \qquad [5.2]$$

Avec wj le poids correspondant au jème critère, et $\sum w_j = 1$; i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n

Etape 3 : Déterminer la solution idéale ou de référence, c'est-à-dire la solution idéale positive (A^+) et la solution idéale négative (A^-).

Cela se fait de la manière suivante :

$$A^+ = \{v_1{}^+, v_2{}^+, \dots, v_j{}^+\} \quad [5.3]$$

$$A^- = \{v_1{}^-, v_2{}^-, \dots, v_j{}^-\} \quad [5.3]$$

Avec

$v_j{}^+ = max_i(v_{ij})$ et $v_j{}^- = min_i(v_{ij})$ si le jème critère est un bénéfice, tandis que

$v_j{}^+ = min_i(v_{ij})$ et $v_j{}^- = max_i(v_{ij})$ si le jème critère est un coût ; i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n.

Etape 4 : Calculer les mesures de séparation.

Il s'agit des distances euclidiennes $d_i{}^+$ par rapport à A^+ et $d_i{}^-$ par rapport à A^-. Ces distances euclidiennes sont de dimension m et sont calculées avec les équations suivantes :

$$d_i{}^+ = \left\{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j{}^+\right)^2\right\}^{1/2} \text{ ; i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n.} \quad [5.4]$$

$$d_i{}^- = \left\{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j{}^-\right)^2\right\}^{1/2} \text{ ; i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n.} \quad [5.5]$$

Etape 5 : Calculer la proximité relative par rapport à la solution idéale.

Le calcul se fait de la manière suivante :

$$R_i = \frac{d_i{}^-}{d_i{}^+ + d_i{}^-} \text{ ; i = 1, 2, …, m} \quad [5.6]$$

Où R_i est la distance normalisée (proximité relative) par rapport à la solution idéale

Si $R_i = 0$, alors $d_i{}^- = 0$. Dans ce cas, il s'agit de la plus mauvaise alternative possible. De l'autre côté, si $R_i = 1$, alors $d_i{}^+ = 0$ et il s'agit de la meilleure alternative possible.

Etape 6 : Classer les alternatives.

Considérer les R_i par ordre décroissant. La meilleure alternative est celle avec Ri le plus élevé.

Il convient de signaler que d'autres distances ont été récemment testés dans TOPSIS comme par exemple Manhattan distance et Chebychev distance (Ciardiello & Genovese, 2023).

B. VIKOR

Pour VIKOR, l'algorithme suit les étapes suivantes :

Etape 1 : déterminer les meilleures valeurs f_j^+ et les pires valeurs f_j^- de chaque critère.

$f_j^+ = max_i(x_{ij})$ et $f_j^- = min_i(x_{ij})$ si le jème critère est un bénéfice, tandis que [5.7]

$f_j^+ = min_i(x_{ij})$ et $f_j^- = max_i(x_{ij})$ si le jème critère est un coût ; j = 1, 2, …, n. [5.8]

Etape 2 : Normaliser les différentes valeurs des critères x_{ij}.

La relation suivante est utilisée :

$n_{ij} = \frac{f_j^+ - x_{ij}}{f_j^+ - f_j^-}$; i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n. [5.9]

Etape 3 : Calculer les valeurs S_i, R_i, S^+, S^-, R^+ et R^- par les relations suivantes :

$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j * n_{ij}$ [5.10]

$R_i = max_j[w_j * n_{ij}]$ [5.11]

Avec i = 1, 2, …, m et j = 1, 2, …, n.

$S^+ = min_i(S_i)$ [5.12]

$S^- = max_i(S_i)$ [5.13]

$R^+ = min_i(R_i)$ [5.14]

$R^- = max_i(R_i)$ [5.15]

Etape 4 : Calculer Q_i par la relation suivante :

$$Q_i = v\frac{(S_i - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1 - v)\frac{(R_i - R^+)}{(R^- - R^+)}$$

Avec $v \epsilon [0, 1]$ un paramètre qui équilibre l'importance relative des indices S et R. Généralement (et c'est le cas pour l'application dans cette recherche), v est pris égal à 0,5.

Etape 5 : Classez les alternatives, en triant par valeurs S, R et Q, par ordre décroissant. On obtient donc trois listes de classement.

Proposer comme solution de compromis l'alternative (a') qui est classé meilleure selon Q (minimum) si les deux conditions sont remplies :

C1 « Avantage acceptable » : $Q(a'') - Q(a') \geq DQ$ où a'' est l'alternative avec la deuxième position dans le classement par Q ; $DQ = {}^{1}/_{(J-1)}$; J est le nombre d'alternatives.

C2 « Stabilité acceptable dans la prise de décision » : L'alternative a' doit également être la meilleure au classement par S ou/et R. Cette solution de compromis est stable dans le cadre d'un processus de prise de décision, ce qui pourrait être : « vote par règle majoritaire » (lorsque v > 0,5 est nécessaire), ou « par consensus » v > 0,5, ou « avec veto » (v < 0,5). Ici, v est le poids de la stratégie de prise de décision « la majorité des critères » (ou « l'utilité maximale du groupe »).

Si l'une des conditions n'est pas remplie, alors un un ensemble de solutions de compromis est proposé, et elle consiste en :

- Alternatives a' et a'' si seule la condition C2 n'est pas satisfaite, ou bien
- Alternatives a' ; a'' ; . . . ; $a^{(M)}$ si la condition C1 n'est pas satisfaite; et $a^{(M)}$ est déterminé par la relation $Q\left(a^{(M)}\right) - Q(a') < DQ$ pour M maximum (les positions de ces alternatives sont « en proximité »).

Les deux méthodes, VIKOR et TOPSIS, ont le mérite d'être rationnelles, et elles procèdent avec grande efficacité dans la mesure des performances de chaque alternative d'une manière simple (Bera et al., 2022).

5.2.3. Mise en marche des modèles VIKOR et TOPSIS

La manipulation des modèles VIKOR et TOPSIS a été faite en utilisant le logiciel R (R Core Team, 2021). Le package MCDM de R (Blanca & Ceballos, 2016) a servi dans les analyses.

La matrice des données nécessaires pour effectuer ces analyses était faite des moyennes des différents paramètres pour chaque espèce d'arbre d'ombrage. La détermination des poids de chaque critère a été faite par consultation de différents spécialistes avec expertises variées (agroforesterie, science du sol et de l'eau, biodiversité, production végétale, agroéconomistes, etc.) du Burundi. Un tableau reprenant les critères de prise de décision leur a été envoyé en vue de donner des poids à chaque critère. Le poids d'un critère était par la suite équitablement partagé entre ses sous composantes.

5.2.4. Modèle de classement moyen

Il s'agit d'un modèle additif des scores (places au classement) obtenus par chaque facteur pour le facteur étudié. Par exemple, le score de 1 qui est le plus bas pour un facteur signifie que ce dernier occupe la première position pour tous les paramètres. Dans ce contexte, le traitement qui montre le plus bas score est classé meilleur.

5.3. Résultats et commentaire

5.3.1. Résultats du modèle (additif) des classements moyens

5.3.1.1. Les préférences des exploitants

Les préférences des exploitants sont appréhendées indirectement via les espèces d'arbres qui sont abondantes dans les exploitations caféicoles. Le tableau 15 est un extrait du tableau 4 et ne reprend que les six espèces suivies par cette recherche.

Tableau 15 : Les six espèces d'arbres d'ombrage les plus présentes dans les exploitations caféicoles de la zone des plateaux centraux du Burundi

Espèce d'arbre d'ombrage	**Champs de caféiers où l'arbre est présent (%)**
Grevillea robusta	62,1
Ficus thonningii	14,6
Persea americana	13,9
Maesopsis eminii	6,7
Markhamia lutea	4,3
Albizia gummifera	0,3

G. robusta est l'arbre d'ombrage qui est le plus préféré par les exploitants de la zone d'étude. Le classement peut être fait dans l'ordre suivant : *G. robusta* > *F. thonningii* > *P. americana* > *M. eminii* > *M. lutea* > *A. gummifera*.

5.3.1.2. La qualité chimique des litières

En ce qui concerne les teneurs en éléments nutritifs des feuilles des arbres d'ombrage, on peut considérer que plus la teneur en un élément est élevée, meilleure est l'essence. Il en est de même pour le pH et la salinité, pour autant que la limite supérieure acceptable ne soit pas dépassée. Le tableau 16 fournit les places obtenues par les six espèces d'arbres d'ombrage du caféier au classement.

Tableau 16 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de leur richesse en éléments nutritifs

Espèce	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	pH	C (%)	Salinité	Score moyen	Classement
Ficus thonningii	3	3	1	1	2	1	6	1	2,25	1
Maesopsis eminii	1	5	3	4	1	4	5	4	3,375	2
Albizia gummifera	2	1	2	6	5	5	4	2	3,375	2
Markhamia lutea	4	2	4	2	4	3	3	5	3,375	2
Persea americana	5	4	6	3	3	2	2	6	3,875	3
Grevillea robusta	6	6	5	5	6	6	1	3	4,75	4

Source : Données du tableau 8

A partir du tableau 16, les espèces d'arbres d'ombrage étudiées peuvent se classer, par ordre décroissant, de la manière suivante :

- Pour la teneur en azote : *M. eminii* > *A. gummifera* > *F. thonningii* > *M. lutea* > *P. americana* > *G. robusta*
- Pour la teneur en phosphore : *A. gummifera* > *M. lutea* > *F. thonningii* > *P. americana* > *M. eminii* > *G. robusta*
- Pour la teneur en potassium : *F. thonningii* > *A. gummifera* > *M. eminii* > *M. lutea* > *G. robusta* > *P. americana*
- Pour la teneur en calcium : *F. thonningii* > *M. lutea* > *P. americana* > *M. eminii* > *G. robusta* > *A. gummifera*
- Pour la teneur en Magnésium : *M. eminii* > *F. thonningii* > *P. americana* > *M. lutea* > *A. gummifera* > *G. robusta*
- Pour le pH : *F. thonningii* > *P. americana* > *M. lutea* > *M. eminii* > *A. gummifera* > *G. robusta*
- Pour la teneur en carbone : *G. robusta* > *P. americana* > *M. lutea* > *A. gummifera* > *M. eminii* > *F. thonningii*
- Pour la salinité : *F. thonningii* > *A. gummifera* > *G. robusta* > *M. eminii* > *M. lutea* > *P. americana*
- En moyenne, en considérant les teneurs en tous ces éléments : *F. thonningii* > *M. eminii* = *A. gummifera* = *M. lutea* > *P. americana* > *G. robusta*

5.3.1.3. Les effets sur le rendement du soja

En ce qui concerne la réponse du soja à la fertilisation en utilisant la poudre de la litière des arbres d'ombrage, on peut considérer que le traitement qui donne à la fois le plus grand nombre de gousses, le plus grand nombre de grains et qui pèsent lourd devrait produire le meilleur rendement. Le classement moyen des six espèces d'arbres d'ombrage est donné dans le tableau 17. Il a été établi sur base du tableau 12.

Tableau 17 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis du rendement du soja et ses composantes

Espèce	NGP	NGG	PMG	Rendement en grains	Score moyen	Classement
P. americana	4	6	5	4	4,75	1
F. thonningii	5	8	3	5	5,25	2
M. eminii	6	4	8	6	6	3
A. gummifera	8	5	6	7	6,5	4
M. lutea	7	2	9	8	6,5	4
G. robusta	9	9	4	9	7,75	5

NGP : Nombre de gousses par plant ; NGG : Nombre de graines par gousse ; PMG : Poids de mille graines

Source : Données du tableau 12

Le classement basé sur le score moyen obtenu pour le rendement et ses composantes montre que l'efficacité agronomique des six espèces agroforestières associées au café suit l'ordre décroissant suivant : *Persea americana* > *Ficus thonningii* > *Maesopsis eminii* > *Albizia gummifera* = *Markhamia lutea* > *Grevillea robusta*. Cela correspond globalement aux teneurs en éléments nutritifs des espèces testées. *F. thonningii*, *P. americana* et *M. eminii* se caractérisent par des teneurs élevées pour la plupart des éléments nutritifs, tandis que *M. lutea* et *G. robusta* sont globalement pauvres en nutriments (N, P, Mg, K). *A. gummifera* se situe entre les deux groupes d'espèces. Il est certes riche en N (avec un faible rapport C/N) et en K, mais il est pauvre en Ca et Mg.

5.3.1.4. Les effets sur les conditions hydriques du sol

Le tableau 18 montre les places obtenues par les six espèces d'arbres d'ombrage pour l'humidité du sol des parcelles caféicoles. Il a été établi à partir des données ayant servi à la confection de la figure 13.

Tableau 18 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de l'humidité dans le sol

Essence	Humidité saison sèche	Humidité saison pluvieuse	Score moyen	Classement
M. lutea	1	1	1	1
A. gummifera	2	2	2	2
M. eminii	3	3	3	3
P. americana	5	4	4,5	4
G. robusta	4	6	5	5
F. thonningii	6	5	5,5	6

Source : Données de la figure 13

En termes de conditions hydriques dans les caféières les six arbres d'ombrage peuvent être classés, par ordre décroissant, comme sui : *M. lutea* > *A. gummifera* > *M. eminii* > *P. americana* > *G. robusta* > *F. thonningii*.

5.3.1.5. Les effets sur la fertilité chimique du sol

La fertilité chimique du sol a été appréhendée à partir des résultats d'analyses chimiques des échantillons de sols au laboratoire (pH, H^+, Al^{3+}, CO, N, P, K, Ca, Mg, CEC) mais aussi à partir de quelques indicateurs calculés (C/N, SB, CECE, PSB, m, FES).

Le facteur d'évaluation des sols (FES) prend en compte dans une certaine manière les bases échangeables, l'acidité et la teneur en matière organique. Il est commode de l'utiliser à côté des teneurs en azote et en phosphore pour le classement des six espèces d'arbres d'ombrage en ce qui concerne la fertilité chimique des sols des caféières. Le tableau 19 donne les places obtenues au classement.

Tableau 19 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la fertilité du sol

Essence	FES	N	P	Score moyen	Classement
F. thonningii	1	1	2	1,33	1
P. americana	3	3	1	2,33	2
G. robusta	2	4	4	3,33	3
A. gummifera	5	2	3	3,33	3
M. lutea	4	5	6	5,00	4
M. eminii	6	6	5	5,67	5

En termes de conditions de fertilité chimique du sol, le classement par ordre croissant des six espèces d'arbres d'ombrage est le suivant : *F. thonningii* > *P. americana* > *G. robusta* = *A. gummifera* > *M. lutea* > *M. eminii*.

5.3.1.6. Les effets sur la lumière transmise

Les effets des arbres sur la transmission de la lumière sont abordés dans deux cas : pénétration de la lumière à travers les arbres seuls et pénétration de la lumière à travers les arbres d'ombrage mais en même temps à travers les cimes des caféiers. Un arbre qui transmet la plus grande proportion de lumière est considéré comme meilleur d'autant plus que les quantités transmises restent loin en-dessous des valeurs recommandées pour les arbres d'ombrage. Les scores obtenus par les essences sont donnés au tableau 20.

Tableau 20 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la lumière

Essence	Effets arbres seuls	Effets combinés	Score moyen	Classement
M. eminii	1	1	1	1
A. gummifera	1	3	2	2
F. thonningii	2	4	3	3
M. lutea	4	2	3	3
G. robusta	3	5	4	4
P. americana	5	6	5,5	5

Source : Données des figures 26 et 27

En ce qui concerne la transmission de la lumière, le classement des six espèces d'arbres d'ombrage du caféier, par ordre décroissant est le suivant : *M. eminii* > *A. gummifera* > *F. thonningii* = *M. lutea* > *G. robusta* > *P. americana*.

5.3.1.7. Les effets sur la production du caféier

Le tableau 21 donne les scores au classement des six arbres d'ombrage du caféier en ce qui concerne la production des caféiers mais aussi le nombre de fleurs et de fruits par paire de rameau fructifère.

Tableau 21 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de la production du caféier

Essence	Score 20	Score 21	Score 22	Score Pcum	Fleurs	Fruits	Score moyen	Classement
P. americana	4	2	1	1	2	2	2,0	1
G. robusta	2	1	3	4	1	1	2,0	1
A. gummifera	5	5	2	3	3	3	3,5	2
F. thonningii	1	4	4	2	6	5	3,7	3
M. lutea	6	3	5	5	5	4	4,7	4
M. eminii	3	4	7	6	4	4	4,7	4

Source : Données du tableau 13 et des figures 29 et 30

Pour la production des caféiers, le classement des six espèces d'arbres d'ombrage du caféier, par ordre décroissant est le suivant : *P. americana = G. robusta > A. gummifera > F. thonningii > M. lutea = M. eminii*.

5.3.1.8. Les principaux usages des arbres d'ombrage

Si l'on voit un arbre qui est gardé dans une exploitation, cela signifie qu'il y a une raison. L'une des motivations concerne ce que l'on en fait. Tous les usages ne s'équivallent pas. Mais, dans cette thèse, il a été considéré que, de manière générale, plus un arbre d'ombrage a plusieurs usages, plus il de chances d'être gardé dans l'exploitation caféicole. Le tableau 22 donne le nombre d'usages répertoriés dans ce document et en fait un classement.

Tableau 22 : Score et classement par score moyen des espèces d'arbres d'ombrage vis-à-vis de leurs principaux usages

Essence	Usages	Score	Classement
F. thonningii	10	1	1
M. lutea	9	2	2
A. gummifera	8	3	3
P. americana	6	4	4
G. robusta	5	5	5
M. eminii	4	6	6

En termes d'usages, le classement des six espèces d'arbres d'ombrage du caféier, par ordre décroissant est le suivant : *F. thonningii > M. lutea > A. gummifera > P. americana > G. robusta > M. eminii*.

5.3.2. Résultats des modèles de prise de décision multicritères

5.3.2.1. Résultats du modèle TOPSIS

Le tableau 23 donne les sorties du modèle TOPSIS

Tableau 23 : Classement des six espèces d'arbres d'ombrage par le modèle TOPSIS

Espèce	Valeur de R	Classement
G. robusta	0,645	1
F. thonningii	0,472	2
P. americana	0,336	3
M. lutea	0,324	4
A. gummifera	0,302	5
M. eminii	0,172	6

Le modèle TOPSIS, qu'il soit linéaire ou vecteur, a donné lieu au classement suivant, dans l'ordre décroissant : *G. robusta* > *F. thonningii* > *P. americana* > *M. lutea* > *A. gummifera* > *M. eminii*.

5.3.2.2. Résultats du modèle VIKOR

Le tableau 24 donne la sortie du modèle VIKOR et son classement des alternatives par la méthode des solutions de compromis.

Tableau 24: Classement des six espèces d'arbres d'ombrage par le modèle VIKOR

Espèce	Valeur de S	Valeur de R	Valeur de Q	Classement
G. robusta	0,475	0,130	0,109	2
F. thonningii	0,400	0,131	0,008	1
P. americana	0,592	0,133	0,308	3
M. eminii	0,748	0,156	0,825	6
M. lutea	0,634	0,159	0,698	4
A. gummifera	0,564	0,170	0,074	5

Le modèle VIKOR a conduit au classement suivant, dans l'ordre décroissant : *F. thonningii* > *G. robusta* > *P. americana* > *M. eminii* > *M. lutea* > *A. gummifera*.

5.4. Discussion

L'arbre *Grevillea robusta* est originaire d'Australie (Chuang et al., 2011). La production annuelle du caféier a été meilleure sous *G. robusta*. Ceci pourrait être la raison qui explique pourquoi cet arbre est le plus rencontré dans les exploitations caféicoles. Il faut ajouter que cet arbre figure parmi les principales espèces qui ont été diffusées comme arbres agroforestiers au Burundi (Besse et al., 1991). Par contre, *G. robusta* vient en dernier lieu en ce qui concerne la richesse de ses litières en éléments nutrififs, sauf pour le carbone. Il a occupé la quatrième place en termes de fertilité du sol. Ceci est en contradiction avec les croyances de la population, pour laquelle les feuilles de *G. robusta* constituent un important fertilisant, ce qu'affirme aussi une certaine littérature (Smith et al., 1999 ; Ong et al., 2000). L'espèce *G. robusta* a été classée première par le modèle TOPSIS, et deuxième par le modèle VIKOR.

Ficus thonningii est un arbre autochtone que l'on retrouve dans les exploitations agricoles en général et dans les caféiers. Les résultats d'analyse de laboratoire ont montré que les feuilles de cet arbre viennent en tête pour ce qui est de la richesse en éléments nutritifs (K et Ca) mais aussi présentent un pH élevé. En termes de fertilité du sol sous arbres d'ombrage, le sol sous *F. thonningii* a été le plus riche. En outre, d'après les usages répertoriés, *F. thonningii* en a reçu le

plus grand nombre. Par contre, *F. thonningii* vient en dernier lieu en ce qui concerne l'humidité dans le sol. Ceci est en contradition avec les affirmations de la population locale selon laquelle cet arbre arrose le sol (Ndihokubwayo et al., 2021). La raison serait à chercher du côté de l'humidité relative de l'air sous *F. thonningii* qui serait maintenue élevée par la canopée de cet arbre qui garde ses feuilles pendant une longue période en saison sèche, ce qui en fait d'ailleurs un supplément dans l'alimentation animale (Asmare & Mekuriaw, 2019). L'espèce *F. thonningii* a été classée première par le modèle VIKOR, et deuxième par le modèle TOPSIS.

L'avocatier (*Persea americana*) est un fruitier originaire d'Amérique, très probablement du Mexique qui en est d'ailleurs le premier producteur (Galindo-Tovar et al., 2008). Au Burundi, on le retrouve aussi comme arbre d'ombrage du caféier. C'est un arbre qui pousse partout au Burundi. Ses fruits sont très appréciés par la population burundaise, tandis que les noyaux sont donnés aux animaux domestiques (bovins, ovins et caprins) soit directement soit par incorporation dans des aliments pour bétail (Nwaogu et al., 2008). Les fruits d'avocat vendus sur les différents marchés burundais constituent une importante source de revenu familial. En outre, d'après nos résultats, *P. americana* vient en second lieu pour ce qui concerne la fertilité du sol et la production du caféier. Par contre, ce fruitier a été dernier en ce qui concerne la transmission de la lumière. *P. americana* a été classé troisième par les deux modèles TOPSIS et VIKOR.

L'espèce *Maesopsis eminii* est un arbre autochtone qui développe un houppier très étalé mais pas très dense. Il a un bois qui n'est ni dur, ni durable, mais il se travaille et se cloue facilement (Moller, 1991). Il s'est classé premier pour ce qui est de la teneur en N et en Mg, mais également pour la transmission de la lumière. Par contre, il a été le dernier en termes de fertilité du sol. *M. eminii* a été classé quatrième par le modèle VIKOR et dernier par le modèle TOPSIS.

Markhamia lutea est un arbre autochtone dont le houppier, bien qu'il puisse être large, n'est pas dense. C'est un arbre à feuilles persistantes et imparipennées et ses fleurs sont de couleur jaune vif (Magdy et al., 2023). Beaucoup d'usages lui sont reconnues, surtout médicinales (Magdy et al., 2023). A partir de nos mesures, l'humidité du sol a été la plus élevée sous *M. lutea*. Par contre, la production annuelle du caféier a été la plus faible sous *M. lutea*. Cet arbre a été classé quatrième par le modèle TOPSIS et cinquième par le modèle VIKOR.

L'espèce *Albizia gummifera* est un arbre autochtone que l'on retrouve dans une moindre proportion dans les caféiers. Mais là où il existe, il est bien développé avec un grand houppier.

Il a des feuilles bipennées avec des folioles en nombreuses paires. La littérature lui reconnait aussi beaucoup d'usages, surtout médicinales dans nombreux pays d'Afrique (Kokila et al., 2013). Avec nos mesures, *A. gummifera* s'est classé deuxième en termes d'humidité dans le sol mais aussi pour ce qui est de la lumière transmise. *A. gummifera* a été classé cinquième par le modèle TOPSIS et sixième (ou dernier) par le modèle VIKOR.

Des chercheurs ont comparé les résultats des modèles TOPSIS et VIKOR dans plusieurs domaines. Donnons-en quelques exemples :

- Dans leur étude sur la prise des décisions en groupes en matière de connaissances communautaires, Chu et al. (2007) ont remarqué que TOPSIS et VIKOR donnaient des classements différents, et que bien que les deux modèles soient convenables pour l'évaluation des connaissances communautaires, c'est le modèle VIKOR qui facilitait le choix des stratégies appropriées.
- En comparant les deux modèles (TOPSIS et VIKOR) dans le classement webométrique des Universités, il a été conclu que les deux modèles conduisent à des résultats différents (Jati, 2012).
- Quant à Zlaugotne et al. (2020) ils ont comparé plusieurs méthodes dont TOPSIS et VIKOR dans le choix de la meilleure alternative en matière d'énergie renouvelable. Ils ont conclu que même si les classements n'étaient pas les mêmes, deux alternatives occupaient les deux premières places comme meilleures alternatives pour tous les modèles.
- Dans leur comparaison du développement des infrastructures logistiques dans les pays de l'Union européenne en utilisant les modèles TOPSIS et VIKOR, Koszela et al. (2020) ont conclu que VIKOR est plus préférable à TOPSIS.
- Dans leur étude sur la probabilité de déforestation de la ceinture de Terai-Dooars des contreforts himalayens, les deux modèles TOPSIS et VIKOR ont été comparés. Il a été conclu que le modèle VIKOR est le modèle le plus fiable (Bera et al., 2022).

A partir de ces quelques exemples, on peut raisonnablement considérer les résultats du modèle VIKOR comme meilleur et donner le meilleur classement des six espèces d'arbres d'ombrage suivant : *F. thonningii* > *G. robusta* > *P. americana* > *M. eminii* > *M. lutea* > *A. gummifera*.

5.5. Conclusion partielle

Dans cette étude sur les arbres d'ombrage du caféier, six espèces ont été évaluées. Il s'agit, par ordre alphabétique, de *Albizia gummifera, Ficus thonningii, Grevillea robusta, Maesopsis eminii, Markhamia lutea* et *Persea americana*.

Ces espèces ont été évaluées par rapport à sept critères (chaque critère pouvant avoir un ou plusieurs sous critères). Il s'agit : (i) des préférences des exploitants, (ii) de la richesse des litières des arbres en éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, pH, C, Salinité) ; (iii) des effets des arbres sur l'humidité du sol (tant en saison sèche qu'en saison pluvieuse) ; (iv) des effets des arbres d'ombrage sur la fertilité chimique du sol (Facteur d'évaluation du sol, N, P) ; (v) des effets sur la lumière transmise (par les arbres seuls ou avec auto-ombrage du caféier) ; (vi) des effets sur la production du caféier ; et (vii) des principaux usages reconnus aux arbres d'ombrage.

Deux modèles d'aide à la prise de décision multicritère ont été appliqué au classement des six espèces d'arbres d'ombrage en combinant les sept critères d'évaluation.

Les résultats ont montré que *F. thonningii* est la meilleure espèce d'arbre d'ombrage dans les conditions des plateaux centraux du Burundi. L'espèce *G. robusta* vient en deuxième lieu, tandis que l'avocatier (*P. americana*) occupe la troisième place.

Ces résultats militent en faveur de la promotion de *F. thonningii* en tant qu'arbre d'ombrage du caféier. C'est un arbre connu localement, avec plusieurs usages depuis longtemps au Burundi, et qui est facile à multiplier. Ça ne devrait pas être difficile à vulgariser. *G. robusta*, un arbre introduit depuis longtemps au Burundi, peut continuer à être produit et diffusé. Il ne nécessite vraiment pas de vulgarisation puisqu'il est le plus abondant des agroforêts. L'avocatier (*P. americana*) peut continuer à être produit et diffusé comme arbre d'ombrage. Il est très connu de la population burundaise de par ses fruits qui sont consommés dans les ménages ou vendus sur le marché. Il faudrait, cependant, identifier ou sélectionner des variétés convenables pour l'ombrage du caféier étant donné que les plus diffusées actuellement sont à port buissonnant, contrairement aux anciennes variétés à port érigé qui se prêtaient mieux à l'ombrage.

La recherche devrait également travailler sur d'autres essences comme arbres d'ombrage. On peut citer à titre d'exemple *Alnus sp.*, *Cedrella sp.*, *Azadirachta indica* (Neem), *Cordia africana*, et bien d'autres.

Conclusion générale

Au moment où cette thèse est produite, la caféiculture dispose d'une ancienneté centennale au Burundi. Dès son introduction, il était exigé de conduire la caféiculture en monoculture stricte, avec imposition de mesures coercitives à l'endroit de tout contrevenant. La gestion de cette culture a été tumultueuse avec le temps. Les agriculteurs n'ont jamais été contents des prix aux producteurs. Cette situation est gravement préjudiciable à la caféiculture.

Actuellement, les autorités sont favorables à l'association des caféiers avec des arbres d'ombrage, mais également des cultures intercallaires. Les arbres d'ombrages sont également des arbres à usages multiples. Lorsqu'ils sont associés au caféier, les avantages qu'ils procurent aux exploitants vont aussi dans le sens de favoriser le maintien des caféiers et par conséquent la pérennisation de cette culture d'exportation.

Cette recherche a été menée dans la région des plateaux centraux du Burundi, dans les exploitations des communes Rutegama (Province Muramvya), Giheta (Province Gitega) et Busiga (Province Ngozi). La première condition était que l'exploitant est membre d'une coopérative membre de COCOCA. Ainsi trois coopératives étaient concernées par cette étude : Nyarunazi à Rutegama, Mboneramiryango à Giheta et Ubwizabwikawa à Mparamirundi (Busiga).

Les travaux réalisés ont permis d'avoir la situation générale de l'état de la caféiculture sous ombrage dans la zone de travail et d'analyser les effets des arbres d'ombrage sur les conditions dans lesquelles le café est conduit (la fertilité du sol et la contribution des arbres d'ombrage dans ce sens, l'humidité du sol, la pénétration de la lumière à travers les cimes des arbres et des caféiers) et sur les performances des caféiers eux-mêmes.

Etat général de la caféiculture

Pour sonder l'état général de la caféiculture dans la zone de travail, une enquête a été réalisée dans les ménages de la zone d'étude. La population cible était de 2248 ménages. En utilisant la formule pour une large population mais finie, un échantillon de 334 personnes a été tirée par la méthode d'échantillonnage systématique. A partir de la liste des membres de la coopérative établie à l'aide de COCOCA, on sélectionnait un nom au hasard près du début de la liste de

population, et les autres étaient sélectionnés en appliquant une unité équidistante par la suite. L'enquête était menée par des étudiants du niveau master.

L'enquête a pu mettre au grand jour que le caféier est cultivé par des personnes âgées de plus de 50 ans en moyenne, qui n'ont en réalité plus d'énergie suffisante pour cultiver à la houe comme le font tous les Burundais. Chaque exploitant possède en moyenne 1,7 parcelles de caféiers sur une superficie moyenne d'environ 0,2 ha. On devrait penser à une stratégie qui permettrait plus d'implication des jeunes dans ce secteur qui est d'une très grande importance dans l'acquisition des devises, denrée dont le Burundi a grandement besoin ces derniers temps.

Ces parcelles de caféiers ne sont pas bien entretenues. Les tailles (de production, d'entretien) ne sont pas correctement faites. Le caféier très peu ou pas du tout fertilisé. L'approvisonnement en paillis devient de plus en plus difficile suite à l'occupation du sol par l'agriculture, consécutive à la démographie galopante. Là où c'est encore possible, le paillage n'est pas correctement fait, exception des exploitants de Mparamirundi où l'on observe encore des caféières paillées sur toute leur surface. Les services d'encadrement et de vulgarisation, en synergie avec les partenaires techniques et financiers, devraient mettre plus d'effort dans l'entretien des plantations de caféiers. Les autorités devraient tout faire pour rendre les fertilisants disponibles. Quant à la recherche, elle devrait penser à l'actualisation des formules de fertilisation du caféier, surtout en cette période d'introduction des fertilisants organo-minéraux au Burundi.

Les parcelles de caféier renferment des arbres d'ombrage dont les 3 suivants se retrouvent dans plus de 10% des exploitations visitées : *Grevillea robusta, Ficus sp*. et *Persea americana*. Les exploitants reconnaissent aux arbres d'ombrage plusieurs avantages, allant de l'amélioration de la fertilité du sol à l'augmentation de la production du café, et même d'un café de meilleure qualité.

On retrouve également, dans les plantations de caféier, des cultures intercalaires dont principalement le haricot, la colocase, le maïs, la pomme de terre et le manioc. Il est important que des solutions qui soient issues de la recherche soient mises à la disposition des agriculteurs, car tout n'est pas à associer au caféier.

Les exploitants essaient de cultiver le café tant bien que mal, malgré l'existence de nombreuses contraintes, dont la plus épineuse est une rémunération qu'ils considèrent toujours comme insuffisante. Le prix au producteur devrait au moins considérer les coûts de production. Comme

le Burundi ne peut pas espérer être compétitif sur base des quantités de café produites, il serait intéressant d'investir dans l'obtention des certificats pouvant procurer des primes aux producteurs après la vente de café certifié.

Les arbres d'ombrage et le sol

Les exploitants ne laissent pas les arbres dans leurs plantations de caféiers pour rien. Parmi les nombreux avantages qui sont reconnus à ces arbres, on peut citer ceux qui se rapportent à l'amélioration de la fertilité du sol et de l'humidité du sol. En ce qui concerne la fertilité du sol, en plus de certains arbres qui fixent l'azote atmosphérique, les feuilles qui tombent sur le sol s'y décomposent et contribuent au stock du sol en éléments nutritifs.

En vue d'évaluer la contribution des arbres d'ombrage à la fertilité du sol, on peut considérer deux niveaux : la richesse des feuilles des arbres en éléments nutritifs et la caractérisation physicochimique des sols des caféiers sous ombrage.

Le travail s'est effectué dans sept plantations caféières qui ont été sélectionnées. Il y avait sept espèces d'arbres d'ombrage qui sont, par ordre alphabétique, *Albizia gummifera*, *Grevillea robusta, Ficus thonningii, Maesopsis eminii*, *Markhamia lutea* et *Persea americana*.

Les feuilles de ces arbres ont été collectées, séchées et emmenées au laboratoire pour en analyser le contenu en éléments chimiques : taux du carbone total, de l'azote total, du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium, le pH et la salinité.

Les sols ont été caractérisés via des profils qui ont été creusés dans chaque exploitation. Ces profils ont été décrits et les sols classés selon la classification INEAC. L'humidité du sol a été mesurée par la méthode destructrice, la thermogravimétrie, en utilisant des anneaux kopeckis. Pour ce qui est de la fertilité du sol, des échantillons remaniés ont été pris sous chaque arbre d'ombrage puis emmenés au laboratoire pour analyses.

Les résultats ont montré que *Ficus thonningii* peut être considéré comme étant le meilleur arbre d'ombrage en termes de qualité de la litière. Cet arbre a aussi donné lieu aux meilleures conditions de fertilité chimique du sol. En effet, bien que tous les sols sous les arbres d'ombrage aient présenté des pH acides, il a été constaté que *F. thonningii* améliore fortement le pH du sol. Sous cette espèce, l'aluminium était à des niveaux indétectables, d'où l'hypothèse d'un probable effet chaulant du *F. thonningii* de par le fait que ses feuilles étaient aussi plus riches en Ca. L'espèce *F. thonningii* a gardé sa première place pour pratiquement tous les paramètres

chimiques du sol : carbone organique, azote, les bases échangeables (Ca, Mg, K), la CEC, la SB, la CECE, le PSB et l'indice de Kamprath.

Pour ce qui est de l'humidité du sol, cette recherche a montré qu'il est toujours avantageux d'associer les arbres d'ombrage au caféier. Par rapport au plein soleil, on est arrivé à gagner jusqu'à 6,6% d'humidité au mieux sous *Markhamia lutea* en période sèche. *Grevillea robusta* a constitué une exception à cette règle où elle a donné une humidité même inférieure à celle mesurée en plein soleil.

Ombrage et production des caféiers

Bien que les avantages des arbres d'ombrage sur la réduction des amplitudes climatiques soient unaniment reconnus par la communauté scientifique, il est aussi connu que les arbres d'ombrage réduisent la quantité de lumière qui arrive au niveau des caféiers.

La quantité de lumière qui arrive tant en découvert que celle qui passe à travers les cimes des arbres d'ombrage a été mesurée en utilisant deux capteurs de quantas (line quantum sensor, modèle MQ-301) qui disposent d'une série de dix capteurs quantiques disposés linéairement. Les deux capteurs étaient opérés en même temps. Parallèlement, des caféiers étaient sélectionnés pour le suivi de leur production.

Les résultats ont montré que les arbres laissent pénétrer très peu de lumière (autour de 25% au mieux). *Persea americana* a laissé passer la quantité de lumière la plus petite, probablement parce que ses branches sont laissées sur l'arbre pour maximiser la production de fruits. Les services en charge de l'encadrement et de la vulgarisation devraient insister sur la gestion de l'appareil aérien des arbres pour que toutes les composantes du système puissent mieux concourir au bien-être des exploitants.

De manière générale, en ce qui concerne la production du caféier durant les trois années suivies, elle a été meilleure sous ombrage. Les trois arbres qui ont donné la meilleure production sont : *Grevillea robusta* > *Persea americana* > *Ficus thonningii*. La production obtenue a été de 3,2 kg/tige au mieux sous *Persea americana* contre 0,7 kg/tige sous *Maesopsis eminii* en conditions de bonne production ; et 0,6 kg/tige sous *Grevillea robusta* contre 0,05 kg/tige sous *Albizia gummifera* en conditions de non production. Les productions obtenues sont proches de la moyenne nationale. Mais, lorque comparées avec la productivité optimale du caféier qui est à 10 kg de cerises/tige de caféier, on comprend qu'il reste du chemin à parcourir. Dans l'entre

temps, il faudrait réunir tout le pacquet pour arriver au moins à avoir entre 5 et 7 kg de cerises/tige de caféier.

Quel est le meilleur arbre d'ombrage pour la zone de travail ?

Lorsqu'on constate la présence d'un arbre d'ombrage qui a été laissé dans une plantation de caféier, seul le propriétaire sait pourquoi cet arbre existe dans cette exploitation. Il est difficile, voire impossible, d'avoir un arbre d'ombrage qui réunit toutes les qualités. D'un côté, ayant travaillé sur plusieurs espèces d'arbres d'ombrage, et ayant évalué plusieurs paramètres, on peut classer les arbres d'ombrage en fonction de chaque paramètre. D'un autre côté, on peut vouloir classer les arbres en fonction de tous les paramètres pris ensemble. Dans ce dernier cas, des modèles mathématiques ont été développés et permettent d'aider à la prise de décision multicritère.

Cette option nous a semblé plus holistique. C'est la raison pour laquelle, dans cette thèse, deux modèles ont été appliqués. Il s'agit de TOPSIS et VIKOR.

Les résultats de ces deux modèles ont permis de classer les espèces d'arbres d'ombrage étudiés. De manière générale, les deux modèles donnent des résultats satisfaisants, mais la littérature tend à pencher à ceux issus de VIKOR.

Dans cette logique, le meilleur arbre d'ombrage parmi les six impliqués dans cette étude est *Ficus thonningii,* un arbre autochtone par ailleurs connu depuis longtemps au Burundi, puisqu'il a servi dans la fabrication de vêtements traditionnels, avant l'arrivée des colonisateurs. Le classement donné par VIKOR est le suivant : *Ficus thonningii* > *Grevillea robusta* > *Persea americana* > *Maesopsis eminii* > *Markhamia lutea* > *Albizia gummifera*.

Défis et Perspectives

La limitation majeure de cette recherche est relative aux conditions dans lesquelles elle s'est déroulée. En effet, nous avons travaillé dans les exploitations paysannes déjà existantes, avec toute leur diversité (types de sols, pente, espèces d'arbres, leur âge, l'âge des caféiers, la gestion des exploitations, etc.). Tous ces éléments affectent d'une manière ou d'une autre les résultats de cette thèse. Il arrivait qu'un exploitant décide à notre insu de couper un arbre d'ombrage. Cette situation a fait que la taille des échantillons n'ait pas été restée constante, ce qui compliquait les analyses statistiques.

Cette étude a le mérite d'avoir traité plusieurs paramètres du système agroforestier à base de café. Elle constitue une contribution importante à la reconnaissance d'un arbre autochtone, *F. thonningii* comme meilleur arbre d'ombrage du caféier. A notre connaissance, c'est la seule étude où les modèles de prise de décision multicritère (TOPSIS et VIKOR) sont appliqués sur la comparaison des arbres d'ombrage.

Cette recherche n'a pas du tout l'intention de rejeter l'un ou l'autre arbre d'ombrage. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il faudrait continuer la recherche sur d'autres espèces d'arbres d'ombrage. On peut citer à titre d'exemple *Alnus sp*. qui est une espèce fixatrice d'azote, *Cedrella sp*. qui se retrouve déjà dans certaines caféières, *Azadirachta indica* (Neem) dont les propriétés répulsives contre les insectes sont reconnues, *Cordia africana* utilisée pour la fabrication des tambours mais qui a un feuillage dense et large pouvant profiter au sol des caféières, et bien d'autres. Cedrella est déjà installé dans l'essai agroforestier de Zege.

La composante des cultures intercalaires est un élément très important pour que le système caféicole reste attrayant. Cette thèse n'a pas pu aborder ces aspects. Il est important que les recherches ultérieures puissent s'y pencher.

Dans cette recherche, seuls deux éléments du microclimat ont été mesurés : l'humidité du sol et la lumière. Il serait utile de mener une recherche qui intègre d'autres paramètres : la température du sol et de l'air, l'humidité de l'air, les précipitations, etc. Pour ce qui est de la lumière, l'acquisition des équipements permettant la mesure de la surface foliaire permettrait d'aller plus loin dans la détermination du coefficient d'extinction lumineuse.

Le comportement des arbres d'ombrage vis-à-vis de l'humidité du sol a révélé que certaines espèces comme par exemple Grevillea robusta pourraient induire une compétition importante.

Il y a une nécessité de mener des investigations poussées dans les études ultérieures dans le contexte burundais surtout que cette essence est très présente en agroforesterie et appréciée par les agriculteurs.

Dans cette thèse, les litières analysées ont présenté des valeurs de pH inférieures aux normes pour les végétaux, ce qui pourrait faire penser à des effets négatifs après leur incorporation dans un sol qui est lui-même déjà acide. Cet important résultat à des fins de prise de décision pour la vulgarisation mérite d'être confirmé par des recherches ultérieures, incluant d'autres espèces d'arbres agroforestières.

Il serait aussi important que les recherches ultérieures évaluent les effets allélopathiques des arbres d'ombrage du caféier, élément d'importance en agroforesterie qui n'a pas été abordé dans cette thèse.

La recherche sur le caféier prend beaucoup de temps. Par exemple, cette recherche a collecté les données sur les productions uniquement sur trois ans. Nous proposons de collecter et d'analyser des données (productions, pénétration de la lumière) jusqu'à couvrir au moins en entièreté tout le cycle de production et au plus toute la période de croissance des arbres. Dans ces études, il faudrait aller plus loin pour inclure aussi les effets sur la qualité du café produit, car c'est cette dernière qui détermine le prix du produit et ainsi tout ce qui est en rapport avec la motivation des agriculteurs de garder ou non le caféier dans leurs exploitations. Le dispositif agroforestier installé à Zege pourra permettre de conduire de telles recherches.

Références bibliographiques

Adhikari, M., Isaac, E. L., Paterson, R. R. M., & Maslin, M. A. (2020). A Review of Potential Impacts of Climate Change on Coffee Cultivation and Mycotoxigenic Fungi. *Microorganisms*, *8*(10), 1625. https://doi.org/10.3390/microorganisms8101625

AFCA. (2022). *African Fine Coffees Association (AFCA)*. https://afca.coffee/

Ahmadvand, Soleimani, F., Saadatian, B., & Pouya, M. (2012). Effect of Seed Priming with Potassium Nitrate on Germination and Emergence Traits of Two Soybean Cultivars under Salinity Stress Conditions. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, *12*(6), 769-774.

Alemu, A., & Dufera, E. (2017). Climate smart coffee (*Coffea arabica*) production. *American Journal of Data Mining and Knowledge Discovery*, *2*(2), 62-68.

Alemu, M. M. (2015). Effect of Tree Shade on Coffee Crop Production. *Journal of Sustainable Development*, *8*, 66. https://doi.org/10.5539/jsd.v8n9p66

Apogee Instruments. (2020). *Owner's manual. Quantum meter. Models MQ-100, MQ-200, and MQ-300 Series*.

Araujo, W. L., Dias, P. C., Moraes, G. A. B. K., Celin, E. F., Cunha, R. L., Barros, R. S., & DaMatta, F. M. (2008). Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. *Plant Physiology and Biochemistry*, *46*(10), 884-890. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.005

Asmare, B., & Mekuriaw, Y. (2019). Assessment of *Ficus thonningii* tree production and utilization for livestock feed by smallholder farmers in northwestern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, *8*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s40066-018-0247-4

Bala, A., Singh, A. P., & Singh, A. P. (2021). Phytopharmaceutical profile of *Ficus thonningii* : An updated Review. *World Journal of Current Medical and Pharmaceutical Research,* 104-106. https://doi.org/10.37022/wjcmpr.v3i4.188

Balehegn, M. (2012). *Forage and multipurpose uses of* Ficus thonningii *in northern Ethiopia : Nutritive value, biomass estimation, and impact on soil fertility*. https://www.academia.edu/25858521/Forage_and_Multipurpose_Uses_of_Ficus_Thonningii_in_Northern_Ethiopia_Nutritive_Value_Biomass_Estimation_and_Impact_on_Soil_Fertility

Basílio, M. P., Pereira, V., Costa, H. G., Santos, M., & Ghosh, A. (2022). A Systematic Review of the Applications of Multi-Criteria Decision Aid Methods (1977–2022). *Electronics*, *11*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/electronics11111720

Batish, D. R., Singh, H. P., & Kohli, R. K. (2008). Allelopathic tree-crop interactions under agroforestry systems. In *Ecological basis of Agroforestry* (p. 400). CRC Press.

Beaumont, J. H., & Fukunaga, E. T. (1958). *Factors affecting the growth and yield of coffee in Kona, Hawaii*. Hawaii agricultural experiment station bulletin 113.

Beck, J., Citegetse, G., Ko, J., & Sieber, S. (2010). *Burundi Environmental Threats and Opportunities Assessment* (p. 84). United States Agency for International Development.

Beer, J. (1987). Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems*, *5*, 3-13.

Beer, J. (1988). Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems*, *7*(2), 103-114. https://doi.org/10.1007/BF00046846

Bekele, A., & Guadie, T. (2020). Multiple regression analysis on factors affecting coffee production in Bench-Shako zone : In case of Mizan-Aman district, southwest Ethiopia. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, *8*(2), 24-30.

Bellefontaine, R., Petit, S., Pain-Orcet, M., Deleporte, P., & Bertault, J.-G. (2001). *Les arbres hors forêt. Vers une meilleure prise en compte* (FAO).

Bellhouse, D. R. (2014). Systematic Sampling Methods. In *Wiley StatsRef : Statistics Reference Online*. American Cancer Society. https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat05723

Bera, B., Shit, P. K., Sengupta, N., Saha, S., & Bhattacharjee, S. (2022). Susceptibility of deforestation hotspots in Terai-Dooars belt of Himalayan Foothills : A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS models. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, *34*(10, Part A), 8794-8806. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.10.005

Berhe, D. H., Anjulo, A., Abdelkadir, A., & Edwards, S. (2013). Evaluation of the effect of *Ficus thonningii* (Blume) on soil physicochemical properties in Ahferom district of Tigray, Ethiopia. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, *4*(2), 35-45.

Berhe, D. H., & Tanga, A. A. (2013). Nutritional evaluation of *Ficus thonningii* Blume leaves as ruminant livestock feed in the Ahferom district of Tigray, Ethiopia. *African Journal of Range & Forage Science*, *30*(3), 149-154. https://doi.org/10.2989/10220119.2013.765505

Besse, F., Guizol, P., & de Ligne, A. (1991). L'agroforesterie au Burundi. *Revue forestière française*, *43*(1), 59-71.

Bhattarai, C., Bhandari, D., Bhandari, S., Bhusal, K., Khatri, B., Srivastava, A., & Sapkota, B. K. (2020). Factors affecting the productivity of coffee in Gulmi and Arghakhanchi districts of Nepal. *Journal of Agriculture and Natural Resources, 3*(1), 51-60.

Bitoga, J., Flémal, J., Lambot, C., & Snoeck, D. (1994). La recherche sur caféier arabica au Burundi. *Tropicultura, 12*(3), 109-113.

Blanca, A., & Ceballos, M. (2016). *MCDM: Multi-criteria decision making methods for Crisp data* (Version R package version 1.2.) [Logiciel].

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 & Environment, 129*(1), 253-260. https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.09.004

Bote, A. D. (2016). *Examining growth, yield and bean quality of Ethiopian coffee trees : Towards optimizing resources and tree management* [PhD Thesis]. Wageningen University.

Bote, A. D., & Struik, P. C. (2011). Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry, 3*(11), 336-341.

Bouyjou, B., Decazy, B., & Fourny, G. (1999). L'élimination du « goût de pomme de terre » dans le café Arabica du Burundi. *Plantations, recherche, développement, 6*(2), 107-115.

Campanha, M. M., Santos, R. H. S., de Freitas, G. B., 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*(1), 75-82. https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000049435.22512.2d

Caramori, P. H., Androcioli Filho, A., & Leal, A. C. (1996). Coffee shade with *Mimosa scabrella* Benth. For frost protection in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, *33*(3), 205-214. https://doi.org/10.1007/BF00055423

Cerdán, C. R., Rebolledo, M. C., Soto, G., Rapidel, B., & Sinclair, F. L. (2012). Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, *110*, 119-130.

Chakraborty, S. (2022). TOPSIS and Modified TOPSIS : A comparative analysis. *Decision Analytics Journal*, *2*, 100021. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021

Chen, S.-J. J., Hwang, C. L., Beckmann, M. J., & Krelle, W. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications*. Springer-Verlag.

Chu, M.-T., Shyu, J., Tzeng, G.-H., & Khosla, R. (2007). Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis. *Expert Systems with Applications*, *33*(4), 1011-1024. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.08.026

Chuang, T.-H., Chan, H.-H., Wu, T.-S., & Li, C.-F. (2011). Chemical Constituents and Biological Studies of the Leaves of *Grevillea robusta*. *Molecules*, *16*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/molecules16119331

Ciardiello, F., & Genovese, A. (2023). A comparison between TOPSIS and SAW methods. *Annals of Operations Research*, *325*(2), 967-994. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05339-w

Ciza, G., Nineza, D. A., Demanet, C., & Ghins, L. (2016). *Analyse des incitations par les prix pour le café au Burundi pour la période 2005-2014* (FAO).

Cochet, H., & Ndarishikanye, B. (1998). Les fondements de la crise caféière au Burundi. *Mondes en développement*.

Cochet, H., & Ndarishikanye, B. (2000). La production caféière au Burundi : Agronomie, vulgarisation et rapports sociaux. *Canadian Journal of African Studies*, *34*(2), 218-248.

Cochran, W. G. (1953). *Sampling techniques*. Asia Publishing House.

DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee : A review. *Field Crops Research, 86*, 949-114.

DaMatta, F. M., Rahn, E., Läderach, P., Ghini, R., & Ramalho, J. C. (2019). Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change, 152*, 167-178.

DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., & Barros, R. S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, *19*, 485-510. https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014

Dangarembizi, R., Erlwanger, K. H., Moyo, D., & Chivandi, E. (2013). Phytochemistry, pharmacology and ethnomedicinal uses of *Ficus thonningii* Blume (Moraceae) : A review. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, *10*(2), 203-212. https://doi.org/10.4314/ajtcam.v10i2.4

Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. (2017). *Understanding soil water content and thresholds for irrigation management*. Oklahoma Cooperative Extension Service BAE-1537.

de Carvalho, A. F., Fernandes-Filho, E. I., Daher, M., Gomes, L. de C., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., & Schaefer, C. E. G. R. (2021). Microclimate and soil and water

loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. *Agroforestry Systems, 95*(1), 119-134. https://doi.org/10.1007/s10457-020-00567-6

Defrenet, E., Roupsard, O., Van den Meersche, K., Charbonnier, F., Pastor Pérez-Molina, J., Khac, E., Prieto, I., Stokes, A., Roumet, C., Rapidel, B., de Melo Virginio Filho, E., Vargas, V. J., Robelo, D., Barquero, A., & Jourdan, C. (2016). Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica : Effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. *Annals of Botany*, *118*(4), 833-851. https://doi.org/10.1093/aob/mcw153

de Mattos, E. M., Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C. A., & Stape, J. L. (2020). Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among Eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, *463*, 118038. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118038

Descroix, F. (1995). Burundi. La caféiculture dans l'économie familiale. *Plantations, recherche, développement*, 5-13.

de Souza, H. N., de Goede, R. G. M., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M. G., Fernandes, R. B. A., Gomes, L. de C., & Pulleman, M. M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Athlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *146*, 179-196.

de Souza, H. N., de Graaff, J., & Pulleman, M. M. (2011). Stategies and economics of farming systems with coffee in the Atlantic Rainforest biome. *Agroforestry Systems*, *84*, 227-242.

Diallo, M. D., Guisse, A., Badiane-Niane, A., Sall, S., & Chotte, J. L. (2005). In situ effect of some tropical litters on N mineralization. *Arid Land Research and Management, 19*(2), 173-181. https://doi.org/10.1080/15324980590916576

Dushimirimana, S., Manirakiza, E., & Gasogo, A. (2016). Etude de l'évolution et de la variabilité saisonnière des principaux ravageurs des caféiers en période de fructification. *Bulletin scientifique sur l'environnement et la biodiversité, 1*, 8-16.

Ebisa, L. (2014). Effect of Dominant Shade Trees on Coffee Production in Manasibu District, West Oromia, Ethiopia. *Science, Technology and Arts Research Journal, 3*(3), 18-22. https://doi.org/10.4314/star.v3i3.3

Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., & Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems, 90*(3), 433-445. https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z

Ehrenbergerová, L., Klimková, M., Cano, Y. G., Habrová, H., Lvončík, S., Volařík, D., Khum, W., Němec, P., Kim, S., Jelínek, P., & Maděra, P. (2021). Does Shade Impact Coffee Yield, Tree Trunk, and Soil Moisture on *Coffea canephora* Plantations in Mondulkiri, Cambodia? *Sustainability, 13*(24), 13823. https://doi.org/10.3390/su132413823

Essa, T. A. (2002). Effect of Salinity Stress on Growth and Nutrient Composition of Three Soybean (*Glycine max* L. Merrill) Cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science, 188*(2), 86-93. https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2002.00537.x

FAOSTAT. (2022). *Crops and livestock products*. FAO. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Gaie, W., & Flémal, J. (1988). *La culture du caféier d'Arabie au Burundi*. Publication du service agricole N° 14.

Galindo-Tovar, M. E., Ogata-Aguilar, N., & Arzate-Fernández, A. M. (2008). Some aspects of avocado (*Persea americana* Mill.) diversity and domestication in Mesoamerica. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *55*(3), 441-450. https://doi.org/10.1007/s10722-007-9250-5

Gokavi, N., & Kishor, M. (2020). Impact of climate change on coffee production : An overview. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *9*(3), 1850-1858.

Gomes, L. C., Bianchi, F. J. J. A., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., Filho, E. I. F., & Schulte, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production : A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *294*, 106858. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858

Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.-M., & Lemaire, G. (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, *6*(1), 47-56.

Grossman, J. M. (2003). Exploring farmer knowledge of soil processes in organic coffee systems of Chiapas, Mexico. *Geoderma*, *111*(3), 267-287.

Habonimana, B., Megerle, H. E., & Hein, S. (2018). Wald und Waldbewirtschaftung in Burundi. Teil 1 : Naturraum, Waldtypen und Forstgeschichte des zentralafrikanischen Landes. *Holzzentralblatt*, *144*(19), 456-458.

Habumugisha, V., Mourad, K. A., & Hashakimana, L. (2019). The Effects of Trees on Soil Chemistry. *Current Environmental Engineering*, *6*(1), 35-44. https://doi.org/10.2174/2212717806666181218141807

Halwani, M., Reckling, M., Egamberdieva, D., Omari, R. A., Bellingrath-Kimura, S. D., Bachinger, J., & Bloch, R. (2021). Soybean Nodulation Response to Cropping Interval

and Inoculation in European Cropping Systems. *Frontiers in Plant Science, 12*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.638452

Harelimana, A., Le Goff, G., Ntirushwa Rukazambuga, D. T., & Hance, T. (2018). Coffee Production Systems : Evaluation of Intercropping System in Coffee Plantations in Rwanda. *Journal of Agricultural Science*, *10*(9), 17-28.

Harvey, C. A., Pritts, A. A., Zwetsloot, M. J., Jansen, K., Pulleman, M. M., Armbrecht, I., Avelino, J., Barrera, J. F., Bunn, C., García, J. H., Isaza, C., Munoz-Ucros, J., Pérez-Alemán, C. J., Rahn, E., Robiglio, V., Somarriba, E., & Valencia, V. (2021). Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *41*(5), 62. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0

Hatungimana, A. (2008). Le café et les pouvoirs au Burundi. *Les cahiers d'Outre-Mer*, *243*.

Havyarimana, T. (2020). *Etude du potentiel de promotion du café d'ombre sur la rentabilité et la durabilité des exploitations caféières du Burundi* [Mémoire de Master]. Université du Burundi.

Hazelton, P., & Murphy, A. B. (2016). *Interpreting soil test results. What do all numbers mean?* (Third Edition). CSIRO Publishing.

Herrick, J. E., & Wander, M. M. (1997). Relationships between Soil Organic Carbon and Soil Quality in Cropped and Rangeland Soils : The Importance of Distribution, Composition, and Soil Biological Activity. In *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press.

Hicintuka, C., & Masilya, P. M. (2013). Gestion optimale et intégrée de la fertilité des sols acides du Burundi. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, *Hors-série 17*. https://doi.org/10.4000/vertigo.13898

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Hines, D. A., & Eckman, K. (1993). *Indigenous multipurpose trees of Tanzania : Uses and economic benefits for people* (FAO, Rome). FAO.

Hodges, S. C. (2010). *Soil fertility basics*. Soil science extension, North carolina state university, 22.

Hue, N. V. (1991). Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Science, 152*(6), 463.

ICO. (2023). *International Coffee Organization*. https://www.ico.org/mission07_e.asp?section=About_Us

Isaac, M. E., & Borden, K. A. (2019). Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. *Plant and Soil, 444*(1), 1-19. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04232-5

ISABU. (1990). *Rapport de la journée de la recherche agronomique*. Bujumbura, Burundi.

Israel, G. D. (1992). *Determining Sample Size*. University of Florida.

ISTEEBU. (2009). *Recensement général des caféiers. Edition 2006-2007. Résultats définitifs*.

ISTEEBU. (2013). *Rapport des projections démographiques 2008-2030 pour le Burundi*.

ISTEEBU. (2017). *Annuaire des statistiques agricoles du Burundi. Edition 2016*.

ISTEEBU. (2021). *Recensement général des caféiers et des caféiculteurs, Edition 2019. Rapport définitif*.

IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106). FA.

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Jati, H. (2012). Comparison of University webometrics ranking using multicriteria decision analysis : TOPSIS and VIKOR method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *71*, 1663-1669.

Johnson, P. (2015). L'émergence de l'agriculture biologique et du commerce équitable au Burundi. *Pour*, *227*(3), 151-161. https://doi.org/10.3917/pour.227.0151

Kaboneka, S., Kwizera, C., Nijimbere, S., Irakoze, W., Nsengiyumva, P., Ndihokubwayo, S., & Habonimana, B. (2021). Yield Responses of Maize (*Zea mays* L.) and Successive Potato (*Solanum tuberosum* L.) Crops to Maize Stover co-composted with *Calliandra calothyrsus* Meisn Green Manure. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *7*(4), 1-15.

Kaboneka, S., Nsavyimana, G., Nkurunziza, M., & Ntezukwigira, G. (2020). Allelopathic effects of *Calliandra calothyrsus* Meisn, *Senna siamea* L. and *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp leaves on Maize (*Zea mays* L.) and Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) root and shoot growth. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *6*(2), 47-59.

Kimonyo, J.-P., & Ntiranyibagira, D. (2007). *Réformes de la filière café au Burundi : Perspectives d'avenir pour la participation, la prospérité et la paix* [Consultance].

Kokila, K., Priyadharshini, S. D., & Sujatha, V. (2013). Phytopharmacological properties of Albizia species : A review. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, *5*(3).

Koszela, G., Gostkowski, M., Ochnio, L., & Kostoglou, V. (2020). A comparison of logistics infrastructure development level of European Union countries using TOPSIS and

VIKOR methods. *Zeszyty Naukowe Szkoly Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Ekonomika i Organizacja Logistyki*, *5*(1), 15-27.

Kouassi, Y. F., Gbogouri, G. A., N'Guessan, K. A., Bilgo, A., Angui, K. T. P., & Ama, J. (2019). Effets de fertilisants organique et organominéral à base de déchets végétaux et animaux sur la croissance et le rendement du soja (*Glycine max* (L.) Merrill) en zone de savane de Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, *31*(1), 21-32. https://doi.org/10.4314/aga.v31i1.

Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bertrand, B., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., Etienne, H., Turreira-García, N., Léran, S., Markussen, B., Marraccini, P., Ramalho, J. C., Vaast, P., & Ræbild, A. (2022). Shade effects on yield across different *Coffea arabica* cultivars—How much is too much ? A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, *42*(4), 55. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00788-2

Krishnan, S. (2017). Sustainable Coffee Production. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.224

Kumar, T. M. (2014). Studies on allelopathic effects of some agroforestry tree species on soybean. *International Journal of Farm Sciences*, *4*(2), 107-113.

Kutos, S., Bennett, R. E., Rao, M. V., Fleischer, R. C., Rice, R. A., & Muletz-Wolz, C. R. (2024). Farm management and shade tree species influence coffee soil microbiomes in Central and South America. *Applied Soil Ecology*, *202*, 105571. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105571

Kwizera, E. (2020). *Problématique de développement des systèmes d'exploitations caféicoles face à la mutation des systèmes agraires et solutions alternatives : Cas de la région nord du Burundi* [Mémoire de Master]. Université du Burundi.

Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3

Landon, J. R. (1991). *Booker Tropical Soil Manual : A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics* (1st Edition). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315846842

Leakey, R. R. B. (2014). The Role of Trees in Agroecology and Sustainable Agriculture in the Tropics. *Annual Review of Phytopathology*, *52*(1), 113-133. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-102313-045838

Lieffers, V. J., Messier, C., Stadt, K. J., Gendron, F., & Comeau, P. G. (1999). Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, *29*, 796-811.

Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, *144*(1), 85-94. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009

Lin, B. B. (2008). Microclimate effects on flowering success in coffee agroforestry systems. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, *2*, 148-152.

Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(4), 510-518. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010

Long, N. V., Ngoc, N. Q., Dung, N. N., Kristiansen, P., Yunusa, I., & Fyfe, C. (2015). The Effects of Shade Tree Types on Light Variation and Robusta Coffee Production in Vietnam. *Engineering*, *7*(11), 742-753. https://doi.org/10.4236/eng.2015.711065

Lott, J. E., Khan, A. A. H., Black, C. R., & Ong, C. K. (2003). Water use in a *Grevillea robusta*–maize overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, *180*(1-3), 45-59. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00603-5

Lu, D., Moran, E. F., & Mausel, P. (2002). Linking amazonian secondary succession forest growth to soil properties. *Land degradation and development, 13*, 331-343.

Magdy, M., Elosaily, A. H., Mohsen, E., & El Hefnawy, H. M. (2023). Mini review on morphology, traditional uses, phytochemical pharmacological potential of Markhamia lutea. *Egyptian Journal of Chemistry*, *66*(13), 507-518.

Mangal, S. K. (2007). *Coffee. Planting, production and processing*. Gene-Tech Books.

Martin, D. (1972). Choix d'une notation des horizons de sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, *X*(1), 45-57.

Mathieu, C., & Piéltain, F. (2003). *Analyse chimique des sols. Méthodes choisies* (Tec&Doc). Lavoisier.

Mayoli, R. N., & Gitau, K. M. (2012). The effects of shade trees on physiology of Arabica coffee. *African Journal of Horticultural Sciences*, *6*, 35-42.

McClelland, T. L. (1935). Coffee Shade in Kenya. *The East African Agricultural Journal*, *1*(2). https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03670074.1935.11663629

Megerle, H. E., & Niragira, S. (2020). The challenge of food security and the water-energy-food nexus : Burundi case study. In *Hidden hunger and the transformation of food systems. How to combat the double burden of malnutrition ? World Rev Nutr Diet. Basel, Karger* (Vol. 121, p. 183-192).

Megerle, H. E., Nkurunziza, P., Hein, S., & Habonimana, B. (2018). Wald und Waldbewirtschaftung in Burundi. Teil 2 : Die verschwundenen Wälder von Burundi und die Folgen der hohen Entwaldungsraten. *Holzzentralblatt*, *144*(25), 588-589.

Mekki, B. B., & Ahmed, A. G. (2005). Growth, Yield and Seed Quality of Soybean (*Glycine max* L.) as Affected by Organic, Biofertilizer and Yiest Application. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, *1*(4), 320-324.

Méndez, V. E., Bacon, C. M., Olson, M., Petchers, S., Herrador, D., Carranza, C., Trujillo, L., Guadarrama-Zugasti, C., Cordón, A., & Mendoza, A. (2010). Effects of Fair Trade and organic certifications on small-scale coffee farmer households in Central America and Mexico. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *25*(3), 236-251. https://doi.org/10.1017/S1742170510000268

Mercier, M., Ngenzebuke, R. L., & Verwimp, P. (2020). Violence exposure and poverty : Evidence from the Burundi civil war. *Journal of Comparative Economics*, *48*(4), 822-840. https://doi.org/10.1016/j.jce.2020.04.005

Merga, D., & Etana, D. (2023). Influences of Salient Agronomic Practices for Mitigation of Biennial Bearing in Coffee (*Coffea arabica* L.). *Journal of Plant Sciences*, *8*(4), 136-143.

MINEAGRIE. (2022). *Cartographie de la fertilité des sols du Burundi. Edition 2022*.

Miransari, M., & Smith, D. L. (2007). Overcoming the Stressful Effects of Salinity and Acidity on Soybean Nodulation and Yields Using Signal Molecule Genistein Under Field Conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *30*(12), 1967-1992. https://doi.org/10.1080/01904160701700384

Mohammadi, K., Sohrabi, Y., Heidari, G., Khalesro, S., & Majidi, M. (2012). Effective factors on biological nitrogen fixation. *African Journal of Agricultural Research*, *7*(12), 1782-1788. https://doi.org/10.5897/AJARX11.034

Moller, K. (1991). *Maesopsis eminii : Arbre agroforestier à usages multiples*. Coopération Technique Suisse.

Montgomery, R. A., & Chazdon, R. L. (2001). Forest Structure, Canopy Architecture, and Light Transmittance in Tropical Wet Forests. *Ecology*, *82*(10), 2707-2718. https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[2707:FSCAAL]2.0.CO;2

Morais, H., Caramori, P. H., Ribeiro, A. M. de A., Gomes, J. C., & Koguishi, M. S. (2006). Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesquisa agropecuária brasileira*, *41*(5), 763-770.

Moran, E. F., Brondizio, E. S., Tucker, J., da Silva-Forsberg, M. C., McCracken, S., & Falesi, I. (2000). Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazônia. *Forest Ecology and Management*, *139*, 93-108.

Morenike, C., Veronica, A., Emikpe, B. O., Oyebanji, V. O., & Jarikre, T. A. (2019). Investigations on the antimicrobial and wound healing activity of *Ficus thonningii* Blume extracts. *Comparative Clinical Pathology*, *28*(4), 1113-1118. https://doi.org/10.1007/s00580-019-02948-5

Morgane. (2019, novembre 2). COCOCA : Café du Burundi. *Trade for Development Centre*. https://www.tdc-enabel.be/fr/2019/11/02/cococa-cafe-du-burundi/

Motsara, M. R., & Roy, R. N. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. FAO.

Msangi, T. H. (2003). The nine deadly sins of *Maesopsis eminii*. *Newsletter - Tanzania Forestry Research Institute*, *3*(1), 2-7.

Muschler, R. G. (2001). Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, *85*, 131-139.

Musese, L. J., Kilawe, C. J., & Kitegile, A. S. (2023). The abundance and diversity of rodents in forest sites invaded and uninvaded by *Maesopsis eminii* trees in Amani Nature Reserve, Tanzania. *Journal of Vertebrate Biology*, *72*.

Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, *4*(5), 661-672. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z

Musy, A., Higy, C., & Reynard, E. (2014). *Hydrologie 1. Une science de la nature. Une gestion sociétale*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Mwakha, E., & Ngugi, D. N. (1990). Yield Advantage in Intercropping of High Density Arabica Coffee with Dry Beans. *East African Agricultural and Forestry Journal*, *56*(2), 21-26.

Ndihokubwayo, S., Havyarimana, T., Windbühler, S., Niragira, S., Habonimana, B., Kaboneka, S., & Megerle, H. E. (2021). Farmers' Perception of Coffee Agroforestry Systems in an Area Targeted for Organic Certification in Burundi. *East African Journal of Forestry and Agroforestry*, *3*(1), 40-53. https://doi.org/10.37284/eajfa.3.1.352

Ndihokubwayo, S., Niyongabire, R., Kaboneka, S., Habonimana, B., Nibasumba, A., & Megerle, H. E. (2023). Qualité agrochimique des litières des arbres d'ombrage du caféier et réponse de la culture de soja à leur application sur un ferralsol acide du Burundi. *Afrique SCIENCE*, *23*(3), 14-24.

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Nduwayo, G., Hakizimana, D., & Kagisye, A. (2017). Guide pratique pour la conduite du café d'ombre. *Bulletin de la recherche agronomique au Burundi*, *16*.

Negash, T., Kinfu, S., Wana, T. W., & Daba, A. (2021). Determination of light and nitrogen extinction coefficient for coffee plant at different growth stages and canopy layers. *International Journal of Botany Studies*, *6*(3), 836-841.

Ngbolua, K.-N., Ngiala, G. B., Liyongo, C. I., Ashande, C. M., Lufuluabo, G. L., Mukiza, J., & Mpiana, P. T. (2019). A mini-review on the phytochemistry and pharmacology of the medicinal plant species *Persea americana* Mill. (Lauraceae). *Discovery Phytomedicine*, *6*(3), 102-111.

Ngeywo, J., Basweti, E., & Shitandi, A. (2015). Influence of gender, age, marital status and farm size on coffee production : A case of Kisii county, Kenya. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, *5*(3), 117-125.

Nibasumba, A. (2013). *Evaluation agronomique de l'association bananiers-caféiers : Application au Burundi*. Université catholique de Louvain.

Nibasumba, A., Jassogne, L., Nduwayo, G., Ngayempore, E., Simbashizubwoba, C., van Asten, P. J. A., & Bielders, C. (2021). Status and management of coffee plantations in Burundi : Reasons to worry. *African Journal of Agricultural Research*, *17*(9), 1180-1191.

Nijimbere, S., Kaboneka, S., Ndihokubwayo, S., Irakoze, W., & Ndikumana, J. (2020). Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi). *Revue de l'Université du Burundi*, *29*, 34-44.

Nillesen, E. (2016). Empty cups ? Assessing the impact of civil war violence on coffee farming in Burundi. *African Journal of Agricultural Resource Economics*, *11*(1), 69-83.

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Niragira, S., D'Haese, M., D'Haese, L., Ndimubandi, J., Desiere, S., & Buysse, J. (2015). Food for Survival : Diagnosing Crop Patterns to Secure Lower Threshold Food Security Levels in Farm Households of Burundi. *Food and Nutrition Bulletin*, *36*(2), 196-210. https://doi.org/10.1177/0379572115587491

Niyongabire, R. (2022). *Valeur fertilisante des litières foliaires des essences agroforestières associées aux caféiers sur une culture de soja (Glycine max L.) dans les plateaux centraux du Burundi* [Mémoire de Master]. Université du Burundi.

Niyonizigiye, F. (2022). *Contribution de la certification dans la compétitivité du café. Cas de l'union COCOCA*. Atelier de présentation des résultats du projet Agroforesterie, Bujumbura.

Njoroge, J. M., & Kimemia, J. K. (1995). Effects on the Yield and Growth of a Young Compact Arabica Coffee Hybrid of Intercropping with Food Crops in Three Agro-ecozones in Kenya. *Experimental Agriculture*, *31*(1), 49-55. https://doi.org/10.1017/S001447970002500X

Njoroge, J. M., Waithaka, K., & Chweya, J. A. (1993). Effects of Intercropping Young Plants of the Compact Arabica Coffee Hybrid Cultivar Ruiru 11 with Potatoes, Tomatoes, Beans and Maize on Coffee Yields and Economic Returns in Kenya. *Experimental Agriculture*, *29*(3), 373-377. https://doi.org/10.1017/S0014479700020937

Nkurunziza, F. (2021). *Guide des procédures d'exportation de café pour les petites et moyennes entreprises au Burundi* (p. 66). International Trade Center.

Nonato, J. V. A., Carvalho, H. F., Borges, K. L. R., Padilha, L., Maluf, M. P., Fritsche-Neto, R., & Guerreiro Filho, O. (2021). Association mapping reveals genomic regions

associated with bienniality and resistance to biotic stresses in arabica coffee. *Euphytica, 217*(10), 190. https://doi.org/10.1007/s10681-021-02922-9

Nwaogu, L. A., Alisi, C. S., & Ojiako, O. A. (2008). Studies on the nutritional and phytochemical properties of *Persea americana* seed. *Bio-Research, 6*(1), 320-322.

Nyamoya, P., Kazungu, C., & Akilimali, J. (1986). Le financement du développement au Burundi : La filière café. *Revue Tiers Monde*, *106*, 357-374.

Nyamweru, J. C., Ndayitwayeko, W. M., Kessler, A., & Biemans, H. (2024). Fostering sustainable agriculture in Burundi : Which competencies for change-agents should vocational agriculture education prioritize? *The Journal of Agricultural Education and Extension*, *30*(3), 341-361. https://doi.org/10.1080/1389224X.2023.2205395

Nyandwi, F. (2022). *Influence des arbres d'ombrage sur la lumière transmise et les paramètres de production du caféier arabica (Coffea arabica L.) au Burundi* [Mémoire de Master]. Université du Burundi.

Oketch, J. S., & Polzer, T. (2002). Conflict and coffee in Burundi. In *Scarcity and surfeit : The ecology of Africa's conflicts* (p. 85-156). Institute for Security Studies.

Ong, C. K., Black, C. R., Wallace, J. S., Khan, A. A. H., Lott, J. E., Jackson, N. A., Howard, S. B., & Smith, D. M. (2000). Productivity, microclimate and water use in *Grevillea robusta*-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *80*(1), 121-141. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00144-4

Ong, C. K., & Leakey, R. R. B. (1999). Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in tropical savannahs. *Agroforestry Systems*, *45*(1), 109-129. https://doi.org/10.1023/A:1006243032538

Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of civil engineering.

Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods : A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research, 156*(2), 445-455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1

Orwa, C., Mutua, A., Jamnadass, R., & Anthony, S. (2009). *Agroforestry database : A tree reference and selection guide version 4.0*.

Oshunsanya, S. O. (2018). Introductory Chapter : Relevance of Soil pH to Agriculture. In *Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.82551

Otieno, H. M. O., Chemining'wa, G. N., & Zingore, S. (2018). Effect of Farmyard Manure, Lime and Inorganic Fertilizer Applications on Soil pH, Nutrients Uptake, Growth and Nodulation of Soybean in Acid Soils of Western Kenya. *Journal of Agricultural Science, 10*(4), 199-208.

Palm, C. A., Gachengo, C. N., Delve, R. J., Cadisch, G., & Giller, K. E. (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems : Application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 83*(1), 27-42. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00267-X

Pancsira, J. (2022). International Coffee Trade : A literature review. *Journal of Agricultural Informatics, 13*(1), Article 1. https://doi.org/10.17700/jai.2022.13.1.654

Panwar, P., Pal, S., Reza, S. K., & Sharma, B. (2011). Soil fertility index, soil evaluation factor, and microbial indices under different land uses in acidic soil of humid subtropical India. *Communications in soil science and plant analysis, 42*, 2724-2737.

Pawlick, T. (1989). Markhamia : A very practical ornamental. *Agroforestry Today, 1*(3), 10-11.

Pelegrina, G. D., Duarte, L. T., & Romano, J. M. T. (2019). Application of independent component analysis and TOPSIS to deal with dependent criteria in multicriteria decision problems. *Expert Systems With Applications, 122*, 262-280.

Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A., & Pinto, L. S. (2005). Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics, 54*(4), 435-446. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.009

Philpott, S. M., Bichier, P., Rice, R. A., & Greenberg, R. (2008). Biodiversity conservation, yield, and alternative products in coffee agroecosystems in Sumatra, Indonesia. *Biodiversity and Conservation, 17*(8), 1805-1820. https://doi.org/10.1007/s10531-007-9267-2

Piato, K., Lefort, F., Subía, C., Caicedo, C., Calderón, D., Pico, J., & Norgrove, L. (2020). Effects of shade trees on robusta coffee growth, yield and quality. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development, 40*(6), 38. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00642-3

Pohlan, H. A. J., & Janssens, M. J. J. (2010). Growth and production of coffee. In *Soils, plant growth and crop production* (Willy H. Verheye, Vol. 2, p. 422). Eolss Publishers Company Limited.

Prabhu, V. V., & Theagarajan, K. S. (1986). Studies on the fatty oil of *Maesopsis eminii* seed. *Van Vigyan, 24*(3-4), 116-117.

Qiu, L.-J., & Chang, R.-Z. (2010). The origin and history of soybean. In *The Soybean. Bontany, production and uses*. CABI.

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing. R Fundation for Statistical Computing* [Logiciel]. https://www.R-project.org/.

Rahmanta, Purba, S., & Supriana, T. (2019). Factors affecting the production of arabica coffee of smallholder plantations in Dairi District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *260*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012007

Ramadhillah, B., & Masjud, Y. I. (2024). Climate change impacts on coffee production in Indonesia : A review. *Journal of Critical Ecology*, *1*(1), Article 1. https://doi.org/10.61511/jcreco.v1i1.645

Ranawana, S. R. W. C. J. K., Pathinayake, P. W., Kaliyadasa, P. E., & Prematilake, K. G. (2024). Allelopathic potential of selected shade tree species to control weeds in tea plantations. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, *17*(2), 165-180.

République du Burundi. (2017). *Guide sur la gestion durable d'une exploitation caféicole au Burundi*.

Rice, R. A. (2018). Coffee in the crosshairs of climate change : Agroforestry as abatis. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *42*(9), 1058-1076. https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1476428

Rigal, C., Xu, J., Hu, G., Qiu, M., & Vaast, P. (2020). Coffee production during the transition period from monoculture to agroforestry systems in near optimal growing conditions, in Yunnan Province. *Agricultural Systems*, *177*. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102696

Rigal, C., Xu, J., & Vaast, P. (2019). Young shade trees improve soil quality in intensively managed coffee systems recently converted to agroforestry in Yunnan Province, China. *Plant and Soil*.

Robertson, G. P., & Paul, E. A. (2000). Decomposition and soil organic matter dynamics. In *Methods in ecosystem science* (p. 104-116). Springer New York.

Rosenberg, M. N. (2022). What matters? The role of values in transformations toward sustainability: a case study of coffee production in Burundi. *Sustainability Science, 17*(2), 507-518. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00974-3

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*(3), 234-281. https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

Saaty, T. L. (1996). Decision making with dependence and feedback : The analytic network process. *RWS Publication.*

Sahinguvu, R. (2013). *Burundi : Vers le progrès des coopératives de caféiculteurs – Inades-Formation.* http://www.inadesformation.net/actualites/burundi-vers-le-progres-des-cooperatives-de-cafeiculteurs/

Sahoo, S. K., & Goswami, S. S. (2023). A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) methods : Advancements, applications, and future directions. *Decision Making Advances*, *1*(1), 25-48.

Sarmiento-Soler, A., Vaast, P., Hoffmann, M. P., Jassogne, L., van Asten, P., Graefe, S., & Rötter, R. P. (2020). Effect of cropping system, shade cover and altitudinal gradient on coffee yield components at Mt. Elgon, Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *295*, 106887. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106887

Sarmiento-Soler, A., Vaast, P., Hoffmann, M. P., Rötter, R. P., Jassogne, L., van Asten, P. J. A., & Graefe, S. (2019). Water use of *Coffea arabica* in open versus shaded systems

under smallholder's farm conditions in Eastern Uganda. *Agricultural and Forest Meteorology*, *266-267*, 231-242. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.006

Satapathy, S. R., Khanduri, V. P., Singh, B., Riyal, M. K., Kumar, S., Kumar, P., & Rawat, D. (2022). Allelopathic potential of *Ficus auriculata* and *Ficus semicordata* on growth of four traditional food crops of Garhwal Himalaya. *Journal of Agriculture and Food Research*, *9*, 100352. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100352

Sebuliba, E., Majaliwa, J. G. M., Isubikalu, P., Turyahabwe, N., Eilu, G., & Ekwamu, A. (2022). Characteristics of shade trees used under Arabica coffee agroforestry systems in Mount Elgon Region, Eastern Uganda. *Agroforestry Systems*, *96*(1), 65-77. https://doi.org/10.1007/s10457-021-00688-6

Seid, H., Kessy, J., Asfaw, Z., & Dahlin, A. S. (2024). Soil Physicochemical Properties under Selected Avocado Cultivars in Ethiopian Smallholder Agroforestry. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*(3), 5552-5564. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01925-4

Shi, Y., Mon, A. M., Fu, Y., Zhang, Y., Wang, C., Yang, X., & Wang, Y. (2018). The genus Ficus (Moraceae) used in diet : Its plant diversity, distribution, traditional uses and ethnopharmacological importance. *Journal of Ethnopharmacology*, *226*, 185-196. https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.07.027

Sileshi, G. W., Mafongoya, P. L., Akinnifesi, F. K., Phiri, E., Chirwa, P., Beedy, T., Makumba, W., Nyamadzawo, G., Njoloma, J., Wuta, M., Nyamugafata, P., & Jiri, O. (2014). Agroforestry : Fertilizer trees. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, *1*, 222-234.

Smith, D. M., Jackson, N. A., Roberts, J. M., & Ong, C. K. (1999). Root distributions in a *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya. *Plant and Soil, 211*(2), 191-205. https://doi.org/10.1023/A:1004635414462

Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J., & Caballero-Nieto, J. (2000). Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 80*(1), 61-69. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00134-1

Steiman, S., Idol, T., Bittenbender, H. C., & Gautz, L. (2011). Shade coffee in Hawai'i – Exploring some aspects of quality, growth, yield, and nutrition. *Scientia Horticulturae, 128*(2), 152-158. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.011

STEP Systems. (2020). *STEP Systems GmbH Soil-Water-Climate Testing Equipment*. https://www.stepsystems.de/

Sys, C. C., Van Wambeke, A., & Frankart, R. P. (1961). *La cartographie des sols au Congo : Ses principes et ses méthodes* (INEAC, Série technique n° 66).

Tadesse, T., Tesfaye, B., & Abera, G. (2020). Coffee production constraints and opportunities at major growing districts of southern Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture, 6*, 1-35.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (Sixth edition). Sinauer Associates, Inc.

Tan, K. J., & Goh, T. N. (1977). Solar insolation in an equatorial region (Singapore). *Solar energy, 19*, 101-103.

Tejeda-Cruz, C., Silva-Rivera, E., Barton, J. R., & Sutherland, W. J. (2010). Why shade coffee does not guarantee biodiversity conservation. *Ecology and Society, 15*(1).

Teketay, D. (1998). History, botany and ecological requirements of coffee. *Walia*, *20*, 28-50.

Teklay, T., & Malmer, A. (2004). Decomposition of leaves from two indigenous trees of contrasting qualities under shaded-coffee and agricultural land-uses during the dry season at Wondo Genet, Ethiopia. *Soil Biology and Biochemistry*, *36*, 777-786.

Tessens, E., & Gourdin, J. (1993). *Critères d'interprétation des analyses pédologiques*. ISABU.

Tessens, E., Mvuyekure, E., Muganza, J.-P., & Bigura, C. (1991). *Guide synoptique pour la carte pédologique semi-détaillée du Burundi*. Publication ISABU N° 164.

Tessens, E., Sottiaux, G., & Bigura, C. (1991). *Classification des sols pour la carte pédologique du Burundi (1:50000)*.

The cup of excellence. (2024). *Cup of Excellence : The premier coffee competition*. Cup of Excellence. https://cupofexcellence.org/

Tian, M., Li, Q., Zhao, W., Qiao, B., Shi, S., Yu, M., Li, X., Li, C., & Zhao, C. (2022). Potential Allelopathic Interference of *Abutilon theophrasti* Medik. Powder/Extract on Seed Germination, Seedling Growth and Root System Activity of Maize, Wheat and Soybean. *Agronomy*, *12*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/agronomy12040844

Tilander, Y., & Ong, C. K. (1999). Conservation of and Competition for Water and Nutrients in Semi-arid Agroforestry. *Annals of Arid Zone*, *38*(3 & 4), Article 3 & 4. https://epubs.icar.org.in/index.php/AAZ/article/view/65601

Traoré, T. M. (2018). What explains specialty coffee quality scores and prices : A case study from the cup of excellence program. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, *50*(3), 349-368.

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). *World Population Prospects 2024*. https://population.un.org/wpp/

Van der Vossen, H. A. M. (2005). A critical analysis of the agronomic and economic sustainability of organic coffee production. *Experimental Agriculture, 41*(4), 449-473. https://doi.org/10.1017/S0014479705002863

Vincent, J. C. (1992). *Technological innovation and quality. An example of spectacular improvement : Arabica coffee in Burundi*. https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/64775a7dbc82cd72160c181e

Vogt, D. J., Tilley, J. P., & Edmonds, R. L. (2015). *Soil and Plant Analysis for Forest Ecosystem Characterization*. De Gruyter; and High Education Press.

Wagner, S., Rigal, C., Liebig, T., Mremi, R., Hemp, A., Jones, M., Price, E., & Preziosi, R. (2019). Ecosystem services and importance of common tree species in Coffee-agroforestry systems : Local knowledge of small-scale farmers at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Forests, 10*(963), 1-16.

Weber, C. R. (1966). Nodulating and Nonnodulating Soybean Isolines : II. Response to Applied Nitrogen and Modified Soil Conditions. *Agronomy Journal, 58*(1), 46-49. https://doi.org/10.2134/agronj1966.00021962005800010015x

Wey, J., & Ibrahima, S. (2007). *Cultures de diversification. Etude de faisabilité du soja et du tournesol dans la zone cotonnière du Nord Cameroun : Synthèse des résultats de la campagne expérimentale 2006* (Cameroun) [Monograph]. CIRAD. https://agritrop.cirad.fr/547136/

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Windbühler, S. (2020). *Acceptance of agroforestry systems in coffee cultivation by smallholders in Burundi* [Bachelor Thesis]. Hochschule Für Angewandte Wissenschaften.

Wintgens, J. N. (2004). *Coffee : Growing, Processing, Sustainable Production. A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers* (WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Yap, J. Y. L., Ho, C. C., & Ting, C.-Y. (2019). A systematic review of the applications of multi-criteria decision-making methods in site selection problems. *Built Environment Project and Asset Management*, *9*(4), 548-563. https://doi.org/10.1108/BEPAM-05-2018-0078

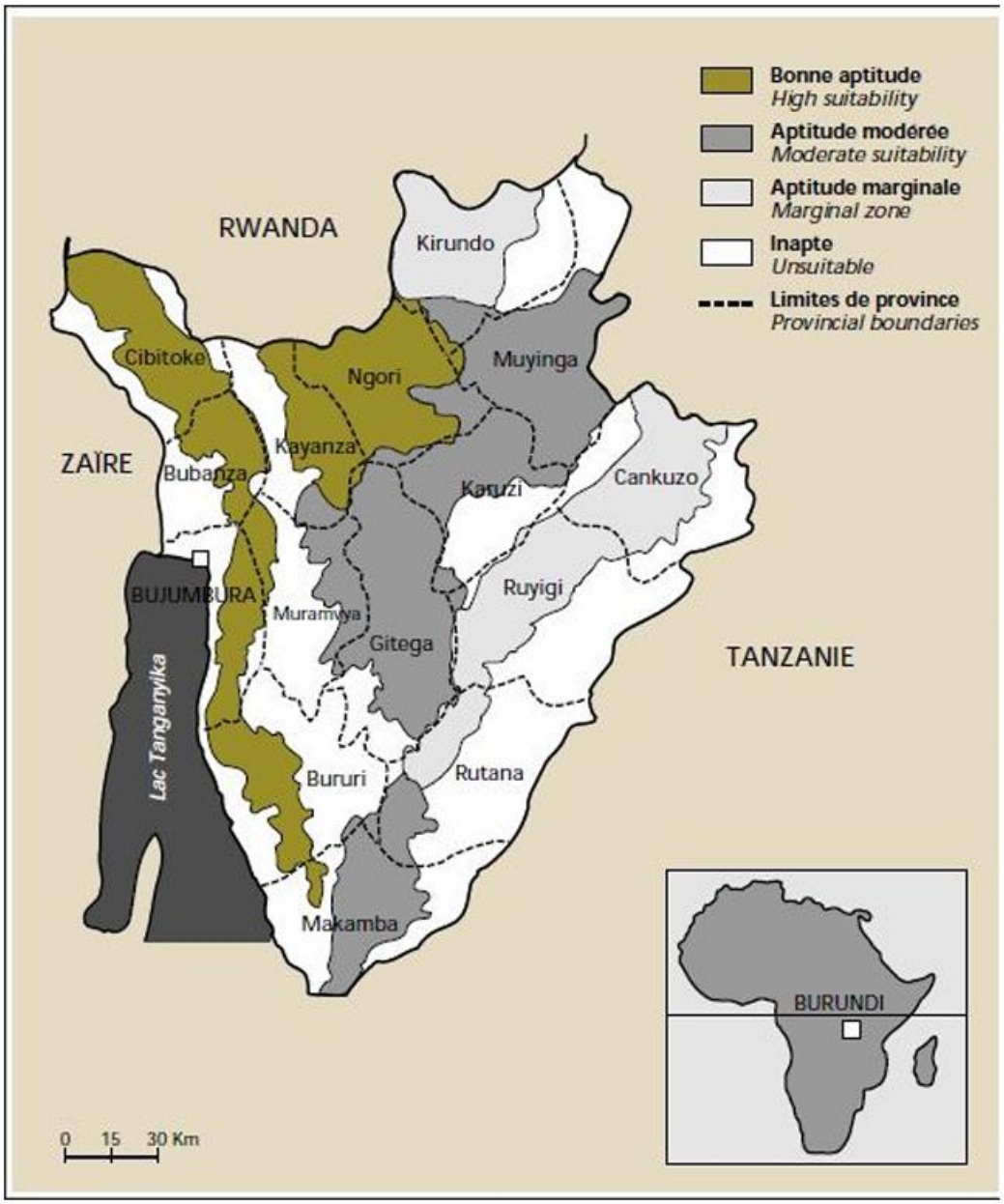
Zaman, S., Yaseen, T., Shah, A. M., Khan, M., Ahmad, M., Gul, R., Rahman, K. ur, & Nawaz, G. (2020). Allelopathic effect of *Ficus carica* L. against *Triticum aestivum* L., *Zea mays* L., *Lactuca sativa* L. and *Trifolium repense* L. *Pure and Applied Biology*, *10*(1), 1-10.

Zlaugotne, B., Zihare, L., Balode, L., Kalnbalkite, A., Khabdullin, A., & Blumberga, D. (2020). Multi-criteria decision analysis methods comparison. *Environmental and Climate Technologies*, *24*(1), 454-471.

Zoundji, C. C., Houngnandan, P., Amidou, M. H., Kouelo, F. A., & Toukourou, F. (2015). Inoculation and phosphorus application effects on soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] productivity grown in farmers' fields of Benin. *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences*, *25*(5), 1384-1392.

Annexes

Annexe 1 : Zones d'aptitude du caféier au Burundi



Source : (Nibasumba, 2013)

Dynamique des éléments nutritifs et de l'eau du sol dans un système agroforestier à base de café dans la zone des plateaux centraux du Burundi

Annexe 2 : Fiche de description des profils de sols

Coordonnées géographiques Longitude : Latitude : Altitude :					
Position géomorphologique : Pente :					
Description					
Type d'horizon					
Profondeur					
Couleur					
Texture					
Sables					
Structure					
Consistance					
Charge (% pondérale)					
Racines					
Revêtements					
Etat hydrique					
Pseudogley/gley					
Matériau parental					
Profondeur du sol					
Occupation du sol					