



UNIVERSITÉ DU BURUNDI

GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI

Dépôt institutionnel officiel

<https://repository.ub.edu.bi>

Modélisation du revenu vital durable et résilience des ménages ruraux pour une sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi

Niyonzima, Audace; Sous la direction de Prof. Dr. Ir Niragira Sanctus Prof. Megerle Heidi Elisabeth

2026-07

UB, ED

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2363>

UNIVERSITE DU BURUNDI



Ecole Doctorale

THESE DE DOCTORAT :

MODELISATION DU REVENU VITAL DURABLE ET RESILIENCE DES MENAGES RURAUX POUR UNE SECURITE ALIMENTAIRE ET NUTRITIONNELLE AU BURUNDI

Présentée par

AUDACE NIYONZIMA

Sous la direction de

**Prof. Dr. Ir NIRAGIRA
Sanctus**

Pour l'obtention du grade de
**Docteur en
Sécurité Alimentaire
et Changement Climatique**

**Prof. Megerle Heidi
Elisabeth**

Membres du Jury

1. **Prof. Fulgence Nahayo : Président du jury**
— *Affiliation et fonction : Université du Burundi – Directeur Pays de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF)*
2. **Dr. Serge Ngendakumana : Secrétaire du Jury**
— *Affiliation : Université du Burundi*
3. **Prof. Jean Ndimubandi : membre du Jury**
— *Affiliation : Université du Burundi*
4. **Prof. Hassan Nusura : membre du Jury**
— *Affiliation et fonction : Université du Burundi – Directrice Générale de l'Ecole Normale Supérieure (ENS)*
5. **Prof. Bernadette Habonimana : membre du Jury**
— *Affiliation : Université du Burundi*
6. **Prof. Niragira Sanctus : promoteur**
— *Affiliation : Université du Burundi*
7. **Prof. Heidi Elisabeth Megerle : co-promoteur**
— *Affiliation : Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Rottenburg am Neckar, Allemagne*

Soutenue le 23 juillet à Bujumbura, Burundi

Remerciements

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche doctorale en **Sécurité Alimentaire et Changement Climatique**, initié par l'East African Nutritional Sciences Institute (EANSI) à l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi. Elle porte sur les enjeux de résilience des ménages burundais face aux défis croissants des changements climatiques, en croisant les dimensions agroalimentaires, nutritionnelles et socio-économiques.

La réalisation de ce travail scientifique est le fruit d'efforts conjugués de nombreuses personnes dont l'accompagnement, la bienveillance et le soutien ont été déterminants à chaque étape de ce parcours. Je tiens à leur exprimer ma plus vive reconnaissance.

Je remercie en premier lieu le Professeur **Niragira Sanctus**, co-promoteur de cette thèse, pour son accompagnement constant depuis les débuts de mes recherches en Master jusqu'à la finalisation de cette recherche doctorale. Votre engagement a été déterminatif : vous m'avez offert des opportunités précieuses pour consolider mes compétences en recherche, m'avez mis en relation avec les communautés scientifiques, et m'avez accompagné avec succès dans mes démarches pour l'obtention de bourses de recherche. Je vous suis particulièrement reconnaissant d'avoir accepté que je sois votre assistant, une collaboration qui m'a permis d'apprendre énormément, tant sur le plan académique que professionnel. Votre confiance, votre rigueur et surtout votre disponibilité, même les week-ends, où vous preniez le temps de m'appeler pour faire avancer ma recherche, témoignent d'un sens aigu du mentorat. Ce dévouement est d'autant plus admirable que vous assumiez simultanément de hautes fonctions, d'abord en tant que Recteur de l'Université du Burundi, puis comme Ministre de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement la Professeure **Marijke D'Haese** pour avoir initié ce travail de recherche à mes côtés. Ses contributions, et tout particulièrement son aide précieuse dans la rédaction du projet de thèse, en ont posé les fondations.

Son indisponibilité ayant nécessité un réajustement, j'exprime ma profonde gratitude à la Professeure **Heidi Elisabeth Megerle** d'avoir spontanément accepté d'assurer la direction de cette thèse. Je vous remercie, Professeure Megerle, pour votre collaboration fructueuse sur les projets *Living Income* et *Agroforesterie*. Votre confiance m'a ouvert les portes de conférences internationales en Allemagne, et votre hospitalité m'a permis de découvrir votre pays à travers des visites enrichissantes. Grâce à votre encadrement, j'ai pu élargir mon réseau scientifique et établir des liens précieux avec des chercheurs du monde entier.

Ma profonde reconnaissance va également au Professeur **NDIMUBANDI Jean**, dont la contribution à ce parcours a été des plus significatives. Depuis le Master, dans le cadre du

projet SAdER, vos orientations scientifiques ont été fortes, claires et toujours éclairantes. Vous étiez constamment présent dans les conférences scientifiques, attentif et engagé, pour renforcer mes compétences et élever la qualité de mes travaux. Votre soutien a été un pilier déterminant dans toutes les étapes de mon développement en tant que chercheur.

Je remercie également le Docteur Ingénieur **Ngendakumana Serge**, membre de mon comité d'accompagnement, pour ses orientations méthodologiques, ses encouragements constants et sa grande générosité. Votre disponibilité s'est traduite concrètement par votre volonté de prendre en charge mes cours afin de me libérer du temps pour me consacrer pleinement à mes recherches. J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble des membres de mon comité d'accompagnement pour le temps qu'ils ont consacré à évaluer l'avancement de mon travail et à enrichir mes réflexions.

Je suis profondément reconnaissant envers l'EANSI pour avoir accepté ma candidature au programme de financement couvrant à la fois la collecte de données et la bourse, ainsi que pour l'encadrement scientifique reçu tout au long de mon parcours doctoral. Je remercie également l'**Ecole Doctorale de l'Université du Burundi** pour son accompagnement rigoureux, ses orientations méthodologiques essentielles et son engagement à l'excellence académique. Mes remerciements s'adressent tout particulièrement au **Centre Universitaire de Recherche Développement en Agroéconomie (CERDA)**, qui m'a offert un cadre d'accueil et d'accompagnement précieux tout au long de ma recherche doctorale. La disponibilité de ses chercheurs, leurs conseils avisés et la qualité des échanges au sein du centre ont grandement contribué à l'avancement et à l'enrichissement de mes travaux. Le personnel de ces institutions a su créer un environnement propice à la recherche, rendant possible l'accomplissement de ce doctorat.

Ma gratitude s'adresse aussi à la **Région de Bade-Wurtemberg**, à l'**Université de Rottenburg** en Allemagne, et à l'organisation **Naturland**, pour leur soutien financier aux projets *Agroforesterie* et *Living Income*. Ces financements ont joué un rôle crucial dans la réalisation de mes recherches et m'ont offert des conditions favorables pour mener à bien mes études doctorales.

Je tiens à saluer la collaboration avec mes collègues **Marius Ntikazohera** et **Gérard Ndayisenga**, avec qui j'ai travaillé étroitement sur le projet *Living Income*. Leur contribution à la formulation des méthodologies a été inestimable, et leur esprit d'équipe a grandement enrichi notre travail commun.

Je remercie également la Professeure **Bernadette Habonimana**, le Docteur **Ndiho-kubwayo Soter** et le Doctorant **Bahnmueller Jannis** pour leurs réflexions pertinentes, qui ont grandement nourri l'un de mes articles scientifiques dont ils sont co-auteurs.

A mes camarades doctorants de l'EANSI et de la 4^e cohorte de l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi, merci pour notre solidarité, nos échanges stimulants et notre parcours partagé, tant en présentiel qu'en ligne. Je remercie également tous les enseignants qui ont dispensé les cours suivis durant mon doctorat pour la qualité de leur enseignement et leur engagement pédagogique.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance particulière à mes collègues enseignants de l'Université du Burundi, et plus spécifiquement de la Faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie, pour nos échanges fructueux et nos discussions inspirantes, que ce soit dans les bureaux ou dans la cour intérieure de notre faculté. Ces moments, souvent simples mais toujours stimulants, ont été une véritable source de motivation et m'ont constamment « réveillé »

à l'action, me poussant à travailler avec rigueur et enthousiasme.

Enfin, je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à ma famille, pilier essentiel de mon parcours.

A mes parents, **Konakuze Victor** et **Bivugire Pauline**, qui ont cru en moi dès le premier jour. Une pensée particulièrement émouvante pour ma mère, dont le départ précipité ne lui a malheureusement pas permis de jouir du fruit de ses efforts. Que ce travail soit l'hommage vibrant à son sacrifice et à son amour éternel.

A mes frères, merci pour votre soutien fraternel et vos encouragements tout au long de ce chemin.

A mon épouse, **MIBURO Désidérate**, merci pour ta patience, ton soutien inconditionnel et tes encouragements constants tout au long de cette aventure doctorale.

A mes enfants bien-aimés, **Audo Délicia Iranezereza**, **Audry Gloire Iriho** et **Audard Colis Niyonzima**, merci d'avoir compris mes absences, parfois longues, et d'avoir accepté de manquer certaines occasions en raison de mes engagements académiques. Votre amour et votre compréhension ont été ma plus grande force.

A toutes et à tous, merci du fond du cœur.

L'auteur,

NIYONZIMA Audace
Bujumbura, 23 juillet 2026

Avant-propos

La présente thèse s'inscrit dans le cadre du programme doctoral en Sécurité Alimentaire et Changement Climatique, mis en place par l'*East African Nutritional Sciences Institute* (EANSI) au sein de l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi, en co-direction avec la *Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg* (Allemagne). Elle a bénéficié de l'accueil scientifique du Centre Universitaire de Recherche-Développement en Agroéconomie (CERDA), qui en a accompagné le déroulement du premier au dernier jour.

Ce travail part d'un constat préoccupant : au Burundi, où 84 % des ménages ruraux tirent leur subsistance d'une agriculture exposée aux aléas climatiques, à une faible productivité et à une fragmentation foncière croissante, l'écart persistant entre le revenu effectif et le revenu vital demeure un frein majeur à la sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations. C'est cet écart, ainsi que les leviers susceptibles de le résorber, que la présente recherche doctorale se propose d'examiner, en portant un regard comparatif sur deux zones de moyens d'existence aux profils contrastés : la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides.

Pour y répondre, la démarche adoptée combine une enquête de terrain menée auprès des ménages dans les deux zones et l'exploitation de données secondaires issues de l'Institution Nationale des Statistiques du Burundi (INSBU) et de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Ces données sont traitées à l'aide d'outils quantitatifs variés : modélisation probit, régression logistique multinomiale, classification ascendante hiérarchique, analyse en composantes principales, frontière de production stochastique, qui permettent de dégager trois profils typologiques de ménages et de proposer un système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire, directement mobilisable par les acteurs de terrain.

Le document est organisé en sept chapitres. Le premier pose l'introduction générale et la problématique de la recherche ; le second situe le contexte géographique, socio-économique et agro-écologique du Burundi ; le troisième détaille l'approche méthodologique. Les trois chapitres suivants présentent successivement l'analyse des déterminants du revenu vital et effectif, la modélisation des combinaisons optimales de ressources agricoles, et sécurité alimentaire et système d'alerte précoce. Le dernier chapitre discute les résultats à la lumière de la littérature, répond aux questions et hypothèses de recherche, et formule des recommandations ainsi que les perspectives de ce travail.

Cette thèse s'adresse tout autant à la communauté scientifique qu'aux décideurs et praticiens du développement rural, dans l'espoir qu'elle puisse éclairer les politiques publiques en cohérence avec le Plan National de Développement 2018-2027 et les Objectifs de Développement Durable. Puisse le lecteur y trouver, au-delà des chiffres et des modèles, une contribution utile à la compréhension et à l'amélioration des conditions de vie des ménages ruraux burundais.

Résumé

La sécurité alimentaire et l'atteinte d'un revenu vital durable constituent des défis critiques pour les ménages ruraux au Burundi, dont 84% dépendent d'une agriculture vulnérable aux aléas climatiques, à la faible productivité et à la fragmentation foncière. Dans ce contexte, cette recherche doctorale examine les déterminants du revenu vital durable et de la résilience des ménages dans deux zones de moyens d'existence, la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, en analysant leur vulnérabilité socio-économique, en identifiant les leviers de résilience et en proposant un système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire. La méthodologie repose sur une enquête auprès de 384 ménages, l'exploitation de données secondaires collectées au niveau de l'INSBU et de l'IGEBU et des analyses quantitatives comme les modélisations économétriques, la typologie des ménages et l'estimation d'inefficacité technique de production.

Les résultats révèlent un écart structurel entre le revenu effectif et le revenu vital, ce dernier étant fixé à 3 242 200 FBU¹/an/ménage en 2024, tandis que le revenu effectif moyen s'élève à 2 906 712,87 FBU² dans la Dépression du Nord et 2 222 662,50 FBU³ dans les Plateaux Centraux Humides, soit une moyenne globale de 2 528 074 FBU⁴, bien en deçà du seuil de décence. Cette précarité généralisée est aggravée par une faible productivité agricole, une inefficacité technique moyenne de 29,9%, et une exposition récurrente aux chocs climatiques. L'insécurité alimentaire est confirmée par des scores FIES moyens de 2,99 et 3,17, traduisant une privation modérée à sévère. Trois profils typologiques émergent :

- un groupe à revenus relativement élevés mais en insécurité alimentaire structurelle se trouvant dans la Dépression du Nord ;
- un groupe résilient, grâce à l'autosuffisance alimentaire et à une diversification agricole efficace se trouvant dans Plateaux Centraux ;
- un groupe en crise alimentaire chronique malgré un environnement agroécologique favorable.

L'analyse économétrique établit des liens causaux solides entre les pratiques agricoles, le capital humain et la sécurité alimentaire. La diversification des cultures annuelles et pérennes, réduit la probabilité d'un score de consommation alimentaire « pauvre » de 5,66%. Chaque saison culturale supplémentaire accroît de 1,11% la probabilité d'échapper à l'insécurité sévère, et un niveau d'éducation plus élevé du chef de ménage augmente

1. Approximativement 1 118 USD ou 954 EUR (taux de change : 1 USD = 2 900 BIF, 1 EUR = 3 400 BIF).

2. Approximativement 1 002 USD ou 855 EUR.

3. Approximativement 766 USD ou 654 EUR.

4. Approximativement 872 USD ou 744 EUR.

de 3,35% la probabilité d'un score « acceptable ». De façon particulièrement significative, l'adoption de l'agroforesterie, notamment l'intégration d'arbres fruitiers et d'espèces d'ombrage aux cultures annuelles, se révèle comme une stratégie de résilience, générant un revenu agricole moyen supérieur de 24,4% (2 724 110 FBU⁵ contre 2 189 132 FBU⁶) par rapport aux systèmes non agroforestiers, avec une différence hautement significative ($p = 0,0012$). Toutefois, l'adoption de ces pratiques durables reste entravée par un accès limité aux intrants modernes pour 27% des ménages dans la Dépression du Nord, 43% dans les Plateaux Centraux et une fragmentation foncière extrême.

A la lumière de ces résultats, nous dégageons trois recommandations stratégiques :

- renforcer l'efficacité technique et la productivité agricole via un accès ciblé aux intrants modernes et la promotion de systèmes agroforestiers durables afin de combler l'écart d'inefficacité et rapprocher les revenus effectifs du seuil vital ;
- institutionnaliser un Système d'Alerte Précoce décentralisé intégrant des indicateurs validés comme revenu, FIES, diversification agricole, adoption de l'agroforesterie et risques climatiques afin de déclencher des réponses différenciées selon les trois profils de ménages identifiés ;
- intégrer dans les politiques publiques une diversification des moyens de subsistance agricole comme les cultures annuelles, pérennes et agroforesterie et non agricole comme la transformation des produits agricoles et le commerce, démontrée comme réduisant significativement l'insécurité alimentaire, en particulier pour les ménages confrontés à la fragmentation foncière, en alignement avec le Plan National de Développement 2018–2027 et les Objectifs de Développement Durable.

Mots-clés : Revenu vital ; Sécurité alimentaire ; Résilience des ménages ruraux ; Agroforesterie ; Système d'alerte précoce ; Vulnérabilité socio-économique ; Changement climatique ; Burundi.

5. Approximativement 939 USD ou 801 EUR.

6. Approximativement 755 USD ou 644 EUR.

Abstract

Food security and the achieving of a sustainable vital income constitute critical challenges for rural households in Burundi, 84% of whom depend on agriculture vulnerable to climate hazards, low productivity, and land fragmentation. In this context, this doctoral research examines the determinants of sustainable vital income and household resilience in two contrasting livelihood zones : the Northern Depression and the Humid Central Plateaus. It analyzes their socio-economic vulnerability, identifies resilience levers, and proposes an early warning system for food insecurity. The methodology relies on a survey of 384 households, the exploitation of secondary data collected from INSBU and IGEBU, and quantitative analyses including econometric modeling, household typology, and technical inefficiency estimation.

The results reveal a structural gap between actual income and vital income, the latter being set at 3,242,200 BIF⁷/household/year in 2024, while the mean actual income amounts to 2,906,712.87 BIF⁸ in the Northern Depression and 2,222,662.50 BIF⁹ in the Humid Central Plateaus, yielding a global average of 2,528,074 BIF¹⁰, well below the decency threshold. This generalized precarity is exacerbated by low agricultural productivity, an average technical inefficiency of 29.9%, and recurrent exposure to climate shocks. Food insecurity is confirmed by mean FIES scores of 2.99 and 3.17, reflecting moderate to severe deprivation. Three typological profiles emerge :

- a group with relatively high incomes but structural food insecurity, located in the Northern Depression ;
- a resilient group, due to food self-sufficiency and effective agricultural diversification, located in the Central Plateaus ;
- a group in chronic food crisis despite a favorable agroecological environment.

The econometric analysis establishes robust causal links between agricultural practices, human capital, and food security. Diversification of annual and perennial crops reduces the probability of a “poor” food consumption score by 5.66%. Each additional cropping season increases the probability of escaping severe insecurity by 1.11%, and a higher education level of the household head increases the probability of an “acceptable” score by 3.35%. The adoption of agroforestry, notably the integration of fruit trees and shade species with annual crops, emerges as a resilience strategy, generating an average agricultural income 24.4% higher (2,724,110 BIF¹¹ vs. 2,189,132 BIF¹²) compared to non-agroforestry

7. Approximately 1,118 USD or 954 EUR (exchange rate : 1 USD = 2,900 BIF, 1 EUR = 3,400 BIF).

8. Approximately 1,002 USD or 855 EUR.

9. Approximately 766 USD or 654 EUR.

10. Approximately 872 USD or 744 EUR.

11. Approximately 939 USD or 801 EUR.

12. Approximately 755 USD or 644 EUR.

systems, with a highly significant difference ($p = 0.0012$). However, the adoption of these sustainable practices remains hindered by limited access to modern inputs for 27% of households in the Northern Depression, 43% in the Central Plateaus, and extreme land fragmentation.

In light of these results, we outline three strategic recommendations :

- enhance technical efficiency and agricultural productivity via targeted access to modern inputs and the promotion of sustainable agroforestry systems to bridge the inefficiency gap and bring actual incomes closer to the vital threshold ;
- institutionalize a decentralized Early Warning System integrating validated indicators such as income, FIES, agricultural diversification, agroforestry adoption, and climate risks to trigger differentiated responses based on the three identified household profiles ;
- integrate into public policies a diversification of livelihoods, both agricultural like annual crops, perennial crops and agroforestry and non-agricultural like agricultural product processing and commercialisation, demonstrated to significantly reduce food insecurity, particularly for households facing land fragmentation, in alignment with the National Development Plan 2018–2027 and the Sustainable Development Goals.

Keywords : Living income ; Food security ; Rural household resilience ; Agroforestry ; Early Warning System ; Socio-economic vulnerability ; Climate change ; Burundi.

Table des matières

Membres du Jury	i
Remerciements	ii
Avant-propos	vii
Résumé	ix
Abstract	ix
Liste des abréviations	xxi
1 INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 Contexte et justification	2
1.2 Fondements conceptuels de la sécurité alimentaire et du revenu vital	3
1.2.1 Concept de la sécurité alimentaire	4
1.2.2 Concept du revenu vital des ménages ruraux	7
1.2.3 Ecart de revenus à l'échelle mondiale et analyse du contexte burundais	8
1.2.4 Revenu vital et autres indicateurs économiques	9
1.2.5 Analyse conceptuelle de la résilience des ménages	13
1.2.6 Problématique de la recherche	14
1.2.7 Justification de la recherche	16
1.2.8 Objectifs de la recherche	16
1.2.9 Ancrage de la recherche avec les cadres politiques	17
1.2.10 Cadre Conceptuel de la recherche	20
2 PORTEE ET CADRAGE DE LA RECHERCHE	25
2.1 Description géographique du Burundi	26
2.2 Description socio-économique et environnementale du Burundi	26
2.3 Pression démographique et fragmentation des terres agricoles	27
2.4 Agriculture et productivité agricole au Burundi	28
2.5 Diversité agro-écologique et représentativité des systèmes agricoles	29
2.6 Vulnérabilité et dispositions de résilience climatique au Burundi	29
2.7 Nuances entre zones agro-écologiques et des moyens d'existence	30
2.8 Présentation de la carte des zones de moyens d'existence du Burundi	32
2.9 Diversification des sources de revenus au Burundi	34
2.9.1 Le petit commerce comme source de revenu non agricole au Burundi	34

2.9.2	L'artisanat : une valorisation des compétences traditionnelles	35
2.9.3	La migration temporaire comme levier de diversification économique	35
2.9.4	Stratégies non agricoles et durabilité des revenus	35
2.9.5	L'accès au crédit : un potentiel sous-exploité	36
2.10	Rôle des institutions et des filets sociaux dans le renforcement de la résilience	36
2.10.1	Les coopératives comme leviers de résilience économique	36
2.10.2	Les associations villageoises et leur rôle dans la cohésion sociale . .	37
2.11	Agroforesterie, revenu vital et résilience	37
2.12	Conclusion	39
3	APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE	41
3.1	Cadre méthodologique	41
3.1.1	Choix de la zone d'étude	43
3.1.2	Choix de la méthode d'échantillonnage pour les données quantitatives	43
3.1.3	Estimation de la taille de l'échantillon	44
3.1.4	Répartition de l'échantillon entre les strates	44
3.1.5	Ajustement pour l'Effet de Plan d'Echantillonnage (Design Effect) .	44
3.1.6	Justification scientifique du plan d'échantillonnage	45
3.2	Présentation des sources des données	45
3.2.1	Présentation des données agro-économiques	45
3.3	Source et méthodologie de collecte des données agro-économiques	46
3.3.1	Sources et méthodologie de collecte des données qualitatives et se- condaires	47
3.3.2	Présentation des données météorologiques	48
3.3.3	Sources des données agro-météorologiques	55
3.3.4	Présentation des logiciels de travail	55
3.3.5	Méthodologie d'analyse des données sur le revenu vital et effectif . .	56
3.3.6	Méthodologie d'analyse des données sur les combinaisons optimales des cultures	57
3.3.7	Méthodologie d'analyse des données sur la vulnérabilité à l'insécu- rité alimentaire	59
3.3.8	Méthodologie de Calcul des Indicateurs de Sécurité Alimentaire . .	61
3.3.9	Difficultés rencontrées dans le cadre de cette recherche	63
3.3.10	Conclusion	64
4	ANALYSE DES DETERMINANTS DU REVENU VITAL ET EFFEC- TIF	67
4.1	Introduction	68
4.2	Revenu vital et indicateurs de pauvreté	68
4.3	Cadre analytique du revenu vital et effectif	68
4.3.1	Définition et calcul du revenu vital	69
4.3.2	Calcul du Revenu vital	69
4.3.3	Définition et calcul du Revenu effectif	70
4.3.4	Corrélation de Pearson entre les facteurs du revenu vital	74
4.3.5	Analyse des déterminants de l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages	77
4.4	Cadre analytique du modèle probit	79
4.4.1	Présentation du modèle	79
4.4.2	Sélection des variables candidates à la modélisation	80

4.4.3	Méthode de sélection des variables basée sur le test de Wald	81
4.4.4	Modélisation des déterminants de l'écart des revenus vital et effectif	81
4.4.5	Description générale des résultats du modèle probit	82
4.5	Conclusion	84
5	ANALYSE DES COMBINAISONS OPTIMALES DES RESSOURCES	87
5.1	Introduction	87
5.2	Description générale des exploitations agricoles au Burundi	88
5.3	Expérience agricole et revenus des ménages ruraux	90
5.4	Saison culturale et production agricole	92
5.5	Répartition et affectation de la production agricole	94
5.5.1	Durée de stockage des productions agricoles	95
5.6	Profit des cultures pratiquées par les ménages ruraux	97
5.7	Impact de l'agroforesterie sur le revenu agricole	99
5.8	Chocs et inégalités de revenu des ménages ruraux	101
5.9	Caractérisation des facteurs économiques avec le Modèle K-Means	103
5.9.1	Structure mathématique du modèle K-Means	103
5.10	Analyse de la frontière de production stochastique	106
5.10.1	Cadre analytique du modèle	106
5.10.2	Formulation mathématique du modèle	106
5.10.3	Estimation des paramètres	107
5.10.4	Consistance statistique du modèle	109
5.10.5	Déterminants de l'inefficacité technique des producteurs	110
5.11	Analyse en composante principale des ressources et des pratiques agricoles (ACP)	112
5.12	Simulation du comportement des producteurs	114
5.13	Conclusion	117
6	SECURITE ALIMENTAIRE ET SYSTEME D'ALERTE PRECOCE DES MENAGES	119
6.1	Introduction	119
6.2	Chocs subis et durée des stocks alimentaires	120
6.2.1	Indicateurs de vulnérabilité et d'insécurité alimentaire	122
6.3	Classification ascendante hiérarchique (CAH)	125
6.4	Analyse statistique de la vulnérabilité alimentaire	128
6.5	Modélisation logistique multinomiale du score de consommation	129
6.5.1	Structure mathématique détaillée	130
6.5.2	Interprétation des coefficients du modèle	131
6.5.3	Régression logistique multinomiale	132
6.6	Equations des modèles trouvés	135
6.7	Système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire	136
6.8	Construction du système d'alerte précoce des ménages	137
6.9	Système d'alerte précoce par Zone des Moyens d'Existence	138
6.10	Stratégie d'opérationnalisation du système d'alerte précoce	141
6.11	Conclusion	142
7	DISCUSSION DES RESULTATS ET CONCLUSION GENERALE	145
7.1	Introduction	146
7.2	Aperçu des résultats sur revenu vital et effectif au Burundi	146

7.3	Confrontation des résultats aux travaux existants à l'échelle mondiale . . .	146
7.4	Revenu vital dans le contexte Africain et Est-Africain	147
7.5	Spécificités du contexte burundais sur le revenu vital	147
7.6	Analyse des différences structurelles entre les deux zones	148
7.7	Aperçu des résultats sur les pratiques agricoles	149
7.7.1	Comparaison des résultats sur les pratiques agricoles par la littérature mondiale	149
7.7.2	Les pratiques agricoles dans le contexte Africain et Est-Africain . .	150
7.7.3	Impact des pratiques agricoles sur la sécurité alimentaire au Burundi	150
7.7.4	Implications théoriques et pratiques agricoles au Burundi	151
7.7.5	Insécurité alimentaire et Système d'Alerte Précoce	151
7.7.6	Insécurité alimentaire au regard de la littérature mondiale	152
7.7.7	L'insécurité alimentaire dans le contexte Africain et Est-Africain . .	152
7.7.8	L'insécurité alimentaire dans le contexte Burundais	153
7.8	Conclusion générale	154
7.8.1	Réponses aux questions de recherche	154
7.8.2	Vérification des hypothèses de recherche	156
7.8.3	Atteinte des objectifs de la recherche	157
7.9	Recommandations générales	158
7.9.1	Axe 1 : Interventions agricoles pour une productivité accrue et une résilience climatique renforcée	159
7.9.2	Axe 2 : Renforcement institutionnel pour une anticipation efficace et un appui technique ciblé	159
7.9.3	Axe 3 : Développement socio-économique pour une diversification inclusive et un revenu vital décent	160
7.10	Limites, lacunes et perspectives de la recherche	160
7.10.1	Limites de la recherche	160
7.10.2	Lacunes de la recherche	160
7.10.3	Perspectives de la recherche	161
	Bibliographie	161
	A DESCRIPTION GENERALE DES ZONES DES MOYENS D'EXISTENCE SELON LA FAO	179
	B CURRICULUM VITAE	189
	B.1 ARTICLES SCIENTIFIQUES	190

Table des figures

1.1	Modèle systémique de la sécurité alimentaire	6
1.2	L'écart entre le revenu vital et effectif au Burundi	12
1.3	Cadre des moyens d'existences durables	14
1.4	Schéma montrant le cadre conceptuel de la recherche	21
2.1	Schéma montrant les stratégies et contraintes des moyens de subsistance .	31
2.2	Carte des zones des moyens d'existences du Burundi	33
3.1	Evolution des précipitations dans les zones étudiées	50
3.2	Evolution des températures dans les zones étudiées	52
3.3	Evolution de l'Humidité dans les zones étudiées	54
4.1	Eléments du revenu vital	69
4.2	Eléments du revenu effectif	71
4.3	Corrélation inter-variables	75
4.4	Comparaison du revenu effectif et revenu vital	78
5.1	Analyse descriptive des exploitations agricoles dans la zone d'étude	89
5.2	Revenu et expérience agricole des ménages	91
5.3	Principales cultures pratiquées par saison au Burundi	93
5.4	Production et affectation de la production	94
5.5	Durée de Stock des denrées alimentaires par Saison culturale	96
5.6	Profit relatif de principales cultures pratiquées dans la zone d'étude	98
5.7	Agroforesterie et revenu des ménages ruraux	100
5.8	Décomposition des inégalités de revenu par zone et par choc subi	102
5.9	Courbe de frontières des possibilités de production agricole	111
5.10	Analyse en composante principale des ressources et des pratiques agricoles	113
5.11	Modèle de simulation du comportement des producteurs	116
6.1	Analyse des indicateurs de la sécurité alimentaire	123
6.2	Typologies des ménages selon l'état de la sécurité alimentaire	126

Liste des tableaux

1.1	Définitions comparées du revenu vital	11
2.1	Quelques espèces fréquentes dans les systèmes agroforestiers de la zone d'étude	38
2.2	Quelques espèces fréquentes dans les systèmes agroforestiers de la zone d'étude (suite)	39
4.1	Liste des variables sélectionnées à la modélisation	81
4.2	Résumé du modèle Probit	82
4.3	Effets marginaux du modèle probit	83
5.1	Caractérisation des typologies par le modèle K-Means	104
5.2	Frontière de production et déterminants du score d'inefficacité technique .	108
5.3	Calcul des élasticités	109
5.4	Test d'hypothèse pour la fonction translog	109
6.1	Chocs climatiques et stocks alimentaires des ménages ruraux	121
6.2	Facteurs de vulnérabilité à l'insécurité alimentaire	128
6.3	Caractéristiques générales du modèle	132
6.4	Analyse du risque de vulnérabilité à l'insécurité alimentaire (Modèle multinomial)	133
6.5	Système d'alerte précoce par Zone de Moyens d'Existence (ZME)	139
A.1	Caractéristiques de la zone Buragane	179
A.2	Caractéristiques de la zone Crête Congo Nil	181
A.3	Caractéristiques de la zone Dépression de l'Est	182
A.4	Caractéristiques de la zone Dépression du Nord	183
A.5	Caractéristiques de la zone Haute Altitude du Nord	184
A.6	Caractéristiques de la zone Haute Altitude du Sud	185
A.7	Caractéristiques de la zone Plaine de l'Imbo	186
A.8	Caractéristiques de la zone Plateau Centraux Humides	187
A.9	Caractéristiques de la zone Plateau Secs de l'Est	188

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ACP	Analyse en Composantes Principales
AfDB	African Development Bank / Banque Africaine de Développement
ANOVA	Analysis of Variance / Analyse de la Variance
BAD	Banque Africaine de Développement
BIF	Franc Burundais (code ISO)
BRIDEP	Projet intégré de développement Burundi-Rwanda
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CARI	Consolidated Approach for Reporting Indicators of Food Security
CERDA	Centre Universitaire d'Étude et de Recherche/Développement en Agroéconomie
COCOCA	Consortium des Coopératives Caféicoles du Burundi
CP	Composante Principale
CSI	Coping Strategies Index / Indice de Stratégie de Coping
DEFF	Design Effect / Effet de Plan d'Échantillonnage
EANSI	East African Nutritional Sciences Institute
EUR	Euro
FABI	Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie
FAO	Food and Agriculture Organization / Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FBu	Franc Burundais
FCS	Food Consumption Score / Score de Consommation Alimentaire
FIES	Food Insecurity Experience Scale
FIDA	Fonds International de Développement Agricole / International Fund for Agricultural Development (IFAD)
IGEBU	Institut Géographique du Burundi
INSBU	Institution Nationale des Statistiques du Burundi
ISTEEBU	Institut des Statistiques et des Études Économiques du Burundi
KDE	Kernel Density Estimation / Estimation par Noyau de la Densité
LIB	Living Income Benchmark / Seuil de Revenu Vital de Référence
LICoP	Living Income Community of Practice

LLR	Log-Likelihood Ratio / Rapport de Vraisemblance Logarithmique
MAE	Mean Absolute Error / Erreur Absolue Moyenne
MEEATU	Ministère de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme
MINEAGRIE	Ministère de l'Environnement de l'Agriculture et de l'Élevage
MLE	Maximum Likelihood Estimation / Maximum de Vraisemblance
MNLogit	Multinomial Logit / Régression Logistique Multinomiale
NAP	National Adaptation Plan / Plan National d'Adaptation
ODD	Objectifs de Développement Durable
OMS	Organisation Mondiale de la Santé / World Health Organization (WHO)
PDDAA	Programme détaillé de Développement de l'Agriculture en Afrique
PIB	Produit Intérieur Brut
PND	Plan National de Développement
PNIA	Programme National d'Investissement Agricole
PNSEB	Programme National de Subvention des Engais du Burundi
PNSA	Programme National de Sécurité Alimentaire
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PAM/WFP	Programme Alimentaire Mondial / World Food Programme
RGPFAE	Recensement Général de la Population, de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage
SADeR	Sécurité Alimentaire et développement Rural
SAN	Stratégie Agricole Nationale
SAP	Système d'Alerte Précoce
SCAM	Score de Consommation Alimentaire (des Ménages)
SDAM	Score de Diversité Alimentaire (des Ménages)
SFA	Stochastic Frontier Analysis / Analyse de Frontière de Production Stochastique
SIG	Système d'Information Géographique
SLF	Sustainable Livelihoods Framework / Cadre des Moyens d'Existences Durables
TE	Technical Efficiency / Efficacité Technique
UE	Union Européenne
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization / Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UNEP	United Nations Environment Programme / Programme des Nations Unies pour l'Environnement
UNICEF	United Nations Children's Fund / Fonds des Nations Unies pour l'Enfance
ZME	Zones de Moyens d'Existence

INTRODUCTION GENERALE

Résumé

L'agriculture, pilier des systèmes alimentaires et moteur de développement économique dans les pays en développement, demeure confrontée à des vulnérabilités structurelles exacerbées par le changement climatique, la pression démographique, la fragmentation foncière et des infrastructures rurales inadéquates. Au Burundi, où plus de 84 % des ménages dépendent d'une agriculture pluviale, ces contraintes engendrent un écart persistant entre le revenu effectif des exploitants et le revenu vital, seuil normatif contextualisé permettant de couvrir les besoins essentiels dans la dignité. Cette disparité structurelle alimente un cycle de pauvreté chronique et d'insécurité alimentaire, illustrant les limites des approches productivistes et la nécessité de repenser la résilience des ménages ruraux sous l'angle de l'accès économique, de la durabilité des moyens d'existence et de la gouvernance des risques.

Sur le plan conceptuel, cette étude articule les quatre piliers de la sécurité alimentaire dans le cadre des moyens d'existence durables, en postulant que l'atteinte du revenu vital constitue le prérequis fondamental à la capacité des ménages à adapter ou transformer leurs stratégies face aux chocs exogènes. Alors que la littérature existante aborde de manière sectorielle la diversification des cultures, les pertes de l'agro-biodiversité ou l'impact des ravageurs, elle peine à intégrer une mesure explicite de l'écart de revenu dans une dynamique systémique et spatialement différenciée. Pour combler cette lacune, la recherche propose une architecture conceptuelle à cinq niveaux hiérarchiques, articulant les dotations structurelles, les déterminants socio-économiques intermédiaires, les conséquences sur le bien-être des ménages, la conception d'un système d'alerte précoce territorialisé, et les réponses institutionnelles associées.

Cette thèse vise ainsi à quantifier l'écart entre revenu vital et revenu effectif, à modéliser les combinaisons optimales de systèmes cultureux et de portefeuilles de ressources naturelles, et à élaborer un cadre opérationnel de surveillance proactive de l'insécurité alimentaire adapté aux hétérogénéités agro-écologiques burundaises. Ancré dans les orientations stratégiques nationales, l'étude mobilise les systèmes agroforestiers comme prisme analytique pour opérationnaliser les politiques publiques. En démontrant que la garantie d'un revenu décent constitue le socle structurel de la résilience alimentaire, cette thèse pose les fondements théoriques et méthodologiques indispensables à l'investigation empirique et au diagnostic territorial.

1.1 Contexte et justification

L'agriculture constitue un pilier fondamental des systèmes alimentaires mondiaux, jouant un rôle central dans la sécurité alimentaire, la réduction de la pauvreté et le développement économique, en particulier dans les pays en développement où elle représente une source essentielle de revenus pour les petits exploitants agricoles [1]. A l'échelle globale, elle contribuait à environ 4 % du produit intérieur brut (PIB) mondial en 2018, avec une part plus élevée dans les économies en développement, où elle peut dépasser 25 % du PIB [2]. Pourtant, malgré son importance, le revenu généré par ce secteur demeure largement en deçà du seuil vital nécessaire pour couvrir les besoins fondamentaux en alimentation, santé, éducation, transport, habillement et logement.

Le secteur agricole soutient les moyens de subsistance de millions de petits exploitants agricoles, mais fait face à des défis complexes qui menacent sa durabilité. Le changement climatique, la pression démographique, l'exiguïté et la dégradation des terres, la pauvreté des ménages, le manque d'infrastructures adéquates, la faible industrialisation entravant la transformation des produits agricoles [3], l'absence de mécanismes efficaces de gestion post-récolte, les difficultés d'accès aux marchés et la faible diversification des sources de revenus concourent à maintenir les revenus effectifs des ménages, bien en dessous du seuil vital, accentuant ainsi la vulnérabilité des systèmes agricoles [4].

Ces défis sont particulièrement aigus en Afrique subsaharienne, où plus de 60 % de la population active dépend de l'agriculture, principalement à petite échelle et de subsistance. La région affiche les rendements agricoles les plus faibles au monde en raison de contraintes structurelles combinées : fragmentation foncière, faible accès aux intrants modernes, infrastructures de stockage et de transformation rudimentaires et forte dépendance aux précipitations [5, 6]. Dans ce contexte, même les ménages fortement engagés dans l'agriculture peinent à atteindre le revenu vital, leur production étant limitée par des facteurs exogènes comme le climat, le sol et les facteurs endogènes dont l'accès au crédit et technologies. La dépendance à une agriculture pluviale et la faible valorisation des produits agricoles creusent un écart structurel entre le revenu effectif et le seuil vital, rendant les ménages ruraux incapables de sortir durablement de la pauvreté.

Cette situation est encore plus critique au Burundi, où l'agriculture demeure largement pluviale et fortement dépendante des conditions climatiques. Le pays est dominé par de petits exploitants pratiquant une agriculture de subsistance, alors que le changement climatique exerce une pression croissante sur les systèmes agricoles. Les sécheresses prolongées, les inondations soudaines et les variations des régimes pluviométriques perturbent les cycles agricoles, entraînant des baisses des rendements [7]. Les variations de température et les altérations des régimes de précipitations modifient la distribution spatiale et saisonnière des ressources hydriques, affectant directement la production agricole [8]. Ces changements perturbent les interactions écologiques entre cultures, pollinisateurs, ravageurs et espèces invasives, accentuant la vulnérabilité des écosystèmes agricoles [9]. Face à ces aléas, les revenus agricoles deviennent imprévisibles et insuffisants pour atteindre le seuil vital, exposant les ménages à une insécurité alimentaire chronique, même en l'absence de crise aiguë.

La pression démographique aggrave ces défis en augmentant la demande alimentaire, tandis que l'exiguïté des terres cultivables, combinée à leur dégradation due à l'érosion et à la surexploitation, réduit la production agricole [10]. En 2024, la population totale du

Burundi s'élève à 12 332 788 habitants, avec un taux de croissance annuel de 1,95 % et une densité de 480 habitants par km² [11]. Les projections indiquent que la population pourrait atteindre entre 18,4 et 22,2 millions d'habitants d'ici 2050, accentuant la pression sur les ressources limitées du pays, notamment les terres agricoles, l'eau et les infrastructures. Dans ce contexte, une population croissante sur une base foncière fixe et dégradée signifie que le revenu par ménage, déjà inférieur au seuil vital, continue de rétrécir, rendant chaque génération plus vulnérable que la précédente.

La faible urbanisation et la dépendance persistante à l'agriculture de subsistance concentrent la population en milieu rural, intensifiant la fragmentation des terres agricoles [5]. Le manque de diversification économique limite les opportunités dans les secteurs non agricoles, renforçant une dépendance quasi exclusive à l'agriculture [12]. Cette fragmentation réduit la taille des exploitations, accélère la dégradation des sols et compromet la productivité agricole à long terme, rendant le revenu vital de plus en plus inaccessible.

Cette dynamique accentue l'insécurité alimentaire, la demande croissante dépassant souvent la capacité productive des systèmes agricoles [1]. La pauvreté limite les investissements dans les intrants et les technologies modernes, perpétuant un cycle de faible productivité [13]. Le manque d'infrastructures de transport et de stockage accentue les pertes post-récolte, limite l'accès aux marchés et réduit les revenus agricoles [10]. Ainsi, le revenu effectif des ménages, déjà faible, est continuellement érodé par les inefficacités structurelles du système, maintenant les populations rurales dans une précarité chronique.

La conception de stratégies adaptatives nécessite donc une compréhension approfondie des facteurs de vulnérabilité des ménages agricoles. L'évaluation du revenu vital et du revenu effectif permet d'identifier les populations les plus exposées à la pauvreté et à l'insécurité alimentaire [14]. Parallèlement, l'intégration de pratiques agricoles durables offre des opportunités pour gérer les crises alimentaires et renforcer la résilience des systèmes agricoles. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente recherche, qui met l'accent sur l'écart entre le revenu effectif et vital des ménages ruraux au Burundi, ainsi que sur les déterminants de cet écart et les mécanismes de résilience face aux chocs climatiques et économiques. L'analyse porte sur les stratégies d'adaptation, qu'elles soient endogènes ou exogènes, afin de comprendre comment elles contribuent à réduire la vulnérabilité structurelle et à tendre vers un revenu vital durable. En combinant approches quantitative et qualitative, cette thèse vise à proposer des leviers d'action contextualisés pour renforcer la résilience des ménages ruraux burundais et améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans un contexte de changement climatique et de pression démographique croissante.

1.2 Fondements conceptuels de la sécurité alimentaire et du revenu vital

L'interdépendance entre le revenu vital et la sécurité alimentaire repose sur des mécanismes économiques, nutritionnels et systémiques documentés dans la littérature. La relation entre revenu et sécurité alimentaire n'est ni linéaire ni immédiate : elle dépend de la structure des dépenses, des chocs exogènes et des stratégies d'adaptation des ménages. Un revenu insuffisant contraint non seulement la quantité, mais également la qualité et la diversité de l'alimentation. Les ménages à faible revenu ont tendance à privilégier des aliments énergétiques peu coûteux, riches en glucides, au détriment des sources de protéines

animales, de légumineuses et de micronutriments essentiels [15, 16]. Ce comportement s'explique par l'élasticité-prix des différents groupes alimentaires. En effet, les aliments de base présentent une élasticité-revenu faible, tandis que les aliments riches en nutriments, c'est-à-dire la viande, le poisson, les fruits et les légumes, ont une élasticité-revenu élevée. Par conséquent, leur consommation augmente plus que proportionnellement au revenu[17].

Ce phénomène, qualifié de « faim cachée » par l'organisation OMS[18], persiste même lorsque les besoins caloriques de base sont couverts. L'accès à une alimentation diversifiée et nutritive dépend largement du pouvoir d'achat des ménages, mais aussi de facteurs complémentaires tels que les prix relatifs sur les marchés locaux, les normes culturelles alimentaires et les infrastructures de transport et de stockage. Headey et al.[19] montrent, à partir de données longitudinales issues de 12 pays en développement, qu'une augmentation de 10 % du revenu effectif des ménages ruraux se traduit par une réduction moyenne de 6 à 8 % de la prévalence de l'insécurité alimentaire sévère, avec des variations selon les contextes agro-écologiques et les systèmes de production.

Inversement, l'insécurité alimentaire chronique détériore le capital humain par plusieurs canaux. Sur le plan biologique, la malnutrition par carence en micronutriments durant les premiers 1000 jours de vie, c'est-à-dire de la conception jusqu'à l'âge de 24 mois, affecte de manière irréversible le développement cognitif, la capacité d'apprentissage ainsi que la productivité future à l'âge adulte [20, 21]. Sur le plan économique, les individus souffrant de carences nutritionnelles présentent une réduction de leur capacité de travail physique mesurée par la diminution de la masse musculaire et de l'endurance et une augmentation de leur morbidité, ce qui limite leur productivité agricole et leur accès à l'emploi salarié [22, 23]. Alderman et al. [24] estiment, sur la base d'études longitudinales menées au Guatemala, au Pérou et en Inde, que chaque épisode de malnutrition sévère dans la petite enfance réduit les revenus à l'âge adulte de 15 à 25 % en moyenne.

Cette boucle de rétroaction négative est amplifiée par la volatilité des prix alimentaires, particulièrement marquée depuis la crise des prix de 2007-2008 et les chocs récents liés à la pandémie de COVID-19 et à la guerre en Ukraine [25]. Les petits producteurs, faiblement intégrés dans les chaînes de valeur formelles et dépourvus de mécanismes efficaces de stockage et de crédit, sont les plus exposés à cette volatilité [26]. Les travaux récents du *Living Income Community of Practice* montrent, à partir de données collectées dans 15 pays d'Afrique subsaharienne et d'Asie du Sud-Est, qu'une augmentation modeste mais stable du revenu rural, de l'ordre de 20 à 30 % du revenu vital, améliore significativement les indicateurs de sécurité alimentaire, en particulier la diversité alimentaire des ménages et la réduction de la période de soudure [27, 28]. Le revenu vital apparaît ainsi comme un déterminant structurel fondamental de la sécurité alimentaire et de la résilience des ménages, car il agit à la fois sur le plan économique grâce au pouvoir d'achat, sur le plan nutritionnel en améliorant la qualité de l'alimentation, et sur le plan systémique par la capacité d'investissement et d'adaptation.

1.2.1 Concept de la sécurité alimentaire

La sécurité alimentaire est définie par la FAO selon quatre piliers interdépendants consolidés lors du Sommet mondial de l'alimentation de 1996, à savoir la disponibilité qui repose sur la production nationale, les stocks et les importations, puis l'accès économique et physique aux aliments, ensuite l'utilisation incluant la qualité nutritionnelle, l'eau potable et

les soins de santé, et enfin la stabilité des aliments [29, 30]. Malgré les progrès accomplis depuis le Sommet du Millénaire, les estimations récentes indiquent qu'entre 713 et 757 millions de personnes ont été sous-alimentées en 2023, soit une augmentation d'environ 150 millions par rapport aux niveaux pré-pandémiques [31]. En Afrique subsaharienne, un habitant sur cinq souffre de faim chronique, et près de 2 milliards de personnes dans le monde vivent en insécurité alimentaire modérée à sévère, ce qui signifie qu'elles sont contraintes de réduire la qualité ou la quantité de leur alimentation [32].

Les déterminants de cette insécurité alimentaire sont multiples et s'inscrivent dans une hiérarchie de causalité bien documentée. Au niveau macro-structural, la pauvreté monétaire reste le facteur explicatif le plus puissant car les pays à faible revenu présentent une prévalence de la sous-alimentation supérieure de 25 points de pourcentage à celle des pays à revenu intermédiaire et de plus de 40 points par rapport aux pays à revenu élevé [33]. Le changement climatique agit comme un multiplicateur de risques : Wheeler et al.[34] estiment, à partir de modèles climatiques couplés à des fonctions de production agricole, qu'une augmentation de 2 °C des températures moyennes mondiales réduirait les rendements des principales cultures céréalières, comme le maïs, le blé et le riz, de 10 à 25 % selon les régions, avec les impacts les plus sévères dans les zones tropicales et subtropicales où se concentrent les pays les plus vulnérables.

L'accès limité aux intrants modernes, notamment les semences améliorées, les engrais et les produits phytosanitaires, constitue un frein majeur à l'intensification durable de l'agriculture familiale. Lowder et al.[35] recensent environ 570 millions d'exploitations agricoles dans le monde, dont 84 % sont des petites exploitations familiales de moins de 2 hectares et sont concentrées en Asie et en Afrique. Ces exploitations, qui produisent environ 30 % des aliments consommés localement dans les pays en développement, ont un accès très inégal aux intrants car seulement 25 à 40 % d'entre elles utilisent des semences améliorées ou des engrais minéraux, contre plus de 80 % dans les grandes exploitations commerciales [36]. Les pertes post-récolte, estimées à 14 % au niveau mondial par Hodges et al.[37], atteignent 20 à 30 % pour certains produits périssables comme les fruits, les légumes, les racines et les tubercules dans les pays à faibles revenus, et cela en raison de l'insuffisance des infrastructures de stockage, de transport et de transformation.

Les conflits armés et l'instabilité politique constituent un autre facteur majeur souvent sous-estimé dans les analyses agrégées. La FAO [32] montre que les pays en conflit prolongé, à l'instar de la Syrie, du Yémen, du Soudan et de la République démocratique du Congo, concentrent plus de 70 % des personnes en situation d'insécurité alimentaire sévère, avec des mécanismes causals incluant les déplacements forcés de populations, la destruction des infrastructures agricoles, la perturbation des marchés et la réorientation des dépenses publiques vers le secteur militaire. Les inégalités de genre, quant à elles, pénalisent les exploitations dirigées par des femmes, lesquelles présentent des rendements inférieurs de 20 à 30 % à ceux des exploitations dirigées par des hommes, et ce principalement en raison d'un accès différencié aux facteurs de production comme la terre, le crédit, la formation et la main-d'œuvre [38, 39].

Enfin, la dégradation des terres arables, affectant près de 24 % des surfaces agricoles mondiales selon GSP [40], menace la productivité agricole à long terme par l'érosion hydrique et éolienne, la salinisation, l'acidification et l'appauvrissement en matière organique des sols. Elbashir et al.[41] estiment que la perte annuelle de productivité due à la dégradation des sols représente un coût économique de l'ordre de 400 milliards de dollars par

an à l'échelle mondiale. Néanmoins, des innovations agricoles fondées sur l'agroécologie, l'agriculture de conservation et la gestion intégrée des nutriments offrent des perspectives prometteuses [42]. De même, les politiques de protection sociale, comme les transferts monétaires conditionnels ou non, les cantines scolaires et les filets sociaux productifs, ont démontré leur efficacité pour améliorer la sécurité alimentaire des ménages les plus vulnérables, avec des impacts significatifs sur la diversité alimentaire et la réduction de la période de soudure [43, 44]. Les investissements dans les infrastructures rurales ainsi que les technologies numériques telles que l'information météorologique, le conseil agricole à distance et les paiements mobiles, contribuent également à renforcer la résilience et la stabilité des systèmes alimentaires face aux chocs climatiques et économiques [45, 46].

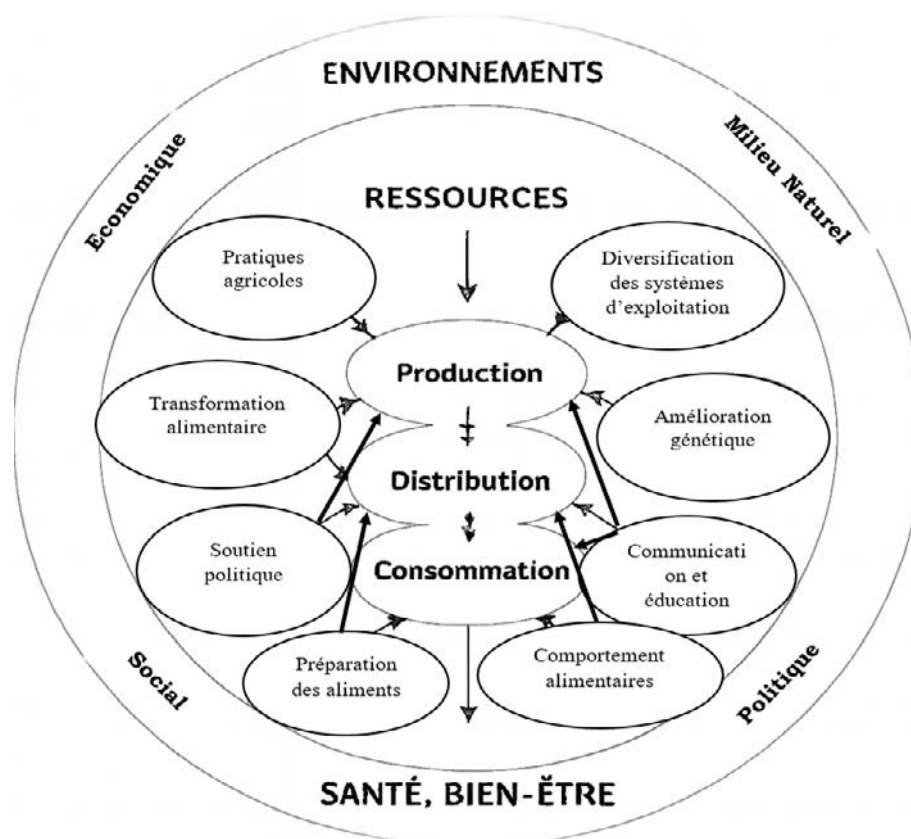


FIGURE 1.1 – Modèle systémique de la sécurité alimentaire
Adapté de Garnier[47]

Figure-1.1 illustre le cadre analytique de la sécurité alimentaire selon une approche systémique, mettant en évidence les interactions entre les environnements économiques, naturels, sociaux et politiques qui façonnent les différentes étapes du système alimentaire.

Le modèle systémique est structuré en couches concentriques qui interconnectent les ressources, les processus et les environnements influençant la santé et le bien-être des populations. Les composantes clés du système, production, distribution et consommation, agissent comme des nœuds dynamiques, alimentés par des ressources telles que les pratiques agricoles, la diversification des systèmes d'exploitation et l'amélioration génétique, qui optimisent les rendements et renforcent la résilience des systèmes agroalimentaires [42].

La transformation alimentaire et la préparation des aliments influencent directement la consommation, tandis que les comportements alimentaires, la communication et l'éducation nutritionnelle façonnent en retour les pratiques agricoles [48]. Cette dynamique de rétroaction souligne le caractère circulaire et adaptatif des systèmes alimentaires.

Les environnements externes, économiques, sociaux, politiques et naturels, modulent l'ensemble de ces processus. Les politiques publiques, les cadres institutionnels et les infrastructures alimentaires jouent un rôle déterminant dans l'adaptation aux contraintes environnementales et climatiques [42]. La santé publique, intégrée au noyau du bien-être, reflète l'impact des choix alimentaires et de la qualité des infrastructures sur l'état nutritionnel des populations, soulignant l'importance d'une approche holistique [49].

1.2.1.1 Concept de la sécurité nutritionnelle des ménages ruraux

A l'échelle mondiale, la littérature sur la sécurité nutritionnelle converge vers l'utilisation d'indicateurs harmonisés pour mesurer l'accès, la qualité et l'expérience vécue de l'alimentation. Dans les pays en développement, les études confirment que la diversité alimentaire (HDDS/SDAM) et les stratégies d'adaptation (rCSI/CSI) sont des proxies robustes de la pauvreté et de la vulnérabilité climatique [50]. Au Burundi, la littérature récente (PAM 2024, IPC, FAO) documente une insécurité alimentaire structurelle : 41 % de la population en insécurité alimentaire élevée, 52,8 % de retard de croissance chez les enfants <5 ans, et une prévalence de consommation alimentaire diversifiée inférieure à 35 % chez les femmes en âge de procréer[51]. Les indicateurs ci-dessous sont ceux les plus validés et utilisés dans la littérature scientifique.

La littérature disponible sur le Burundi révèle une situation de sécurité nutritionnelle préoccupante, caractérisée par une convergence d'indicateurs défavorables. Les enquêtes du Programme Alimentaire Mondial [52], indiquent que seulement 63 % des ménages atteignent un *Food Consumption Score* (FCS) « acceptable », avec des écarts marqués entre zones urbaines et rurales où prédomine une consommation monotone à base de tubercules et de céréales. L'échelle FIES, validée localement, montre que 41 % de la population vit une insécurité alimentaire modérée ou sévère, avec une prévalence plus élevée pendant la période de soudure alimentaire (octobre-février)[53]. La diversité alimentaire (HDDS/SDAM) demeure faible : les ménages ruraux consomment en moyenne 3 à 4 groupes alimentaires sur 12 au cours des 24 dernières heures, bien en deçà du seuil d'adéquation en micronutriments, ce qui explique en partie la prévalence élevée de retard de croissance (52,8 %) chez les enfants de moins de cinq ans [54]. En matière de stratégies d'adaptation, le rCSI intégré aux analyses IPC classe régulièrement 10 à 15 % de la population en Phase 3 (Crise) ou pire, avec des pics lors des chocs climatiques ou économiques. Le CSI complet, bien que moins utilisé en routine, a permis dans des études ciblées d'identifier l'épuisement progressif des stratégies d'adaptation dans les ménages les plus vulnérables, signalant un risque de basculement vers des situations d'urgence prolongée[55].

1.2.2 Concept du revenu vital des ménages ruraux

Le concept de revenu vital, également désigné sous le terme anglais *living income*, s'est imposé dans la littérature scientifique au début des années 2010 pour pallier les insuffisances des indicateurs conventionnels de pauvreté, tels que le seuil international de 2,15 dollars par jour ou les salaires minimums légaux, lesquels demeurent souvent déconnectés des

réalités rurales des pays en développement [56]. Porté par des coalitions internationales telles que le *Global Living Wage Coalition*, créé en 2006, ainsi que la *Living Income Community of Practice*, lancée en 2015, ce cadre mobilise la société civile, la recherche et le secteur privé autour d'une norme éthique visant à garantir un niveau de vie décent aux ménages agricoles [27, 57].

Consensuellement défini, le revenu vital correspond au revenu net annuel requis par un ménage rural type, lequel compte en moyenne entre quatre et six membres, afin d'acquérir un panier de biens et services essentiels adaptés au contexte local [58, 59]. Ce panier couvre notamment une alimentation nutritive et diversifiée, qui doit fournir entre 2 100 et 2 500 kcal par personne et par jour tout en garantissant un apport équilibré en protéines, lipides et micronutriments. Il inclut également un logement décent doté d'un toit durable, d'un accès à l'eau potable et à l'assainissement, les soins de santé primaires, l'éducation de base pour les enfants avec les frais de scolarité, les fournitures et les uniformes, ainsi que les frais de transport nécessaires. Une marge de précaution et d'épargne, estimée entre 10 et 20 % du total, y est par ailleurs intégrée afin de faire face aux chocs éventuels [60, 61].

Pour évaluer l'adéquation entre les ressources des ménages et cette norme, la littérature privilégie la comparaison entre le revenu vital et le revenu effectif, également appelé *actual income*. Ce dernier englobe l'ensemble des flux monétaires et non monétaires perçus sur une année, qu'il s'agisse des ventes agricoles, de l'autoconsommation valorisée aux prix du marché, des activités non agricoles, des transferts tels que les remises migratoires, les aides sociales ou les dons, ainsi que des revenus du capital [15, 62]. Contrairement au revenu vital, qui relève d'une référence normative, le revenu effectif constitue une variable positive mesurable empiriquement à partir d'enquêtes ménages [28]. Cette approche est méthodologiquement et opérationnellement privilégiée pour plusieurs raisons. Premièrement, les deux indicateurs partagent la même unité monétaire et la même période annuelle, ce qui permet une comparaison directe ainsi que le calcul standardisé du déficit, désigné sous le terme *living income gap*, tel que promu par le LICoP et la méthodologie Anker [60, 59, 27, 61]. Deuxièmement, le revenu effectif intègre l'autoconsommation, laquelle représente une composante centrale des systèmes ruraux subsahariens et couvre souvent entre 30 et 50 % de la consommation alimentaire totale, un aspect que les approches strictement monétaires tendent à occulter [28, 63]. Troisièmement, cet écart permet d'identifier directement des leviers d'action concrets, parmi lesquels figurent l'amélioration de la productivité, la diversification des sources de revenus, l'optimisation des prix à bord champ et la réduction des coûts de transaction [64, 65].

1.2.3 Ecarts de revenus à l'échelle mondiale et analyse du contexte burundais

A l'échelle mondiale, les travaux empiriques menés dans les filières à haute valeur ajoutée, telles que le café, le cacao, la banane, le thé et le coton, révèlent une perte structurelle. Une synthèse regroupant trente-sept études réalisées dans quatorze pays d'Afrique subsaharienne, d'Amérique latine et d'Asie du Sud-Est indique que 65 à 85 % des petits producteurs perçoivent un revenu effectif inférieur de 30 à 70 % au seuil vital local [66]. En Côte d'Ivoire et au Ghana, lesquels concentrent 60 % de l'offre mondiale de cacao, le revenu réel moyen n'atteint que 20 à 30 % du revenu vital, ce qui compromet gravement la sécurité alimentaire ainsi que la transition vers des pratiques agricoles durables [67, 68]. De manière similaire, dans les filières caféières d'Ouganda, du Rwanda et d'Ethiopie, le

déficit oscille entre 40 et 60 %, bien que les écarts soient légèrement réduits pour les producteurs intégrés à des filières certifiées, notamment le commerce équitable ou l'agriculture biologique [69, 70].

La persistance de déficit résulte des facteurs imbriqués agissant à plusieurs échelles. Au niveau microéconomique, il est principalement attribué à une faible productivité, caractérisée par des rendements qui demeurent souvent inférieurs à 50 % du potentiel agricole, à l'exiguïté des exploitations dont la superficie moyenne reste sous les 2 hectares en Afrique subsaharienne, ainsi qu'à une forte dépendance aux revenus agricoles représentant entre 70 et 90 % des ressources, au détriment de toute diversification [63, 71]. À l'échelle mésoéconomique, la valorisation des productions est freinée par des coûts de transaction élevés, un enclavement géographique, un déficit d'infrastructures de stockage et de transformation, et un accès restreint au crédit formel, puisque moins de 20 % des petits producteurs bénéficient de prêts bancaires [64, 62]. Au niveau macroéconomique, la volatilité des cours internationaux, couplée à une asymétrie d'information et à un faible pouvoir de négociation des producteurs face aux intermédiaires, maintient durablement les prix bord champ en dessous des coûts de production durables [65, 72].

Le Burundi illustre une situation critique, laquelle se trouve exacerbée par des contraintes structurelles spécifiques. Bien que les études sur le revenu vital y demeurent encore émergentes, les recherches récentes dressent un constat alarmant. Ainsi, selon Ntikazohera [73], sur base d'une enquête menée auprès de 450 ménages dans la province de Gitega, dans la zone de production caféicole, établit que le revenu vital annuel pour un ménage rural type au Burundi s'élève à 3 675 492 francs burundais. En contrepoint, le même auteur rapporte que le revenu effectif moyen observé dans l'échantillon atteint 2 710 256 francs burundais pour l'année 2021, ce qui traduit un déficit structurel d'environ 26 % par rapport au seuil vital de référence. Par ailleurs, Ntikazohera [73] et Ndayisenga [74], dans le cadre du projet *Living Income Burundi*, confirment que la majorité des ménages enquêtés, soit plus de 80 %, évoluent en dessous de ce seuil vital. Cette précarité est aggravée par une insécurité alimentaire chronique affichant un taux annuel moyen de 15 à 25 % entre 2020 et 2024, ce qui alourdit considérablement le coût d'accès aux biens et services essentiels non produits directement sur l'exploitation [75, 32].

1.2.4 Revenu vital et autres indicateurs économiques

La clarification conceptuelle du revenu vital nécessite une mise en perspective par rapport à d'autres notions proches mais distinctes, fréquemment utilisées dans la littérature sur la pauvreté, le développement rural et les politiques sociales. Le tableau 1 propose une synthèse comparative de ces différents concepts, adaptée de Anker[60], LICOP [27] et Ostermeier [61].

Revenu vital (*living income*) : Il s'agit du revenu net annuel qu'un ménage rural typique doit percevoir pour atteindre un niveau de vie décent dans son contexte local, incluant une alimentation nutritive, un logement décent, l'accès aux soins de santé, à l'éducation et à d'autres besoins essentiels, ainsi qu'une marge de précaution. Ce concept est normatif et contextualisé : il se calcule à partir de données locales sur les coûts de la vie, les besoins nutritionnels et les standards de logement selon Anker [59]. Il diffère du revenu effectif observé (ou *actual income*), qui correspond aux revenus effectivement perçus par les ménages, et qui constitue la base du diagnostic du déficit de revenu vital.

Seuil de pauvreté (*poverty line*) : Défini par la Banque mondiale comme le revenu minimum nécessaire pour satisfaire les besoins alimentaires et non alimentaires de base, avec des seuils internationaux standardisés (2,15 dollars par jour pour les pays à faible revenu en parité de pouvoir d'achat 2017, 3,65 dollars pour les pays à revenu intermédiaire inférieur) [56]. Contrairement au revenu vital, ce seuil est plus bas (environ 30 à 50 % inférieur selon les contextes) car il ne prend en compte qu'une alimentation minimale (souvent non diversifiée), un logement de très faible qualité et ne prévoit aucune marge pour les dépenses imprévues ou l'épargne selon Ferriera[76].

Salaires minimums légaux (*legal minimum wage*) : Fixés par les Etats, ils varient considérablement d'un pays à l'autre et sont souvent inférieurs au revenu vital, notamment dans les secteurs agricoles où l'application est faible. Dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne, les salaires minimums agricoles sont compris entre 0,50 et 2,00 dollars par jour, alors que le revenu vital estimé pour un travailleur agricole se situe généralement entre 4 et 8 dollars par jour selon Anker[77].

Revenu de subsistance (*subsistence income*) : Correspond au revenu nécessaire pour couvrir les besoins alimentaires de base, sans marge pour la santé, l'éducation, le logement décent ou l'épargne. Il s'agit d'un concept proche du seuil de pauvreté alimentaire (*food poverty line*), mais ne permettant pas de sortir durablement de la vulnérabilité selon Devereux [26].

Revenu vital de référence (*benchmark living income*) : Variante méthodologique proposée par Pyrko [58] afin de faciliter les comparaisons internationales. Cette approche consiste à fixer un panier de biens et services standardisé, par exemple selon les normes de l'Organisation internationale du Travail ou les recommandations nutritionnelles de l'OMS, puis à l'ajuster au moyen de coefficients de conversion fondés sur la parité de pouvoir d'achat locale.

La dépendance des ménages ruraux à une agriculture de subsistance, combinée à une faible diversification des sources de revenus, expose ces ménages aux chocs climatiques, aux fluctuations des prix agricoles et aux contraintes foncières. En effet, selon Megerle[78], moins de 30 % des revenus proviennent d'activités non agricoles dans la majorité des ménages burundais. Dans ce contexte, la seule garantie de la sécurité alimentaire apparaît insuffisante pour assurer un niveau de vie décent et une résilience à long terme [62]. Il devient indispensable d'assurer aux ménages ruraux un revenu économique stable et adéquat, condition d'une sortie durable de la pauvreté et d'une amélioration structurelle de leur sécurité alimentaire et nutritionnelle. Cette exigence est d'autant plus pressante que les projections démographiques et climatiques pour les prochaines décennies aggravant des pressions sur les ressources naturelles et les systèmes agricoles, en particulier au Burundi [33, 31].

TABLEAU 1.1 – Définitions comparées du revenu vital

Auteur / Institution	Eléments inclus dans le revenu vital	Dimension spatiale	Dimension environnementale
LICoP	Alimentation, logement, santé, éducation, eau, transport, imprévus, coûts de production	Locale	Implicite
FAO	Besoins essentiels et résilience des moyens d'existence	Locale	Explicite
Alkire & Santos	Accès aux capacités de base	Nationale	Non
Giller et al.	Revenu net agricole et non agricole, durabilité	Rurale	Explicite
Niragira	Besoins essentiels et investissement productif	Burundi	Implicite

Le tableau 1.1 compare les approches de différentes institutions et auteurs dans la définition du revenu vital, en mettant en évidence les composantes retenues ainsi que la prise en compte des dimensions spatiale et environnementale. Il illustre l'évolution d'une vision strictement monétaire vers des cadres plus holistiques intégrant la résilience, la durabilité et le contexte local.

Contrairement au seuil de pauvreté, qui mesure une survie minimale, ou au salaire minimum, fixé par la loi, le revenu vital constitue un standard normatif de décence. Il est contextualisé, holistique et durable, reflétant la capacité d'un ménage à vivre sans endettement, sans dégrader les ressources naturelles et sans compromettre l'avenir des générations futures.

Dans de nombreux pays en développement, et particulièrement en Afrique subsaharienne, le revenu effectif des ménages agricoles demeure systématiquement inférieur à ce seuil vital. Cette lacune structurelle explique pourquoi des ménages autosuffisants sur le plan productif peuvent néanmoins souffrir de malnutrition, de déscolarisation ou d'un accès insuffisant aux soins. En zone rurale, jusqu'à 70 % des revenus sont consacrés à l'alimentation [79], laissant peu de marges pour d'autres investissements essentiels [80].

L'articulation entre sécurité alimentaire et revenu vital est à la fois causale et circulaire. Un revenu insuffisant limite l'accès à une alimentation de qualité, compromettant les piliers d'accès et d'utilisation de la sécurité alimentaire. Inversement, une insécurité alimentaire chronique réduit la productivité agricole, ce qui abaisse davantage le revenu effectif. Les mêmes déterminants structurels, dégradation des sols, fragmentation foncière, pression démographique, accès limité aux intrants et faiblesse des filières de commercialisation, menacent simultanément la production alimentaire et la génération de revenus durables.

Dans des contextes de forte densité rurale comme le Burundi, l'estimation locale du revenu vital constitue un outil stratégique pour identifier les ménages les plus vulnérables, orienter les politiques publiques et évaluer l'impact des innovations agricoles [81, 82]. En ce sens, le revenu vital ne se limite pas à un indicateur économique, mais s'impose comme le socle structurel de la sécurité alimentaire durable.

Ainsi, repenser la résilience des systèmes agricoles exige de dépasser une vision exclusivement productiviste. Il s'agit non seulement de garantir la disponibilité alimentaire,

mais aussi de s'assurer que chaque ménage rural dispose de moyens économiques stables et suffisants pour mener une vie digne. Figure-1.2 illustre le concept de *Living Income Benchmark* comme seuil minimal couvrant les besoins essentiels d'un ménage, ainsi que l'écart (*Income Gap*) entre ce niveau de vie décent et le revenu réellement perçu (*Actual Income*).

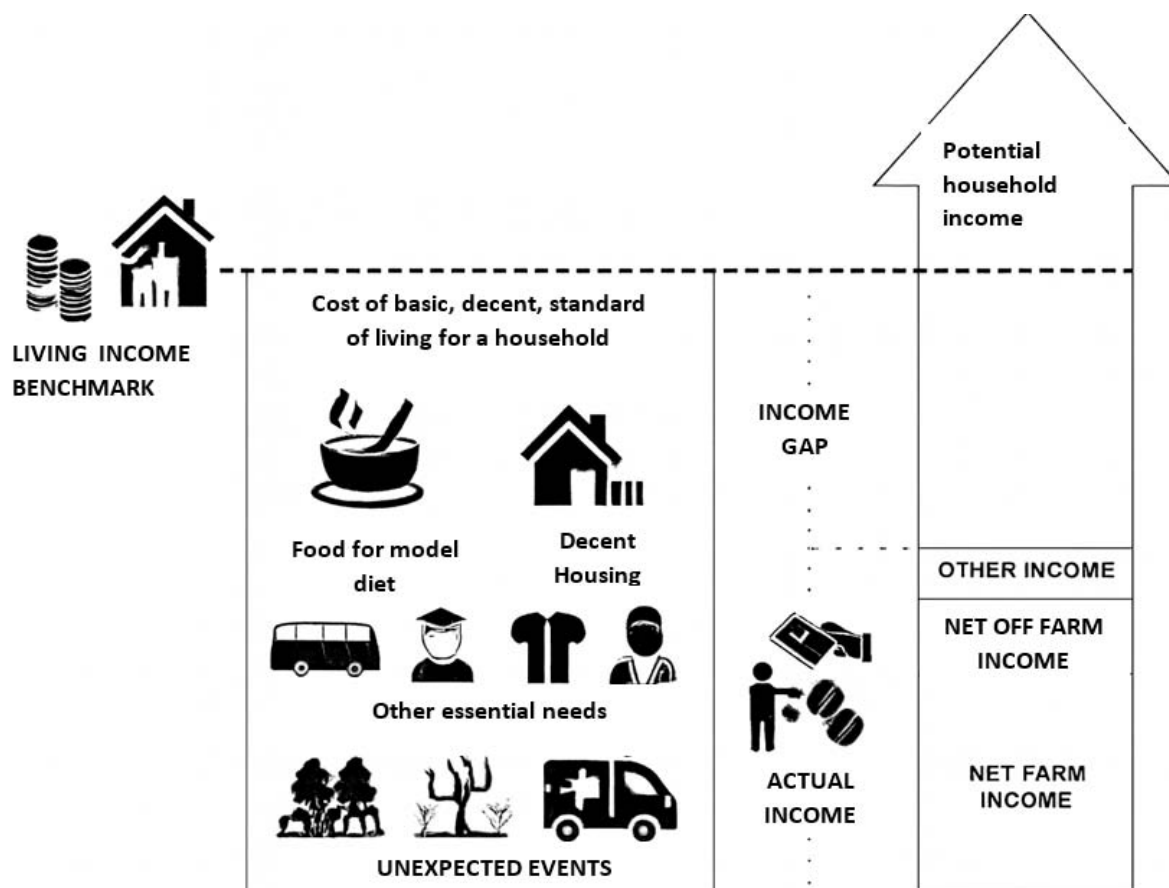


FIGURE 1.2 – L'écart entre le revenu vital et effectif au Burundi
Adapté de Mychajluk[83]

Figure-1.2 illustre de manière schématique l'écart structurel entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages ruraux, mettant en évidence une précarité économique chronique. Ce graphique souligne que, même lorsqu'un ménage génère un revenu supérieur à la moyenne nationale, celui-ci demeure souvent insuffisant pour atteindre le niveau de vie minimum requis. Un thème récurrent dans la littérature est l'existence d'un écart de revenu, ou *income gap*, entre le revenu réel des ménages et un revenu de référence, communément désigné comme le *Living Income Benchmark* (LIB), adapté au contexte local [83]. Cette littérature met en lumière les besoins essentiels qui structurent le seuil de revenu vital et conditionnent l'atteinte d'un niveau de vie décent.

L'alimentation constitue une dépense prioritaire au sein du panier de consommation. Une diète modèle, incluant les aliments de base nécessaires à une nutrition adéquate, représente une part substantielle du revenu des ménages ruraux. Toutefois, le coût de cette alimentation peut fluctuer en fonction des aléas climatiques, affectant la disponibilité et les prix des denrées alimentaires [84].

Le logement décent, bien que souvent rudimentaire dans les zones rurales, engendre également des coûts non négligeables. A cela s'ajoutent les dépenses liées à l'éducation et aux soins de santé, qui constituent des charges supplémentaires, en particulier dans les pays en développement où l'accès aux services sociaux de base demeure limité [85, 78].

Par ailleurs, plusieurs études soulignent l'impact des dépenses imprévues, telles que les catastrophes naturelles, les crises sanitaires ou les chocs économiques, qui tendent à épuiser des ressources déjà rares et fragilisent les ménages. Ces pressions cumulées illustrent la difficulté persistante à maintenir un équilibre entre le revenu disponible et les exigences minimales d'un niveau de vie décent, particulièrement dans des contextes caractérisés par une faible résilience économique.

1.2.5 Analyse conceptuelle de la résilience des ménages

La résilience des ménages ruraux est un concept multidimensionnel qui renvoie à leur capacité à absorber, à s'adapter et à se transformer face aux chocs climatiques, économiques et sociaux, tout en préservant ou en améliorant leurs conditions de vie [86]. La capacité d'absorption se manifeste par la faculté à résister à des perturbations temporaires, par exemple en mobilisant des réserves alimentaires ou financières durant une période de crise.

L'adaptation, quant à elle, implique des ajustements progressifs des stratégies de subsistance, tels que la diversification des cultures, l'adoption de techniques agroforestières ou l'amélioration des pratiques de gestion des sols afin de limiter les effets de la dégradation environnementale. La transformation correspond à des changements structurels plus profonds, comme la transition vers des activités non agricoles ou les migrations vers les zones urbaines en réponse à des crises récurrentes, traduisant une réorientation stratégique des moyens de subsistance [87, 88].

Dans ce contexte, le *Cadre des moyens d'existence durables* s'impose comme un outil analytique central pour l'étude des stratégies de subsistance des ménages ruraux. Ce cadre met l'accent sur cinq types de capitaux, humain, social, naturel, physique et financier, et sur leur mobilisation face aux vulnérabilités structurelles [89]. Plusieurs études montrent que les ménages disposant d'un accès diversifié à ces capitaux, notamment à travers des groupes d'épargne, des réseaux sociaux solides ou des systèmes d'irrigation, sont mieux à même d'absorber les chocs climatiques et de renforcer leur sécurité alimentaire [90].

Cependant, le SLF présente certaines limites, en particulier sa prise en compte insuffisante des dynamiques de pouvoir et des inégalités structurelles. Ces dernières restreignent souvent l'accès des femmes et des groupes marginalisés aux ressources productives, un facteur déterminant dans les contextes ruraux marqués par des normes patriarcales ou des politiques foncières défavorables [91]. Dès lors, l'intégration des dimensions culturelles et institutionnelles apparaît indispensable. Des travaux portant sur l'influence des normes sociales ou sur les effets des programmes de transferts monétaires, tels que le *Programme des filets sociaux productifs*, montrent que la combinaison d'un soutien financier et d'une gestion communautaire des ressources naturelles peut contribuer significativement au renforcement de la résilience des ménages ruraux [92].

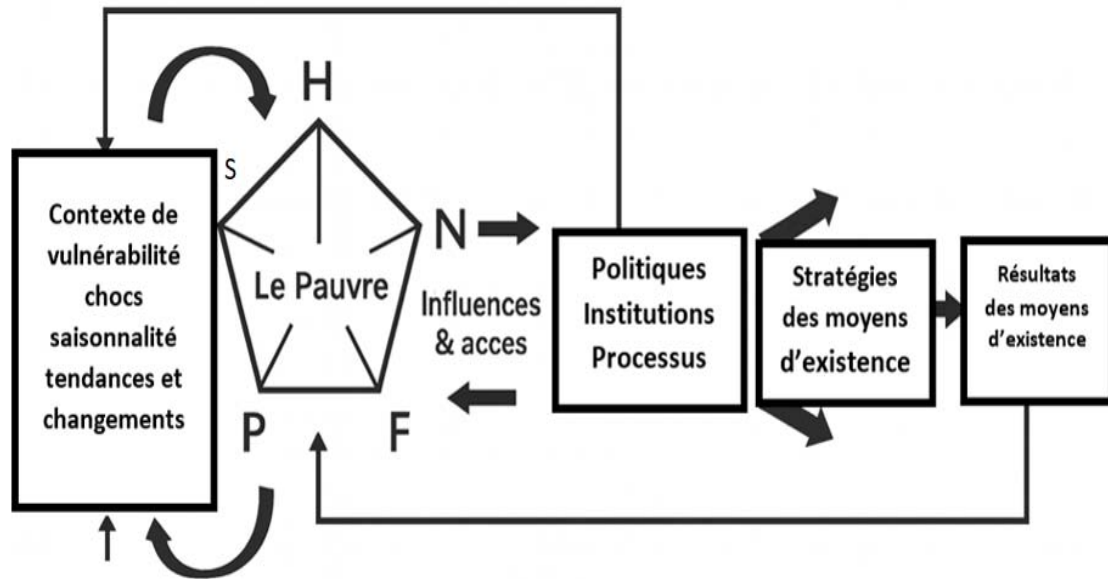


FIGURE 1.3 – Cadre des moyens d'existences durables
Adapté de Mamy [93]

La Figure-1.3 illustre un modèle conceptuel de de moyens d'existence dans un contexte de vulnérabilité, car elle met en évidence les interactions entre différents facteurs. Au centre, le Pauvre est représenté par un pentagone qui est entouré de cinq dimensions interconnectées, à savoir les ressources ou capitaux humain, social, naturel, physique et financier. Ces dimensions sont par ailleurs influencées par un *Contexte de vulnérabilité* tel que les chocs, la saisonnalité, les tendances et les changements, lequel exerce ainsi des pressions externes. Les politiques, institutions et processus modulent ces interactions, tandis que les stratégies des moyens d'existence adoptées par les pauvres conduisent à des résultats mesurables, tels que l'amélioration ou l'aggravation de leur situation. Ce cadre systémique, souvent utilisé en analyse de la sécurité alimentaire et des moyens de subsistance, montre comment la pauvreté est un phénomène multidimensionnel, influencé par des facteurs externes et internes, avec des boucles de rétroaction complexes.

1.2.6 Problématique de la recherche

Malgré les avancées enregistrées au cours des dernières décennies en matière de réduction de la faim dans certaines régions du monde, la sécurité alimentaire reste un défi planétaire majeur. Selon le rapport conjoint de la FAO, du FIDA, de l'OMS, du PAM et de l'UNICEF [32], environ 2,4 milliards de personnes étaient confrontées à une insécurité alimentaire modérée ou sévère en 2023, soit près de 30 % de la population mondiale. Ce chiffre a augmenté de près de 400 millions par rapport aux niveaux pré-pandémiques, en raison d'une succession de chocs globaux : la pandémie de COVID-19 (2020–2022), les conflits armés (notamment en Ukraine, au Soudan, au Sahel), les crises économiques et la volatilité sans précédent des marchés agricoles mondiaux [56, 31]. Ces dynamiques globales compromettent la capacité des systèmes alimentaires à garantir un accès stable, régulier et suffisant à une alimentation nutritive pour les populations les plus vulnérables, en particulier dans les pays à faible revenu où les mécanismes d'adaptation sont limités [91, 62].

Les perturbations climatiques constituent un multiplicateur de risques actif. En effet, les variations des régimes pluviométriques, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes comme les sécheresses, les inondations et les tempêtes, ainsi que les vagues de chaleur, affectent directement les rendements agricoles et la stabilité des productions [34, 9]. Parallèlement, la volatilité des prix internationaux des denrées alimentaires, qui a connu des pics successifs en 2007–2008, 2010–2011, 2021–2022 et 2024, exacerbe la vulnérabilité des populations rurales dépendant de l'agriculture, en particulier dans les pays à faible revenu importateurs de produits alimentaires [25, 26]. Ces chocs globaux se traduisent par des défis locaux amplifiés dans les contextes où les infrastructures agricoles, les systèmes de stockage, les filets de protection sociale et les capacités institutionnelles sont faibles, rendant les populations rurales doublement exposées aux aléas naturels et aux défaillances des marchés [62, 64].

Au Burundi, l'agriculture constitue le socle économique et social des communautés rurales. Environ 84 % des ménages dépendent de l'agriculture comme source principale de revenus, qu'il s'agisse de ventes de produits agricoles, d'autoconsommation ou de petits commerces liés aux filières vivrières et de rente [94, 7]. Cependant, cette dépendance ne garantit ni la sécurité alimentaire ni un niveau de vie décent. Le secteur agricole burundais est confronté à un ensemble de pressions structurelles, fragmentation foncière, faible productivité, dégradation des sols, insuffisance des infrastructures, faible diversification économique, déjà détaillées dans la section précédente. La combinaison de ces facteurs se traduit par un revenu effectif moyen par ménage nettement inférieur au seuil vital estimé, comme l'ont montré les travaux de Megerle [78], Ntikazohera [73] et Ndayisenga [74], avec un déficit de l'ordre de 50 à 70 % selon les zones agro-écologiques.

Ce déficit structurel de revenu a des conséquences directes sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages ruraux. Les études menées au Burundi par Niragira [10] et Cochet [4] montrent que les ménages dont le revenu effectif se situe en dessous du seuil vital présentent des scores de diversité alimentaire inférieurs de 30 à 40 % à ceux des ménages atteignant ou dépassant ce seuil. En effet, ces ménages réduisent le nombre de repas par jour, passant de 3 à 2 voire 1 repas en période de soudure alimentaire, puis ils consomment moins de protéines animales et de légumes frais, et présentent enfin des taux plus élevés de malnutrition chronique chez les enfants de moins de 5 ans [95]. En période de chocs climatiques comme les sécheresses ou les inondations, ou encore de chocs économiques tels que la hausse des prix des aliments de base, ces ménages n'ont pas de marge de manœuvre suffisante pour maintenir leur consommation alimentaire sans vendre leurs actifs productifs, ce qui les enfonce dans une trappe à pauvreté dont il est difficile de sortir [96].

C'est dans cette intersection entre chocs globaux, qu'ils soient climatiques, économiques ou biologiques, et vulnérabilités locales. La problématique centrale est formulée autour de l'écart entre le revenu effectif et vital des ménages, leur vulnérabilité à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle, ainsi que les mécanismes de résilience permettant de réduire cet écart face aux chocs. La problématique ainsi posée trouve sa justification dans plusieurs constats qui en établissent la pertinence scientifique et l'urgence opérationnelle. Premièrement, on observe un manque criant de données empiriques sur le revenu vital spécifique aux différentes régions du Burundi, car la plupart des études disponibles sont partielles, ponctuelles ou basées sur des méthodologies non standardisées, ce qui limite leur comparabilité et leur utilisation pour les politiques publiques [66, 27]. Deuxièmement, les politiques publiques actuelles, à savoir les subventions aux intrants, l'appui aux

coopératives et les filets sociaux, ne sont pas explicitement calibrées sur un objectif de revenu vital, si bien qu’elles peinent à réduire l’écart observé, et cela faute d’une cible claire et d’indicateurs de suivi adaptés. Troisièmement, les mécanismes de résilience mobilisés par les ménages ruraux burundais face aux chocs sont encore mal compris dans leur diversité et leur efficacité relative. Certains sont adaptatifs, par exemple la diversification des cultures, la migration temporaire ou les petits commerces, tandis que d’autres sont palliatifs comme la vente d’actifs, la réduction de la consommation alimentaire ou le retrait des enfants de l’école, et peuvent avoir des effets délétères à long terme [12]. Enfin, la littérature internationale sur le revenu vital a largement été développée dans des contextes de filières d’exportation organisées comme le café, le cacao ou la banane, mais elle a été très peu adaptée aux systèmes de polyculture vivrière complexe qui caractérisent les hautes terres densément peuplées de l’Afrique des Grands Lacs, dont le Burundi est un cas emblématique [66, 4].

Ainsi, cette recherche se donne pour ambition de combler ces lacunes en fournissant une estimation rigoureuse du revenu vital pour différents types de ménages ruraux burundais, puis en mesurant l’écart avec le revenu effectif observé, ensuite en identifiant les déterminants de cet écart, et enfin en analysant les mécanismes de résilience qui permettent de le réduire. Les résultats attendus devraient éclairer la conception de politiques agricoles, sociales et d’adaptation au changement climatique plus efficaces et mieux ciblées, ce qui contribuera ainsi à la sécurité alimentaire et nutritionnelle durable des populations rurales du Burundi.

1.2.7 Justification de la recherche

Quelques études ont exploré le lien entre le revenu vital durable, la résilience des ménages ruraux et la sécurité alimentaire au Burundi, mais elles se concentrent souvent sur des aspects spécifiques, laissant des lacunes que cette thèse souhaite combler. Par exemple : Plusieurs études récentes ont abordé des dimensions clés de la sécurité alimentaire sans toutefois les relier explicitement aux concepts de revenu vital et de revenu effectif. Ainsi, le rôle des pratiques agricoles, en particulier la diversification des cultures, dans l’amélioration de la sécurité alimentaire a été examiné [94], sans toutefois établir de lien avec les seuils de revenu des ménages ruraux. Dans la même veine, la perte d’agro-biodiversité et ses conséquences sur la nutrition ont fait l’objet d’analyses [97], mais ces travaux n’intègrent pas de cadre socio-économique articulant le revenu vital et l’accès aux marchés. Enfin, les pertes de rendement induites par les ravageurs et leurs impacts sur la sécurité alimentaire ont été étudiées [98], sans pour autant envisager de stratégies de renforcement de la résilience ou de durabilité des revenus. Ces travaux, bien que pertinents, laissent ainsi en suspens la question centrale de l’écart entre revenu effectif et revenu vital comme déterminant structurel de la vulnérabilité alimentaire. Cette thèse propose une approche interdisciplinaire novatrice, en caractérisant l’écart de revenus, en modélisant des systèmes agricoles résilients et en suggérant des stratégies de systèmes d’alerte précoce, offrant ainsi un cadre pour renforcer la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans le contexte rural burundais.

1.2.8 Objectifs de la recherche

Cette thèse doctorale vise à analyser les déterminants de la vulnérabilité et de la résilience des ménages ruraux burundais face aux aléas climatiques et socio-économiques,

afin de comprendre comment l'interaction entre dimensions agronomiques, économiques, climatiques et sociales influence leur sécurité alimentaire et nutritionnelle. Les objectifs spécifiques sont :

1. Estimer le revenu vital des ménages ruraux dans les zones d'étude et quantifier l'écart avec leur revenu effectif afin de révéler les dimensions non couvertes des besoins fondamentaux et leur incidence sur la pauvreté multidimensionnelle.
2. Modéliser les combinaisons optimales de systèmes de cultures et de portefeuilles de ressources naturelles et socio-économiques qui maximisent simultanément la stabilité des revenus, la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale.
3. Elaborer un système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire des ménages, fondé sur des indicateurs de vulnérabilité et de résilience, adapté aux dynamiques locales de risque climatique, économique et foncier au Burundi.

1.2.8.1 Questions de recherche

Afin d'explorer les déterminants et les dynamiques de l'insécurité alimentaire des ménages ruraux au Burundi dans des zones aux conditions économiques et climatiques contrastées, trois questions principales guident cette recherche :

1. Dans quelle mesure les facteurs économiques et climatiques expliquent-ils l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages ruraux dans les zones contrastées du Burundi ?
2. Comment les ménages ruraux combinent-ils les pratiques agricoles et les ressources disponibles pour concilier productivité, sécurité alimentaire et durabilité environnementale ?
3. Quels mécanismes d'intégration des indicateurs de vulnérabilité et de résilience permettraient l'élaboration d'un système d'alerte précoce fiable et opérationnel pour la surveillance de l'insécurité alimentaire des ménages au Burundi ?

1.2.8.2 Hypothèses de recherche

En réponse aux questions posées et sur la base d'une revue de la littérature ainsi que des connaissances empiriques disponibles sur la vulnérabilité agricole et alimentaire au Burundi, les hypothèses suivantes sont formulées :

1. Les facteurs économiques et climatiques sont des prédictors de la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire au Burundi.
2. L'effet combiné des facteurs économiques et climatiques varie selon les zones de moyens d'existence, permettant d'identifier des profils distincts de vulnérabilité alimentaire.
3. Le système d'alerte précoce fondé sur les indicateurs socio-économiques et climatiques repose sur des dynamiques locales observables.

1.2.9 Ancrage de la recherche avec les cadres politiques

Le Burundi dépend d'une économie essentiellement rurale, dominée par l'agriculture et l'élevage [99]. Selon le Plan National de Développement [100], l'agriculture contribue à

39,6 % du Produit Intérieur Brut (PIB), génère 84 % des emplois, assure 95 % de l’approvisionnement alimentaire national et fournit les principales matières premières pour l’agro-industrie. Ce rôle central du secteur agricole dans les économies en développement s’explique par quatre fonctions économiques clés : sa capacité à produire des denrées alimentaires et des matières premières ; sa contribution à la formation de capital pour d’autres secteurs économiques ; son rôle de réservoir de main-d’œuvre ; et sa capacité à stimuler la demande intérieure pour les biens industriels.

Cependant, les rendements agricoles burundais demeurent de loin inférieurs aux potentiels agronomiques atteignables, en raison de contraintes structurelles telles que la dégradation des conditions climatiques, le faible niveau des rendements des cultures vivrières et d’exportation, une gestion insuffisante des ressources naturelles et l’utilisation de techniques agricoles rudimentaires [101]. Dans ce contexte, l’autre défi pour le Burundi consiste à promouvoir une croissance économique soutenue et durable en positionnant l’agriculture comme moteur clé du développement, ce qui nécessite un renforcement des systèmes de production, une amélioration des moyens de subsistance des ménages ruraux et une résilience accrue face aux chocs climatiques, économiques et sociaux [102].

La présente recherche s’inscrit dans la trajectoire des visions nationales successives qui structurent la planification stratégique du Burundi. La **Vision Burundi 2025** [103] avait fixé l’objectif de faire du pays une nation émergente, avec un accent sur la transformation structurelle de l’économie, l’amélioration des conditions de vie des populations et la réduction de la pauvreté. Cette vision est désormais prolongée par la **Vision Burundi 2040 – Pays émergent**, qui ambitionne d’atteindre le statut de pays à revenu intermédiaire, et la **Vision Burundi 2060 – Pays développé**, qui vise une transformation économique complète et une amélioration durable du bien-être des populations. La présente recherche contribue directement à ces visions en ciblant l’augmentation du revenu des ménages ruraux, condition nécessaire pour sortir durablement de la pauvreté et atteindre un niveau de vie décent.

Plus précisément, la recherche alimente trois composantes majeures de ces visions, à savoir premièrement la sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations rurales, deuxièmement la promotion de pratiques agricoles durables et résilientes face aux changements climatiques, et troisièmement la création d’emplois et de revenus décents dans les filières agricoles à forte valeur ajoutée.

S’agissant des documents de planification à moyen terme, le **Plan National de Développement (PND) révisé** ainsi que son plan d’actions 2023–2027 orientent les interventions publiques vers une croissance inclusive et une gestion durable des ressources naturelles [100]. La recherche s’aligne sur cet outil par les objectifs suivants du PND : premièrement l’objectif stratégique n° 2 concernant l’amélioration de la productivité agricole et de la sécurité alimentaire, deuxièmement l’objectif opérationnel n° 5 portant sur le renforcement de la résilience des ménages ruraux face aux chocs climatiques, et troisièmement l’axe prioritaire n° 3 relatif à la promotion de l’agroforesterie et des pratiques agricoles climato-intelligentes.

La **Stratégie Nationale Agricole** [104] constitue le document de référence sectoriel. Elle met l’accent sur l’amélioration de la productivité agricole, le renforcement de la résilience des ménages ruraux [105] ainsi que la promotion de pratiques agricoles durables, notamment l’agroforesterie, et cela pour assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle. La présente recherche s’inscrit directement dans trois axes de cette stratégie, à savoir l’axe

1 concernant l'intensification durable des systèmes de production vivrière et de rente, puis l'axe 3 relatif à la diversification des sources de revenus des ménages agricoles, et enfin l'axe 4 portant sur la gestion durable des ressources naturelles et l'adaptation au changement climatique.

Le **Plan National d'Adaptation (PNA, 2023)** recense les besoins et actions prioritaires pour la prévention et la riposte en matière d'adaptation au changement climatique. Il identifie l'agroforesterie comme une pratique qui renforce la résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques. La recherche répond à deux composantes spécifiques du PNA, c'est-à-dire la composante A.2 relative à la promotion de systèmes agricoles résilients dont l'agroforesterie, ainsi que la composante C.1 concernant le renforcement des capacités des ménages ruraux à gérer les risques climatiques.

Le **Code de l'Environnement (2021)** dispose, en son titre VII article 191, d'une liste de mesures que le Burundi doit mettre en œuvre pour renforcer les capacités d'adaptation au changement climatique. Parmi ces mesures figurent la promotion des systèmes agroforestiers et la gestion durable des terres, ce qui confère ainsi un ancrage juridique aux pratiques étudiées. La recherche contribue à l'opérationnalisation de l'article 191, plus précisément ses alinéas 3 concernant la promotion de l'agroforesterie et 7 relatif à l'amélioration des revenus des ménages ruraux par des activités résilientes.

La **Contribution Déterminée au Niveau National (CDN, 2025)** comprend les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'un plan d'actions d'atténuation et d'adaptation. L'agroforesterie y est reconnue comme une solution fondée sur la nature, contribuant à la fois à la séquestration du carbone et à l'amélioration des moyens d'existence des ménages ruraux. La recherche s'aligne sur deux cibles de la CDN, à savoir la cible d'adaptation A.1 visant l'accroissement de la superficie sous agroforesterie de 30 % d'ici 2030, puis la cible d'atténuation M.3 concernant la séquestration de carbone par les systèmes agroforestiers.

Cette recherche s'appuie sur l'expérience concrète du projet Agroforesterie financé par le Ministère d'Etat du Bade-Wurtemberg en Allemagne, lequel accompagne des petits producteurs de café organisés au sein du Consortium des Coopératives Caféicoles du Burundi, également connu sous le sigle COCOCA. Ce projet promeut des systèmes agroforestiers intégrant le café comme culture commerciale clé, et ce en association avec des arbres d'ombrage incluant des essences forestières et fruitières ainsi qu'avec des cultures vivrières, et cela dans une logique de durabilité environnementale, de résilience climatique et de revenus décents. La présente étude analyse les déterminants de la vulnérabilité et de la résilience des ménages ruraux engagés dans ces systèmes agroforestiers, puis elle propose des stratégies innovantes pour optimiser l'utilisation des ressources agricoles limitées.

A l'échelle régionale, cette recherche s'inscrit dans l'**Agenda 2063 de l'Union Africaine**, lequel vise à éradiquer la faim et à promouvoir une agriculture durable. Plus précisément, elle contribue à l'objectif prioritaire n° 1 visant un niveau de vie élevé, une qualité de vie et un bien-être accrus pour tous les citoyens, ainsi qu'à l'objectif prioritaire n° 7 concernant des économies et des communautés résilientes face au changement climatique. Elle s'aligne également sur le **Partenariat pour le Développement Durable de l'Agriculture Africaine (PDDAA)**, notamment son résultat phare n° 2 relatif à l'accès accru des petits producteurs aux marchés et aux chaînes de valeur.

Au niveau international, la recherche répond aux **Objectifs de Développement Du-**

table (ODD) des Nations Unies, en particulier :

- **ODD 1 concernant l'élimination de la pauvreté** : cible 1.1 relative à l'éradication de l'extrême pauvreté et cible 1.4 portant sur l'accès de tous aux services de base et à la propriété économique ;
- **ODD 2 relatif à la faim zéro** : cible 2.1 visant l'accès universel à une alimentation saine et nutritive, cible 2.3 concernant le doublement de la productivité agricole et des revenus des petits producteurs, et cible 2.4 relative aux systèmes alimentaires durables et résilients ;
- **ODD 13 consacré aux mesures relatives à la lutte contre le changement climatique** : cible 13.1 portant sur le renforcement de la résilience et des capacités d'adaptation face aux aléas climatiques, et cible 13.2 relative à l'intégration des mesures climatiques dans les politiques nationales.

L'ensemble de ces cadres stratégiques, qu'ils soient nationaux avec les Visions 2040 et 2060, le PND et la Stratégie Nationale Agricole, puis climatiques avec le PNA, le Code de l'Environnement et la CDN, ensuite régionaux avec l'Agenda 2063 et le PDDAA, et enfin internationaux avec les ODD, converge vers la nécessité de promouvoir des pratiques agricoles durables, résilientes et économiquement viables. En évaluant rigoureusement l'impact de l'agroforesterie sur le revenu vital des ménages ruraux, cette recherche fournit des éléments de preuve susceptibles d'éclairer les politiques publiques et d'orienter les interventions de développement vers des solutions efficaces et adaptées aux réalités locales du Burundi.

1.2.10 Cadre Conceptuel de la recherche

Le cadre conceptuel élaboré pour cette recherche postule que, dans le contexte spécifique du Burundi, l'atteinte du revenu vital constitue le seuil critique déterminant la capacité de résilience des ménages. Ce revenu de référence agit comme un facteur structurel : en deçà de ce niveau, les mécanismes d'adaptation et d'absorption des chocs demeurent structurellement compromis.

Dans cette perspective théorique, la vulnérabilité alimentaire ne relève plus d'une logique exclusive d'offre (disponibilité productive), mais d'un écart structurel entre seuil de subsistance théorique et revenu effectif des ménages, selon une approche par la demande et l'accès. Cette définition déplace l'analyse de la seule production agricole vers une approche multidimensionnelle intégrant l'accessibilité économique.

Le modèle adopte une architecture causale hiérarchisée qui structure les interactions entre les différents niveaux de déterminants :

- **Niveau fondamental** : Les dotations en ressources et l'exposition aux chocs exogènes.
- **Niveau intermédiaire** : Les dynamiques socio-économiques et les stratégies agricoles d'ajustement.
- **Niveau final** : Les *outcomes* de sécurité ou d'insécurité alimentaire.

Cette approche systémique, empiriquement fondée et spatialement différenciée, vise à opérationnaliser des instruments de politique publique et des systèmes d'alerte précoce. Ceux-ci sont conçus pour être contextuellement adaptés aux hétérogénéités agro-écologiques et institutionnelles spécifiques au Burundi, permettant ainsi une intervention ciblée sur les leviers critiques de la vulnérabilité.

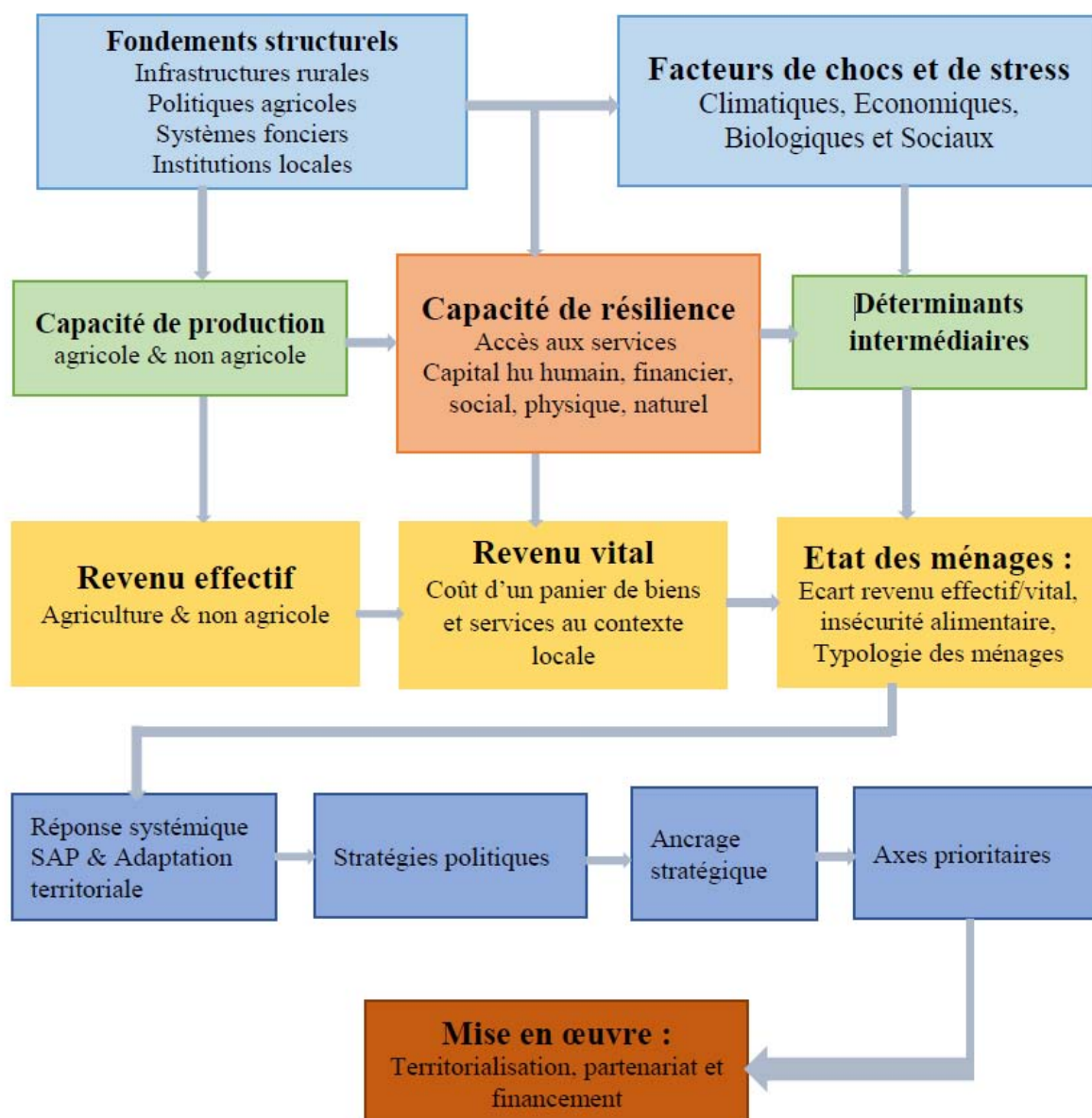


FIGURE 1.4 – Schéma montrant le cadre conceptuel de la recherche

Ce cadre conceptuel offre une architecture analytique, verticale, organisée en cinq niveaux hiérarchiques interconnectés. Il permet d'identifier les déterminants structurels de la vulnérabilité alimentaire, d'analyser le rôle central de la résilience dans la trajectoire des ménages, de mesurer l'écart entre revenus effectifs et besoins essentiels, de traduire les diagnostics en réponses politiques différenciées, et d'opérationnaliser les interventions à travers une mise en œuvre territorialisée et partenariale. En positionnant la capacité de résilience au centre du système, ce cadre reconnaît son caractère transversal et déterminant dans la capacité des ménages ruraux burundais à faire face aux chocs multiples. Il fournit ainsi les fondements analytiques nécessaires pour guider des politiques publiques fondées sur des preuves, différenciées selon les réalités locales, et orientées vers l'objectif ultime d'un revenu vital décent des ménages ruraux au Burundi.

Premier niveau : Fondements structurels et facteurs de chocs

Le premier niveau identifie les déterminants structurels qui conditionnent la capacité productive et la résilience des ménages ruraux, en articulant deux dimensions complémentaires. D'une part, les fondements structurels comprennent les infrastructures rurales, les politiques agricoles, les systèmes fonciers et les institutions locales. Ces éléments constituent le socle institutionnel et matériel à partir duquel les ménages développent leurs activités productives. D'autre part, les facteurs de chocs et de stress se classent en quatre catégories interdépendantes : climatiques, économiques, biologiques et sociaux. Ces facteurs exogènes exercent des pressions constantes sur les systèmes de subsistance des ménages. Ces deux composantes interagissent directement avec les capacités des ménages, influençant leur trajectoire de développement et leur vulnérabilité face aux crises.

Deuxième niveau : Capacités et déterminants intermédiaires

Le deuxième niveau, cœur du cadre conceptuel, s'articule autour de trois composantes interdépendantes. Premièrement, la capacité de production agricole et non agricole est déterminée par la superficie cultivée, l'accès aux intrants modernes, la disponibilité de la main-d'œuvre et la diversification des activités génératrices de revenus. Deuxièmement, la capacité de résilience, positionnée au centre du cadre, représente l'aptitude des ménages à absorber, s'adapter et se transformer face aux chocs. Elle repose sur six formes de capital : l'accès aux services, le capital humain, le capital financier, le capital social, le capital physique et le capital naturel. Cette position centrale reflète son rôle de pivot dans le système de résilience des ménages. Troisièmement, les déterminants intermédiaires correspondent aux caractéristiques socio-économiques des ménages qui modulent la transformation des capacités en résultats concrets. La capacité de résilience, placée au centre, reçoit des influences des fondements structurels et des chocs, tout en interagissant avec les deux autres composantes, illustrant son caractère transversal et systémique.

Troisième niveau : Résultats et état des ménages

Le troisième niveau traduit les conséquences des dynamiques antérieures sur le bien-être des ménages à travers trois indicateurs clés. Le revenu effectif agrège les revenus provenant de l'agriculture et des activités non agricoles, reflétant la capacité productive réelle des ménages. Le revenu vital représente le coût d'un panier de biens et services essentiels, contextualisé selon les réalités locales. Il constitue le seuil de référence pour un niveau de vie décent. L'état des ménages synthétise la situation des ménages à travers trois dimensions : l'écart structurel entre revenu effectif et revenu vital, le niveau d'insécurité alimentaire, et la typologie des ménages selon leurs caractéristiques socio-économiques. Ces indicateurs fournissent un diagnostic empirique rigoureux, indispensable pour identifier les ménages vulnérables et orienter les interventions différenciées.

Quatrième niveau : Réponses stratégiques et institutionnelles

Le quatrième niveau traduit les résultats diagnostiques en un dispositif intégré de réponses, structuré autour de quatre composantes séquentielles. La réponse systémique repose sur le Système d'Alerte Précoce (SAP) territorialisé et l'adaptation territoriale, permettant une anticipation et une gestion proactive des crises alimentaires. Les stratégies politiques

constituent le levier transversal et décisionnel qui oriente l'action publique vers la réduction de la vulnérabilité. L'ancrage stratégique assure l'alignement des interventions avec les politiques nationales et internationales, garantissant la cohérence et la légitimité des actions entreprises. Les axes prioritaires définissent les domaines d'intervention stratégiques, notamment le renforcement de la productivité agricole, l'institutionnalisation du SAP, et la diversification inclusive des sources de revenus. Ces composantes s'enchaînent de manière logique, transformant le diagnostic en orientations stratégiques opérationnelles.

Cinquième niveau : Mise en œuvre opérationnelle

Le cinquième niveau incarne la concrétisation des stratégies à travers la mise en œuvre, qui repose sur trois piliers fondamentaux. La territorialisation correspond à l'adaptation des interventions aux spécificités agro-écologiques et socio-économiques des zones d'intervention. Le partenariat implique la mobilisation d'acteurs multiples (Etat, organisations paysannes, secteur privé, société civile) pour une action coordonnée et synergique. Le financement assure la sécurisation des ressources financières nécessaires à la pérennité des interventions.

Le chapitre suivant vise à opérationnaliser ce cadre conceptuel en dressant un diagnostic géographique et socioéconomique approfondi du Burundi. Il examinera les leviers de résilience existants ainsi que les facteurs structurels de vulnérabilité, tout en mettant en exergue les nuances critiques entre les zones agro-écologiques et les moyens d'existence. Cette contextualisation est indispensable pour délimiter avec précision le périmètre empirique de l'étude et assurer que les analyses ultérieures soient pertinentes au regard des hétérogénéités territoriales et des dynamiques locales.

PORTEE ET CADRAGE DE LA RECHERCHE

Résumé

Ce chapitre caractérise les déterminants structurels de la vulnérabilité des ménages ruraux au Burundi. Pays à forte diversité agro-écologique, le Burundi fait face à une pression démographique soutenue atteignant 480 habitants par kilomètre carré, ce qui entraîne une fragmentation extrême des terres avec moins de 0,5 hectare par ménage et une dégradation accélérée des ressources naturelles. L'agriculture, pilier économique puisqu'elle représente environ 40 % du PIB et 84 % de l'emploi, demeure pluviale et faiblement productive avec une efficacité technique d'environ 48 %, générant un revenu effectif inférieur au revenu vital, seuil contextualisé couvrant les besoins essentiels du ménage. Cet écart de revenu compromet l'accès économique aux aliments, affaiblissant ainsi les piliers d'accès et d'utilisation de la sécurité alimentaire et perpétuant un cycle de pauvreté multidimensionnelle.

La vulnérabilité est par ailleurs exacerbée par le changement climatique caractérisé par une hausse des températures de 0,5 à 1,5 degré Celsius depuis 1970 et des extrêmes pluviométriques accrus, perturbant les cycles culturels et amplifiant les risques d'érosion et d'inondations. Face à ces chocs, les ménages déploient des stratégies de diversification telles que le commerce ou la migration, et s'appuient sur des institutions locales comme les coopératives. Toutefois, leur résilience reste limitée par l'accès restreint au crédit, l'inadéquation des infrastructures et l'insuffisance des filets sociaux, ce qui restreint leur capacité à assurer simultanément un revenu stable et une sécurité alimentaire durable. La distinction analytique entre zones agro-écologiques et zones de moyens d'existence s'avère cruciale pour concevoir des interventions territorialisées ciblant à la fois la productivité, l'accès aux marchés et la protection sociale.

La recherche se positionne sur l'analyse des systèmes agroforestiers comme levier intégré de résilience, en s'appuyant sur le Projet Agroforesterie exécuté par l'Université du Burundi en partenariat avec l'Université Rotterburg. Elle postule que l'agroforesterie diversifiée, associant café, arbres d'ombrage et cultures vivrières, peut simultanément : premièrement, stabiliser et accroître le revenu via la diversification des productions et la valorisation des filières ; deuxièmement, renforcer la sécurité alimentaire par l'amélioration de la disponibilité, de la diversité nutritionnelle et de la stabilité saisonnière ; troisièmement, atténuer les impacts climatiques grâce à la conservation des sols, la régulation hydrique et la séquestration du carbone. Ce cadrage contextuel fonde l'opérationnalisation méthodologique du chapitre suivant, garantissant ainsi l'adaptation des dispositifs d'enquête aux hétérogénéités territoriales et aux dynamiques locales de vulnérabilité identifiées.

2.1 Description géographique du Burundi

Le Burundi est un pays enclavé d'Afrique de l'Est, situé au cœur de la région des Grands Lacs, entre les latitudes 2°15' et 4°30' Sud et les longitudes 28°58' et 30°53' Est. Il couvre une superficie d'environ 27 834 km², dont près de 8% est occupée par des plans d'eau, incluant notamment la partie burundaise du lac Tanganyika, l'un des Grands Lacs africains. Le pays est bordé par trois Etats : la République démocratique du Congo à l'ouest situé à 233 km de frontière, le Rwanda au nord situé à 290 km, et la Tanzanie à l'Est et au Sud situé à 451 km, soit un total de frontières terrestres de 974 km [106].

Le Burundi appartient à la vallée du Grand Rift et se caractérise par un relief très varié, dominé par la crête Congo-Nil, formant des reliefs irréguliers avec des altitudes culminant à 2 670 mètres au mont Heha, le point le plus élevé du pays. Cette crête domine de plus de 1 000 mètres le lac Tanganyika situé à environ 772 mètres d'altitude et est bordée à l'ouest par la dépression d'Imbo une plaine d'effondrement et à l'Est par les plateaux centraux. Cinq régions éco-climatiques principales sont identifiées dans le pays : la basse plaine de l'Imbo, la région délicate de Mumirwa, la zone montagneuse de la crête Congo-Nil, les plateaux centraux, et les dépressions du Kumoso et du Bugesera [107].

Les plateaux centraux occupent la majeure partie du territoire, avec des altitudes entre 1 350 et 2 000 mètres. Ces zones sont formées de collines aux sommets aplatis et de vallées larges, souvent marécageuses, mais progressivement drainées pour l'agriculture. La dépression du Kumoso, à l'Est, s'étend sur 160 km et présente des altitudes entre 1 125 et 1 400 mètres, formant une partie importante du bassin hydrographique du Nil. Au Nord, la cuvette de Bugesera comprend plusieurs lacs et zones humides, avec des altitudes majoritairement inférieures à 1 500 mètres [107].

Le Burundi est soumis à un climat tropical de montagne avec des influences marquées par l'altitude et la topographie variées. Le pays connaît une alternance de saisons sèches et de pluies, avec des variations régionales liées aux zones écologiques précitées. Cette diversité géoclimatique expose le pays à des risques naturels tels que les glissements de terrain dans les zones escarpées et les inondations dans les plaines et zones basses [30].

Sur le plan hydrologique, le territoire burundais est fragmenté entre deux bassins majeurs : celui du Congo à l'ouest, drainé notamment par la rivière Rusizi qui se déverse dans le lac Tanganyika, et celui du Nil à l'Est, comprenant des affluents tels que la Ruvubu. Cette dualité hydrographique contribue à la variété des écosystèmes et des ressources en eau sur le territoire [108].

2.2 Description socio-économique et environnementale du Burundi

Le Burundi est un pays enclavé de la région des Grands Lacs d'Afrique de l'Est, et son économie reste largement dominée par le secteur agricole. Celui-ci contribue à 39,6 % du PIB, génère 84 % des emplois et assure 95 % de l'approvisionnement alimentaire national [100]. Le pays repose sur une dualité agricole structurante : d'une part, les cultures vivrières comme la banane, le haricot, le manioc et le maïs occupent environ 90 % des superficies cultivées et ces cultures sont principalement destinées à l'autoconsommation, tandis que d'autre part, les cultures d'exportation telles que le café et le thé génèrent

l'essentiel des recettes extérieures, avec le café qui représente à lui seul 60 à 70 % des revenus d'exportation [78, 10]. Malgré un potentiel agronomique réel lié à la diversité des zones climatiques, à savoir l'Imbo, les hautes terres et le Moso, la productivité agricole reste faible : les rendements du haricot atteignant 0,8 t/ha, ceux du maïs avec 1,2 t/ha et ceux du riz avec 2,5 t/ha sont inférieurs de 40 à 60 % aux potentiels atteignables, et cela en raison d'une faible utilisation d'intrants car moins de 20 % de semences améliorées sont utilisées, d'une mécanisation quasi inexistante puisque moins de 5 % des ménages y ont recours, et d'un déficit d'irrigation car moins de 3 % des terres sont irriguées [4, 31, 12]. L'économie burundaise, avec un PIB par habitant d'environ 210 USD, reste vulnérable aux chocs climatiques et à la volatilité des prix internationaux, bien qu'une reprise récente, avec une croissance de 3,5 % en 2024 projetée à 5,9 % en 2025, soit portée par les investissements dans les infrastructures et le secteur minier [109, 110].

Sur le plan environnemental, le Burundi abrite des écosystèmes d'exception, notamment le lac Tanganyika qui est l'un des lacs les plus riches en biodiversité au monde avec environ 250 espèces de poissons, ainsi que les parcs nationaux de la Kibira et de la Ruvubu [111, 112]. Cependant, ces écosystèmes subissent de fortes pressions anthropiques liées à une densité de population très élevée, soit 480 habitants/km² en 2024, ce qui entraîne la conversion des forêts en terres agricoles, la surexploitation des ressources ligneuses et une déforestation annuelle estimée entre 0,5 et 1 % [7, 97]. La perte cumulée du couvert forestier atteint environ 30 % entre 1990 et 2020, ce qui contribue à l'érosion des sols, à la perte de biodiversité et à l'aggravation de la vulnérabilité climatique [113]. Des efforts de reforestation sont en cours, avec 5 000 ha reboisés entre 2015 et 2018, et les cadres nationaux comme le PNA et la CDN visent 10 000 ha supplémentaires d'ici 2030 ainsi que la promotion de l'agroforesterie sur 50 000 ha [30, 114].

Malgré ces défis structurels, le Burundi affiche des signes de transformation positive, et cette dynamique est portée par la résilience de sa population ainsi que par des investissements croissants dans les infrastructures, l'énergie et les services tels que les télécommunications, le mobile banking et le tourisme naissant [109].

2.3 Pression démographique et fragmentation des terres agricoles

Le Burundi est un pays à fort potentiel malgré ses défis, car il dispose d'une population dynamique estimée à 12,33 millions d'habitants en 2025 et d'une riche diversité culturelle portée par une jeunesse qui représente 22,5 % de la population âgée de moins de 15 ans [11]. Cette vitalité démographique constitue à la fois un atout, c'est-à-dire un potentiel de développement, et une contrainte majeure dans un contexte de ressources naturelles limitées et de pression foncière croissante. Selon Vico [115], le taux de croissance démographique élevé, soit environ 1,95 % par an, a conduit à une fragmentation extrême des terres agricoles, si bien que la taille moyenne des exploitations est passée de 1,2 hectare dans les années 1980 à moins de 0,5 hectare par ménage en 2020. Cette réduction drastique de la superficie disponible par ménage limite la capacité des producteurs à générer un revenu agricole suffisant pour couvrir leurs besoins alimentaires et non alimentaires, ce qui les expose ainsi à un déficit structurel de revenu vital.

La fragmentation des terres a également intensifié la surexploitation des sols, entraînant une baisse de la fertilité et des rendements agricoles, et ce phénomène est bien documenté

par Jeanneaux [116] qui note une diminution de 30 % des rendements céréaliers au Burundi entre 2000 et 2015. Cette baisse de productivité aggrave la dépendance des ménages aux cultures vivrières de base, à savoir le manioc, le maïs et les haricots, lesquelles sont souvent insuffisantes pour assurer une alimentation diversifiée et équilibrée [117]. La situation est particulièrement critique dans les zones densément peuplées comme les hauts plateaux centraux, où la concurrence pour les terres cultivables a également conduit à des conflits fonciers, réduisant ainsi encore l'accès des ménages les plus pauvres aux ressources productives [118]. En conséquence, la pression démographique et la fragmentation foncière qui en découle constituent un obstacle majeur à la disponibilité alimentaire, c'est-à-dire au premier pilier de la sécurité alimentaire selon la FAO [30], et elles limitent les opportunités de diversification alimentaire nécessaires à une sécurité nutritionnelle adéquate, tout en creusant l'écart entre le revenu effectif des ménages et le revenu vital.

2.4 Agriculture et productivité agricole au Burundi

L'agriculture constitue le pivot de l'économie burundaise, sur le plan employabilité et contribution au PIB. Elle repose sur de petites exploitations familiales d'environ 0,5 hectare en moyenne, lesquelles pratiquent une agriculture de subsistance. Les systèmes de culture associent principalement des cultures vivrières, comme le maïs, le riz, le manioc, la banane, les haricots et la patate douce, ainsi que des cultures de rente telles que le café et le thé [119].

Le calendrier agricole s'organise autour de trois saisons : la saison A appelée Agatasi qui s'étend d'octobre à janvier, puis la saison B appelée Impeshi de février à mai, ces deux saisons étant séparées par une courte pause sèche allant de mi-janvier à mi-février, et enfin la saison C appelée Ici qui se déroule de juin à septembre. Durant cette dernière saison qui est plus aride, les producteurs privilégient des cultures résilientes comme les légumes, les céréales et les tubercules, ainsi que le riz irrigué dans les zones humides et les bas-fonds [120]. Le pays dispose par ailleurs d'importantes ressources hydriques issues des bassins du Nil et du Congo, ce qui offre un potentiel pour l'irrigation et la diversification fruitière et légumière, gage de sécurité alimentaire et d'exportations [121].

Cependant, la productivité agricole reste faible, car les rendements des cultures principales sont très inférieurs à leur potentiel agronomique, avec une efficacité technique moyenne estimée à 48% lors des campagnes 2011-2012, ce qui suggère qu'à intrants constants, la production pourrait être doublée grâce à de meilleures pratiques [122]. Les principaux freins incluent la fragmentation des parcelles, la faible mécanisation, l'accès limité aux intrants de qualité comme les semences améliorées et les engrais, ainsi qu'une dépendance quasi totale à la pluviométrie, ce qui accroît la vulnérabilité climatique.

La stratégie agricole nationale [121] souligne que si les petites exploitations peuvent afficher une meilleure efficacité à l'hectare, leur exiguïté limite cependant la sécurité alimentaire durable et les revenus nécessaires pour sortir de la pauvreté. Depuis 1982, la production agricole par habitant a chuté de 28%, et ce sous l'effet conjugué d'une faible productivité et d'une forte croissance démographique.

Des progrès récents sont néanmoins à noter, notamment la vulgarisation de pratiques améliorées, la hausse de l'usage des engrais via le Programme National de Subvention des Engrais du Burundi, également connu sous le sigle PNSEB, ainsi que la réhabilitation des zones humides, lesquelles ont accru les surfaces cultivables et les rendements.

Les recherches recommandent de renforcer l'accès aux infrastructures routières, aux marchés et au financement, ainsi que l'autonomisation économique des jeunes et des femmes. Enfin, pour une résilience durable face au changement climatique, la diversification des productions et l'adaptation du secteur sont prioritaires [100].

2.5 Diversité agro-écologique et représentativité des systèmes agricoles

Le Burundi se distingue par une remarquable diversité agro-écologique qui reflète la variété de ses systèmes agricoles, soutenus par des conditions climatiques et géographiques variées. Avec des précipitations annuelles allant de 1 200 à 2 000 mm selon les régions, le pays bénéficie de sols fertiles qui favorisent une agriculture diversifiée, combinant cultures vivrières et cultures de rente comme le café et le thé, qui représentent 50 % des revenus d'exportation [123]. Les plaines fertiles, notamment dans les zones de basse altitude, soutiennent la riziculture irriguée, tandis que les plateaux vallonnés aux températures modérées permettent des pratiques agricoles adaptées aux topographies accidentées [98]. Les données climatologiques disponibles montrent que le Burundi a subi des variations significatives de ses paramètres climatiques au cours des dernières décennies.

Selon une étude réalisée par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) en collaboration avec la FAO [30], les températures moyennes ont augmenté de 0,5 à 1,5 °C depuis les années 1970, avec des projections indiquant une hausse supplémentaire de 1,5 à 2,5 °C d'ici 2050 [8]. Parallèlement, les précipitations annuelles ont connu une variabilité accrue, avec des périodes de sécheresse prolongées alternant avec des épisodes pluvieux intenses. Ces événements extrêmes perturbent les cycles agricoles, menaçant la stabilité des systèmes de production vivrière. Une étude publiée dans *Climate Change and Development* (2020) souligne que les régions du Nord et de l'Est du Burundi, déjà confrontées à des sols pauvres et à une faible capacité de rétention d'eau, sont particulièrement exposées à ces variations climatiques.

2.6 Vulnérabilité et dispositions de résilience climatique au Burundi

Le Burundi est un pays particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, et cela en raison de son relief accidenté, de sa dépendance à l'agriculture pluviale ainsi que de la fragilité socio-économique de sa population. Une étude intégrée de la vulnérabilité climatique réalisée dans le cadre du projet ACCES, dont l'intitulé complet est *Adaptation au Changement Climatique pour la protection des ressources en eau et sol au Burundi*, met en lumière des zones qualifiées de *hotspots* présentant des risques élevés, notamment liés à l'érosion des sols, à la sécheresse et à la variabilité des précipitations [124]. Ces risques sont accentués par la forte pression démographique et par l'exploitation intensive des ressources naturelles, lesquelles dégradent les terres et réduisent ainsi la résilience des écosystèmes.

Sur le plan climatique, les projections pour le 21^e siècle montrent une augmentation générale des températures, et ce particulièrement durant la saison sèche, avec une tendance à l'allongement de cette période qui devient plus chaude et plus aride. Parallèlement, les

précipitations annuelles devraient globalement augmenter, surtout dans les régions de l'Est et du Sud, mais cette augmentation s'accompagne d'une variabilité accrue et d'épisodes plus fréquents d'extrêmes pluviométriques, ce qui accroît les risques d'inondations et de glissements de terrain [125]. Ces changements modifient la saisonnalité des cultures et imposent ainsi une adaptation des pratiques agricoles.

La vulnérabilité socio-économique est très marquée au Burundi, où près de 98% de la population est exposée aux impacts négatifs du changement climatique, avec une distribution spatiale inégale. Les régions du Nord-Est et de l'Est du pays sont particulièrement touchées, et cela en raison de la dégradation accélérée des terres, avec une perte estimée à 5,2% de la superficie nationale depuis 2020, ainsi que d'une plus grande insuffisance des infrastructures agricoles et sociales [126].

En effet, plusieurs mesures d'adaptation sont en cours de mise en œuvre, notamment la gestion durable des sols, la restauration des bassins versants vulnérables, le renforcement des systèmes d'alerte précoce ainsi que l'appui aux pratiques agricoles adaptées au nouveau climat. Toutefois, la résilience reste limitée par des contraintes institutionnelles, techniques et financières. Le MINEAGRIE[8] souligne l'importance d'une approche multi-sectorielle intégrée, laquelle encourage la diversification des activités économiques rurales et l'implication communautaire dans les projets d'adaptation.

2.7 Nuances entre zones agro-écologiques et des moyens d'existence

Le Burundi est réparti en plusieurs zones agroécologiques qui reflètent la diversité des conditions biophysiques, notamment le climat, le relief, les sols et l'altitude. Selon les classifications reconnues, cinq principales zones agroécologiques sont identifiées, à savoir la plaine de l'Imbo à l'ouest dont l'altitude se situe entre 700 et 1000 mètres, puis les contreforts du Mumirwa avec une altitude comprise entre 1000 et 1500 mètres, ensuite la crête Congo-Nil qui s'étend de 1500 à 2600 mètres, puis le plateau central situé entre 1400 et 2000 mètres, et enfin les dépressions du Kumoso et Bugesera dont l'altitude varie de 1200 à 1500 mètres. Ces zones se distinguent par leurs caractéristiques pédoclimatiques, par la fertilité des sols qui est plus élevée dans l'Imbo mais plus faible sur la crête, ainsi que par les types de végétation, et cela régule ainsi la production agricole et la biodiversité locale [127]. Par exemple, la plaine de l'Imbo bénéficie de sols relativement fertiles et de précipitations modérées, mais sa spécificité majeure réside dans son important réseau hydrographique ainsi que dans la présence de nappes phréatiques proches de la surface, ce qui y favorise particulièrement la riziculture irriguée et le maraîchage de contre-saison. En revanche, la crête Congo-Nil, qui est plus élevée et sujette à l'érosion, est davantage adaptée aux cultures pérennes de haute altitude comme le thé et le café.

En parallèle, les zones des moyens d'existence au Burundi constituent une segmentation socio-économique et territoriale des populations rurales basée sur leur accès aux ressources naturelles, infrastructures, marchés et activités génératrices de revenus. Ces zones traduisent la réalité des conditions de vie, la vulnérabilité socio-économique et la diversification des stratégies d'adaptation des ménages aux contraintes environnementales et économiques.

La distinction fondamentale entre ces deux types de zones tient donc à leur origine et

objectif : les zones agroécologiques décrivent avant tout les conditions naturelles physiques et écologiques qui déterminent les potentialités agricoles[128], tandis que les zones des moyens d'existence reflètent les réalités socio-économiques et l'organisation des territoires dans leur interaction avec l'environnement. La combinaison de ces deux typologies est cruciale pour la formulation de politiques agricoles et de développement territorial adaptées, favorisant la sécurité alimentaire et la résilience des populations face aux défis climatiques et économiques [129]. La figure 2.1 présente un cadre analytique des stratégies de subsistance des ménages ruraux, reliant les contraintes structurelles aux processus d'adaptation, puis aux stratégies adoptées et enfin aux résultats économiques, allant d'un faible revenu à un revenu élevé ou à l'accumulation d'actifs. Elle met en lumière comment les facteurs contextuels, tels que la croissance démographique, le manque de technologie ou l'échec des politiques, façonnent les choix des ménages et déterminent le niveau du bien-être économique.

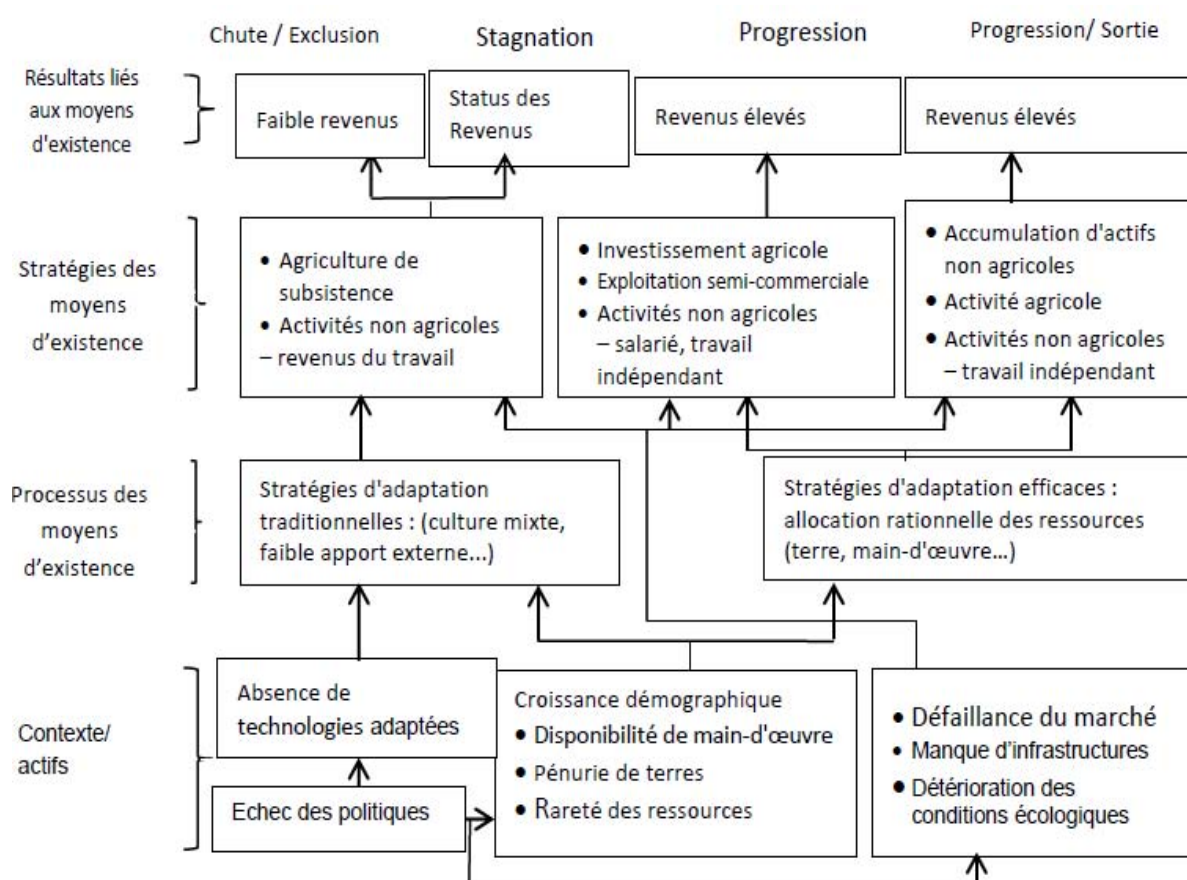


FIGURE 2.1 – Schéma montrant les stratégies et contraintes des moyens de subsistance
Adapté de Niragira [10]

Le schéma illustre les résultats, stratégies et contraintes liés aux moyens de subsistance des ménages au Burundi, un pays où l'agriculture constitue la principale source de revenu pour la majorité de la population rurale. Les résultats en termes de moyens de subsistance sont classés en trois catégories : faible revenu, revenu élevé et très élevé. Ces catégories dépendent des stratégies adoptées par les ménages pour assurer leur subsistance, dans un contexte marqué par des défis climatiques, économiques et infrastructurels. Le Burundi, avec ses zones de moyens d'existence variées, fait face à une forte dépendance à

l'agriculture de subsistance, rendant les ménages vulnérables aux aléas climatiques et aux contraintes structurelles.

Les stratégies des moyens de subsistance identifiées reflètent les réalités socio-économiques du Burundi. Les ménages ayant un faible revenu s'appuient principalement sur l'agriculture de subsistance, les activités extra-agricoles comme le petit commerce et le revenu du travail occasionnel. Ceux avec un revenu élevé diversifient leurs activités en investissant dans l'exploitation agricole semi-commerciale et les activités non agricoles principalement le salariat ou le travail indépendant. Les ménages à revenu très élevé, quant à eux, adoptent des stratégies plus intensives, telles que l'accumulation d'actifs non agricoles, l'activité agricole commerciale et le travail indépendant qualifié. Le processus de création des moyens de subsistance est influencé par des stratégies d'adaptation traditionnelles, telles que les cultures mixtes et les faibles intrants, qui sont courantes au Burundi en raison des ressources limitées des agriculteurs. Ces pratiques, bien qu'adaptées aux conditions locales, sont souvent insuffisantes pour générer des revenus élevés, surtout dans un contexte de variabilité climatique croissante. Par ailleurs, le contexte et les actifs des ménages, comme l'accès à la terre, à la main-d'œuvre et aux intrants, jouent un rôle déterminant.

Enfin, l'absence de technologies adaptées, la croissance démographique entraînant une pénurie de terres, la raréfaction des ressources naturelles, la défaillance des marchés et le manque d'infrastructures, ainsi que la dégradation des conditions écologiques sont les contraintes majeures qui entraînent l'échec des politiques agricoles au Burundi. Ces facteurs, exacerbés par la pression démographique et les impacts du changement climatique, limitent la capacité des ménages à améliorer leurs moyens de subsistance.

2.8 Présentation de la carte des zones de moyens d'existence du Burundi

La carte des zones de moyens d'existence du Burundi présente une segmentation du territoire national en neuf zones agro-écologiques distinctes (BI01 à BI09), reflétant la diversité des systèmes de production et des conditions environnementales du pays. Ces zones, délimitées sur la base de critères combinant l'altitude, les régimes pluviométriques, les types de sols et les pratiques agricoles dominantes, s'étendent depuis la plaine littorale de l'Imbo (BI07) bordant le lac Tanganyika à l'ouest, jusqu'aux dépressions de l'Est (BI03) en passant par les crêtes Congo-Nil (BI02) qui traversent le pays du nord au sud. Cette zonage met en évidence la forte hétérogénéité territoriale du Burundi, où se succèdent des étages écologiques allant des zones de basse altitude (moins de 1 000 m) aux hautes altitudes (plus de 2 000 m), chacune présentant des potentialités et des contraintes spécifiques pour l'agriculture et les moyens de subsistance des ménages ruraux.

Chaque zone de moyens d'existence se caractérise par des systèmes culturels et des stratégies de subsistance adaptés à son contexte pédoclimatique. Les plateaux humides (BI08) et les plateaux secs de l'Est (BI09) dominent la partie Centre-Est du pays, tandis que les hautes altitudes du Nord (BI05) et du Sud (BI06) occupent les régions montagneuses les plus élevées. Les dépressions du Nord (BI04), plus arides, contrastent avec la fertilité des zones de la Crête Congo-Nil (BI02). Cette différenciation spatiale des conditions de production explique en grande partie les disparités régionales observées en termes de sécurité

alimentaire, de revenus agricoles et de vulnérabilité aux chocs climatiques. La compréhension de cette zonation est donc essentielle pour élaborer des politiques agricoles et des interventions de développement territorial adaptées aux réalités locales, visant à renforcer la résilience des ménages ruraux et à améliorer leur accès au revenu vital décent.

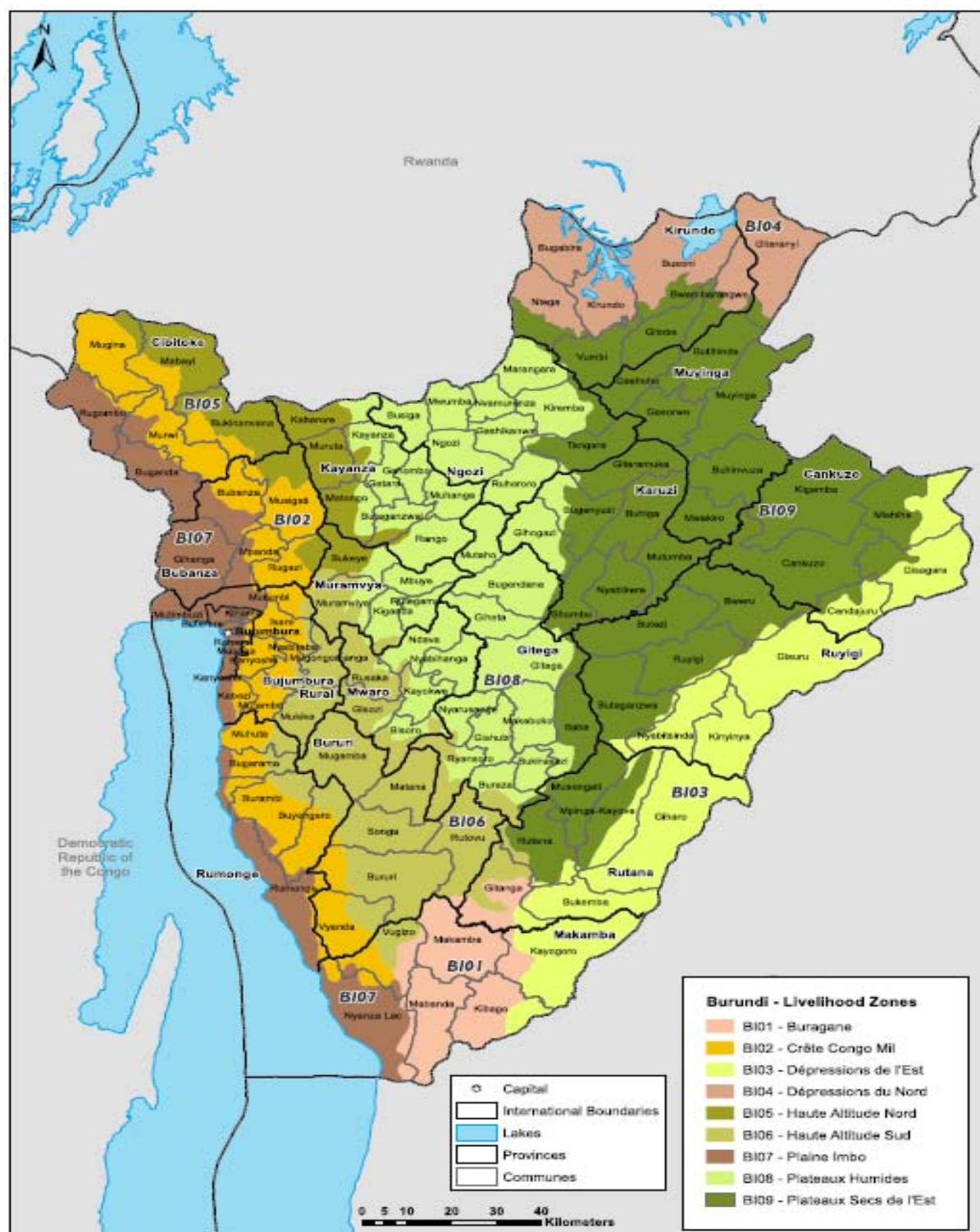


FIGURE 2.2 – Carte des zones des moyens d’existences du Burundi

2.9 Diversification des sources de revenus au Burundi

La diversification des sources de revenus au Burundi constitue un enjeu crucial pour renforcer la résilience économique des populations, réduire la pauvreté rurale, et soutenir un développement durable. Cependant, le secteur agricole, pilier économique des ménages ruraux, est caractérisée par une forte prédominance de cultures vivrières traditionnelles et une faible transformation des produits, limitant la création de valeur ajoutée locale et le développement d'activités génératrices de revenus diversifiées [130].

Néanmoins, des efforts de diversification sont en cours, notamment à travers le développement des filières horticoles, l'élevage modernisé, et la valorisation de nouveaux produits agricoles à fort potentiel d'exportation. Les bassins versants aménagés et les systèmes d'irrigation, offrent aussi des opportunités pour accroître la production de cultures de rente et horticoles, apportant une diversification aux revenus agricoles traditionnels [131].

Au-delà de l'agriculture, la vision stratégique « Burundi 2025 » et les projets régionaux tels que le Projet intégré de développement Burundi-Rwanda (BRIDEP) visent à moderniser l'agriculture tout en promouvant l'entrepreneuriat rural, l'agro-industrialisation et l'intégration commerciale régionale, favorisant ainsi la création d'emplois non agricoles. Ces initiatives soutiennent l'économie rurale en diversifiant les activités vers l'agro-transformation, la pêche, l'artisanat, et les services liés au marché agricole. La digitalisation progressive basée sur la géolocalisation, les plateformes numériques d'accès aux intrants et marchés facilite l'inclusion économique et l'innovation entrepreneuriale des jeunes et des femmes.

Par ailleurs, la diversification des revenus constitue une stratégie d'adaptation à la vulnérabilité climatique, en réduisant la dépendance exclusive aux récoltes pluviales et en favorisant des activités génératrices de revenus alternatives ou complémentaires. La FAO souligne ainsi l'importance d'une diversification durable des moyens d'existence pour renforcer la sécurité alimentaire tout en offrant des revenus stables aux ménages ruraux.

Ainsi, bien que la structure économique du Burundi reste largement dominée par une agriculture vivrière traditionnelle, la diversification des sources de revenus s'impose comme une priorité pour la transition vers un modèle plus résilient et inclusif. Elle passe par une modernisation agricole intégrée à des politiques de développement rural multisectorielles, l'exploitation optimale des potentialités agroécologiques et hydriques du pays, et un appui accru aux capacités entrepreneuriales rurales [100].

2.9.1 Le petit commerce comme source de revenu non agricole au Burundi

Le petit commerce est une activité non agricole prédominante dans les zones rurales du Burundi, souvent adopté pour compléter les revenus agricoles. Les ménages s'engagent dans la vente de produits locaux ou de biens de consommation courante achetés dans les centres urbains. Une étude de Irankunda [132] montre que le commerce informel représente une source de revenu significative pour les femmes rurales, qui dominent ce secteur en vendant des produits sur les marchés locaux. Cependant, les contraintes structurelles, telles que le manque d'infrastructures routières et l'accès limité au capital, freinent son expansion. En milieu rural, les petits commerçants dépendent souvent de microcrédits informels pour démarrer leurs activités, ce qui limite leur capacité à investir dans des

stocks plus importants [133]. Malgré ces défis, le petit commerce offre une flexibilité et une stabilité financière que l'agriculture seule ne peut garantir, surtout en période de sécheresse ou d'inondations fréquentes au Burundi.

2.9.2 L'artisanat : une valorisation des compétences traditionnelles

L'artisanat, incluant la vannerie, la poterie et la fabrication d'outils, est une autre stratégie non agricole clé dans les zones rurales burundaises. Cette activité tire parti des compétences traditionnelles et des ressources locales, pour générer des revenus. Selon le bulletin scientifique sur l'environnement [134], dans la région de Bubanza, les artisans ruraux, souvent des femmes, produisent des paniers et des nattes vendus sur les marchés locaux ou exportés vers les pays voisins. Ces activités permettent de diversifier les revenus et de réduire la dépendance aux cultures de rente comme le café, dont les prix fluctuent sur le marché international [135]. Cependant, l'artisanat burundais souffre d'un manque de modernisation et de formation, ainsi que de la concurrence avec des produits importés à bas prix [129]. Des initiatives gouvernementales, comme le Programme National de Développement (PND) révisé, visent à soutenir ce secteur par des formations et l'accès à des outils modernes, mais leur mise en œuvre reste limitée dans les zones rurales.

2.9.3 La migration temporaire comme levier de diversification économique

La migration temporaire, souvent saisonnière, est une stratégie courante au Burundi pour diversifier les revenus des ménages ruraux [136]. Les jeunes hommes et femmes migrent vers des centres urbains, ou vers des pays voisins comme la Tanzanie, pour travailler dans la construction, le commerce informel ou les plantations. Une analyse de Gahungu [137] indique que les envois de fonds issus de ces migrations représentent une part croissante des revenus des ménages, contribuant à environ 15-20 % du budget familial. Ces fonds sont souvent investis dans l'achat de bétail ou l'amélioration des terres agricoles, renforçant ainsi la résilience économique [138]. Cependant, la migration temporaire comporte des risques, notamment l'exploitation sur les lieux de travail et la perturbation des structures familiales, particulièrement dans un contexte de forte pression démographique [30].

2.9.4 Stratégies non agricoles et durabilité des revenus

Les stratégies non agricoles ont un impact significatif sur le revenu des ménages en réduisant leur vulnérabilité aux aléas climatiques et économiques. Une étude de la Banque Mondiale [2] dans la région des Grands Lacs montre que les ménages diversifiés sont 25 % moins susceptibles de tomber sous le seuil de pauvreté que ceux dépendant uniquement de l'agriculture. Cette diversification est cruciale pour améliorer l'accès à l'éducation et à la santé. Les revenus du petit commerce ou de la migration permettent aux familles de payer les frais scolaires, un facteur clé de développement humain [139]. Cependant, la durabilité de ces stratégies est menacée par des facteurs qui exacerbent les inondations et les sécheresses, et le manque d'investissements dans les infrastructures rurales [140]. Le Plan National d'Adaptation (NAP) du Burundi met l'accent sur la diversification agricole et non agricole comme réponse à ces défis, mais son financement reste insuffisant.

2.9.5 L'accès au crédit : un potentiel sous-exploité

L'accès au crédit est une intervention clé pour permettre aux ménages ruraux d'investir dans des activités productives, qu'elles soient agricoles ou non agricoles. Les institutions de micro-finance, ont offert des prêts aux petits agriculteurs et commerçants, augmentant leurs revenus de 12 % en moyenne [141]. Cependant, les taux d'intérêt élevés souvent supérieurs à 20 % et le manque de garanties, notamment pour les femmes et les jeunes, restreignent l'accès à ces services. Cette recherche montre que seuls 15 % des ménages ruraux ont bénéficié de microcrédits formels en 2021, en raison de la faible pénétration des institutions financières dans les zones rurales [142]. L'accès au crédit pourrait transformer le revenu vital s'il était accompagné de formations financières et d'un assouplissement des conditions d'éligibilité, mais son impact reste limité dans le contexte actuel.

2.10 Rôle des institutions et des filets sociaux dans le renforcement de la résilience

La résilience communautaire, définie comme la capacité d'une communauté à anticiper, absorber, s'adapter et se remettre des chocs et des stress, est un concept central pour comprendre les dynamiques sociales et économiques dans les contextes fragiles comme celui du Burundi [143]. Dans ce pays, marqué par des décennies de conflits, de pauvreté structurelle et de vulnérabilité climatique, les institutions locales et les filets sociaux jouent un rôle crucial dans le renforcement de cette résilience. Parmi ces institutions, les coopératives, les associations villageoises et les programmes d'appui externes sont particulièrement importants.

2.10.1 Les coopératives comme leviers de résilience économique

Les coopératives agricoles constituent un levier de résilience économique, particulièrement dans un contexte marqué par la vulnérabilité socio-économique et climatique des populations rurales. Originellement introduites pendant la période coloniale comme outils d'éducation sociale et agricole au Burundi, elles sont aujourd'hui reconnues pour leur capacité à mobiliser les énergies paysannes autour d'objectifs conjoints de sécurité alimentaire, d'accélération du développement rural et de réduction de la pauvreté.

Les coopératives fournissent un ensemble de services essentiels à leurs membres, notamment l'encadrement technique à la production, l'approvisionnement en intrants agricoles modernes, le stockage, la transformation et la commercialisation collective des produits. Elles proposent aussi des activités connexes telles que le crédit agricole, l'assurance-santé, la formation au petit entrepreneuriat, ainsi que des actions transversales comme éducation à l'épargne, alphabétisation et travaux communautaires qui contribuent au renforcement du tissu socio-économique local. Ce bouquet de services permet aux exploitants agricoles d'améliorer leur productivité, de diversifier leurs revenus et de mieux gérer les risques à la vulnérabilité [144].

Par ailleurs, les coopératives facilitent l'accès aux marchés, un facteur clé de valorisation des productions agricoles. Elles favorisent la structuration économique des filières, ce qui améliore la négociation de prix et la réduction des coûts de transaction, offrant ainsi une meilleure stabilité des revenus pour leurs membres. Cet aspect est crucial pour la résilience

économique, car il réduit la vulnérabilité face aux fluctuations des marchés et aux aléas climatiques affectant la production.

Cependant, malgré leur potentiel, certaines coopératives peinent encore à transformer de manière significative les conditions de vie des adhérents en raison de défis comme la gouvernance interne, le faible capital social, les limitations techniques et les contraintes financières. Le soutien institutionnel renforcé, via des programmes étatiques et partenariats internationaux comme le PNUD et le FIDA, vise à professionnaliser ces structures, notamment à travers le renforcement des capacités, la fourniture d'équipements de transformation, et l'appui à l'inclusion économique des groupes vulnérables [101]. Ainsi, le rôle des coopératives s'étend bien au-delà de la simple mutualisation des moyens de production ; elles sont des vecteurs d'autonomisation, de solidarité économique, et d'adaptation aux défis multisectoriels, contribuant ainsi à la durabilité et à la stabilité socio-économique dans un contexte de fragilité.

2.10.2 Les associations villageoises et leur rôle dans la cohésion sociale

Les associations villageoises, souvent appelées « groupements », sont des structures communautaires informelles ou semi-formelles qui jouent un rôle central dans la gestion collective des ressources et la résolution des conflits locaux [145]. Elles sont particulièrement importantes dans un contexte où l'Etat a une faible présence sur le terrain et où les services publics sont limités. Ces associations permettent aux communautés de s'organiser autour de projets collectifs, tels que la construction d'infrastructures communautaires ou la mise en place de systèmes de gestion des ressources naturelles. L'un des aspects les plus significatifs des associations villageoises est leur contribution à la cohésion sociale. En favorisant la participation inclusive et en renforçant les normes de solidarité, elles aident à atténuer les tensions ethniques et sociales, héritées des conflits passés [146]. Les initiatives telles que les "bacs d'épargne communautaire" permettent aux femmes et aux jeunes d'accéder à des microcrédits, améliorant ainsi leur autonomisation économique et sociale [147]. Toutefois, leur efficacité peut être limitée par des problèmes de leadership, de corruption locale ou de désengagement des membres face à des résultats insuffisants.

2.11 Agroforesterie, revenu vital et résilience

Dans le contexte de vulnérabilité climatique au Burundi, la promotion de systèmes agricoles résilients et durables s'impose comme une priorité stratégique. La présente recherche s'inscrit précisément dans cette dynamique, en s'appuyant sur l'expérience concrète du projet agroforestier burundo-allemand, lequel est financé par le Ministère d'Etat du Bade-Wurtemberg et mis en œuvre par l'Université du Burundi à travers la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie, en partenariat avec le Consortium des Coopératives Caféicoles du Burundi. Ce projet vise à renforcer la résilience économique et environnementale des petits producteurs en intégrant le café comme culture commerciale centrale au sein de systèmes agroforestiers diversifiés, combinant arbres d'ombrage, cultures vivrières et pratiques de conservation des sols. Cette approche s'adapte spécifiquement aux contraintes structurelles des exploitations rurales, puisque les ménages confrontés à l'exiguïté foncière privilégient généralement les arbres de bordure afin d'optimiser l'espace productif sans réduire les surfaces cultivables. Par ailleurs, les producteurs évoluant sur des terrains

pentus ou dégradés adoptent majoritairement des haies antiérosives, lesquelles stabilisent les sols tout en fournissant du bois et du fourrage. En complément de ces dispositifs, les systèmes d'arbres dispersés dans les parcelles agricoles et les jardins de case constituent des pratiques répandues, car ils permettent une diversification rapide des ressources, améliorent la fertilité micro-locale et assurent un complément alimentaire direct aux ménages. En articulant ces différentes configurations agroforestières autour de la filière café, le projet répond simultanément aux impératifs de sécurité alimentaire, de convergence vers un revenu vital décent et d'atténuation des impacts du changement climatique, conformément aux recommandations de la littérature scientifique sur l'agroforesterie tropicale [148, 149, 150].

TABEAU 2.1 – Quelques espèces fréquentes dans les systèmes agroforestiers de la zone d'étude

Espèce	Nom vernaculaire	Type de système	Usages
<i>Albizia gummi-fera</i>	Umusebeyi	Arbres dispersés	Fertilité des sols, bois de service
<i>Grevillea robusta</i>	Igereveriyo	Bordures de parcelles, arbres dispersés	Bois de construction, bois d'œuvre
<i>Calliandra calothyrsus</i>	Kaliyandara	Haies antiérosives, clôtures vivantes	Érosion hydrique, fourrage, fertilité des sols, tuteurs
<i>Leucaena diversifolia</i>	Lesena	Haies, jardins de case	Fertilité, fourrage
<i>Cordia africana</i>	Umuwugangoma	Arbres dispersés dans les caféières	Ombrage, fabrication tambours
<i>Markhamia lutea</i>	Umusave	Bordures, arbres dispersés	Délimitation parcellaire, apiculture
<i>Sesbania sesban</i>	Umunyegenyege	Jardins de case	Fertilité, pharmacopée
<i>Faidherbia albida</i>	Acacia albida	Parcs agroforestiers, champs	Fertilité, fourrage saison sèche
<i>Cedrela</i> sp.	Isederera	Arbres dispersés	Bois d'œuvre
<i>Ficus thonin-gii</i>	Ikivumu	Arbres dispersés, clôtures vivantes	Bois de service

TABLEAU 2.2 – Quelques espèces fréquentes dans les systèmes agroforestiers de la zone d'étude (suite)

Espèce	Nom vernaculaire	Type de système	Usages
<i>Persea americana</i>	Ivoka	Arbres dispersés	Fruits
<i>Mangifera indica</i>	Umwembe	Arbres dispersés dans les caféières, haies	Fruits, ombrage, bois de service
<i>Psidium guajava</i>	Ipera	Jardins de case, arbres dispersés	Fruits, pharmacopée
<i>Carica papaya</i>	Ibipapayi	Jardins de case	Fruits, feuilles médicinales

Le tableau 2.1 présente dix espèces agroforestières fréquemment utilisées au Burundi, lesquelles illustrent la diversité des stratégies d'adaptation des producteurs ruraux face aux contraintes biophysiques et socio-économiques. Ces arbres, désignés par leurs noms scientifiques et vernaculaires, sont intégrés dans des configurations spatiales variées telles que les arbres dispersés, les alignements, les haies vives ou les jardins de case, en fonction des objectifs prioritaires des ménages. Ainsi, des espèces fixatrices d'azote comme *Albizia coriaria* et *Sesbania sesban* sont privilégiées pour restaurer la fertilité des sols sur les petites exploitations, tandis que *Calliandra calothyrsus* et *Croton macrostachyus* sont mobilisées en haies pour lutter contre l'érosion hydrique sur les versants. Par ailleurs, des espèces à double vocation comme *Grevillea robusta* et *Eucalyptus spp.* répondent aux besoins urgents en bois de construction et en revenus monétaires, alors que *Cordia africana* et *Markhamia lutea* optimisent l'ombrage des caféières tout en diversifiant les sources de revenus par le miel ou le bois d'œuvre[151]. Cette pluralité d'usages confirme que l'agroforesterie au Burundi ne constitue pas un modèle unique, mais un ensemble de pratiques modulables, permettant aux exploitants de combiner sécurité alimentaire, résilience climatique et amélioration du revenu réel [150, 148].

2.12 Conclusion

Cette recherche s'inscrit dans une démarche intégrée visant à comprendre et adresser la vulnérabilité et la résilience des ménages ruraux au Burundi, dans un contexte marqué par des défis socio-économiques majeurs, une pression démographique accrue, et des impacts croissants du changement climatique. Le Burundi, pays enclavé d'Afrique de l'Est, présente une géographie variée, des reliefs accidentés et une diversité agro-écologique qui influencent directement les systèmes agricoles vivriers, pierre angulaire de l'économie nationale et source principale des moyens de subsistance.

La forte densité démographique et la fragmentation progressive des terres agricoles limitent la capacité productive des exploitations familiales, accentuant l'insécurité alimentaire. Cette situation est aggravée par la dégradation des sols, le faible accès aux intrants modernes, la dépendance quasi exclusive aux pluies saisonnières, et la faible industrialisation du secteur agricole. Par ailleurs, le changement climatique perturbe les cycles agricoles, avec une variabilité accrue des précipitations, des épisodes extrêmes et un allongement des périodes sèches, fragilisant davantage les ménages ruraux.

Dans ce contexte, les systèmes agroforestiers, notamment ceux intégrant le café comme culture commerciale centrale, émergent comme une alternative prometteuse pour renforcer simultanément la productivité agricole, la durabilité environnementale et la résilience économique des ménages. Cette recherche s'appuie précisément sur l'expérience concrète du projet agroforestier burundo-allemand, financé par le Ministère d'Etat du Bade-Wurtemberg et mis en œuvre par l'Université du Burundi en partenariat avec le consortium COCOCA, qui promeut ces systèmes comme levier vers un revenu vital décent.

La recherche met en exergue le rôle fondamental du revenu vital comme levier central pour réduire l'écart entre les besoins fondamentaux des ménages et leurs ressources effectives. Ce revenu constitue également un vecteur clé de la résilience, en permettant aux ménages d'absorber les chocs climatiques et économiques, d'adapter leurs stratégies via la diversification des activités, y compris agroforestières, et de transformer durablement leurs conditions de vie par l'investissement dans des actifs productifs et des compétences.

Toutefois, la résilience des systèmes agricoles au Burundi dépend d'une approche holistique, intégrant les dimensions économiques, sociales et environnementales, et s'appuyant sur une coordination institutionnelle renforcée. Cette approche est indispensable pour promouvoir des systèmes alimentaires durables et inclusifs, résilients face aux pressions climatiques et socio-économiques, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et au développement rural du pays.

La caractérisation contextuelle opérée dans le chapitre précédent, en mettant en exergue les hétérogénéités géographiques, les diversités des systèmes de moyens d'existence et les spécificités agro-écologiques du Burundi, a souligné la complexité des dynamiques de vulnérabilité et de résilience à appréhender. Toutefois, la validité scientifique des analyses dépend intrinsèquement de la rigueur des dispositifs mis en œuvre pour capturer ces réalités multidimensionnelles. Le chapitre suivant qui parle de l'approche méthodologique, vise donc à décliner les choix opérationnels découlant de ce cadrage contextuel. Il détaillera le protocole d'enquête, les stratégies d'échantillonnage adaptées aux nuances territoriales, ainsi que les techniques d'analyse quantitative et qualitative retenues. Cette explicitation méthodologique est essentielle pour garantir la robustesse des estimations, la fiabilité des données collectées et, in fine, la pertinence des réponses apportées aux questions de recherche formulées.

APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE

Résumé

Ce chapitre présente un cadre méthodologique pour analyser les déterminants du revenu vital, de la résilience et de la sécurité alimentaire des ménages ruraux dans la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides du Burundi. Les données utilisées dans cette recherche proviennent d'un échantillon probabiliste à plusieurs degrés composé de 384 ménages, avec un seuil de confiance de 95 % et une marge d'erreur de ± 5 %, et ces données ont été collectées via un questionnaire structuré puis enrichies par des entretiens semi-directifs, des focus groups multi-acteurs ainsi que par des données secondaires.

Le traitement et l'analyse ont été réalisés sous Python et se sont déroulés en trois étapes, à savoir des analyses descriptives, puis des analyses exploratoires incluant une analyse en composantes principales et une classification ascendante hiérarchique pour la segmentation des profils de vulnérabilité, et enfin des modélisations économétriques. Un modèle Probit a permis d'estimer les déterminants de l'écart entre le revenu vital, estimé selon la méthode Anker, et le revenu effectif, et ce modèle a été complété par une analyse de frontière stochastique pour l'inefficacité technique ainsi que par des régressions logistiques multinomiales pour le Score de Consommation Alimentaire.

La sécurité alimentaire a été évaluée à l'aide d'indicateurs standardisés, notamment le Score de Consommation Alimentaire, la diversité alimentaire, les stratégies d'adaptation ainsi que l'échelle FIES. Malgré des contraintes logistiques et des données secondaires fragmentées, la robustesse des résultats a été assurée par la triangulation des sources, par des tests de sensibilité ainsi que par une validation participative. Cette démarche garantit la validité interne et externe de l'étude, ce qui fournit ainsi une base empirique fiable pour orienter les politiques publiques et les interventions ciblées.

3.1 Cadre méthodologique

L'approche méthodologique adoptée pour cette recherche vise à analyser les déterminants du revenu vital durable ainsi que les capacités de résilience des ménages ruraux face aux chocs économiques et environnementaux au Burundi. L'objectif principal est de comprendre comment ces facteurs influencent la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages ruraux. Cette méthodologie se compose de plusieurs étapes clés, allant de la définition du cadre théorique à l'analyse des données collectées, en passant par le choix des outils et des méthodes d'échantillonnage.

Dans cette section du document, nous cherchons à définir les méthodes d'analyses préliminaires à la modélisation et de la prédiction elle-même. Cette approche s'appuie sur la complémentarité des techniques qualitatives et quantitatives d'analyses de données.

Certaines données quantitatives de cette étude telles que les indicateurs de sécurité alimentaire ont été intégrées pour trianguler et expliquer les résultats de l'enquête qualitative des exploitations agricoles afin de bien pouvoir les mettre en contexte.

Dans la suite, nous sommes amenés à appliquer différentes méthodes qui sont axées autour de trois (3) phases :

- Les analyses descriptives ;
- Les analyses exploratoires multidimensionnelles ;
- La modélisation.

L'analyse descriptive a permis de décrire et d'explorer chacune des variables qualitatives et quantitatives à travers un diagnostic approfondi des paramètres de tendances centrales, de position et de forme. Cette étape a été capitale pour une évaluation de la dispersion et de l'analyse de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité associées à leurs caractères. En ce qui concerne les variables quantitatives, nous avons cherché d'abord à étudier la qualité de la distribution des données.

Les analyses exploratoires multidimensionnelles ont pour but de décrire les liaisons entre des variables afin d'expliquer les combinaisons en facteurs ou dimensions entre celles-ci. L'existence de facteurs exprime un résumé de la quantité totale d'information véhiculée par la base de données. Cependant, il a été toujours envisagé d'exploiter le pourcentage de l'inertie totale exprimée par les facteurs à une proportion significative afin de pouvoir fixer leurs nombres et de faciliter leur identification.

Dans le cadre de notre recherche, deux analyses exploratoires multidimensionnelles ont été utilisées dont l'ACP et CAH, d'une part, pour déterminer la cartographie des facteurs et d'autre part, pour faire sortir des classes afin de discriminer les différentes caractéristiques des ménages à travers les zones de moyens d'existence étudiées. Ces deux analyses nous ont aidé à déterminer les séries de variables qui expliquent au mieux l'absence ou la présence de la vulnérabilité des ménages à l'insécurité alimentaire selon les zones. Bref, nous cherchions par le biais de ces deux analyses, d'expliquer la situation alimentaire des ménages, laquelle constitue une composante essentielle de l'objet de cette étude. Parallèlement, l'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour chercher s'il existe une différence significative entre les vulnérables et les non vulnérables en comparant leurs moyennes calculées dans les variables quantitatives.

Quant à la régression logistique, elle est réputée être l'une des meilleures méthodes en modélisation statistique [152]. Elle a été utilisée afin d'identifier les facteurs les plus explicatifs de la vulnérabilité alimentaire mais aussi de l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages ruraux au Burundi [10]. En outre, cette méthodologie n'est applicable qu'à travers une bonne préparation de la qualité des données. Ainsi, le traitement des données (sous Excel) et le calcul de nouvelles variables ont été l'étape préalable et primordiale avant d'aborder les différentes phases de la méthodologie d'analyse adoptée. Cette étape a été capitale et a préparé les autres étapes qui ont mis en évidence les variables à prendre en compte dans les analyses multidimensionnelles. Néanmoins, l'ensemble des analyses citées ont été réalisées avec le langage de programmation Python et différentes bibliothèques qui ont été importées dans Python. Il est d'un usage facile et pragmatique, d'où son choix pour cette étude.

3.1.1 Choix de la zone d'étude

Dans le cadre de cette recherche, le choix des zones d'étude s'est porté sur deux zones de moyens d'existence distinctes du Burundi : la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides. Cette sélection stratégique repose à la fois sur leur représentativité des principales variations agro-écologiques, socio-économiques et environnementales du pays, et sur leur ancrage explicite des systèmes agroforestiers, qui ciblent précisément les Plateaux Centraux Humides.

Les plateaux centraux humides constituent le cœur d'intervention sur le système d'agroforesterie, où les ménages bénéficient d'un accompagnement par le Consortium des Coopératives Caféicoles du Burundi (COCOCA) et mettent en œuvre des systèmes intégrant le café comme culture commerciale centrale, associée à des arbres d'ombrage et des cultures vivrières [153].

La Dépression du Nord a été sélectionnée comme celle où les ménages dépendent de systèmes agricoles traditionnels sans couverture arborée. Cette zone, caractérisée par une agriculture pluviale vulnérable, une forte pression démographique et une faible intégration dans les filières agroforestières, permet d'isoler l'effet spécifique des pratiques agroforestières sur les indicateurs de revenu, de sécurité alimentaire et de résilience [120].

Bien que les deux zones partagent une forte dépendance à l'agriculture de subsistance, elles diffèrent fondamentalement en termes d'intégration dans des systèmes productifs durables et d'accès à un encadrement technique structuré. Les Plateaux Centraux Humides bénéficient d'un potentiel agroécologique plus favorable, ressources hydriques abondantes, sols relativement fertiles, mais font face à des défis liés aux inondations, à la dégradation des sols et à la fragmentation foncière. La Dépression du Nord, quant à elle, est confrontée à une variabilité climatique accrue [125], à des rendements agricoles structurellement faibles et à une moindre diversification des sources de revenus [154].

En choisissant ces deux ZME comme terrains d'étude, la recherche vise à capter cette diversité contextuelle et à analyser finement les dynamiques économiques, sociales et environnementales qui façonnent la vulnérabilité et la résilience des ménages ruraux. Cette délimitation, renforcée par une stratification géographique rigoureuse et l'utilisation des unités administratives locales (collines) comme unités secondaires d'échantillonnage, permet d'assurer à la fois la représentativité, la comparabilité et la pertinence territoriale des données recueillies. Dès lors, cette approche offre une base empirique solide pour formuler des recommandations différenciées, alignées sur les réalités agricoles et institutionnelles propres à chaque territoire.

3.1.2 Choix de la méthode d'échantillonnage pour les données quantitatives

En l'absence de données précises sur la taille de la population, une approche d'échantillonnage probabiliste à plusieurs degrés a été utilisée, car elle est adaptée aux contextes où les informations démographiques sont incomplètes. Cette méthode combine un échantillonnage en grappes et un échantillonnage aléatoire simple. Dans un premier temps, un échantillonnage en grappes a été utilisé pour sélectionner un certain nombre de collines dans chaque zone. Dans un second temps, au sein de chaque grappe sélectionnée, un échantillonnage aléatoire simple a été appliqué pour choisir les ménages à enquêter. Cette

approche a permis de réduire les coûts logistiques tout en maintenant une représentativité statistique.

3.1.3 Estimation de la taille de l'échantillon

Lorsque la taille de la population est inconnue, la taille de l'échantillon peut être déterminée en utilisant une formule basée sur l'échantillonnage pour des proportions, qui suppose une population infinie. Cette méthode est couramment utilisée dans les enquêtes socio-économiques en l'absence de données démographiques précises. La formule de Cochran (1977) pour une population infinie est donnée par l'équation 3.1 suivante :

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - P)}{E^2} \quad (3.1)$$

Où : n : Taille minimale de l'échantillon. Z : Valeur de la statistique de la distribution normale correspondant au niveau de confiance souhaité (par le cas notre échantillon, Z=1,96 pour un intervalle de confiance de 95 %). p : Proportion estimée de la caractéristique étudiée dans la population (en l'absence d'information, p=0,5 est utilisé pour maximiser la variance et obtenir une estimation conservatrice). E : Marge d'erreur acceptable (dans notre cas, E=0,05, soit une précision de ± 5 %).

En ayant un niveau de confiance de 95 % (Z=1,96), une proportion estimée de p=0,5, et une marge d'erreur de E=0,05, la taille de l'échantillon est calculée comme suit :

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{0,05^2} = \frac{3,8416 \cdot 0,25}{0,0025} = 384,16$$

Ainsi, une taille d'échantillon d'environ 384 ménages est nécessaire pour obtenir des estimations fiables. Cette valeur correspond à l'échantillon total rapporté dans l'étude de 384 ménages, ce qui indique que la taille choisie est cohérente avec les standards statistiques.

3.1.4 Répartition de l'échantillon entre les strates

Pour refléter les différences entre les deux zones, l'échantillon total est réparti proportionnellement en fonction du poids relatif de chaque strate. Dans notre étude, 44,5 % des ménages (171) proviennent de la Dépression du Nord et 55,5 % (213) des Plateaux Centraux Humides. Cette répartition est justifiée par une décision méthodologique visant à surreprésenter légèrement la zone des Plateaux Centraux Humides, potentiellement plus peuplée ou présentant une plus grande variabilité socio-économique.

3.1.5 Ajustement pour l'Effet de Plan d'Echantillonnage (Design Effect)

L'échantillonnage en grappes introduit une corrélation intra-grappe, ce qui peut réduire la précision des estimations par rapport à un échantillonnage aléatoire simple. Pour compenser cet effet, un facteur de correction, appelé effet de plan d'échantillonnage (Design Effect, DEFF), est appliqué. Le DEFF est généralement estimé entre 1,5 et 2 pour les enquêtes en grappes dans des contextes ruraux. La taille de l'échantillon ajustée est calculée comme suit :

$$n_{\text{ajusté}} = n \cdot \text{DEFF}$$

En supposant un DEFF de 1,5, la taille de l'échantillon ajustée serait :

$$n_{\text{ajusté}} = 384 \cdot 1,5 = 576$$

Cependant, dans cette étude, la taille de l'échantillon est restée à 384 ménages, en raison de contraintes budgétaires. Ainsi, les analyses statistiques tiennent compte de l'effet de grappe via des méthodes robustes, par exemple l'utilisation d'erreurs standards ajustées dans les modèles économétriques, et ce afin de maintenir une représentativité acceptable.

3.1.6 Justification scientifique du plan d'échantillonnage

L'élaboration d'un cadre d'échantillonnage s'est avérée essentielle dans le contexte de cette recherche, étant donné que la taille exacte de la population des ménages ruraux dans les deux zones de moyens d'existence étudiée, n'est pas précisément connue. Pour garantir la représentativité et la validité statistique des résultats, une stratification géographique a été mise en œuvre, chaque ZME constituant une strate distincte. Cette approche permet non seulement de capturer la variabilité agro-écologique, socio-économique et institutionnelle entre les deux zones, mais aussi de faciliter des comparaisons analytiques pertinentes. À l'intérieur de chaque strate, les collines, unités administratives de base, ont été retenues comme unités primaires d'échantillonnage, tandis que les ménages ruraux ont été définis comme unités finales.

La méthode d'échantillonnage adoptée combine un échantillonnage en grappes à deux degrés avec un tirage aléatoire simple au niveau des ménages, une stratégie particulièrement adaptée aux contextes ruraux caractérisés par l'absence de cadastre fiable et la dispersion géographique des unités d'observation. Cette approche permet de réduire significativement les coûts logistiques tout en préservant une représentativité acceptable. Cette méthodologie, fondée sur des principes statistiques bien établis et adaptée aux réalités du terrain burundais, assure une base solide pour l'inférence et la généralisation des résultats, tout en permettant une analyse différenciée des dynamiques de résilience, de revenu vital et de sécurité alimentaire selon les spécificités locales [138].

3.2 Présentation des sources des données

3.2.1 Présentation des données agro-économiques

La collecte des données agro-économiques a constitué une étape fondamentale pour appréhender la situation socio-économique des ménages dans les deux zones de moyens d'existence étudiées. Pour garantir la fiabilité et la précision des données recueillies, une enquête structurée a été conçue et mise en œuvre. Cette enquête a débuté par l'élaboration d'un questionnaire adapté au contexte local, prenant en compte les caractéristiques socio-économiques, agricoles et environnementales des ménages ruraux. Afin d'optimiser le processus de collecte et de réduire les erreurs liées à la saisie manuelle, le questionnaire a été digitalisé à l'aide du logiciel KoBoCollect, un outil largement utilisé dans les études de terrain pour sa capacité à faciliter la gestion des données. La collecte des données a ensuite été réalisée directement sur le terrain à l'aide de smartphones, permettant une saisie en temps réel et une centralisation efficace des informations. Cette méthodologie numérique a non seulement amélioré la qualité des données en minimisant les risques d'erreurs humaines, mais elle a également permis de couvrir un échantillon représentatif de ménages

dans la zone étudiée. L'utilisation de technologies modernes comme KoBoCollect illustre ainsi une approche innovante et rigoureuse pour répondre aux exigences scientifiques de l'étude tout en s'adaptant aux réalités des terrains ruraux.

3.3 Source et méthodologie de collecte des données agro-économiques

Les données utilisées dans cette étude proviennent d'une enquête menée auprès des ménages ruraux à l'aide d'un questionnaire structuré en quatre sections complémentaires, et chacune de ces sections correspond à un objectif analytique spécifique. Ces sections sont désignées par les acronymes suivants, à savoir QM pour le Questionnaire Ménage, QP pour le Questionnaire Productivité Agricole, QR pour le Questionnaire Revenu du Ménage ainsi que QS pour le Questionnaire Sécurité Alimentaire. Cette architecture méthodologique vise ainsi à appréhender de manière systématique et multidimensionnelle les réalités socio-économiques et agricoles des ménages enquêtés. Le Questionnaire Ménage (QM) a permis de collecter des informations sur les caractéristiques sociodémographiques, économiques, écologiques et agricoles des ménages. Les données recueillies portent notamment sur la composition familiale, les conditions de vie, l'accès aux infrastructures ainsi que les pratiques agricoles traditionnelles et modernes adoptées. Cette section fournit une base contextuelle essentielle à l'interprétation des résultats issus des autres questionnaires.

Le Questionnaire Productivité Agricole (QP) est centré sur la performance productive des exploitations. Il a permis de documenter les types de cultures pratiquées, les rendements obtenus, les superficies cultivées, les quantités produites, l'utilisation d'intrants ainsi que les pratiques agricoles adoptées [155, 94]. Une attention particulière a été accordée à l'agroforesterie en tant que pratique agricole spécifique. L'objectif était de mesurer son impact sur le revenu des ménages qui l'adoptent par rapport à ceux qui ne l'adoptent pas. Aucun seuil universellement reconnu ne permet de définir strictement un ménage comme « pratiquant l'agroforesterie ». Par conséquent, un choix méthodologique a été opéré en fixant un seuil de dix arbres agroforestiers par exploitant pour distinguer les deux groupes. Ainsi, l'étude a considéré comme ménages pratiquants ceux dont l'exploitation compte un nombre d'arbres agroforestiers supérieur ou égal à dix, associant ainsi arbres, cultures et parfois élevage sur leur parcelle. A l'inverse, les ménages non pratiquants sont ceux dont le nombre d'arbres agroforestiers est inférieur à dix. Cette approche comparative a permis d'isoler l'effet potentiel de l'agroforesterie sur le revenu agricole total, la diversification des sources de revenus à travers la vente de bois, de fruits et de produits forestiers, ainsi que la résilience économique face aux aléas climatiques.

Le Questionnaire Revenu du Ménage (QR) a documenté les sources et montants des revenus agricoles et non agricoles, y compris les ventes de produits agroforestiers. Une étape de fusion des données issues des différentes sections a été nécessaire pour intégrer les informations relatives aux revenus et aux dépenses agricoles et alimentaires, permettant ainsi le calcul d'indicateurs clés tels que le revenu net agricole [144, 78].

Enfin, le Questionnaire Sécurité Alimentaire (QS) a joué un rôle central dans l'évaluation de l'accès, de la disponibilité et de l'utilisation des aliments par les ménages. Il a permis de recueillir des données sur les dépenses alimentaires, la fréquence des repas, les stratégies d'adaptation en cas de pénurie ainsi que la perception de l'insécurité alimentaire [156, 157]. Ces informations ont servi au calcul d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs de la sécurité

alimentaire, en tenant compte des dimensions économiques et sociales telles que les revenus disponibles et les prix des denrées sur les marchés locaux [158].

L'intégration de ces quatre sections dans une méthodologie cohérente permet de croiser les données provenant de différentes dimensions de la vie des ménages. Par exemple, les informations du QM peuvent être combinées avec celles du QR pour évaluer les inégalités économiques, tandis que les données du QP et du QS permettent d'analyser comment la productivité agricole influence la sécurité alimentaire. Cette approche multidimensionnelle garantit une analyse approfondie et nuancée des réalités locales. Elle s'inscrit dans une démarche scientifique rigoureuse visant à maximiser la validité et la fiabilité des analyses, tout en offrant des pistes concrètes pour orienter les politiques publiques et les interventions humanitaires [14].

3.3.1 Sources et méthodologie de collecte des données qualitatives et secondaires

Outre les données recueillies auprès des ménages, une attention particulière a été accordée à la collecte d'informations sur les prix des denrées alimentaires dans les marchés locaux de la zone d'étude. Ces données sont essentielles pour évaluer la variabilité des prix et leur impact sur la sécurité alimentaire des ménages. En effet, les fluctuations des prix des produits de base peuvent influencer directement l'accès des ménages aux aliments nutritifs, un facteur critique pour leur bien-être et leur résilience [158, 82]. Pour ce faire, des entretiens semi-directifs ont été menés avec les commerçants des marchés locaux, ce qui a permis de documenter les variations temporelles et spatiales des prix des denrées alimentaires. Ces données ont ensuite été croisées avec celles issues des enquêtes auprès des ménages afin de mieux comprendre les interactions entre les revenus disponibles et les dépenses alimentaires.

Par ailleurs, pour renforcer la fiabilité des données relatives aux prix des denrées alimentaires et contextualiser les informations collectées, des focus groups ont été organisés avec les autorités administratives locales, des informateurs clés ainsi qu'avec des groupes de ménages, incluant à la fois des pratiquants et des non-pratiquants de l'agroforesterie. Ces discussions ont permis de valider les données recueillies sur les marchés et d'apporter des éclairages supplémentaires sur les dynamiques locales, notamment en termes de disponibilité des produits, de qualité des infrastructures de marché et de régulation des prix par les institutions publiques. Dans le cadre spécifique de l'agroforesterie, les focus groups ont été structurés autour de l'identification des avantages perçus par les répondants selon quatre dimensions complémentaires. La première dimension est économique et recouvre l'amélioration des revenus, la réduction des dépenses en intrants ainsi que la stabilisation des productions. La deuxième dimension est sociale et inclut la création d'emplois saisonniers, le renforcement de la cohésion sociale autour de la gestion des arbres et la réduction des conflits d'usage des terres. La troisième dimension est environnementale et concerne l'amélioration de la fertilité des sols, la réduction de l'érosion, la régulation du microclimat et la préservation de la biodiversité. Enfin, la quatrième dimension est climatique et porte sur l'atténuation par le stockage de carbone ainsi que sur l'adaptation par la diversification des cultures et la protection contre les aléas climatiques. Les focus groups ont également permis d'identifier des biais potentiels dans les données collectées, notamment une surestimation déclarative des revenus agroforestiers, et de proposer des ajustements méthodologiques pour améliorer la précision des analyses. Cette approche

participative contribue ainsi à enrichir la compréhension des réalités locales et à renforcer la crédibilité des résultats obtenus.

Malgré les efforts déployés pour collecter des données primaires, certaines informations se sont avérées difficiles à obtenir directement sur le terrain. C'est dans ce contexte que l'Institution Nationale des Statistiques du Burundi, désignée par l'acronyme INSBU, a joué un rôle crucial en fournissant des données secondaires fiables et standardisées. Ces données concernent principalement les coûts liés à l'éducation, aux soins de santé et, de manière plus générale, au coût de la vie dans les zones ciblées par l'étude. L'accès à ces informations a permis de combler les lacunes observées dans les données primaires et d'offrir une vue plus complète des contraintes économiques pesant sur les ménages. A titre d'exemple, les données relatives aux coûts de l'éducation et des soins de santé permettent d'évaluer l'impact des dépenses non alimentaires sur la capacité des ménages à subvenir à leurs besoins vitaux. Par conséquent, l'utilisation de données secondaires provenant d'une source institutionnelle reconnue comme l'INSBU garantit une cohérence méthodologique et une comparabilité des résultats à l'échelle nationale.

La combinaison des différentes méthodes de collecte de données illustre une approche méthodologique rigoureuse et multidimensionnelle. Cette combinaison inclut les enquêtes auprès des ménages avec une comparaison systématique entre pratiquants et non-pratiquants de l'agroforesterie, les observations sur les marchés locaux, les focus groups multi-acteurs intégrant les quatre dimensions des bénéfices de l'agroforesterie, ainsi que le recours aux données secondaires de l'INSBU. Cette pluralité des sources de données permet de minimiser les biais liés à une seule méthode de collecte et d'assurer une triangulation des informations. En effet, les données des ménages fournissent un aperçu microéconomique des réalités individuelles, tandis que les données des marchés et de l'INSBU offrent des perspectives macroéconomiques et structurelles. De même, les focus groups permettent de contextualiser les données quantitatives sur les revenus agroforestiers et d'identifier des dynamiques sociales ou institutionnelles qui ne seraient pas immédiatement visibles à travers les chiffres seuls. En somme, cette méthodologie intégrée a permis de produire des résultats robustes et nuancés, capables de refléter les complexités des systèmes socio-économiques locaux. Elle s'inscrit dans une démarche scientifique visant à maximiser à la fois la validité interne de l'étude, grâce à la comparaison contrôlée entre groupes avec et sans agroforesterie, et sa validité externe, tout en offrant des pistes concrètes pour orienter les politiques publiques et les interventions humanitaires dans les zones rurales du Burundi [2].

3.3.2 Présentation des données météorologiques

Les données météorologiques jouent un rôle fondamental dans la compréhension des interactions entre les conditions climatiques et les systèmes agricoles, constituant ainsi un pilier essentiel pour l'analyse de la productivité agricole et de la sécurité alimentaire [34, 9]. Ces données couvrent un large éventail de paramètres environnementaux critiques, tels que les précipitations, les températures moyennes, l'humidité relative, la vitesse du vent, l'ensoleillement, la pression atmosphérique et autres. Chacun de ces indicateurs influence directement les cycles agricoles, la croissance des cultures, la gestion des ressources en eau et la vulnérabilité des ménages face aux aléas climatiques. Toutefois, dans le cadre de cette recherche, les données disponibles auprès de l'IGEBU se concentrent principalement sur trois indicateurs clés : les précipitations, les températures et l'humidité. Ces paramètres

ont été sélectionnés en raison de leur pertinence directe pour l'agriculture et leur capacité à refléter les tendances climatiques à long terme mais également de leur collecte régulière.

Les précipitations, mesurées sous forme de quantités cumulées mensuelles ou annuelles, sont un indicateur crucial pour évaluer la disponibilité en eau nécessaire à la croissance des cultures. Les irrégularités dans les schémas pluviométriques, telles que les sécheresses prolongées ou les épisodes de précipitations excessives, peuvent entraîner des baisses significatives des rendements agricoles et accentuer la vulnérabilité des ménages ruraux [123]. Les températures, quant à elles, influencent les cycles phénologiques des plantes, la durée de la saison de croissance et la prévalence des maladies et ravageurs. Des variations anormales des températures, notamment des périodes de chaleur extrême ou de froid inhabituel, peuvent compromettre la production agricole et réduire la résilience des systèmes alimentaires locaux [30]. Enfin, l'humidité relative est un paramètre essentiel pour comprendre les conditions microclimatiques qui affectent la conservation des sols, la disponibilité en eau et la santé des cultures. Une humidité insuffisante peut accélérer le dessèchement des sols et augmenter les risques d'érosion, tandis qu'une humidité excessive peut favoriser le développement de maladies cryptogamiques.

Ces données météorologiques collectées par l'IGEBU sont régulièrement mises à jour et fournissent une base solide pour analyser les tendances climatiques dans les ZME étudiées. Elles permettent non seulement de caractériser les conditions climatiques actuelles, mais aussi d'identifier les évolutions à long terme liées au changement climatique [124]. L'intégration de ces indicateurs dans la recherche offre une perspective scientifique approfondie sur les impacts des conditions climatiques sur la productivité agricole et la sécurité alimentaire des ménages ruraux. Une évaluation des tendances thermiques peut aider à anticiper les besoins en adaptation agricole, comme l'utilisation de variétés résistantes à la chaleur ou la mise en place de systèmes d'irrigation.

En somme, les données météorologiques disponibles auprès de l'IGEBU constituent une ressource inestimable pour contextualiser les défis climatiques auxquels fait face le Burundi [127]. Elles offrent une base analytique robuste pour identifier les vulnérabilités climatiques et proposer des stratégies d'adaptation durables, contribuant ainsi à renforcer la résilience des systèmes agricoles et alimentaires dans un contexte de changement climatique.

3.3.2.1 Evolution des précipitations

Les précipitations influencent directement la croissance et la productivité des cultures [84]. Leur analyse permet d'identifier les variations saisonnières, les épisodes de sécheresse et les risques de stress hydrique, qui réduisent les rendements agricoles et compromettent les revenus des ménages, exacerbant ainsi leur vulnérabilité. Cette démarche est donc essentielle pour évaluer leur résilience face aux aléas climatiques. La Figure 3.1 localise les deux zones d'étude au Burundi (Dépression du Nord et Plateaux Centraux Humides) et présente l'évolution des précipitations annuelles (2013–2022), illustrant la variabilité climatique qui structure les dynamiques agricoles et socio-économiques de ces territoires.

Le contexte climatique de la dernière décennie se caractérise par une irrégularité croissante du régime pluviométrique, marquée par un décalage du début des saisons et une concentration des précipitations sur des périodes plus courtes mais plus intenses. D'un point de vue agroécologique, cette variabilité impacte différemment les zones d'étude : la Dépression du Nord, par son aridité, est structurellement plus exposée aux sécheresses intra-saisonnières

pouvant compromettre les cultures de la saison B, tandis que les Plateaux Centraux Humides sont davantage vulnérables aux épisodes pluvieux extrêmes, favorisant l'érosion et la lixiviation des nutriments. Face à cette double contrainte environnementale, l'adaptation des ménages agricoles nécessite l'adoption de techniques de conservation des eaux et des sols, la diversification des calendriers de semis et l'introduction de variétés adaptées. L'analyse de cette capacité d'adaptation est donc essentielle pour évaluer les conditions de stabilisation des rendements et la trajectoire des ménages vers un revenu vital décent.

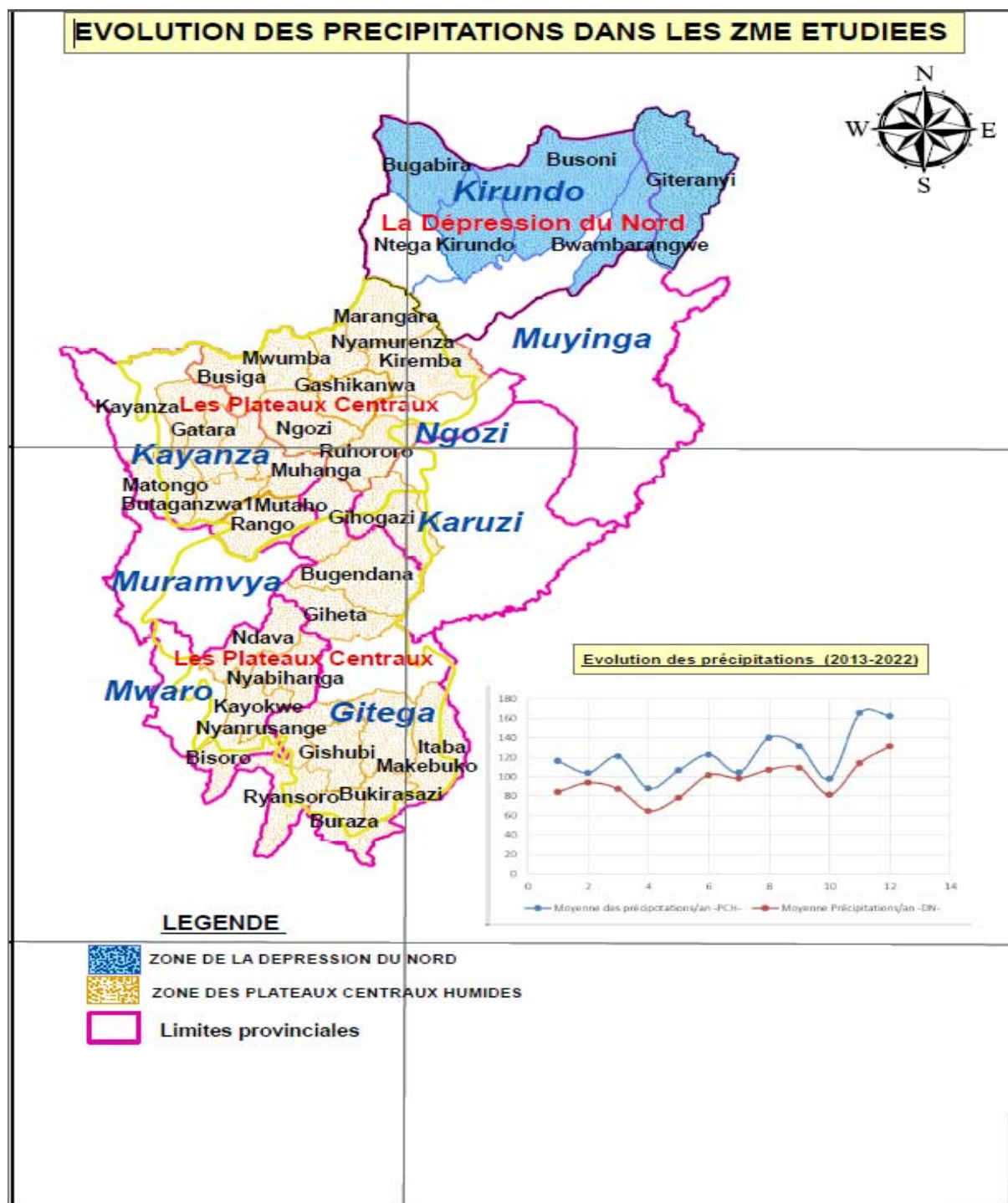


FIGURE 3.1 – Evolution des précipitations dans les zones étudiées

Source : IGEBU, 2025

La carte permet de comparer l'évolution des précipitations entre la Dépression du Nord (Kirundo, Muyinga) et les Plateaux Centraux Humides (Ngozi, Kayanza, Gitega) au Burundi de 2013 à 2022. Bien que le graphique présente une moyenne nationale, les caractéristiques géographiques des deux zones influencent les précipitations. La Dépression du Nord, située à une altitude plus basse, connaît généralement des précipitations moins abondantes et plus irrégulières, avec des valeurs mensuelles moyennes souvent inférieures à 100 mm, notamment en raison de sa position géographique et d'une moindre influence des reliefs sur la pluviométrie. En revanche, les Plateaux Centraux Humides, situés à une altitude plus élevée et bénéficiant d'un climat plus humide, enregistrent des précipitations plus importantes et régulières, souvent proches ou supérieures à 120 mm durant la saison des pluies. Sur la période étudiée (2013-2022), les deux zones montrent une augmentation globale des précipitations, particulièrement marquée en 2022, mais les Plateaux Centraux Humides affichent une variabilité plus faible et des pics plus élevés, traduisant une meilleure stabilité pluviométrique comparée à la Dépression du Nord, plus sujette aux fluctuations.

3.3.2.2 Evolution des températures

Des fluctuations thermiques affectent directement les rendements et la qualité des produits agricoles, réduisant ainsi les revenus des ménages ruraux [13]. Des températures excessivement élevées peuvent entraîner un stress thermique, réduire la photosynthèse, et diminuer la productivité des plantes d'une part. D'autre part, des températures trop basses peuvent limiter la croissance des cultures sensibles au froid. L'analyse des températures dans le cadre de notre recherche permet de détecter les tendances à long terme, telles que les vagues de chaleur ou le gel tardif, qui peuvent avoir des effets délétères sur la production agricole. Dans le cadre de la sécurité alimentaire, des variations thermiques extrêmes peuvent entraîner des pénuries alimentaires locales, aggravant les problèmes de nutrition et d'accès à la nourriture. La Figure- 3.2 cartographie les deux zones d'étude au Burundi tout en intégrant un graphique illustrant l'évolution des températures moyennes annuelles entre 2013 et 2022, mettant en évidence une tendance à la hausse thermique qui accentue les pressions climatiques sur les systèmes agricoles et la sécurité alimentaire locale.

L'impact de cette hausse thermique s'exprime à travers plusieurs mécanismes biophysiques et socio-économiques interconnectés. Sur le plan physiologique, l'augmentation des températures accélère l'évapotranspiration potentielle, intensifiant les besoins en eau des cultures et exacerbant le stress hydrique, particulièrement dans la Dépression du Nord où les ressources en eau sont déjà limitées. Cette dynamique affecte différemment les principales cultures du Burundi : le café, sensible aux températures supérieures à 24°C, voit sa productivité et la qualité de ses fèves décliner, tandis que la banane et le maïs subissent des perturbations dans leurs cycles phénologiques, avec des floraisons précoces et un remplissage des grains compromis. Dans les Plateaux Centraux Humides, le réchauffement modifie les équilibres agroécologiques traditionnels en favorisant la prolifération de ravageurs et de maladies auparavant cantonnés aux zones de basse altitude. Pour les ménages ruraux, ces perturbations se traduisent par une baisse des rendements, une dégradation de la qualité des récoltes et une augmentation des coûts de production liés à la nécessité d'intrants supplémentaires ou de systèmes d'irrigation. A long terme, cette érosion de la productivité agricole compromet directement la capacité des ménages à atteindre le

seuil de revenu vital décent, renforçant ainsi leur vulnérabilité structurelle face au changement climatique. L'adaptation à ces nouvelles contraintes thermiques impose donc une transformation profonde des systèmes de production, passant par l'introduction de variétés tolérantes à la chaleur, la diversification des assolements, le recours à l'agroforesterie pour créer des microclimats favorables, et la réorganisation des calendriers culturaux en fonction des nouveaux régimes thermiques.

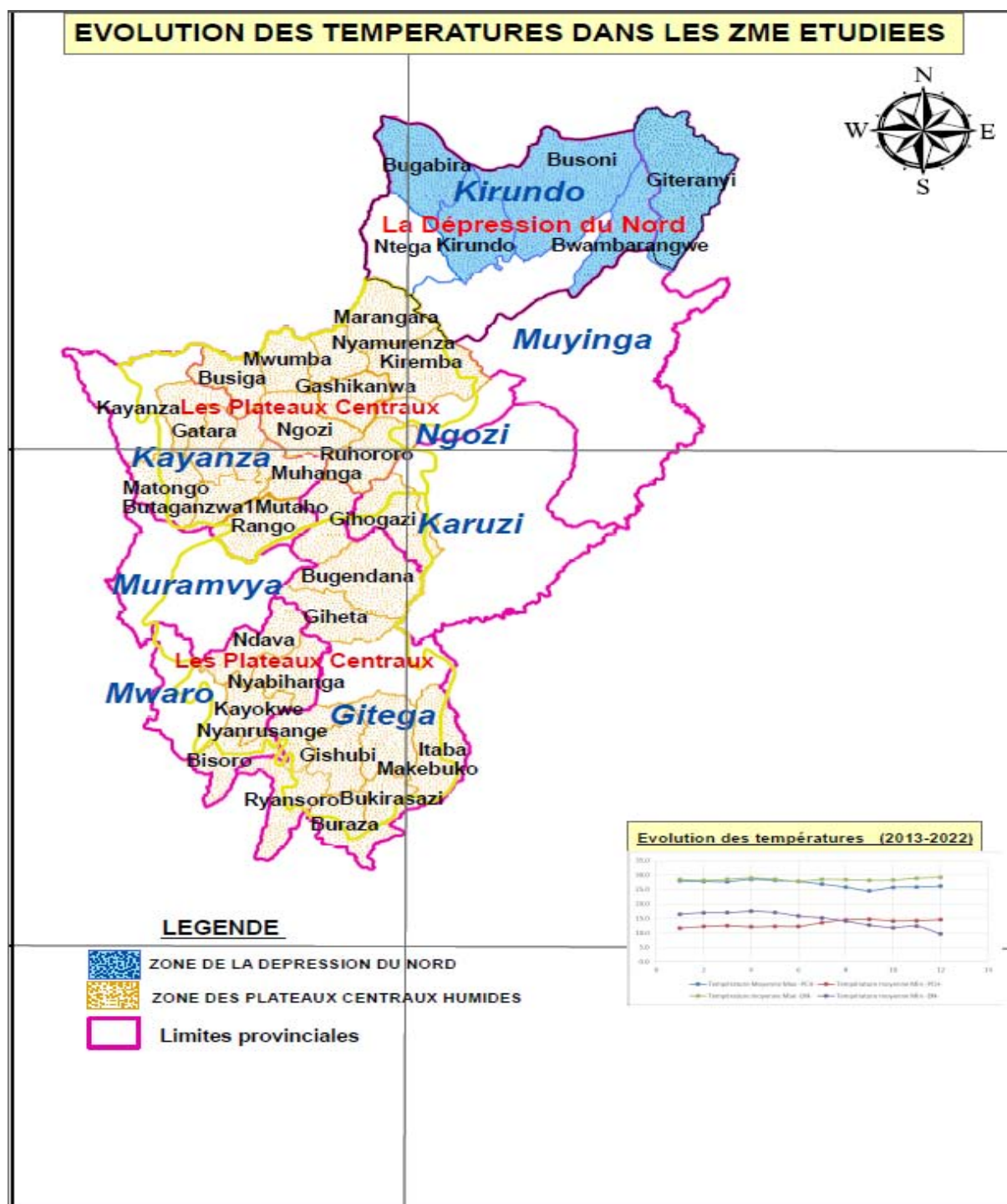


FIGURE 3.2 – Evolution des températures dans les zones étudiées

Source : IGEBU, 2025

Bien que le graphique reflète une moyenne dans les ZME étudiées, les différences géographiques entre ces zones influencent les températures. La Dépression du Nord, située à une altitude plus basse, connaît des températures généralement plus élevées, souvent proches de 19-20°C durant les mois chauds, en raison de sa topographie qui favorise un réchauffement plus important.

En revanche, les Plateaux Centraux Humides, à une altitude plus élevée, bénéficient d'un climat plus tempéré, avec des températures moyennes légèrement plus basses, oscillant autour de 17-19°C dans les mois chauds et descendant à 15-16°C en saison fraîche. Sur la période 2013-2022, les deux zones montrent une augmentation progressive des températures, mais la Dépression du Nord est plus susceptible d'atteindre des pics élevés, tandis que les Plateaux Centraux Humides affichent une variabilité plus modérée, reflétant l'effet modérateur de l'altitude sur les fluctuations thermiques.

3.3.2.3 Evolution de l'humidité

L'humidité de l'air et du sol est un indicateur crucial de la santé des cultures, particulièrement dans les régions tropicales et subtropicales où l'humidité élevée favorise la croissance de nombreuses plantes. Cependant, une humidité excessive peut également favoriser le développement de maladies fongiques et de parasites qui nuisent à la production agricole. En revanche, une humidité insuffisante peut entraîner une déshydratation des plantes, compromettant leur croissance. Les données sur l'humidité permettent d'évaluer l'équilibre entre l'humidité disponible et les besoins des cultures. Elles aident à prévoir les risques de maladies, à ajuster les pratiques agricoles, et à mieux planifier les périodes de récolte. Dans une étude sur la résilience, l'humidité joue un rôle essentiel pour comprendre comment les agriculteurs s'adaptent aux conditions climatiques variables et comment ces variations influencent leur capacité à maintenir une production stable et à assurer la sécurité alimentaire des ménages [159].

Figure- 3.3 présente la cartographie des deux zones d'étude au Burundi, la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, accompagnée d'un graphique illustrant l'évolution de l'humidité relative entre 2013 et 2022, révélant des tendances contrastées qui influencent directement les conditions de production agricole et la vulnérabilité des ménages dans ces territoires. L'analyse comparative des deux zones révèle des dynamiques contrastées : la Dépression du Nord, caractérisée par un climat plus aride, présente des fluctuations plus marquées de l'humidité relative, avec des pics de sécheresse prononcés durant les saisons B et C, tandis que les Plateaux Centraux Humides maintiennent des niveaux d'humidité plus stables mais parfois excessifs, favorisant le développement de maladies cryptogamiques. Ces variations interannuelles observées entre 2013 et 2022 traduisent l'impact du changement climatique sur les régimes hydriques locaux, avec une tendance à l'assèchement progressif dans la Dépression du Nord et une irrégularité croissante des précipitations dans les Plateaux.

Pour les ménages agricoles, ces évolutions imposent une adaptation continue des calendriers culturels et des choix variétaux, sous peine de voir leurs rendements compromis. La maîtrise de l'humidité du sol devient ainsi un enjeu central de résilience, nécessitant le déploiement de techniques de conservation des eaux et des sols, d'irrigation de complément et de pratiques agroécologiques adaptées à chaque contexte pédoclimatique. La mise en place de systèmes de récupération des eaux de pluie, associés à des techniques de paillage et de mulching, permet de maintenir une humidité résiduelle favorable durant les périodes

de déficit pluviométrique. Parallèlement, l'introduction de variétés tolérantes à la sécheresse dans la Dépression du Nord et de cultivars résistants aux maladies cryptogamiques dans les Plateaux Centraux Humides constitue une stratégie complémentaire essentielle. Ces adaptations techniques doivent néanmoins s'accompagner d'un renforcement de l'encadrement agronomique et de l'accès au crédit agricole, seuls à même de permettre aux ménages les plus vulnérables d'investir dans ces innovations.

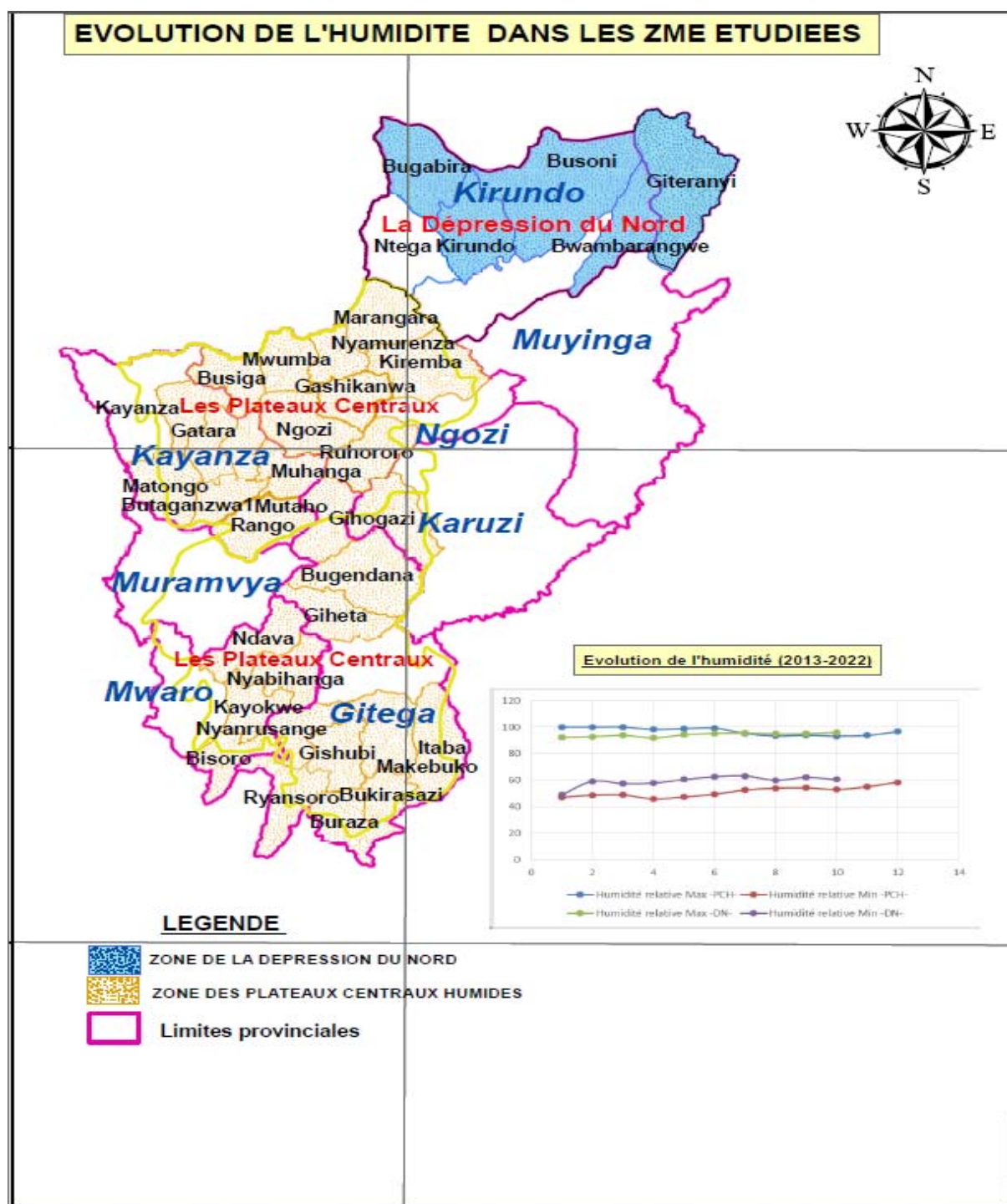


FIGURE 3.3 – Evolution de l'Humidité dans les zones étudiées

Source : IGEBU, 2025

Les Plateaux Centraux Humides, situés à une altitude plus élevée et bénéficiant d'un climat plus humide, affichent des niveaux d'humidité relative systématiquement plus élevés que la Dépression du Nord. L'humidité maximale dans les Plateaux Centraux Humides reste proche de 90-100 % pendant la saison des pluies, avec des minima rarement inférieurs à 40 %, reflétant une atmosphère plus saturée en raison de l'altitude et des précipitations abondantes. En revanche, la Dépression du Nord, à une altitude plus basse et dans une région plus aride, présente une humidité maximale de 80-90 % et des minima plus bas, descendant jusqu'à 30 % en saison sèche, ce qui indique des conditions plus sèches et une variabilité plus marquée. Sur la période 2013-2022, les deux zones montrent une augmentation de l'humidité maximale, mais les Plateaux Centraux Humides maintiennent une humidité plus stable et élevée, tandis que la Dépression du Nord est plus sensible aux fluctuations saisonnières, exacerbées par sa topographie et son climat moins humide.

3.3.3 Sources des données agro-météorologiques

Les données météorologiques proviennent de diverses sources fiables, principalement des stations météorologiques et sont collectées par l'Institut Géographique du Burundi qui est spécialisé dans la collecte et l'analyse des informations climatiques. Pour notre étude, nous nous sommes concentrés sur les stations météorologiques se trouvant dans la zone ciblée par notre recherche. Cette institution collecte régulièrement des données sur les précipitations, les températures et l'humidité, en utilisant des équipements modernes tels que des pluviomètres, des thermomètres et des hygromètres. De plus, des données satellitaires peuvent également être utilisées pour compléter ces informations sur les tendances climatiques à plus large échelle.

3.3.4 Présentation des logiciels de travail

3.3.4.1 Logiciel de collecte des données

KoBoCollect, intégré à la plateforme KoBoToolbox, a été utilisé comme outil principal de collecte de données au niveau des ménages dans cette étude. Ce logiciel open-source, compatible avec les smartphones et tablettes Android, a permis la saisie intuitive et structurée des données sur le terrain, même en l'absence de connexion Internet, ce qui est particulièrement adapté aux zones rurales à faible couverture réseau. KoBoCollect supporte divers types de questions comme choix multiples, numériques, géolocalisation et médias, facilitant ainsi la standardisation et la qualité des données collectées. Les informations saisies, sont ensuite synchronisées automatiquement vers une base centralisée sur KoBoToolbox pour une gestion sécurisée, un accès en temps réel et une analyse rapide. Cette méthode modernisée réduit les délais de collecte et limite les erreurs associées aux saisies manuelles traditionnelles, garantissant ainsi la rigueur méthodologique et l'efficacité dans le traitement des données.

3.3.4.2 Logiciel d'analyse descriptive et de modélisation : Python

Python est un langage de programmation open-source très populaire dans le domaine de l'analyse de données en raison de sa simplicité, de sa puissance et de la vaste bibliothèque de modules disponibles pour traiter et analyser les données.

Python a été utilisé dans le cadre de cette recherche comme outil central pour manipuler, nettoyer, analyser et modéliser les données socio-économiques et météorologiques.

Plusieurs bibliothèques Python ont été mobilisées pour leurs fonctionnalités spécifiques :

- **Pandas** : cet outil assure la structuration et la transformation des données sous forme de tableaux, puis il permet la gestion des valeurs manquantes, le filtrage ainsi que le calcul d'indicateurs statistiques descriptifs essentiels comme la moyenne, la médiane et l'écart-type.
- **NumPy** : cette bibliothèque réalise des calculs numériques rapides, des opérations matricielles et un traitement efficace des données multidimensionnelles.
- **Matplotlib et Seaborn** : ces outils permettent la création de visualisations graphiques claires et informatives, notamment des histogrammes, des diagrammes et des représentations de corrélations, et ce afin d'explorer les tendances et les relations entre variables.
- **Statsmodels** : ce package effectue des modélisations statistiques avancées, par exemple des régressions linéaires et des tests d'hypothèses, dans le but d'étudier les impacts des variables explicatives telles que le revenu ou le climat sur des variables dépendantes comme la productivité agricole ou la sécurité alimentaire.
- **Scikit-learn** : cette bibliothèque applique des algorithmes d'apprentissage automatique pour la classification, la régression et le clustering, ce qui facilite la prédiction des effets des chocs climatiques et économiques sur la résilience des ménages.

Ainsi, Python a offert une chaîne intégrée d'analyse, de l'exploration initiale des données à la modélisation prédictive, renforçant la rigueur méthodologique et la pertinence des résultats scientifiques [160].

3.3.5 Méthodologie d'analyse des données sur le revenu vital et effectif

Une analyse statistique et économétrique, combinant des approches descriptives et exploratoires multidimensionnelles, a été utilisée. La première étape a consisté à calculer le revenu vital, en utilisant une approche basée sur la méthode Anker, adaptée au contexte local burundais [161, 162]. Le revenu effectif, quant à lui, a été estimé en agrégeant les revenus nets agricoles issus des cultures de spéculation, autres cultures et élevage, non agricoles comme le commerce, salaires, artisanat, et autres sources comme les transferts et les investissements. Ces calculs ont été effectués à partir de données collectées auprès de 384 ménages, permettant une estimation précise des composantes financières [137].

Pour visualiser la distribution des revenus, des histogrammes et des courbes de densité par estimation par noyau (KDE) ont été utilisés, suivant les méthodes de Silverman [163] et Parzen [164]. Ces outils ont permis d'identifier les concentrations de revenus, les asymétries, et les inégalités économiques, notamment via le coefficient de Gini calculé pour chacune des zones des moyens d'existence ciblées par la recherche.

L'analyse des déterminants de l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif a été réalisée à l'aide d'un modèle Probit, et ce modèle a été choisi pour sa capacité à modéliser une variable dépendante binaire dénommée `Ecart_RV_RE`, laquelle prend la valeur 1 si le revenu effectif est supérieur ou égal au revenu vital et la valeur 0 sinon. Ce modèle postule l'existence d'une variable latente continue y_i^* qui représente la propension du ménage i à atteindre ou à dépasser le revenu vital. La relation entre cette propension et les variables

explicatives s'écrit ainsi sous la forme générale suivante :

$$y_i^* = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \cdots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad (3.2)$$

où $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ désignent les variables socio-démographiques, agricoles et institutionnelles décrites ci-après ; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ sont les paramètres à estimer ; et ε_i est un terme d'erreur supposé suivre une loi normale centrée réduite $\mathcal{N}(0, 1)$. La variable observée binaire y_i (Ecart_RV_RE) est alors définie par :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } y_i^* \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Ainsi, la probabilité que le revenu effectif soit supérieur ou égal au revenu vital s'exprime comme :

$$P(y_i = 1 \mid X) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \cdots + \beta_k X_{ki}) \quad (3.4)$$

où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. Le modèle est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance (MLE). Il intègre des variables socio-démographiques, agricoles et institutionnelles. La sélection des variables a été effectuée via un test de Wald [165], éliminant progressivement les variables non significatives ($p\text{-value} > 0,05$) pour garantir un modèle parcimonieux et robuste. Les corrélations entre les variables ont été examinées à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson. Les effets marginaux du modèle Probit ont été calculés pour interpréter l'impact de chaque variable sur la probabilité de réduire l'écart, offrant une mesure intuitive des contributions relatives des facteurs. Cette méthodologie, combinant analyses descriptives, visualisation et modélisation économétrique, permet une compréhension approfondie des dynamiques socio-économiques et des inégalités, tout en fournissant des bases solides pour des recommandations politiques ciblées.

3.3.6 Méthodologie d'analyse des données sur les combinaisons optimales des cultures

La méthodologie utilisée dans l'analyse des données repose sur une approche statistique multidimensionnelle combinant des analyses descriptives, exploratoires et économétriques pour examiner les combinaisons optimales des ressources des ménages ruraux au Burundi. Des statistiques univariées et bivariées ont été utilisées pour les analyses descriptives initiales, incluant des moyennes, écarts-types, et tests de signification (t-tests, ANOVA) pour comparer les caractéristiques des deux zones [?].

Pour explorer les relations complexes entre les variables, une analyse en composantes principales (ACP) sera employée, visant à réduire la dimensionnalité tout en capturant la variance principale des données. Soit X une matrice de données de dimension $n \times p$ où n est le nombre d'observations et p le nombre de variables. L'ACP consiste à trouver des combinaisons linéaires des variables originales appelées composantes principales :

$$C_k = a_{1k}X_1 + a_{2k}X_2 + \cdots + a_{pk}X_p \quad \text{pour } k = 1, \dots, p \quad (3.5)$$

où $a_{1k}, \dots, a_{pk}$ sont les coefficients de la k -ième composante principale, obtenus en maximisant

sant la variance de C_k sous la contrainte d'orthogonalité. Les composantes sont ordonnées par ordre décroissant de variance, de sorte que C_1 capture le maximum de variance, C_2 le maximum de la variance résiduelle non expliquée par C_1 , et ainsi de suite.

L'efficacité productive a été analysée via un modèle de frontière de production stochastique (SFA), basé sur une fonction Translog estimée par maximum de vraisemblance (MLE). Ce modèle distingue l'inefficacité technique (u_i) des aléas stochastiques (v_i), avec des intrants comme la terre, le travail, et le capital, et des déterminants de l'inefficacité. La forme générale du modèle SFA s'écrit :

$$Y_i = f(X_i; \beta) \cdot e^{v_i - u_i} \quad (3.6)$$

où Y_i est la production observée du ménage i , $f(X_i; \beta)$ la fonction de production déterministe (Translog ou Cobb-Douglas), X_i le vecteur des intrants, β les paramètres à estimer, v_i un terme d'erreur aléatoire supposé suivre une loi normale $v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$ représentant les chocs exogènes, et u_i un terme d'inefficacité technique supposé suivre une loi demi-normale $u_i \sim \mathcal{N}^+(0, \sigma_u^2)$. La fonction Translog spécifiée est :

$$\ln Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j \ln X_{ji} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \beta_{jl} \ln X_{ji} \ln X_{li} + v_i - u_i \quad (3.7)$$

où m est le nombre d'intrants. L'efficacité technique du ménage i est alors définie par :

$$TE_i = \exp(-u_i) \quad (3.8)$$

avec $0 \leq TE_i \leq 1$. Le test du rapport de vraisemblance sera également effectué pour confirmer l'adéquation de la forme Translog par rapport à la Cobb-Douglas. Enfin, un modèle K-Means est également prévu pour segmenter les ménages en deux clusters basés sur leurs revenus. Soit un ensemble d'observations $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ où $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^d$ est le vecteur des caractéristiques du ménage i . L'algorithme K-Means partitionne les données en K clusters (avec $K = 2$) en minimisant la somme des carrés des distances intra-cluster (inertie) :

$$\arg \min_{\mathbf{C}} \sum_{k=1}^K \sum_{\mathbf{x} \in C_k} \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k\|^2 \quad (3.9)$$

où C_k est l'ensemble des observations appartenant au cluster k , $\boldsymbol{\mu}_k$ le centroïde (moyenne) des observations du cluster k , et $\|\cdot\|$ la distance euclidienne. Un RandomForestRegressor sera utilisé pour simuler le comportement des producteurs. Le modèle Random Forest est un ensemble d'arbres de régression construits sur des échantillons bootstrap de données. La prédiction pour une observation $\mathbf{x}$ est la moyenne des prédictions individuelles des B arbres :

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{f}_b(\mathbf{x}) \quad (3.10)$$

où $\hat{f}_b(\mathbf{x})$ est la prédiction de l'arbre b . Chaque arbre est construit en sélectionnant aléatoirement, à chaque nœud, un sous-ensemble restreint de variables prédictives, ce qui permet de réduire la corrélation entre les arbres et d'améliorer la capacité de généralisation.

Les données doivent avant tout être prétraitées afin de gérer les valeurs manquantes, par imputation par la moyenne, ainsi que les aberrations, en utilisant des seuils arbitraires, ce qui garantit ainsi la robustesse des modèles. Cette méthodologie intégrée fournit une compréhension nuancée des dynamiques agricoles et socio-économiques, et elle soutient par conséquent des recommandations contextuelles pour le développement rural [12].

3.3.7 Méthodologie d'analyse des données sur la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire

L'analyse des données repose sur une méthodologie statistique multidimensionnelle qui intègre des approches descriptives, exploratoires et économétriques, et ce dans le but d'évaluer le risque de vulnérabilité à l'insécurité alimentaire dans la zone étudiée. Les analyses descriptives ont mobilisé d'une part des statistiques univariées telles que les moyennes, les écarts-types et les médianes, et d'autre part des statistiques bivariées comme les corrélations de Pearson ainsi que les tests t et ANOVA, et ce afin de comparer les caractéristiques des deux zones.

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) utilisant la distance de Ward et le critère de similarité euclidienne va segmenter les ménages en clusters basés sur le Score de Consommation Alimentaire (SCA), le FIES, le revenu réel et la localisation géographique, pour révéler les profils distincts de vulnérabilité dans les deux zones. La CAH repose sur un principe d'agglomération séquentielle : initialement, chaque ménage constitue un cluster distinct ; à chaque étape, les deux clusters les plus proches sont fusionnés selon le critère de Ward, qui minimise l'accroissement de l'inertie intra-classe. La distance euclidienne entre deux ménages i et j est définie par :

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{m=1}^p (x_{im} - x_{jm})^2} \quad (3.11)$$

où p représente le nombre de variables, c'est-à-dire le Score de Consommation Alimentaire, l'échelle FIES, le revenu réel ainsi que la localisation, et où x_{im} désigne la valeur de la variable m pour le ménage i . Le critère de Ward, quant à lui, minimise à chaque fusion la perte d'inertie inter-classe, ce qui s'exprime de la manière suivante :

$$\Delta E(A, B) = \frac{|A| \cdot |B|}{|A| + |B|} \cdot \|\bar{x}_A - \bar{x}_B\|^2 \quad (3.12)$$

où $|A|$ et $|B|$ sont les effectifs des clusters A et B , et $\bar{x}_A$, $\bar{x}_B$ leurs centres de gravité respectifs. Le dendrogramme obtenu permet de déterminer le nombre optimal de clusters par coupure à un niveau de distance approprié.

Pour modéliser les déterminants du Score de Consommation Alimentaire, dont les catégories sont Pauvre, Limite et Acceptable, une régression logistique multinomiale a été estimée par la méthode du maximum de vraisemblance. Soit Y_i une variable catégorielle prenant la valeur 0 pour la catégorie Acceptable qui constitue la catégorie de référence, la valeur 1 pour la catégorie Limite ou la valeur 2 pour la catégorie Pauvre. La probabilité que le ménage i appartienne à la catégorie j , avec $j = 1$ ou $j = 2$, s'écrit alors de la manière suivante :

$$P(Y_i = j \mid X_i) = \frac{\exp(\beta_{j0} + \beta_{j1}X_{1i} + \cdots + \beta_{jk}X_{ki})}{1 + \sum_{r=1}^2 \exp(\beta_{r0} + \beta_{r1}X_{1i} + \cdots + \beta_{rk}X_{ki})} \quad (3.13)$$

La probabilité de la catégorie de référence (Acceptable) est alors :

$$P(Y_i = 0 \mid X_i) = \frac{1}{1 + \sum_{r=1}^2 \exp(\beta_{r0} + \beta_{r1}X_{1i} + \cdots + \beta_{rk}X_{ki})} \quad (3.14)$$

où $X_{1i}, \dots, X_{ki}$ désignent les variables explicatives (caractéristiques socio-démographiques, agricoles, institutionnelles) et $\beta_{j0}, \dots, \beta_{jk}$ les coefficients à estimer pour la catégorie j . L'estimation par maximum de vraisemblance maximise la fonction :

$$\mathcal{L}(\beta) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=0}^2 P(Y_i = j \mid X_i)^{\mathbb{I}(Y_i=j)} \quad (3.15)$$

L'analyse CARI (Consumption Aggregates and Resilience Index) intégrera des indicateurs comme le ratio revenu effectif/revenu vital et le FIES, avec des tests de significativité (p-values) pour comparer les deux zones.

Les systèmes d'alerte précoce sont construits en combinant des paramètres météorologiques, des enquêtes socio-économiques et des suivis de prix [166, 167], et des modèles prédictifs, assurant une approche intégrée et robuste. La probabilité d'occurrence d'un épisode d'insécurité alimentaire sévère peut être modélisée par une fonction logistique de la forme :

$$P(Y_{t+1} = 1 \mid Z_t) = \frac{1}{1 + \exp(-(\gamma_0 + \gamma_1 X_{1t} + \gamma_2 X_{2t} + \gamma_3 X_{3t} + \gamma_4 X_{4t}))} \quad (3.16)$$

où :

- Y_{t+1} est une variable binaire prenant la valeur 1 en cas de survenue d'une crise alimentaire au trimestre $t + 1$, et 0 sinon ;
- $Z_t = (X_{1t}, X_{2t}, X_{3t}, X_{4t})$ désigne le vecteur des variables explicatives mesurées au trimestre t ;
- $X_{1t}, X_{2t}, X_{3t}, X_{4t}$ sont les variables explicatives de la variable dépendante Y_{t+1} ;
- γ_0 est l'ordonnée à l'origine (constante) ;
- $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ sont les coefficients associés à chaque variable explicative, à estimer par maximum de vraisemblance.

Cette spécification logistique permet d'estimer la probabilité conditionnelle d'apparition d'une crise alimentaire au trimestre suivant, sur la base des observations du trimestre courant. Des approches alternatives complémentaires incluent des modèles de séries temporelles (VAR, ARIMAX) pour anticiper les chocs sur les prix et la production agricole.

Cette méthodologie est renforcée par des validations croisées et des tests de robustesse. Cette combinaison d'approches descriptives, exploratoires et différentielles ont permis une compréhension nuancée des dynamiques de l'insécurité alimentaire, offrant des bases solides pour des recommandations politiques ciblées [168].

3.3.8 Méthodologie de Calcul des Indicateurs de Sécurité Alimentaire

3.3.8.1 Score de Consommation Alimentaire (SCA)

Le SCA évalue la qualité et la quantité de l'alimentation des ménages sur 7 jours, basé sur la fréquence de consommation de 8 groupes alimentaires pondérés selon leur valeur nutritionnelle. Les données sont collectées via des enquêtes ménage, rapportant les jours de consommation (0-7) pour : aliments principaux (poids : 2), légumineuses (3), légumes (1), fruits (1), viande/poisson (4), lait (4), sucre (0,5), huile (0,5).

La formule est :

$$SCA = \sum_i n_{ji} \times Poids_i \quad (3.17)$$

où n_{ji} représente le nombre de jours de consommation du groupe d'aliment i . Les données sont ensuite nettoyées par l'élimination des valeurs aberrantes ainsi que par l'imputation par la médiane ou par le mode. Le Score de Consommation Alimentaire est ensuite classé de la manière suivante : la catégorie Pauvre correspond à un score inférieur à 28, la catégorie Limite correspond à un score compris entre 28,5 et 42, et la catégorie Acceptable correspond à un score supérieur à 42[169].

3.3.8.2 Score de Diversité Alimentaire (SDA)

Le SDA mesure la variété des groupes alimentaires consommés sur les dernières 24 heures précédant l'enquête, reflétant la qualité nutritionnelle. Les 12 groupes incluent céréales, racines/tubercules, légumineuses, végétaux riches en vitamine A, etc. (sucre/condiments exclus).

Le score de diversité alimentaire (SDA) est calculé comme suit :

$$SDA = \sum_i 1(\text{consommation}_i > 0) \quad (3.18)$$

où $1(\text{consommation}_i > 0)$ est un indicateur binaire prenant la valeur 1 si le groupe alimentaire i a été consommé et 0 sinon. Le SDA atteint un maximum de 12 lorsque tous les groupes alimentaires ont été consommés.

Les données ont été prétraitées par imputation du mode et vérification croisée avec le Score de Consommation Alimentaire (SCA). Le SDA est classé en trois catégories : faible (≤ 3), modéré (4-5) et élevé (≥ 6).

Pour analyser les variations du SDA, des corrélations de Spearman et des tests de Mann-Whitney ont été utilisés. La prévalence des différents groupes alimentaires a été représentée à l'aide de cartes de chaleur (heatmaps) [156].

3.3.8.3 Stratégie de survie : Indice des Stratégies de Survie liées aux Moyens d'Existence (LCSI)

L'indicateur LCSI évalue la sévérité des mécanismes d'adaptation que les ménages mobilisent face à un manque durable de ressources pour couvrir leurs besoins essentiels, qu'ils soient alimentaires ou non. Contrairement au CSI, il ne s'intéresse pas à la fréquence des comportements mais à la nature des stratégies engagées, car certaines d'entre elles, comme la vente d'actifs productifs, compromettent durablement la capacité de résilience du ménage, indépendamment du nombre de fois où elles sont utilisées.

La méthodologie repose sur une liste standardisée d'au moins dix stratégies, réparties en trois catégories de sévérité croissante : les **stratégies de stress** (emprunter de l'argent ou puiser dans l'épargne), qui réduisent la capacité du ménage à faire face à un choc futur ; les **stratégies de crise** (vendre des actifs productifs ou retirer un enfant de l'école), qui diminuent directement la productivité future du ménage ; et les **stratégies d'urgence** (vendre la dernière terre agricole ou s'engager dans des activités à haut risque), qui compromettent gravement et durablement les moyens d'existence. Le questionnaire interroge le ménage sur l'utilisation de chaque stratégie au cours des 30 derniers jours, ou sur son épuisement au cours des 12 derniers mois (réponse codée 0 = non, 1 = oui). Le ménage est ensuite classé dans une seule des quatre catégories suivantes, déterminée par la stratégie la plus sévère qu'il a utilisée, et non par un score cumulé : aucune stratégie utilisée, stress, crise, ou urgence.

$$\text{Catégorie LCSI} = \max_{i \in S} (\text{Niveau de sévérité}_i) \quad \text{tel que } U_i = 1 \quad (3.19)$$

où S est l'ensemble des stratégies déclarées comme utilisées par le ménage, $U_i \in \{0, 1\}$ indique si la stratégie i a été utilisée (ou épuisée), et le Niveau de sévérité prend la valeur Stress, Crise ou Urgence selon la stratégie. Si $U_i = 0$ pour toutes les stratégies, le ménage est classé « Aucune stratégie ».

3.3.8.4 Calcul du CSI (Coping Strategies Index)

Le CSI mesure la fréquence et la sévérité des stratégies de consommation alimentaire adoptées par le ménage à court terme pour faire face à un déficit immédiat de nourriture, par opposition au LCSI qui porte sur les moyens d'existence à moyen et long terme. Il produit un score numérique continu, ce qui permet de suivre l'évolution de la sécurité alimentaire d'un ménage dans le temps.

La méthodologie repose sur une liste standardisée de cinq stratégies de consommation alimentaire, chacune assortie d'un poids de sévérité fixe défini par la littérature de référence : consommer des aliments moins préférés ou moins chers (poids 1), emprunter de la nourriture ou de l'argent pour en acheter (poids 2), limiter la taille des portions aux repas (poids 1), réduire la consommation des adultes au profit des enfants (poids 3), et réduire le nombre de repas pris par jour (poids 1). Le ménage est interrogé sur le nombre de jours,

au cours des 7 derniers jours, où chaque stratégie a été utilisée. Le score est obtenu en multipliant cette fréquence par le poids de sévérité de chaque stratégie, puis en sommant l'ensemble.

$$\text{CSI} = \sum_{i=1}^5 (\text{Fréquence}_i \times \text{Poids}_i) \quad (3.20)$$

où $\text{Fréquence}_i \in [0, 7]$ est le nombre de jours où la stratégie i a été utilisée durant les 7 derniers jours, et Poids_i est le poids de sévérité standard attribué à cette stratégie (1, 2 ou 3). Le score varie typiquement entre 0 et 56 ; les seuils de classification doivent être calibrés au contexte local plutôt que fixés arbitrairement, car le score brut dépend fortement des poids retenus.

3.3.8.5 Calcul du FIES (Food Insecurity Experience Scale)

La Food Insecurity Experience Scale (FIES), développée par la FAO, est un outil conçu pour mesurer l'insécurité alimentaire au niveau individuel ou des ménages en se fondant sur les expériences directes liées à l'accès à la nourriture sur une période de 12 mois, à travers un questionnaire standardisé de 8 questions. Ces questions évaluent des difficultés croissantes, allant de préoccupations légères à des situations sévères. Le score brut est ensuite ajusté à l'aide du modèle de Rasch, qui prend en compte la sévérité relative des questions pour standardiser les résultats. Les ménages sont alors classés en trois catégories : sécurité alimentaire (score ajusté de 0 à 3), insécurité alimentaire modérée (4 à 6), et insécurité alimentaire sévère (7 à 8). Enfin, ces résultats permettent d'estimer la prévalence de l'insécurité alimentaire au sein d'une population, offrant une base pour des analyses comparatives globales.

Formule (score brut) :

$$\text{Score FIES brut} = \sum_{i=1}^8 \text{Réponse}_i \quad (3.21)$$

où $\text{Réponse}_i = 1$ si la réponse à la question i est « oui » et 0 sinon. Le score ajusté nécessite des calculs statistiques supplémentaires via le modèle de Rasch, qui ne sont pas détaillés ici.

Ainsi, ces méthodologies permettent une évaluation rigoureuse de la sécurité alimentaire, chacune avec un focus spécifique : la Stratégie de Survie sur les moyens de subsistance, le CSI sur les comportements alimentaires, et la FIES sur les expériences subjectives. Leur combinaison offre une vue complète de la situation alimentaire des ménages [170].

3.3.9 Difficultés rencontrées dans le cadre de cette recherche

Dans le cadre de cette recherche, plusieurs difficultés ont été rencontrées, affectant diverses étapes du processus, notamment la collecte, le traitement et l'analyse des données. Ces contraintes, bien que surmontées grâce à des ajustements méthodologiques et logistiques, ont posé des défis.

Premièrement, la période de collecte des données a coïncidé avec les préparatifs du Recensement Général de la Population de l'Habitat de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE) au Burundi, une période marquée par des restrictions administratives strictes. Les autorités locales et nationales, mobilisées pour cet événement, ont imposé des contrôles rigoureux sur les activités de collecte de données par des entités externes, y compris les recherches académiques. Obtenir les autorisations nécessaires a été un processus long et complexe, entraînant des retards dans le démarrage des enquêtes sur le terrain. Dans certains cas, des refus temporaires d'accès dans les ménages ont nécessité des négociations supplémentaires avec les autorités locales, ce qui a prolongé la phase de planification.

Deuxièmement, une contrainte majeure a été rencontrée lors de la collecte des données agro-économiques, notamment pour les variables liées à la productivité agricole, le rendement, les superficies cultivées et aux dépenses alimentaires. Les ménages ruraux utilisent souvent des unités de mesure locales non standardisées, telles que des "sacs" ou des "brouettes" dont les équivalences en unités métriques comme kilogrammes et hectares variaient selon les régions ou les pratiques locales. Cette hétérogénéité a compliqué la consolidation des données et introduit un risque d'erreurs dans les estimations. Pour surmonter cette difficulté, des tables de conversion approximatives ont été établies en collaboration avec des informateurs locaux comprenant les agriculteurs, les commerçants, et agents de vulgarisation agricole, mais ce processus a été chronophage et a nécessité des vérifications croisées pour garantir la fiabilité des données [122].

Troisièmement, la collecte des données sur le terrain a été entravée par une pénurie de carburant au Burundi. Cette situation a affecté la mobilité des équipes de collecte des données, qui devaient couvrir des zones rurales souvent éloignées et difficilement accessibles. Les coûts imprévus liés à l'achat de carburant au marché noir, à des prix exorbitants, ont exercé une pression sur le budget de la recherche. De plus, les retards causés par ces contraintes logistiques ont réduit le temps disponible pour interroger certains ménages, obligeant les équipes à ajuster les itinéraires et à prioriser certaines zones au détriment d'autres. Dans certains cas, des enquêtes prévues dans des collines reculées ont dû être annulées ou remplacées par des collines plus accessibles, ce qui a potentiellement introduit un biais de sélection dans l'échantillon.

Quatrièmement, bien que l'Institution Nationale des Statistiques du Burundi (INSBU) et l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) aient fourni des données secondaires précieuses, certaines informations, notamment sur les coûts de l'éducation, des soins de santé et les prix des denrées alimentaires, étaient incomplètes ou obsolètes. Par exemple, les données sur les prix des marchés locaux présentaient des lacunes pour certaines périodes, ce qui a compliqué l'analyse des fluctuations saisonnières. De plus, l'accès à certaines bases de données institutionnelles était restreint en raison de formalités administratives ou de limitations techniques, obligeant le chercheur à s'appuyer davantage sur les données primaires collectées sur le terrain. Cette dépendance a accru la charge de travail liée à la collecte et au nettoyage des données [108].

3.3.10 Conclusion

La méthodologie décrite dans ce chapitre établit un cadre robuste et multidimensionnel pour analyser les dynamiques de la sécurité alimentaire, des revenus ainsi que de la résilience des ménages ruraux dans la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides du Burundi. En combinant des approches descriptives, exploratoires et économétriques,

cette recherche s'appuie sur une collecte de données rigoureuse qui utilise des outils modernes comme KoBoCollect pour les enquêtes numériques ainsi que des logiciels tels que Python et Excel pour le traitement et l'analyse. Les données agro-économiques, météorologiques et secondaires provenant de sources fiables comme l'INSBU et l'IGEBU ont permis une analyse contextualisée des facteurs socio-économiques, agricoles et climatiques qui influencent la vulnérabilité alimentaire.

Les indicateurs clés, tels que le Score de Consommation Alimentaire, le Score de Diversité Alimentaire ainsi que l'Indice de Stratégie de Coping simplifié, ont été calculés avec précision, ce qui offre une évaluation standardisée de la qualité et de la quantité des régimes alimentaires, de même que des mécanismes d'adaptation des ménages face aux chocs. L'utilisation de techniques statistiques avancées, comme l'analyse en composantes principales, la classification ascendante hiérarchique et la régression logistique multinomiale, a permis d'identifier les déterminants de la vulnérabilité et de segmenter les ménages selon leurs profils de risque, renforçant ainsi la pertinence des résultats.

Cette approche intégrée, validée par des tests de robustesse comme le bootstrap et l'exclusion séquentielle de variables, ainsi que par des analyses de sensibilité, garantit la fiabilité des conclusions qui ont été tirées. Les analyses exploratoires multidimensionnelles ont révélé des relations complexes entre les variables socio-économiques, agricoles et environnementales. Les modèles économétriques, tels que le modèle Probit pour l'écart entre revenu vital et revenu effectif, ainsi que le modèle de frontière de production stochastique pour l'efficacité productive, ont quantifié les contributions spécifiques de ces facteurs. L'incorporation de systèmes d'alerte précoce fondés sur les précipitations, les prix des denrées et les enquêtes socio-économiques a enrichi l'analyse en intégrant les dimensions climatiques et économiques.

En somme, cette méthodologie interdisciplinaire fournit une base scientifique solide pour comprendre les dynamiques de l'insécurité alimentaire et de la résilience au Burundi, tout en offrant des perspectives pour des interventions visant à améliorer la sécurité alimentaire et le bien-être des ménages ruraux dans un contexte de défis climatiques et socio-économiques croissants.

Fort de ce cadre méthodologique rigoureux et de la diversité des outils analytiques mobilisés, le chapitre suivant s'attache à examiner empiriquement les déterminants socio-économiques, agricoles et institutionnels qui façonnent l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages ruraux. En s'appuyant sur le modèle Probit, les enquêtes de terrain ainsi que les indicateurs de vulnérabilité préalablement définis, cette analyse vise à quantifier l'influence de facteurs clés sur la capacité des ménages à couvrir leurs besoins essentiels. Cette mise en perspective des résultats a permis non seulement de cartographier les mécanismes structurels à l'origine de la précarité économique, mais aussi d'identifier les leviers d'action prioritaires pour résorber durablement le déficit de revenu et orienter les politiques publiques vers des interventions ciblées, équitables et adaptées aux réalités territoriales du Burundi.

ANALYSE DES DETERMINANTS DU REVENU VITAL ET EFFECTIF

Résumé

Ce chapitre met en évidence l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages ruraux dans les deux zones de moyens d'existence. L'objectif est d'identifier les déterminants socio-économiques de cet écart et des facteurs clés auxquels reposent les inégalités. Le revenu vital, calculé à 3 242 200 FBu en moyenne par ménage de 5 personnes, intègre des composantes essentielles dont l'alimentation, logement, santé, éducation, intrants agricoles et autres besoins de base des membres des ménages. En revanche, le revenu effectif moyen, estimé à 2 528 074 FBu, reste inférieur à ce seuil pour 60% des ménages, reflétant une précarité généralisée.

Le revenu effectif est mesuré comme la somme des revenus agricoles, non agricoles, et des transferts. L'écart entre revenu effectif et vital est analysé via un modèle Probit, intégrant des variables socio-démographiques, pratiques agricoles, et accès aux services. Les effets marginaux du modèle révèlent l'impact des variables sur la probabilité de réduire ou de supprimer l'écart entre le revenu vital et effectif.

La Dépression du Nord, caractérisée par une agriculture pluviale vulnérable, affiche un écart de revenu. Les ménages y génèrent en moyenne 2 906 712,87 FBu, soit 335 487 FBu de moins que le seuil vital. Les Plateaux Centraux Humides bénéficient d'une économie mixte (cultures maraîchères, élevage), avec un revenu effectif moyen de 2 222 662,50 FBu, affichant un écart plus prononcé sous le seuil vital.

Les principaux facteurs identifiés sont : la situation matrimoniale non mariée (divorcé, veuf, célibataire) réduit la probabilité d'atteindre le revenu vital de 13,2 % ($p = 0,002$), reflétant un manque de soutien socio-économique. On a constaté également que l'utilisation de semences sélectionnées (+5,1 %, $p = 0,030$) et la pratique de cultures annuelles (+7,3 %, $p = 0,008$) améliorent les revenus grâce à une productivité accrue. Par ailleurs, l'âge du chef de ménage (+4,7 %, $p = 0,086$) et l'accès à l'encadrement agronomique (+1,9 %, $p = 0,386$) montrent des effets marginaux, soulignant des lacunes dans les politiques d'accompagnement.

Cependant, l'écart entre revenu effectif et vital au Burundi reflète des inégalités profondément ancrées, exacerbées par des chocs climatiques et économiques. Une approche intégrée combinant innovation agricole, éducation financière, et protection sociale est essentielle pour atteindre les Objectifs de Développement Durable (ODD) en matière de réduction de la pauvreté [105].

4.1 Introduction

Ce chapitre vise à examiner dans quelle mesure le concept de revenu vital peut éclairer l'analyse de la pauvreté rurale au Burundi et guider des interventions adaptées aux réalités agro-écologiques et socio-économiques du pays. Alors que les cadres internationaux reconnaissent le revenu vital comme une composante du droit fondamental à un niveau de vie suffisant, force est de constater que, dans de nombreux pays en développement, les revenus effectifs des ménages restent bien en deçà de ce seuil.

Au Burundi, pays parmi les plus pauvres du monde, les ménages ruraux font face à des défis structurels cumulés : faible productivité agricole, forte pression démographique, accès limité aux intrants modernes, crises politiques récurrentes et catastrophes naturelles. Près de 65 % des ménages ruraux vivent sous le seuil national de pauvreté, avec une alimentation insuffisante et un accès restreint aux services essentiels.

Ce chapitre cherche à répondre à une question centrale : dans quelle mesure les facteurs économiques et climatiques expliquent-ils l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages ruraux dans les zones contrastées du Burundi ? L'analyse s'attachera à identifier les déterminants de cet écart afin de proposer des leviers d'action permettant de réduire la vulnérabilité des ménages ruraux et d'améliorer leur résilience face aux chocs économiques et climatiques.

4.2 Revenu vital et indicateurs de pauvreté

Les indicateurs de la pauvreté se concentrent sur le manque d'accès à des services et des biens matériels indispensables à une vie décente, même si le ménage peut avoir un revenu suffisant. Nous avons deux types d'indicateurs de pauvreté :

- les indicateurs liés à la pauvreté monétaire qui sont centrés sur les revenus ou ressources financières disponibles pour répondre aux besoins essentiels ;
- les indicateurs liés à la privation matérielle qui sont centrés sur le manque d'accès aux biens et services essentiels comme logement, nourriture et santé, indépendamment des revenus [14].

Par conséquent, la mesure de la pauvreté reste complexe, les approches varient selon les contextes socio-économiques et les choix politiques. Le revenu vital, bien que plus holistique que le salaire minimum, se heurte à des défis de mise en œuvre dont les coûts et l'inflation et de comparabilité internationale. Les indicateurs comme l'indice de pauvreté ou le taux de privation monétaire offrent des perspectives complémentaires, mais aucun ne suffit seul. Une combinaison de méthodes à savoir monétaire, relative et qualitative est essentielle pour appréhender la multidimensionalité de la pauvreté [66].

4.3 Cadre analytique du revenu vital et effectif

Le Burundi étant un pays à faible revenu où la majorité de la population dépend de l'agriculture pour sa subsistance [2], la comparaison entre revenu vital et revenu effectif permet d'identifier les écarts entre les ressources disponibles et les besoins essentiels des

ménages. Alors que le revenu vital représente un seuil théorique pour garantir une vie décente, le revenu effectif reflète la réalité économique effective des ménages.

4.3.1 Définition et calcul du revenu vital

Le revenu vital correspond au montant minimal de ressources financières nécessaires pour couvrir les besoins essentiels d'un ménage rural : alimentation, eau potable, santé, éducation, logement et autres dépenses non discrétionnaires. Ce seuil, fondé sur des standards universels, est ajusté selon le contexte local (prix, pratiques culturelles, etc.) [161, 162].

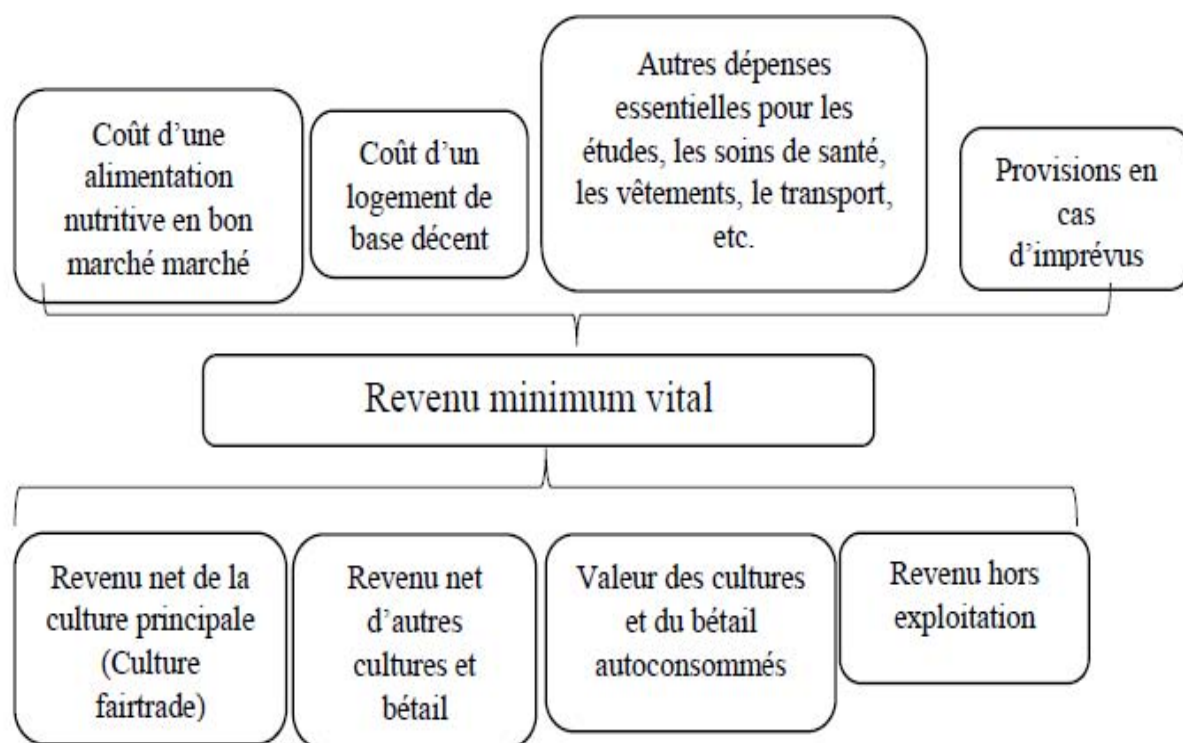


FIGURE 4.1 – Eléments du revenu vital

4.3.2 Calcul du Revenu vital

Le calcul du revenu vital doit prendre en compte différents facteurs spécifiques à cette population, tels que les coûts des intrants agricoles, le revenu nécessaire pour couvrir les besoins alimentaires et autres besoins essentiels, ainsi que les différences géographiques (zones rurales ou urbaines). Les éléments suivants constituent des composantes principales pour le calcul du revenu vital :

- **Alimentation (A)** : Le coût nécessaire pour nourrir le ménage [169].
- **Logement (L)** : Les dépenses liées au logement, y compris le loyer ou les coûts d'entretien de la maison.
- **Santé (S)** : Les dépenses médicales et les assurances santé.
- **Éducation (E)** : Les coûts d'éducation des enfants, y compris les frais scolaires et les fournitures.
- **Transport (T)** : Les coûts liés au transport, notamment pour aller sur le marché ou se rendre aux services sociaux.

- **Services de base (B)** : Les coûts liés à l'accès à l'eau potable, à l'électricité, et autres services essentiels [108].
- **Intrants agricoles (I)** : Le coût des semences, des fertilisants, des produits phytosanitaires, et des outils nécessaires à la production agricole [98].

Le revenu vital peut donc être exprimé comme la somme des coûts de chaque composante essentielle pour le ménage du producteur agricole. Cela peut être formulé mathématiquement comme suit :

$$R_{\text{vital}} = A + L + S + E + T + B + I \quad (4.1)$$

Où :

- A est le coût mensuel ou annuel pour la nourriture pour le ménage,
- L est le coût mensuel ou annuel du logement (loyer ou entretien),
- S est le coût mensuel ou annuel des soins de santé et des assurances,
- E est le coût mensuel ou annuel de l'éducation des enfants,
- T est le coût mensuel ou annuel du transport,
- B est le coût mensuel ou annuel des services de base (eau potable, électricité, etc.),
- I est le coût mensuel ou annuel des intrants agricoles nécessaires à la production agricole.

4.3.3 Définition et calcul du Revenu effectif

Le revenu effectif, également désigné sous le terme *actual income*, correspond à la valeur des ressources effectivement disponibles pour un ménage sur une période donnée, incluant à la fois les flux monétaires (ventes, transferts, revenus non agricoles, etc.) et la valeur imputée de l'autoconsommation [15, 28]. Cet indicateur se distingue ainsi des mesures purement monétaires du revenu, qui ignorent la part non marchande de la consommation.

Le calcul du revenu effectif repose sur l'agrégation de plusieurs composantes. Il intègre d'une part les revenus monétaires perçus par le ménage, lesquels comprennent les ventes de produits agricoles, les activités non agricoles, les transferts (remises migratoires, aides sociales, dons) ainsi que les éventuels revenus du capital. D'autre part, il inclut la valeur monétaire de l'autoconsommation, c'est-à-dire la part de la production agricole que le ménage consomme directement sans passer par le marché. Cette dernière est généralement estimée en multipliant les quantités autoconsommées par les prix de marché locaux [28, 15]. Ainsi défini, le revenu effectif constitue un indicateur plus fidèle de la capacité réelle du ménage à satisfaire ses besoins essentiels, et il est privilégié pour la comparaison avec le revenu vital [60, 171].

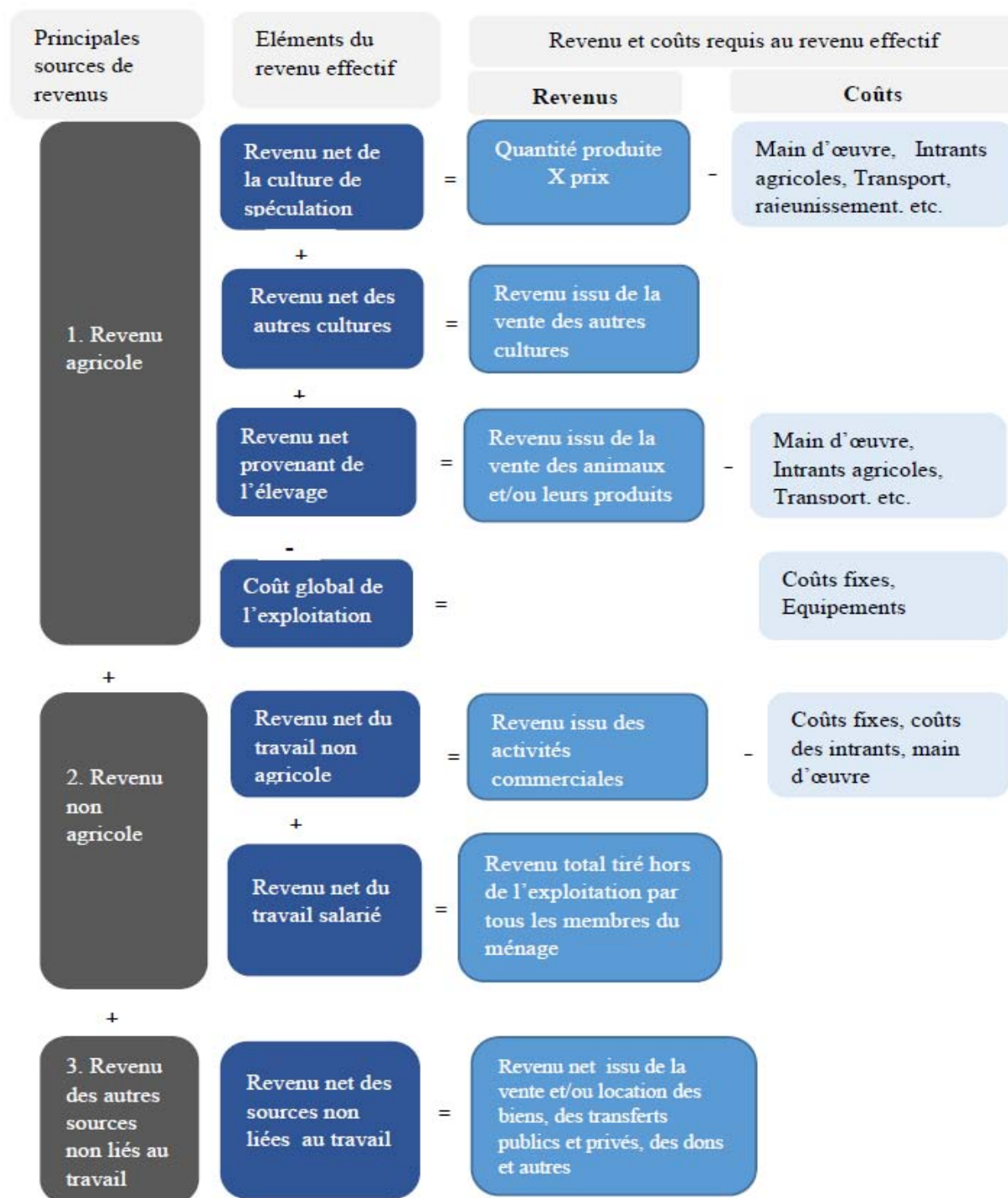


FIGURE 4.2 – Eléments du revenu effectif

Revenu net agricole

Le revenu net agricole se décompose en trois composantes :

$$R_a = R_s + R_o + R_e \quad (4.2)$$

où :

— R_a : revenu net agricole total

- R_s : revenu net tiré de la culture de spéculation
- R_o : revenu net tiré des autres cultures
- R_e : revenu net tiré de l'élevage

Chacune de ces composantes s'écrit comme la somme du revenu issu des ventes et de la valeur de l'autoconsommation.

Revenu net tiré de la culture de spéculation

$$R_s = R_{s,v} + R_{s,c} \quad (4.3)$$

Interprétation : $R_{s,v}$ représente les revenus monétaires obtenus par la vente de la production de spéculation sur le marché. $R_{s,c}$ correspond à la valeur économique (au prix du marché) des quantités de cette même production que le ménage consomme directement, sans passer par une transaction monétaire.

Revenu net tiré des autres cultures

$$R_o = R_{o,v} + R_{o,c} \quad (4.4)$$

Interprétation : $R_{o,v}$ est le revenu monétaire issu de la vente des cultures autres que celui des cultures de spéculation. $R_{o,c}$ est la valeur imputée de l'autoconsommation de ces autres cultures.

Revenu net tiré de l'élevage

$$R_e = R_{e,v} + R_{e,c} \quad (4.5)$$

Interprétation : $R_{e,v}$ regroupe les revenus monétaires provenant de la vente d'animaux (bétail) ou de produits d'élevage (lait, œufs, etc.). $R_{e,c}$ est la valeur imputée des produits d'élevage consommés directement par le ménage.

Revenu net non agricole

$$R_{na} = R_{com} + R_{sal} + R_{art} \quad (4.6)$$

Interprétation : Le revenu non agricole (R_{na}) est la somme des revenus tirés d'activités commerciales (R_{com}), d'emplois salariaux (R_{sal}) et d'activités artisanales (R_{art}).

Revenu des autres sources

$$R_{aut} = R_{tr} + R_{inv} + R_{nt} \quad (4.7)$$

Interprétation : R_{aut} inclut les revenus non liés au travail agricole : transferts sociaux (R_{tr}), revenus d'investissement (R_{inv}) et autres revenus hors travail (R_{nt}).

Revenu total réel du ménage

$$R_{eff} = R_a + R_{na} + R_{aut} \quad (4.8)$$

Interprétation : Le revenu effectif du ménage R_{eff} est la somme de l'ensemble des ressources monétaires et non monétaires (autoconsommation) issues des activités agricoles, non agricoles et des autres sources.

Relation entre revenu effectif et revenu vital du ménage

Soit R_{vit} le revenu vital, c'est-à-dire le montant minimum nécessaire pour couvrir les besoins essentiels du ménage comme l'alimentation, le logement, la santé et l'éducation de base.

- Si $R_{eff} > R_{vit}$: le ménage dispose d'un surplus lui permettant d'améliorer son niveau de vie et d'investir dans des activités non essentielles.
- Si $R_{eff} = R_{vit}$: le ménage couvre exactement ses besoins essentiels, sans excédent.
- Si $R_{eff} < R_{vit}$: le ménage est en situation de précarité, contraint de faire des arbitrages douloureux entre ses besoins fondamentaux [78].

Notation

- R : Revenu net
- Indice a : agricole
- Indice na : non agricole
- Indice v : vendu
- Indice c : autoconsommé (consommé par le ménage)
- Indice s : culture de spéculation
- Indice o : autres cultures
- Indice e : élevage
- Indice com : commercial
- Indice sal : salarial
- Indice art : artisanal
- Indice tr : transferts
- Indice inv : investissements
- Indice nt : non-travail
- Indice $effectif$: effectif
- Indice vit : vital

4.3.4 Corrélation de Pearson entre les facteurs du revenu vital

L'analyse de la corrélation entre les variables constitue une étape essentielle avant d'entamer toute analyse statistique et économétrique. Elle permet d'explorer et de comprendre les relations entre différentes variables, d'identifier des tendances, de formuler des hypothèses et de guider les décisions basées sur des données quantitatives. Elle quantifie également la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables. Le coefficient de corrélation de Pearson, qui varie entre -1 et +1, est l'un des indicateurs les plus courants. Un coefficient de +1 indique une corrélation positive parfaite, tandis qu'un coefficient de -1 indique une corrélation négative parfaite. Un coefficient de 0 suggère qu'il n'y a pas de relation linéaire [152].

La formule du coefficient de corrélation de Pearson (r) est donnée par :

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (4.9)$$

où :

- n : le nombre d'observations (points de données)
- x et y : les variables ou les séries de données
- $\sum xy$: somme des produits des paires de valeurs x et y
- $\sum x$ et $\sum y$: sommes respectives des valeurs de x et de y
- $\sum x^2$ et $\sum y^2$: sommes des carrés des valeurs de x et de y

L'analyse de la corrélation est donc cruciale dans la modélisation statistique car elle permet de choisir les variables explicatives appropriées dans le modèle de régression. C'est

ainsi que dans notre modèle, nous décidons d'inclure des variables ayant une forte corrélation avec la variable dépendante, maximisant ainsi la capacité prédictive du modèle [172].

La Figure-4.3 est une matrice de corrélation qui révèle des relations entre la variable « Ecart_RV_REFF » qui est un écart entre le revenu vital et le revenu réel des ménages et plusieurs variables socio-économiques, agricoles et démographiques.

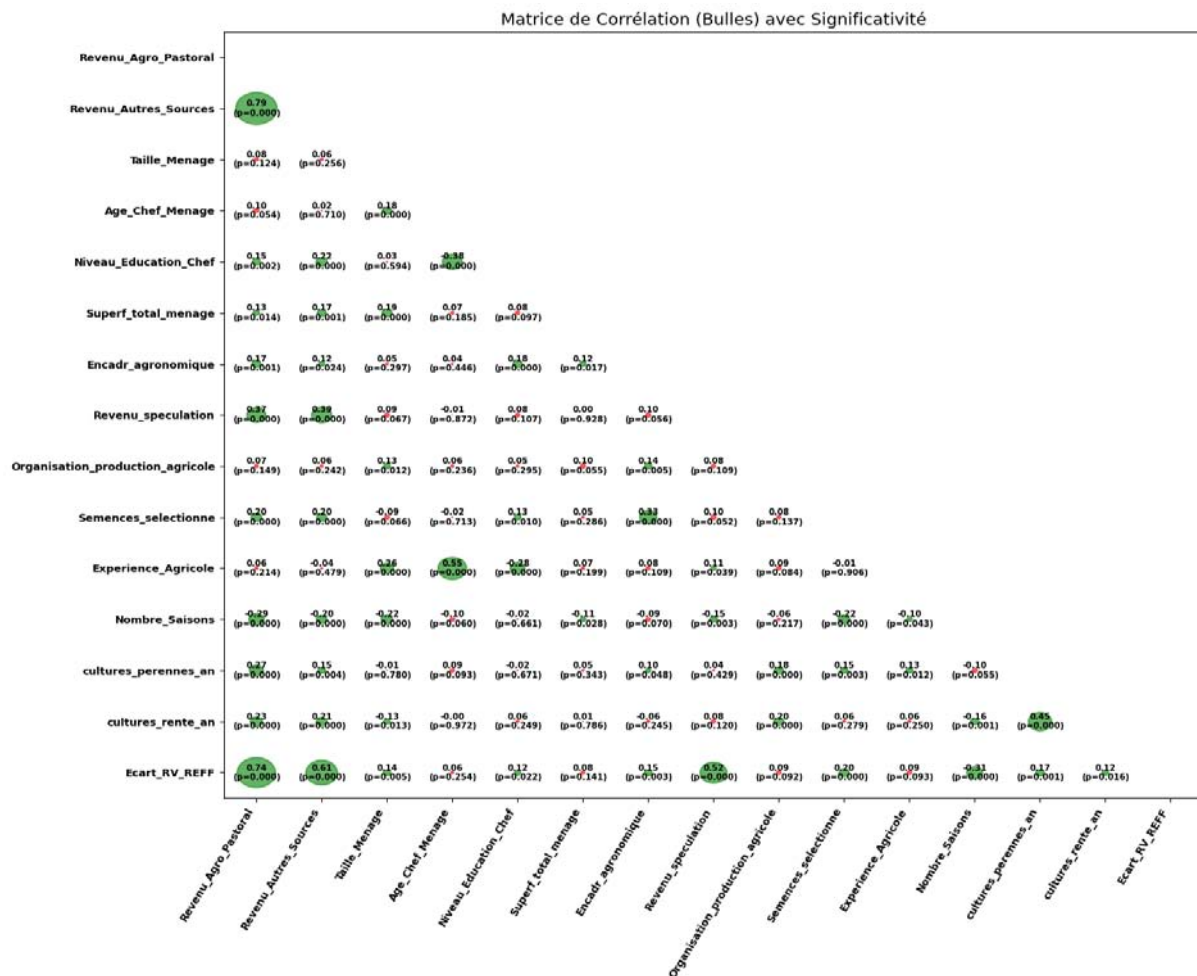


FIGURE 4.3 – Corrélation inter-variables

Les relations présentées dans Figure 4.3 fournissent des connaissances sur les facteurs qui influencent la capacité des ménages à combler l'écart entre leurs revenus effectifs et leurs besoins essentiels. Les résultats montrent que les variables liées aux sources de revenus agricoles jouent un rôle prépondérant dans cette dynamique. En particulier, le revenu agro-pastoral (coefficient de 0.74, $p=0.000$), le revenu des autres sources (0.61, $p=0.000$) et le revenu des cultures de spéculation (0.52, $p=0.000$) présentent des corrélations positives et fortement significatives avec la variable « Ecart_RV_REFF ». Ces résultats indiquent que l'amélioration de ces revenus contribue directement à réduire ou à supprimer l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages. Ce constat souligne l'importance cruciale de l'agriculture et des activités connexes comme principaux leviers économiques pour améliorer la sécurité financière des populations rurales, notamment dans un contexte où l'économie burundaise repose largement sur l'agriculture vivrière et les petites exploi-

tations familiales comme le montre Mpandeli [3]. Cependant, il convient de noter que ces corrélations positives ne garantissent pas nécessairement une augmentation proportionnelle du revenu effectif par rapport aux besoins vitaux, car d'autres facteurs structurels, tels que les coûts de production élevés ou l'accès limité aux marchés, peuvent limiter cet impact.

En plus des revenus agricoles, d'autres variables présentent des corrélations faibles mais statistiquement significatives avec la variable « Ecart_RV_REFF », suggérant des relations plus subtiles mais néanmoins importantes. Par exemple, la taille du ménage (0.14, $p=0.005$) et le genre du chef de ménage (0.13, $p=0.009$) montrent des coefficients positifs modérés. Cela peut indiquer que les ménages plus grands, bien qu'exerçant une pression accrue sur les ressources disponibles, bénéficient également d'une main-d'œuvre plus importante pour générer des revenus supplémentaires, ce qui pourrait contribuer à réduire l'écart entre le revenu réel et vital [137]. De même, les ménages dirigés par des femmes semblent présenter un léger avantage en termes de revenus, bien que cela puisse être attribué à des politiques ciblées favorisant l'autonomisation économique des femmes dans certaines régions [97]. L'encadrement agronomique (0.15, $p=0.003$) et l'utilisation de semences sélectionnées (0.20, $p=0.000$) apparaissent également comme des facteurs clés pour améliorer les revenus agricoles. Ces résultats mettent en lumière l'importance des interventions techniques et institutionnelles, telles que la formation agricole et l'accès à des intrants modernes, pour renforcer la productivité et la résilience des ménages face aux chocs économiques et climatiques [155].

D'autres variables, telles que le nombre de saisons culturales (0.31, $p=0.000$), le nombre de cultures pérennes (0.17, $p=0.001$) et le nombre de cultures de rente (0.12, $p<0.016$), montrent également des corrélations positives significatives, bien que modérées. Ces résultats reflètent l'importance de la diversification agricole comme stratégie pour maximiser les revenus et minimiser les risques liés à la variabilité climatique et aux fluctuations des prix des produits agricoles [12]. La capacité des ménages à cultiver plusieurs types de plantes sur différentes saisons leur permet non seulement de mieux gérer les incertitudes environnementales, mais aussi de profiter des opportunités économiques offertes par les cultures de rente et les cultures pérennes. Toutefois, ces corrélations modérées suggèrent que la diversification seule ne suffit pas à combler l'écart entre le revenu vital et effectif, surtout dans un contexte marqué par des contraintes foncières, des pratiques agricoles traditionnelles et un accès limité aux technologies modernes. Ces facteurs limitent potentiellement l'efficacité des stratégies de diversification pour les ménages les plus vulnérables.

La significativité statistique observée pour toutes les variables analysées ($p\text{-value} < 0.05$) confirme que les corrélations identifiées ne sont pas dues au hasard, mais reflètent des relations réelles et mesurables entre les variables étudiées. Cependant, il est important de reconnaître que les corrélations, même significatives, ne démontrent pas nécessairement des relations causales. Par exemple, bien que l'encadrement agronomique et l'utilisation de semences sélectionnées soient associés à une réduction de l'écart, leur impact réel dépend probablement d'autres facteurs contextuels, tels que l'accès aux terres arables, la disponibilité des crédits agricoles et la qualité des infrastructures locales. De plus, les faibles coefficients observés pour certaines variables, comme le genre du chef de ménage ou le nombre de cultures de rente, soulignent la nécessité d'adopter une approche holistique pour comprendre les interactions complexes entre les différents déterminants de la sécurité économique des ménages [28].

Cependant, l'analyse de la matrice de corrélation fournit une base solide pour identifier les principaux leviers capables de réduire l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages dans les zones étudiées. Les revenus agricoles, l'encadrement technique, la diversification des cultures et les caractéristiques démographiques émergent comme des facteurs clés pour améliorer la situation économique des ménages ruraux. Cependant, ces résultats appellent également à une réflexion approfondie sur les mécanismes institutionnels et politiques nécessaires pour renforcer l'impact de ces facteurs. Des interventions ciblées, telles que l'amélioration de l'accès aux intrants agricoles, la promotion de pratiques agricoles durables et la mise en place de systèmes de soutien social, sont essentielles pour transformer ces corrélations en véritables stratégies de développement durable [42]. Dans un contexte marqué par des vulnérabilités croissantes liées au changement climatique et à la pauvreté généralisée, ces efforts deviennent cruciaux pour garantir une sécurité alimentaire et économique durable pour les populations dans les zones étudiées [173].

4.3.5 Analyse des déterminants de l'écart entre le revenu vital et effectif des ménages

4.3.5.1 Visualisation de la distribution du revenu vital et effectif des ménages

La Figure-4.4 représente la distribution des variables revenu effectif et vital pour les ménages de la zone d'étude au Burundi. L'histogramme utilisé divise les données en intervalles et affiche la fréquence des observations dans chaque intervalle.

L'histogramme bleu illustre la répartition du revenu effectif des ménages, permettant d'identifier les concentrations de revenus. La courbe KDE (Kernel Density Estimation) est une méthode non paramétrique pour estimer la fonction de densité de probabilité d'une variable. Elle lisse l'histogramme en utilisant un noyau (fonction de pondération) et une bande passante, offrant une visualisation plus fluide des modes et asymétries.

Un histogramme asymétrique à droite avec une queue étendue vers les hauts revenus suggère une inégalité économique et la présence de ménages aisés minoritaires.

- **Revenu effectif faible** : Concentration autour du premier quartile ($\leq 25\%$ des ménages).
- **Revenu effectif moyen** : Pic central, reflétant la classe majoritaire.
- **Revenu effectif élevé** : Queue de distribution, souvent associée à des ménages ayant des activités diversifiées.

La Figure-4.4 présente les distributions des revenus effectifs et vitaux des ménages dans deux zones d'étude. Chaque sous-graphique montre un histogramme accompagné d'une courbe de densité (KDE) pour les deux types de revenus, avec les moyennes respectives et le pourcentage de ménages dont le revenu effectif est supérieur ou égal au revenu vital.

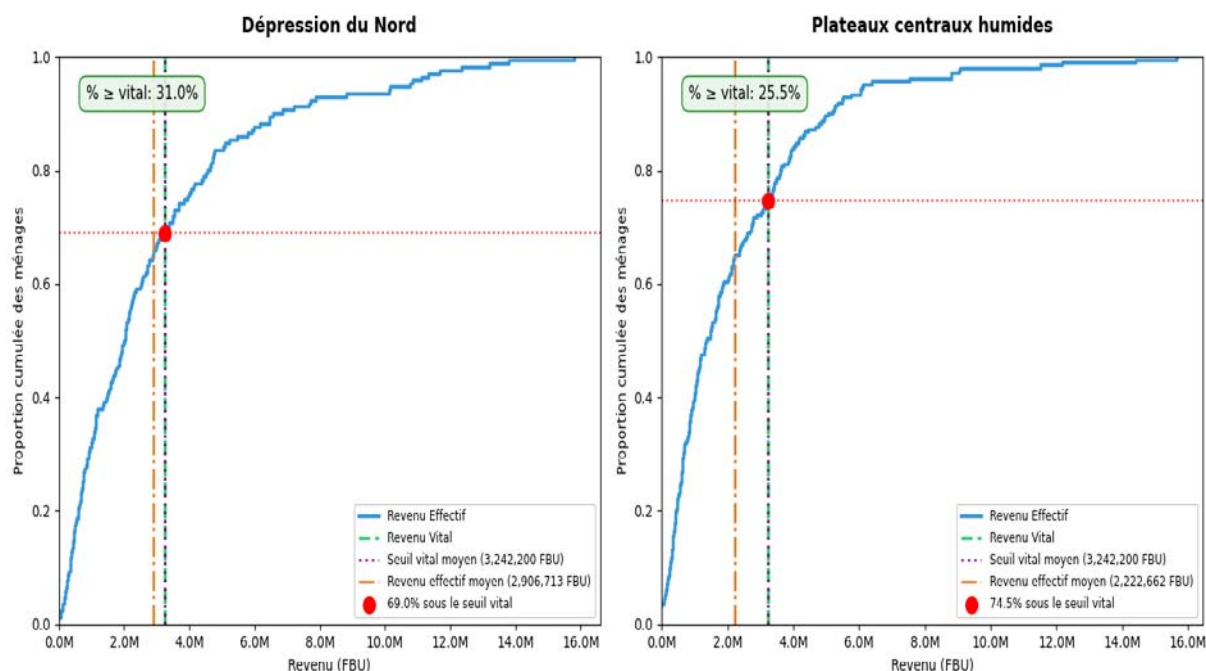


FIGURE 4.4 – Comparaison du revenu effectif et revenu vital

Les résultats montrent que dans la Dépression du Nord, la distribution des revenus effectifs et vitaux est fortement concentrée sur des valeurs faibles. La moyenne du revenu effectif dans cette zone est de 2 906 712,87 FBU, tandis que la moyenne du revenu vital est de 3 242 200 FBU. Ces chiffres révèlent qu'en moyenne, les ménages disposent d'un revenu effectif inférieur au revenu nécessaire, témoignant ainsi d'une situation économique précaire. L'histogramme met en évidence une forte concentration des données dans les premières classes, indiquant que la majorité des ménages perçoit des revenus effectifs très faibles. La courbe de densité appuie cette observation, avec un pic marqué à gauche et une queue qui s'étend vers des valeurs plus élevées, mais reste faible. Le pourcentage de ménages ayant un revenu effectif supérieur ou égal au revenu vital est seulement de 30,99%, ce qui souligne les difficultés rencontrées par la plupart des ménages pour couvrir leurs besoins essentiels avec leurs ressources économiques disponibles.

Dans les Plateaux centraux humides, la situation diffère légèrement. La moyenne du revenu effectif dans cette zone est de 2 222 662,50 FBU, inférieure à celle de la Dépression du Nord. Cependant, la distribution des revenus effectifs y est plus dispersée, caractérisée par plusieurs pics et une queue plus longue vers les valeurs élevées. L'histogramme illustre une répartition plus étalée des revenus, avec des pics moins prononcés et une queue plus étendue, ce que confirme également la courbe de densité. La moyenne du revenu vital y demeure la même qu'en Dépression du Nord, soit 3 242 200 FBU, mais sa distribution est également plus variable, reflétant une diversité plus importante des besoins vitaux des ménages. Seuls 25,47% des ménages dans cette zone disposent d'un revenu effectif supérieur ou égal au revenu vital, un chiffre plus bas que dans la Dépression du Nord, laissant présumer une précarité économique plus accentuée.

En moyenne, le revenu effectif des ménages dans les deux zones étudiées se situe à 2 564 687,69 FBU, ce qui représente une estimation globale des ressources économiques disponibles pour ces populations rurales, par rapport à un revenu vital moyen de 3 242

200 FBU. De plus, le pourcentage moyen de ménages ayant un revenu effectif supérieur ou égal à ce seuil vital dans ces zones est de 28,23%, reflétant une situation générale où une large majorité des ménages peine à atteindre ce niveau minimal de ressources. En comparant ces deux zones, on observe que la Dépression du Nord affiche une moyenne de revenu effectif plus élevée, bien que concentrée sur des faibles valeurs, tandis que les Plateaux centraux humides présentent un revenu effectif moyen plus bas, mais avec une distribution plus diversifiée. Cette différence suggère que la situation économique dans les Plateaux centraux humides est plus hétérogène, avec une plus grande proportion de ménages à revenus très faibles, mais aussi une minorité disposant de revenus plus importants. Quant aux besoins vitaux, bien que la moyenne soit similaire dans les deux zones, leur dispersion est plus marquée dans les Plateaux centraux humides, indiquant une plus grande variabilité des besoins selon les ménages.

Ces constats soulignent la nécessité de tenir compte des spécificités locales dans l'analyse des revenus et des besoins vitaux [144]. Ainsi, dans la Dépression du Nord, les politiques publiques devraient prioritairement viser l'amélioration des revenus effectifs par la création d'emplois bien rémunérés et un soutien socio-économique accru. Dans les Plateaux centraux humides, les interventions devraient également cibler l'augmentation des revenus, tout en prenant en considération la diversité des situations économiques des ménages pour garantir une approche plus adaptée et efficace.

4.4 Cadre analytique du modèle probit

La régression probit est une méthode statistique utilisée pour modéliser des variables dépendantes binaires (ou dichotomiques), où la variable cible prend généralement deux valeurs possibles, comme "oui" ou "non", "succès" ou "échec". C'est une forme de régression logistique, mais au lieu d'utiliser la fonction logistique pour transformer les prédictions, elle utilise la fonction de répartition cumulative de la loi normale (fonction probit). Le but de cette régression est de prédire la probabilité qu'un événement se produise en fonction des variables indépendantes. Cette méthode est particulièrement utilisée dans des situations où l'on cherche à prédire des événements binaires avec des données continues ou catégorielles comme prédictors.

Dans le cadre de notre recherche, nous utilisons la régression probit pour identifier les facteurs indispensables à l'accessibilité des ménages au revenu minimum vital. Ce modèle a été choisi du fait que notre variable de réponse est dichotomique avec des modalités OUI (avoir le revenu effectif supérieur ou égal au revenu minimum vital) et NON (avoir le revenu effectif inférieur au revenu minimum vital). Cependant, la probabilité d'avoir le revenu effectif supérieur ou égal au revenu minimum vital implique la réduction ou l'absence de l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif, tandis que la probabilité d'avoir le revenu effectif inférieur au revenu minimum vital implique l'augmentation de l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif.

4.4.1 Présentation du modèle

Le modèle cherche à estimer la probabilité P_i que le ménage i ait un revenu minimum vital, en fonction d'un ou plusieurs facteurs observables. Cette probabilité est représentée par la fonction $F(I)$, qui est la fonction de répartition cumulative de la distribution normale, souvent notée $\Phi(I)$. Ce modèle suppose que I_i suit une fonction de répartition de la loi

normale centrée réduite [152]. La probabilité P_i est exprimée comme :

$$P_i = F(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_i} e^{-Z^2/2} dZ \quad (4.10)$$

où I_i représente un indice qui combine les facteurs explicatifs influençant la probabilité que le ménage i ait un revenu minimum vital.

L'indicateur I_i , qui est l'argument de la fonction cumulative F , est un score latent (non observé directement) qui dépend linéairement des variables explicatives X_i :

$$I_i = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (4.11)$$

d'où :

$$P_i = F(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta_0 + \beta_1 X_i} e^{-Z^2/2} dZ \quad (4.12)$$

ou encore :

$$P_i = P(Y = 1 | X) = F(\beta_0 + \beta_1 X_i) \quad (4.13)$$

avec :

- P_i : probabilité que le ménage i gagne un revenu minimum vital
- F : fonction de densité cumulée normale
- β_0 : ordonnée à l'origine
- β_1 : coefficient associé à la variable explicative X_i
- X_i : variable explicative

4.4.1.1 Effets marginaux

Les coefficients du modèle probit sont souvent interprétés en termes d'effets marginaux. L'effet marginal représente l'impact du changement d'une unité de X_i sur la probabilité P_i , calculé par :

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_i} = \phi(\beta_0 + \beta_1 X_i) \cdot \beta_1 \quad (4.14)$$

où ϕ est la fonction de densité normale standard. Cela indique l'impact du changement de X_i sur la probabilité de l'événement.

4.4.2 Sélection des variables candidates à la modélisation

La sélection de variables est une étape clé et délicate de la modélisation. La base de données de l'étude comporte un ensemble de variables dont la méthode sélective de variables basée sur le test de Wald [165] nous permettra de réduire pas à pas. Certaines variables sont redondantes, d'autres n'ont aucun rapport avec la variable dépendante. La méthode statistique doit indiquer le sous-ensemble de variables à inclure dans le modèle. Dans l'idéal, elles devraient être orthogonales entre elles et fortement liées avec la variable dépendante. Certains facteurs agroéconomiques sont très liés entre eux et surtout à l'écart entre le revenu vital et effectif dans les zones étudiées.

4.4.3 Méthode de sélection des variables basée sur le test de Wald

La procédure peut être résumée comme suit :

1. Commencer avec la totalité des variables ;
2. Estimer les paramètres de la régression ;
3. Détecter parmi les coefficients celui qui présente la statistique de Wald la plus faible ;
4. Vérifier s'il est non significatif en comparant la p-value du test avec le risque de première espèce α choisi. Si p-value $\leq \alpha$, la variable est conservée. Si p-value $> \alpha$, la variable est retirée et, si l'ensemble n'est pas vide, retourner à l'étape (2), sinon arrêter le processus.

TABLEAU 4.1 – Liste des variables sélectionnées à la modélisation

Variable	Type	Description
Variable dépendante		
ECART_RV_REFF	Binaire	Différence entre revenu vital et effectif. 0 = revenu effectif < revenu vital 1 = revenu effectif $\geq$ revenu vital
Variables indépendantes		
AGE_CHEF_MENAGE	Quantitative	Âge du chef de ménage en années révolues le jour de l'enquête
GENRE_CHEF_MENAGE	Binaire	Genre du chef de ménage. 1 = Masculin, 2 = Féminin
SITUATION_MATRIMONIALE	Catégorielle	Situation matrimoniale du chef de ménage : 1 = Marié, 2 = Célibataire, 3 = Divorcé, 4 = Séparé, 5 = Veuf/veuve
NIVEAU_EDUCATION	Catégorielle	Niveau d'éducation du chef de ménage : 1 = Sans éducation, 2 = Alphabétisation, 3 = Primaire, 4 = Secondaire, 5 = Universitaire
TAILLE_MENAGE	Quantitative	Nombre de personnes dans le ménage (y compris les personnes à charge)
SUPERF_AGRICOLE_TOTALE_MENAGE	Quantitative	Superficie agricole totale exploitée par le ménage (en ha)
ENCADR_AGRONOMIQUE	Binaire	Accès au service d'encadrement agronomique : 1 = Oui, 0 = Non
ORGANISATION_PROD_AGRICOLE	Binaire	Appartenance à une organisation de production agricole : 1 = Oui, 0 = Non
SEMENCES_SELECTIONNEE	Binaire	Utilisation de semences sélectionnées : 1 = Oui, 0 = Non
MAIN_D'OEUVRE	Binaire	Accès à une main-d'œuvre suffisante pour les activités agricoles : 1 = Oui, 0 = Non
EXPERIENCE_AGRICOLE	Catégorielle	Expérience agricole du ménage : 1 = 1-5 ans, 2 = 5-10 ans, 3 = >10 ans
NOMBRE_DE_SAISONS	Catégorielle	Nombre de saisons culturales pratiquées : 1 = Trois saisons, 2 = Deux saisons, 3 = Une saison
NBRE_CULTURES_ANNUELLES	Quantitative	Nombre de cultures annuelles pratiquées par le ménage
NBRE_CULTURES_PERENNES	Quantitative	Nombre de cultures pérennes pratiquées par le ménage
NBRE_CULTURES_RENTE	Quantitative	Nombre de cultures de rente pratiquées par le ménage

4.4.4 Modélisation des déterminants de l'écart des revenus vital et effectif

Contrairement à la régression linéaire, le modèle Probit repose sur la distribution normale cumulative (Φ) pour lier les variables indépendantes aux probabilités d'occurrence de l'événement représenté par la variable dépendante. Les coefficients du modèle sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (MLE), qui cherche à maximiser la probabilité d'observer les données sous-jacentes en ajustant les paramètres du modèle. Ces coefficients mesurent l'impact des variables indépendantes sur la probabilité cumulée standard normale, mais ils ne peuvent pas être interprétés directement comme des variations dans les probabilités. Les effets marginaux sont dérivés à partir des probabilités prédites par le modèle et permettent d'évaluer l'influence pratique des variables explicatives sur la variable dépendante, offrant ainsi une compréhension claire et accessible des résultats du modèle Probit [160]. En appliquant ce cadre général au contexte spécifique

de cette étude, le modèle des déterminants de l'écart entre le revenu vital et le revenu effectif s'exprime comme suit :

$$P(\text{ECART_RV_REFF}_i = 1 \mid \mathbf{X}_i) = \Phi \left(\beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k X_{ik} \right) \quad (4.15)$$

où :

- $P(\text{ECART_RV_REFF}_i = 1 \mid \mathbf{X}_i)$: probabilité que le ménage i atteigne ou dépasse le revenu vital,
- $\Phi(\cdot)$: fonction de répartition de la loi normale centrée réduite,
- β_0 : constante du modèle,
- β_k : coefficient associé à la k -ième variable explicative,
- X_{ik} : valeur de la k -ième variable explicative pour le ménage i ,
- K : nombre total de variables indépendantes sélectionnées dans Tableau 4.1.

Cette spécification opérationnalise les équations (1) à (4) présentées précédemment en intégrant l'ensemble des déterminants socio-économiques et agricoles identifiés. L'interprétation des résultats repose sur le calcul des effets marginaux selon l'équation (5), permettant de quantifier l'impact de chaque facteur sur la probabilité d'atteindre le seuil de revenu vital.

4.4.5 Description générale des résultats du modèle probit

TABLEAU 4.2 – Résumé du modèle Probit

Statistique	Valeur
Dep. Variable	Ecart_RV_REFF
No. Observations	383
Model	Probit
Df Residuals	367
Method	MLE
Df Model	15
Pseudo R-squ.	0.1768
Log-Likelihood	-186.75
Converged	True
LL-Null	-226.87
Covariance Type	nonrobust
LLR p-value	6.313e-11

Source : Calculs de l'auteur à partir des données d'enquête, réalisés sous Python (statsmodels)

Le modèle Probit présenté ici vise à expliquer la variable dépendante Ecart_RV_REFF (écart entre le revenu vital et le revenu effectif) en fonction de plusieurs variables indépendantes. Les résultats montrent que le modèle converge correctement ('Converged : True'), ce qui signifie que les algorithmes d'estimation ont abouti à une solution optimale pour maximiser la vraisemblance. La statistique du pseudo R^2 (0,1768) indique que le modèle explique environ 17,68 % de la variation dans la variable dépendante, ce qui est acceptable dans le contexte des modèles économétriques basés sur des données binaires,

où les R^2 sont souvent plus faibles que dans les régressions linéaires classiques. La valeur de la log-vraisemblance (-186,75) reflète la qualité de l'ajustement du modèle, tandis que la comparaison avec la log-vraisemblance nulle (-226,87) permet de calculer le test du rapport de vraisemblance (LLR). Le LLR p-value (6.313e-11) extrêmement faible suggère que le modèle global est statistiquement significatif, c'est-à-dire que les variables indépendantes collectivement contribuent de manière importante à expliquer la variation de la variable dépendante.

Dans un modèle Probit, les coefficients ne peuvent pas être interprétés directement comme des effets marginaux, car ils mesurent l'impact des variables indépendantes sur la probabilité cumulée standard normale (Φ). Pour une interprétation plus intuitive, nous avons calculé les effets marginaux, qui représentent le changement attendu dans la probabilité d'avoir le revenu effectif supérieur ou égal au revenu vital (ou "1") pour une unité de variation d'une variable indépendante, tout en maintenant constantes les autres variables.

TABLEAU 4.3 – Effets marginaux du modèle probit

Variable	dy/dx	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
Age_Chef_Ménage	0.0474	0.028	1.717	0.086	-0.007	0.101
Genre_chef_ménage	0.0668	0.040	1.688	0.091	-0.011	0.144
Situation_Matrimoniale	-0.1316	0.042	-3.116	0.002	-0.214	-0.049
Niveau_Education_Chef	0.0387	0.023	1.653	0.098	-0.007	0.085
Taille_Menage	0.0201	0.023	0.865	0.387	-0.025	0.065
Organisation_production_agricole	0.0023	0.021	0.109	0.913	-0.039	0.044
Superf_total_ménage	-0.0078	0.018	-0.442	0.659	-0.043	0.027
Encadr_agronomique	0.0192	0.022	0.867	0.386	-0.024	0.063
Semences_selectionne	0.0513	0.024	2.175	0.030	0.005	0.097
Main_oeuvre	0.0140	0.021	0.657	0.511	-0.028	0.056
Experience_Agricole	0.0174	0.027	0.641	0.521	-0.036	0.071
Nombre_Saisons	-0.0692	0.022	-3.100	0.002	-0.113	-0.025
cultures_annuelles_an	0.0727	0.027	2.660	0.008	0.019	0.126
cultures_perennes_an	0.0133	0.024	0.556	0.578	-0.034	0.060
cultures_rente_an	0.0071	0.025	0.283	0.777	-0.042	0.056

Source : Calculs de l'auteur sous Python (statsmodels)

Note : Les effets marginaux représentent la variation de la probabilité d'atteindre ou de dépasser le revenu vital pour une variation unitaire de chaque variable explicative, toutes choses égales par ailleurs.

Les résultats du Tableau 4.3 montrent que certaines caractéristiques sociodémographiques jouent un rôle significatif dans la probabilité qu'un ménage atteigne ou dépasse le revenu vital. L'âge du chef de ménage (coefficient marginal = 0,0474) est associé positivement à une augmentation de cette probabilité, bien que cet effet ne soit pas statistiquement significatif au seuil conventionnel de 5%. Cette tendance peut être interprétée comme une accumulation d'expérience et de savoir-faire avec l'âge, qui pourrait améliorer les capacités des chefs de ménage à maximiser leurs ressources disponibles. Cependant, l'incertitude autour de cet effet (intervalle de confiance incluant 0) suggère que d'autres facteurs liés à l'âge pourraient aussi influencer ce résultat.

En revanche, la situation matrimoniale du chef de ménage a un impact négatif et statistiquement significatif (effet marginal = -0,1316, p-value = 0,002). Les ménages dirigés par des personnes célibataires, divorcées ou veuves semblent donc avoir une probabilité réduite d'atteindre ou de dépasser leur revenu vital. Le genre du chef de ménage présente également un effet positif, bien que non significatif qu'un seuil de 5% (coefficient marginal = 0,0668, p-value = 0,091).

Les variables relatives aux pratiques agricoles et à la gestion des ressources montrent des effets variés mais significatifs. Par exemple, l'utilisation de semences sélectionnées (coefficient marginal = 0,0513, p-value = 0,030) est fortement associée à une augmentation de la probabilité de succès. De manière similaire, le nombre de cultures annuelles (coefficient marginal = 0,0727, p-value = 0,008) est également lié positivement à une meilleure performance économique [84]. En revanche, le nombre de cultures pérennes ou de rente n'a pas d'effet significatif.

Le nombre de saisons agricoles exploitées par les ménages présente un effet négatif significatif (coefficient marginal = -0,0692, p-value = 0,002). Ces résultats soulignent l'importance de l'accompagnement technique et financier pour aider les agriculteurs à gérer efficacement leur diversification agricole [97].

4.5 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en exergue des dynamiques complexes qui régissent la sécurité alimentaire des ménages dans les zones étudiées. Les analyses ont montré que les revenus agricoles, bien qu'essentiels, ne constituent qu'un élément parmi d'autres dans la réduction de l'écart entre le revenu vital et effectif. Les revenus issus des cultures de spéculation et des activités agro-pastorales présentent des corrélations positives significatives, ce qui suggère que leur intensification pourrait contribuer à améliorer la situation économique des ménages. Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car ils reflètent des relations statistiques qui ne garantissent pas nécessairement des impacts causaux directs.

Un aspect crucial mis en lumière est le rôle des interventions techniques et institutionnelles. L'accès à des semences sélectionnées, l'encadrement agronomique et le nombre de saisons apparaissent comme des déterminants significatifs mais modérés de l'amélioration du revenu effectif. Ces variables illustrent l'importance de renforcer les capacités des ménages à adopter des pratiques agricoles résilientes. Les corrélations faibles mais significatives observées pour des variables comme la taille du ménage ou le genre du chef de ménage soulignent la nécessité d'intégrer une dimension démographique et sociale dans les politiques publiques.

Enfin, ces résultats appellent à une réflexion stratégique sur la durabilité des systèmes agricoles, notamment la diversification des cultures et l'optimisation des cycles culturaux, pour maximiser les revenus tout en minimisant les risques environnementaux. Ce chapitre fournit ainsi des bases solides pour orienter les efforts de recherche et de développement vers des solutions durables pour renforcer la résilience des populations rurales face aux défis actuels et futurs. Il contribue également à une compréhension nuancée de la pauvreté au Burundi, en articulant revenu vital, inégalités régionales, et déterminants socio-économiques. Les politiques publiques doivent prioriser une transformation structurelle des systèmes agricoles, une redistribution équitable des ressources, et une protection

sociale inclusive.

Fort de ces constats sur les déterminants de l'écart entre revenu vital et revenu effectif, il apparaît nécessaire d'aller au-delà de l'identification des facteurs explicatifs pour examiner comment les ménages mobilisent et combinent concrètement leurs ressources productives. En effet, la réduction durable de cet écart ne dépend pas seulement de l'accès à des intrants ou à un encadrement technique, mais aussi de la capacité des exploitants à optimiser l'allocation de leurs terres, de leur main-d'œuvre, de leur capital et de leurs choix cultureux dans un contexte de forte fragmentation foncière et de variabilité climatique. Le chapitre suivant se consacre ainsi à l'analyse des combinaisons optimales des ressources au sein des exploitations rurales, en mobilisant des outils économétriques et multidimensionnels pour évaluer l'efficacité technique, identifier les pratiques les plus rentables et résilientes, et démontrer le rôle structurant de l'agroforesterie dans la transformation des systèmes agricoles vers un revenu vital décent et une sécurité alimentaire durable.

ANALYSE DES COMBINAISONS OPTIMALES DES RESSOURCES

Résumé

Ce chapitre révèle des disparités marquées entre deux zones rurales du Burundi : les Plateaux Centraux Humides, dotés de meilleures conditions agro-écologiques, d'un accès plus fréquent à l'irrigation (14,4 %) et à l'encadrement agricole (40 %), et la Dépression du Nord, marquée par des sols appauvris, une forte variabilité climatique et un accès limité aux ressources. Ces écarts se traduisent par des revenus agropastoraux presque doublés dans les Plateaux (2,4 millions FBU vs 1,3 million FBU) et des inégalités plus aiguës dans la Dépression (Gini = 0,49 contre 0,45).

L'agroforesterie se distingue comme une stratégie de résilience : les ménages qui l'adoptent enregistrent un revenu agricole moyen 24,4 % plus élevé (2 724 110 FBU vs 2 189 132 FBU), avec une différence hautement significative ($p = 0,0012$). Son efficacité est renforcée par un accompagnement technique, notamment dans les systèmes de café ombragé soutenus par des coopératives et des partenariats internationaux.

L'analyse par frontière de production stochastique pointe une inefficacité technique moyenne de 29,9 %, révélant un potentiel de gain de production sans nouveaux intrants. La superficie cultivée est le principal déterminant de la production (élasticité = 0,2281), tandis que la main-d'œuvre est sous-utilisée (effet non significatif). L'ACP confirme cette dualité territoriale à travers deux axes : un axe socio-économique (CP1) caractéristique des Plateaux, et un axe démographique-pratique (CP2) typique de la Dépression, illustrant des stratégies d'adaptation profondément différenciées.

5.1 Introduction

Le développement durable repose aujourd'hui sur l'amélioration des conditions de vie, en particulier dans les zones rurales où la pauvreté demeure un enjeu majeur [100]. Dans de nombreux pays en développement, et plus spécifiquement en Afrique de l'Est, l'agriculture constitue la principale source de revenus et un levier fondamental de la sécurité alimentaire. Toutefois, les ménages ruraux y sont confrontés à des contraintes persistantes : ressources productives limitées, fragmentation des terres, faible accès aux intrants, aux marchés et aux services financiers, ainsi qu'une exposition croissante aux aléas climatiques, dans un contexte de systèmes économiques fragiles.

L'Afrique de l'Est se caractérise par une grande diversité de trajectoires de développement. Si certains pays, comme le Kenya ou l'Ouganda, enregistrent des progrès grâce à des politiques agricoles ciblées et à l'adoption d'innovations [?], d'autres, comme le Burundi, restent engagés dans un modèle de subsistance fortement vulnérable. L'agriculture burundaise est majoritairement pratiquée sur de petites parcelles, avec une mécanisation quasi

inexistante et une productivité chroniquement faible [122]. Dans ce contexte, les stratégies mises en œuvre par les ménages, choix des cultures, diversification des sources de revenus (agricoles et non agricoles), gestion des dépenses domestiques, deviennent déterminantes pour leur résilience et leur bien-être [10].

Cette étude propose donc d'analyser, à l'aide des méthodes statistiques avancées, les interactions entre les pratiques agricoles, la diversification des revenus et les comportements de consommation au sein des ménages ruraux burundais. L'objectif est d'identifier les combinaisons de facteurs susceptibles de renforcer leur stabilité économique, d'atténuer leur vulnérabilité et d'orienter des politiques publiques mieux adaptées aux réalités locales, en vue d'un développement rural durable [3].

5.2 Description générale des exploitations agricoles au Burundi

Les exploitations agricoles des ménages ruraux au Burundi présentent une grande diversité de pratiques, mais elles sont confrontées à des défis importants liés à l'accès à la terre, à l'encadrement agricole, à la fragmentation foncière ainsi qu'au faible développement des infrastructures d'irrigation [12]. Ces contraintes limitent sévèrement la productivité, la diversification des cultures et la capacité d'adaptation aux aléas climatiques. La distribution inégale des terres, caractérisée par une forte concentration foncière entre quelques ménages et une majorité qui exploite des parcelles inférieures à 0,5 hectare, renforce cette vulnérabilité structurelle.

Ainsi, certains ménages adoptent les systèmes agroforestiers comme une stratégie de résilience, et ce particulièrement dans les zones où les moyens d'existence sont les plus dégradés. Bien que leur adoption reste inégale, ces systèmes intègrent des arbres, notamment des espèces d'ombrage comme *Grevillea robusta*, des fruitiers tels que les avocatiers et les bananiers, ou encore des légumineuses fixatrices d'azote, aux cultures annuelles comme les haricots, le maïs et le manioc, ou aux cultures pérennes comme le café. Cette intégration permet non seulement de protéger les sols contre l'érosion, d'améliorer leur fertilité et de modérer le microclimat, mais aussi de diversifier les sources de revenus et d'alimentation [153].

Toutefois, la gestion des systèmes agroforestiers demeure souvent traditionnelle, et cela faute d'un encadrement technique suffisant, d'un accès limité aux plants de qualité ainsi que d'incitations économiques claires. Dans certaines zones, notamment les Plateaux Centraux Humides, des initiatives portées par des coopératives comme le consortium COCOCA et soutenues par des partenariats internationaux, par exemple le projet burundo-allemand financé par le Bade-Wurtemberg, favorisent une agroforesterie planifiée centrée sur le café ombragé, laquelle combine durabilité environnementale et amélioration du revenu [78].

Ainsi, si la majorité des exploitations restent dominées par des cultures annuelles et une agriculture pluviale vulnérable, le renforcement des systèmes agroforestiers structurés, accompagné par un appui technique et institutionnel, constitue une voie prometteuse pour transformer l'agriculture burundaise vers plus de productivité, de durabilité et de résilience face au changement climatique [42].

La figure 5.1 présente une série de graphiques décrivant les caractéristiques agricoles des

ménages étudiés, notamment la distribution de leur superficie totale et cultivable, les modes d'accès à la terre ainsi que la diversification des cultures pratiquées, et ces graphiques mettent ainsi en évidence un contexte de petite exploitation fortement fragmentée, avec une faible diversification et un accès majoritairement personnel ou familial à la terre.

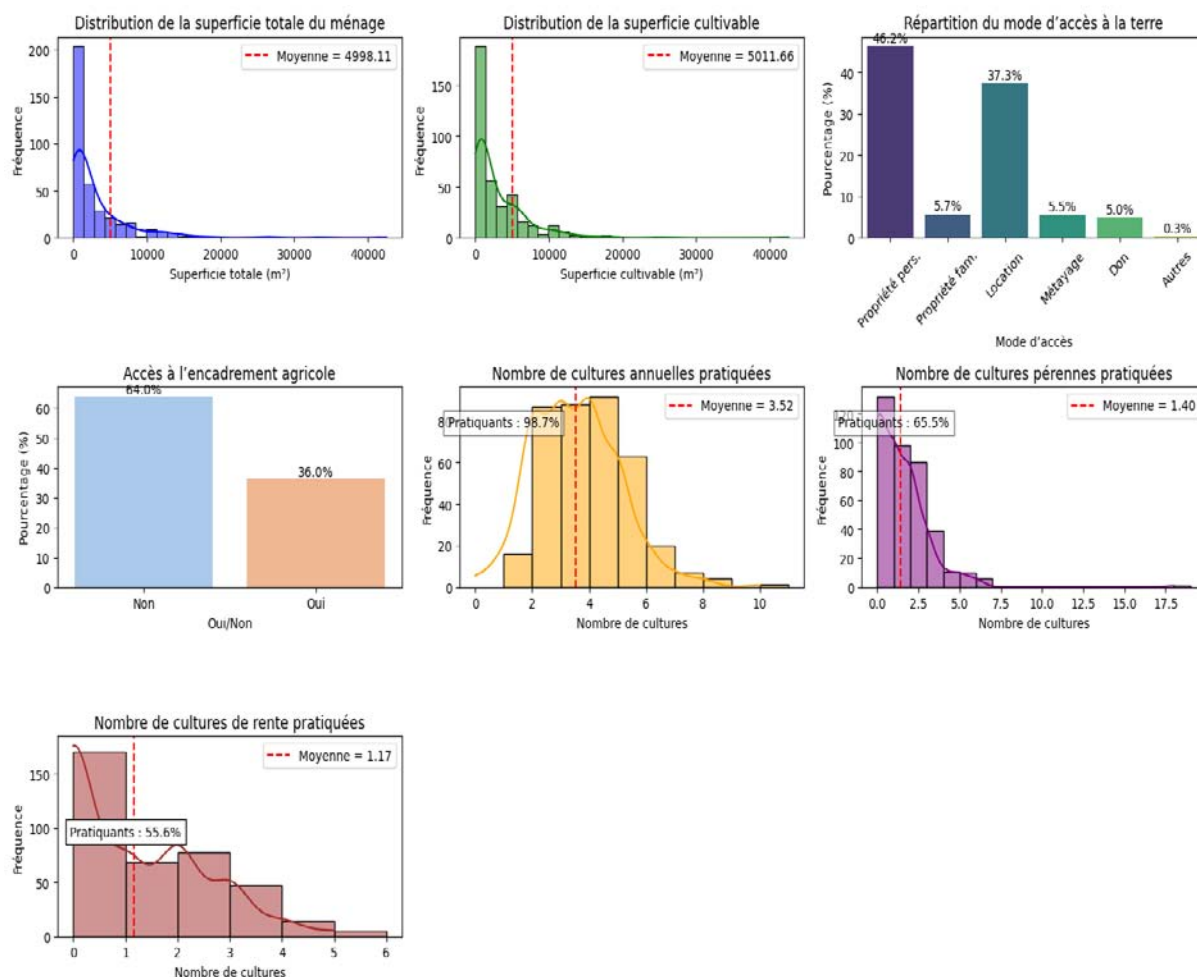


FIGURE 5.1 – Analyse descriptive des exploitations agricoles dans la zone d'étude

Les résultats présentés dans la Figure 5.1 montrent que la distribution des superficies totales est fortement asymétrique à droite, où la majorité des ménages détient de petites surfaces, mais quelques-uns possèdent des terres considérablement plus vastes, tirant ainsi la moyenne vers le haut (4998,11 m²). Cette inégalité se reflète aussi dans la superficie cultivable, avec une répartition similaire, indiquant que la plupart des terres agricoles sont utilisées, bien que quelques exploitations se distinguent par leur taille exceptionnelle. L'écart entre la moyenne de la superficie totale (4998,11 m²) et celle de la superficie cultivable (5011,66 m²) suggère qu'une partie des ménages cultive des parcelles de terre supplémentaires qui ne font pas nécessairement partie de leur propriété principale. Ces parcelles, bien que contribuant à la superficie cultivable, ne sont pas incluses dans la superficie totale de la propriété. Cette observation pourrait indiquer une utilisation de terres extérieures à la propriété principale pour des activités agricoles, ce qui permet d'augmenter la superficie cultivée sans pour autant en augmenter la superficie totale de terrain possédé.

La structure foncière des ménages est dominée par des modes d'accès à la terre principalement basés sur la propriété personnelle (46,2 %) et familiale (37,3 %), mettant en évidence une forte prévalence de la propriété privée. Cependant, l'accès à l'encadrement agricole reste limité, car seulement 36 % des ménages bénéficient d'un soutien en la matière, ce qui constitue un frein potentiel pour l'augmentation de la productivité agricole. En termes de production, l'agriculture en milieu rural repose avant tout sur les cultures annuelles, avec une moyenne de 3,52 cultures annuelles par ménage, indiquant une forte dépendance à cette forme d'agriculture. Les cultures pérennes, bien que pratiquées par 65,5 % des ménages, sont moins répandues avec une moyenne de 1,40 culture pérenne. Les cultures de rente représentent également une part croissante de la production agricole, pratiquées par 55,6 % des ménages, bien que la majorité se concentre sur 1 ou 2 cultures de rente [94].

5.3 Expérience agricole et revenus des ménages ruraux

Au Burundi, le revenu des ménages ruraux est étroitement lié à leur expérience agricole. Cette expérience limitée en techniques agricoles modernes, conjuguée à la vulnérabilité aux aléas climatiques et à un accès restreint à l'irrigation et à l'encadrement agronomique, limite la productivité et par conséquent les revenus générés. Néanmoins, des efforts de diversification des cultures et d'amélioration progressive des pratiques offrent un potentiel d'augmentation des revenus agricoles, qui restent essentiels pour la subsistance et le développement économique [10]. La Figure 5.2 met en évidence l'impact de l'expérience agricole et du nombre de saisons culturales sur les revenus des ménages, soulignant ainsi le rôle crucial de la fréquence culturale dans la construction d'un revenu plus stable.

En effet, une expérience agricole prolongée permet aux ménages d'optimiser l'allocation de leurs ressources productives, de mieux anticiper les risques climatiques et biologiques, et d'ajuster leurs choix cultureux en fonction des spécificités agro-écologiques locales. Cette accumulation de savoir-faire, souvent transmise de génération en génération, constitue une forme de capital immatériel qui renforce la résilience des exploitations face aux chocs récurrents. Parallèlement, la multiplication des saisons culturales agit comme un mécanisme de lissage des revenus, en étalant les périodes de récolte et en réduisant la dépendance à une seule campagne agricole, souvent compromise par l'irrégularité des précipitations. Toutefois, cette dynamique vertueuse se heurte à plusieurs contraintes structurelles qui limitent la capacité des ménages à transformer leur expérience en gains de productivité durables et, par conséquent, à franchir le seuil du revenu vital décent. Dès lors, l'enjeu pour les politiques publiques réside dans la conception de programmes d'accompagnement qui valorisent les savoirs endogènes tout en introduisant des innovations adaptées aux réalités locales, afin de consolider les trajectoires de résilience des ménages ruraux.

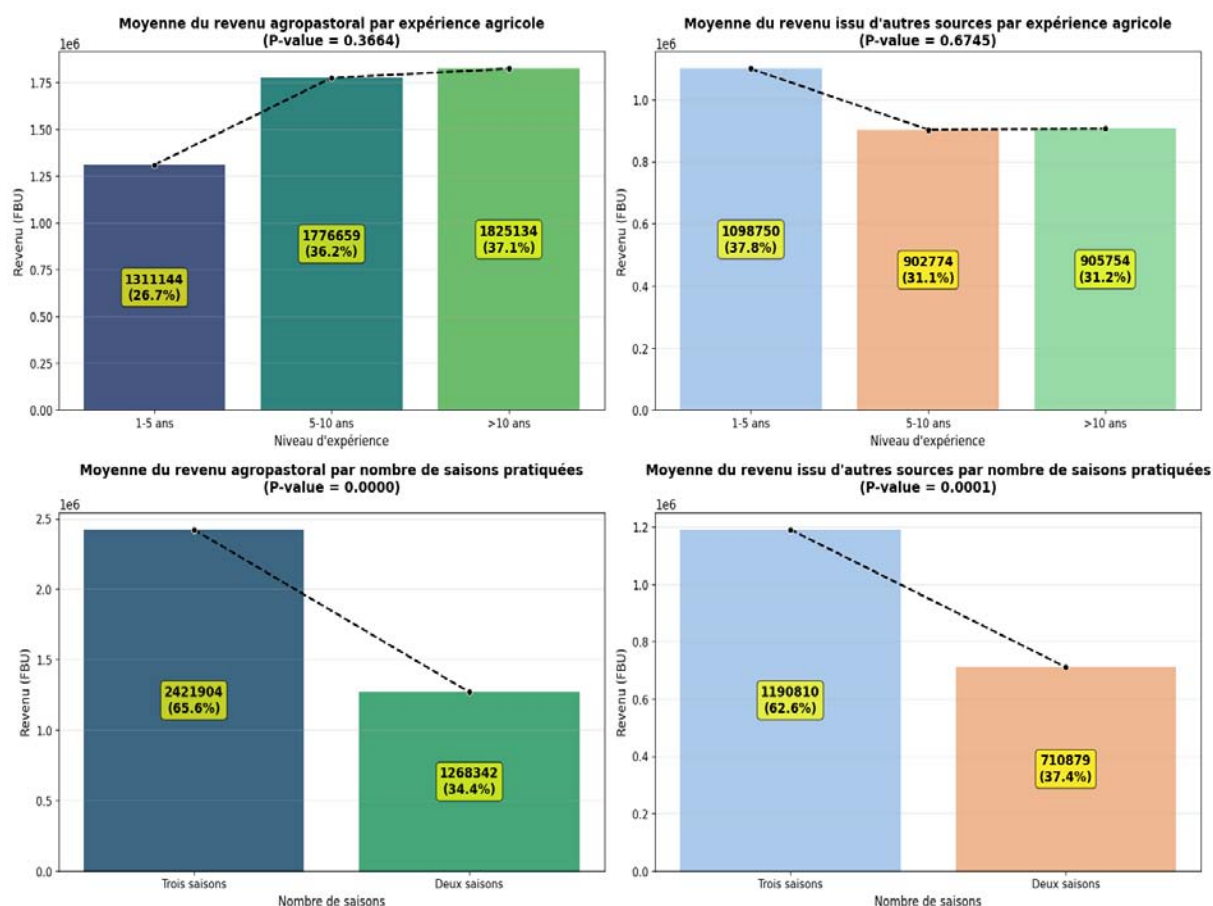


FIGURE 5.2 – Revenu et expérience agricole des ménages

L'analyse du revenu agropastoral en fonction de l'expérience agricole des ménages ruraux burundais met en évidence une tendance générale à l'augmentation des revenus avec l'accroissement de l'expérience. Ainsi, les agriculteurs disposant de plus de dix années d'expérience dégagent un revenu moyen de 1 825 134,47 FBU, contre 1 311 143,75 FBU pour ceux dont l'expérience se situe entre un et cinq ans. Cette observation paraît cohérente, dans la mesure où une expérience plus longue confère aux exploitants une meilleure maîtrise des pratiques culturales, une optimisation de l'usage des ressources et une capacité accrue à adopter des techniques adéquates à leur environnement. Néanmoins, cette différence n'est pas statistiquement significative ($P = 0,3664$), ce qui suggère que d'autres déterminants, tels que la taille des exploitations, l'accès aux marchés, la qualité des sols ou les capacités d'investissement, pourraient jouer un rôle prépondérant dans la génération des revenus agropastoraux [91].

Contrairement au revenu agricole, le revenu issu d'autres sources décline légèrement avec l'augmentation de l'expérience. En effet, les agriculteurs ayant entre un et cinq ans d'expérience perçoivent en moyenne 1 098 750 FBU provenant d'activités non agricoles pour une période d'un an, tandis que ceux jouissant de plus de dix années d'expérience enregistrent un revenu moyen de 905 754,44 FBU. Bien que cette variation ne soit pas statistiquement significative ($P = 0,6745$), elle suggère une tendance à une concentration progressive sur les activités agricoles parmi les exploitants les plus aguerris, réduisant ainsi leur diversification économique [5].

En revanche, le nombre de saisons agricoles exploitées exerce un effet hautement significatif sur le revenu agropastoral. Les exploitants pratiquant trois saisons agricoles génèrent un revenu moyen de 2 421 903,63 FBU, soit presque le double de celui des exploitants limités à deux saisons (1 268 342,05 FBU), avec un niveau de signification statistique très élevé ($P < 0,0001$). Cette intensification culturale permet une exploitation optimale des terres et une augmentation notable des rendements. Toutefois, cette pratique soulève des interrogations quant à sa durabilité, notamment en ce qui concerne la dégradation des sols et la gestion des ressources hydriques [120]. Par ailleurs, le revenu tiré d'autres activités suit une évolution similaire bien que moins marquée, les exploitants à trois saisons percevant 1 190 809,71 FBU en moyenne contre 710 879,07 FBU pour ceux à deux saisons, cette différence étant également statistiquement significative ($P = 0,0001$). Ce constat révèle que l'intensification agricole procure aux ménages ruraux une plus grande marge de manœuvre financière, leur permettant de diversifier leurs sources de revenus vers des activités telles que le commerce, l'élevage ou d'autres entreprises locales [28].

En somme, si l'expérience agricole tend à favoriser une hausse des revenus agricoles, l'intensification des pratiques culturales à travers la multiplication des saisons constitue un facteur déterminant dans l'accroissement des revenus agropastoraux et la diversification des sources de revenus des ménages ruraux au Burundi. Cependant, cette dynamique demeure conditionnée par des facteurs externes, notamment les contraintes structurelles et environnementales.

5.4 Saison culturale et production agricole

L'organisation agricole saisonnière permet aux agriculteurs de diversifier les cycles culturels et d'intensifier leur production, notamment grâce à la pratique de trois saisons culturales. Toutefois, des défis persistent, notamment le manque d'intrants, les difficultés d'accès à l'irrigation et les risques liés à la durabilité des pratiques. Globalement, ces saisons rythment la production agricole burundaise en intégrant une combinaison de cultures vivrières et de rente, soutenant ainsi la sécurité alimentaire malgré les contraintes agroécologiques et logistiques [84]. La Figure 5.3 illustre la proportion de chaque culture cultivée par les ménages selon les trois saisons agricoles (A, B et C), mettant en évidence une forte dominance de cultures vivrières comme le haricot, le manioc, le maïs et la banane, avec des variations saisonnières marquées qui reflètent les stratégies d'adaptation aux conditions climatiques et aux besoins alimentaires.

Chacune de ces trois saisons répond à une logique productive et stratégique distincte, contribuant différemment à la sécurité alimentaire et au revenu des ménages. La **saison A** (septembre à janvier), dite « grande saison des pluies », concentre l'essentiel des cultures vivrières de base (maïs, haricot, manioc) et constitue le pilier de l'autoconsommation annuelle. La **saison B** (février à juin), plus courte et plus irrégulière, est souvent dédiée aux cultures de contre-saison et aux cultures de rente (café, pois cajan), jouant un rôle clé dans la génération de revenus monétaires. Enfin, la **saison C** (juillet à août), fortement dépendante de l'irrigation et des bas-fonds, permet une production de soudure essentielle pour combler la période de soudure pré-récolte. Cette répartition temporelle des activités culturales traduit une stratégie de lissage des risques : en étalant les récoltes sur l'année, les ménages réduisent leur exposition aux chocs climatiques et aux fluctuations des prix.

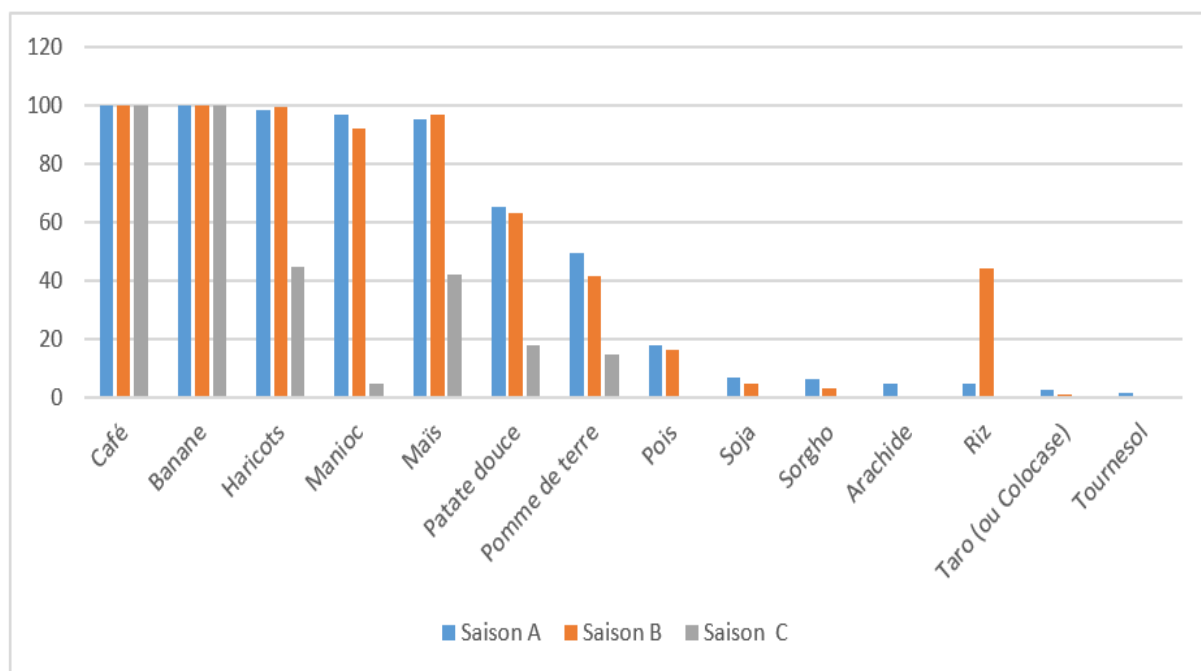


FIGURE 5.3 – Principales cultures pratiquées par saison au Burundi

L'interprétation de cette figure s'appuie sur la catégorisation des principales cultures pratiquées par saison culturales dans la zone d'étude.

1. Les cultures pérennes (Café, Banane)

Contrairement aux autres, le Café et la Banane affichent des barres stables à environ 100% pour les trois saisons (A, B et C). Cela indique qu'il s'agit de cultures présentes ou récoltées tout au long de l'année, sans rupture saisonnière marquée sur ce graphique.

2. Les cultures dominantes en saisons A et B, mais en recul en saison C (Haricots, Maïs, Manioc)

- Haricots et Maïs : Ces deux cultures dominent largement les saisons A et B avec des valeurs proches de 100% (le maïs est légèrement en dessous des haricots en saison A). Cependant, la barre grise (Saison C) chute drastiquement pour se situer autour de 40-45%.
- Manioc : Il suit une tendance similaire mais encore plus marquée. Très présent en saisons A (~98%) et B (~92%), il devient quasi inexistant en saison C (barre grise très faible, environ 5%).

3. Les cultures à saisonnalité spécifique (Riz, Patate douce, Pomme de terre)

- Riz : Le graphique montre que le Riz est peu présent en saison A, mais connaît un pic important en Saison B (barre orange) atteignant environ 45%, avant de disparaître presque en saison C. C'est une culture principalement associée à la saison B au Burundi.

- Patate douce et Pomme de terre : Elles ont une présence modérée. La patate douce est à $\sim 65\%$ (A et B) et la pomme de terre à $\sim 50\%$ (A) et $\sim 40\%$ (B). Toutes deux chutent en saison C (entre 15% et 20%).

4. Les cultures mineures (Petit Pois, Soja, Sorgho, Arachide, Taro, Tournesol)

Ces cultures affichent des barres très courtes (généralement inférieures à 20%) sur l'ensemble des saisons.

- Le Petit Pois (en saison C) sont autour de 15-20%.
- Le Soja, le Sorgho, l'Arachide, le Taro et le Tournesol restent marginaux, avec des valeurs souvent inférieures à 10%, voire proches de 0 pour le Tournesol et l'Arachide en saisons B et C.

En somme, le graphique révèle une agriculture fortement dépendante de la saisonnalité. Seuls le café et la banane assurent une production constante. La saison C apparaît comme une période de faible activité agricole pour la plupart des cultures vivrières (chute du manioc, du maïs et des haricots), à l'exception du café et de la banane. Le riz se distingue comme une culture spécifique à la saison B.

5.5 Répartition et affectation de la production agricole

La Figure-5.4 illustre la répartition moyenne des quantités produites, vendues, autoconsommées et conservées pour les principales cultures agricoles dans la zone d'étude. Il met en évidence un fort contraste entre les cultures vivrières, dont une grande partie est consommée sur place, et les cultures de rente, qui sont principalement commercialisées. La faible quantité conservée pour la plupart des cultures souligne les défis structurels liés aux infrastructures de stockage et à la gestion des périodes de soudure [37].

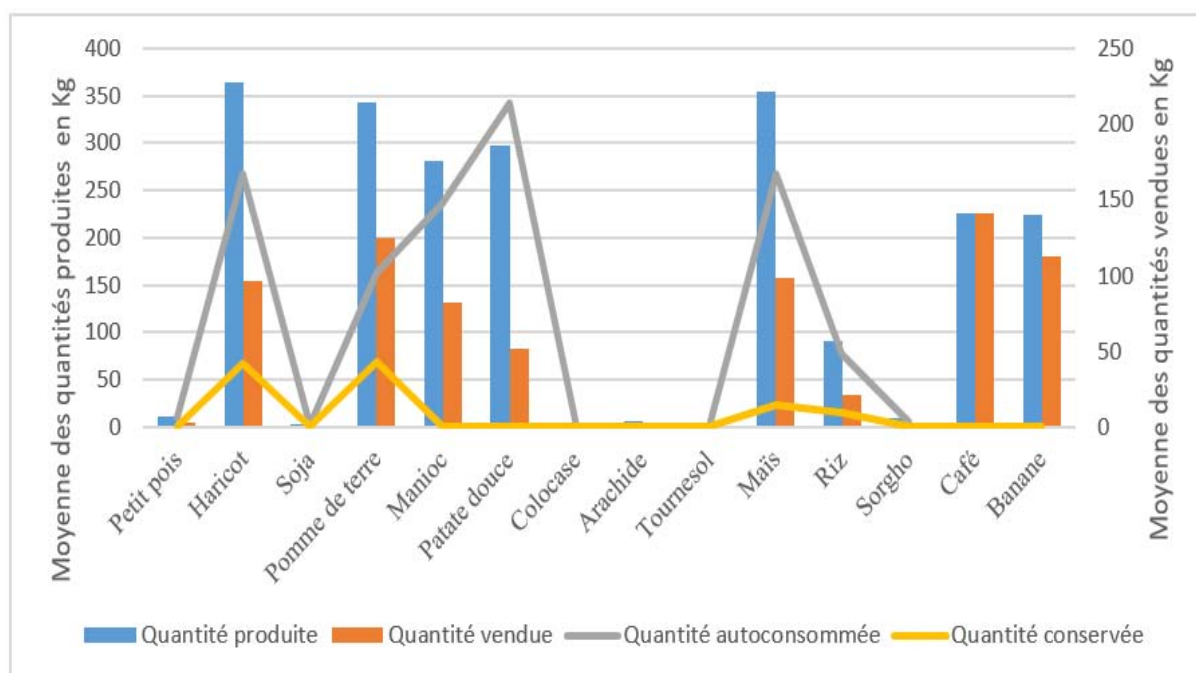


FIGURE 5.4 – Production et affectation de la production

Cette figure illustre la production moyenne et l'affectation de la production, exprimées en kilogrammes, pour différentes cultures au Burundi, et elle distingue ainsi les quantités produites, vendues, autoconsommées et conservées. Les cultures comme le haricot, le maïs, la banane et la patate douce dominent en termes de production, avec des quantités produites atteignant respectivement environ 350 kilogrammes, 300 kilogrammes, 250 kilogrammes et 200 kilogrammes en moyenne par ménage. Une grande partie de ces cultures est autoconsommée, comme le montre la ligne verte, avec des pics pour la patate douce qui atteint environ 300 kilogrammes, pour le haricot avec environ 250 kilogrammes ainsi que pour le maïs avec environ 200 kilogrammes, ce qui indique leur rôle clé dans la sécurité alimentaire des ménages. Les quantités vendues, représentées en rouge, sont relativement faibles pour la plupart des cultures, sauf pour le haricot et le maïs où environ 100 kilogrammes sont vendus, ce qui suggère une certaine commercialisation. Les quantités conservées, représentées en violet, restent marginales et sont souvent inférieures à 50 kilogrammes, ce qui peut refléter des capacités de stockage limitées ou une préférence pour une consommation immédiate [158]. Pour les cultures moins produites, comme le petit pois, la colocase, l'arachide, le tournesol, le riz, le sorgho et le café, les quantités totales sont bien inférieures et se situent souvent en dessous de 50 kilogrammes. Ces cultures montrent également une autoconsommation dominante, mais avec des volumes très faibles atteignant souvent moins de 20 kilogrammes, et des quantités vendues ou conservées qui sont quasi négligeables. Cela peut indiquer que ces cultures sont soit moins adaptées aux conditions agro-écologiques, soit moins prioritaires pour les agriculteurs, et cela en raison d'une faible demande sur le marché ou d'une préférence pour les cultures de subsistance comme le haricot et le maïs. La faible conservation globale suggère des défis structurels, par exemple l'absence de systèmes de stockage efficaces, ce qui pourrait exacerber les périodes de soudure alimentaire. Ces données soulignent ainsi la nécessité de renforcer les infrastructures de stockage et de diversifier les cultures commercialisées afin d'améliorer la résilience économique des agriculteurs burundais [155].

5.5.1 Durée de stockage des productions agricoles

La Figure 5.5 illustre la durée de stockage des productions agricoles par saison (A, B et C), montrant que près de la moitié des ménages conservent leurs récoltes plus de quatre mois, tandis qu'un tiers environ ne dispose que d'un mois ou moins de stocks, ce qui révèle des disparités importantes dans la gestion des réserves alimentaires et souligne les risques d'insécurité alimentaire entre les saisons.

Ces écarts de durée de stockage traduisent des inégalités structurelles dans les capacités productives et financières des ménages. Ceux disposant de stocks limités sont souvent contraints à une commercialisation précoce et à bas prix de leurs récoltes, un phénomène de vente de détresse qui réduit substantiellement leurs revenus agricoles et les expose à racheter plus tard des denrées à des coûts plus élevés. À l'inverse, les ménages capables de conserver leurs productions sur de longues périodes bénéficient d'un pouvoir de négociation accru sur les marchés et d'une meilleure couverture de leurs besoins alimentaires durant la période de soudure. Cette capacité de stockage constitue ainsi un déterminant majeur de la résilience économique des ménages ruraux, influençant directement leur trajectoire vers un revenu vital décent et leur vulnérabilité face aux fluctuations saisonnières des prix agricoles.

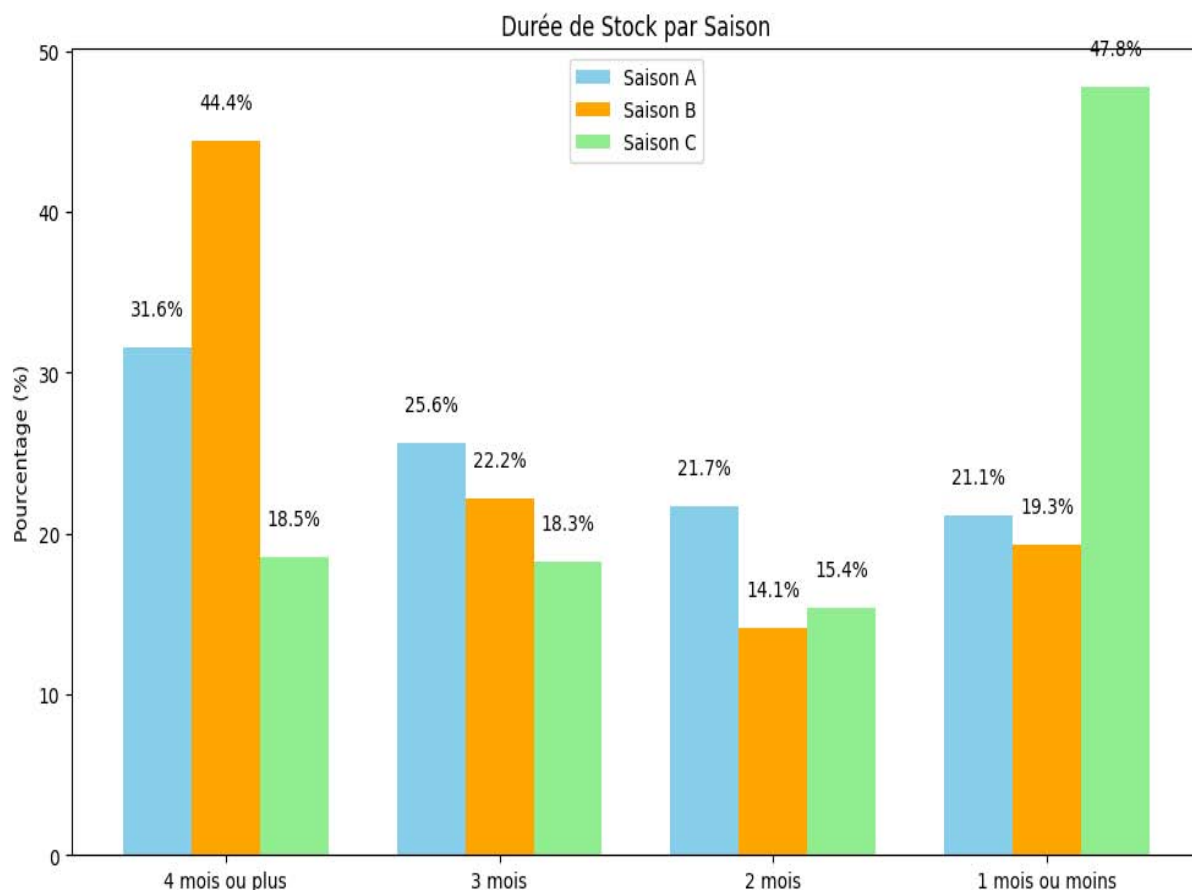


FIGURE 5.5 – Durée de Stock des denrées alimentaires par Saison culturale

La Figure-5.5 montre que dans la saison B, une forte proportion de produits agricoles est stockée pendant une période de 4 mois ou plus (44,4 %). Cela peut suggérer une surproduction, où les producteurs ont récolté plus que ce qu'ils peuvent écouler ou consommer rapidement, entraînant une accumulation des stocks. En conséquence, cette abondance de produits peut être bénéfique pour la sécurité alimentaire des ménages, car elle garantit une disponibilité alimentaire suffisante sur une période prolongée. De plus, si cette situation est associée à une production importante, elle peut potentiellement entraîner une baisse des prix des denrées alimentaires, rendant la nourriture plus accessible pour les ménages, ce qui améliore encore leur sécurité alimentaire. Cependant, une telle surproduction peut aussi poser des défis logistiques et commerciaux, car les producteurs pourraient se retrouver avec des difficultés pour vendre ou distribuer leur excédent de produits.

La saison C, par contre, présente une situation différente. Un pourcentage élevé de produits (47,8 %) est stocké pendant 1 mois ou moins, ce qui pourrait indiquer une faible production de denrées agricoles durant cette saison. Si cette faible durée de stockage est liée à une production moins abondante, cela peut entraîner une réduction de la disponibilité alimentaire, car les stocks sont rapidement épuisés. Ce manque d'approvisionnement pourrait entraîner une hausse des prix des produits agricoles, affectant négativement la sécurité alimentaire des ménages, surtout pour ceux à revenu faible ou moyen [30]. Cependant, il est aussi possible que cette faible durée de stockage soit le résultat d'une forte demande, ce qui signifierait que les produits agricoles sont rapidement écoulés sur le marché. Si tel est le cas, cela pourrait indiquer que les ménages ont un accès relativement facile

à la nourriture pendant cette période, et que les produits sont consommés rapidement, répondant à une demande élevée.

La saison A, avec une distribution uniforme des durées de stockage, suggère une certaine stabilité dans la production agricole. Les produits sont stockés de manière assez régulière, ce qui indique que les récoltes sont bien réparties tout au long de la saison et qu'il n'y a pas de surplus ni de pénurie majeurs. Cette stabilité dans la production contribue à une sécurité alimentaire stable, car elle permet aux ménages de compter sur une disponibilité alimentaire constante tout au long de la saison. Une telle situation est favorable pour les producteurs et les consommateurs, car elle permet une gestion plus prévisible des ressources alimentaires et des prix, réduisant les risques de pénuries ou de hausses de prix soudaines [166].

5.6 Profit des cultures pratiquées par les ménages ruraux

Le graphique présente le profit des principales cultures (en %), c'est-à-dire le profit relatif par unité de production, pour les cultures qui sont beaucoup pratiquées dans la zone d'étude. Cette mesure permet de comparer l'efficacité économique relative de chaque système cultural, indépendamment des différences d'échelle ou de coût absolu. Les résultats révèlent une hiérarchie nette des systèmes cultureux, mettant en lumière des opportunités stratégiques pour la transformation de l'agriculture burundaise vers plus de résilience et de revenu vital décent. La Figure-5.6 présente la marge normalisée (profitabilité relative) de différentes cultures et activités agricoles, mettant en évidence que l'agroforesterie et la banane génèrent les marges les plus élevées, tandis que le café et le pois cajan affichent des marges très faibles, soulignant ainsi l'intérêt économique d'une diversification orientée vers des systèmes durables et résilients.

Le graphique présente le profit des principales cultures (en %), c'est-à-dire le profit relatif par unité de production, pour les cultures qui sont beaucoup pratiquées dans la zone d'étude. Cette mesure, exprimée sous forme de marge normalisée, permet de comparer l'efficacité économique relative de chaque système cultural, indépendamment des différences d'échelle, de superficie cultivée ou de coût absolu. En rapportant le profit généré aux intrants mobilisés (semences, engrais, main-d'œuvre, traitements phytosanitaires), cet indicateur offre une lecture fine de la performance économique réelle des activités agricoles, au-delà des simples volumes de production. Les résultats révèlent une hiérarchie nette des systèmes cultureux, mettant en lumière des opportunités stratégiques pour la transformation de l'agriculture burundaise vers plus de résilience et de revenu vital décent. La Figure 5.6 présente ainsi la marge normalisée (profitabilité relative) de différentes cultures et activités agricoles, offrant une base empirique solide pour orienter les choix cultureux des ménages et les politiques agricoles territorialisées.

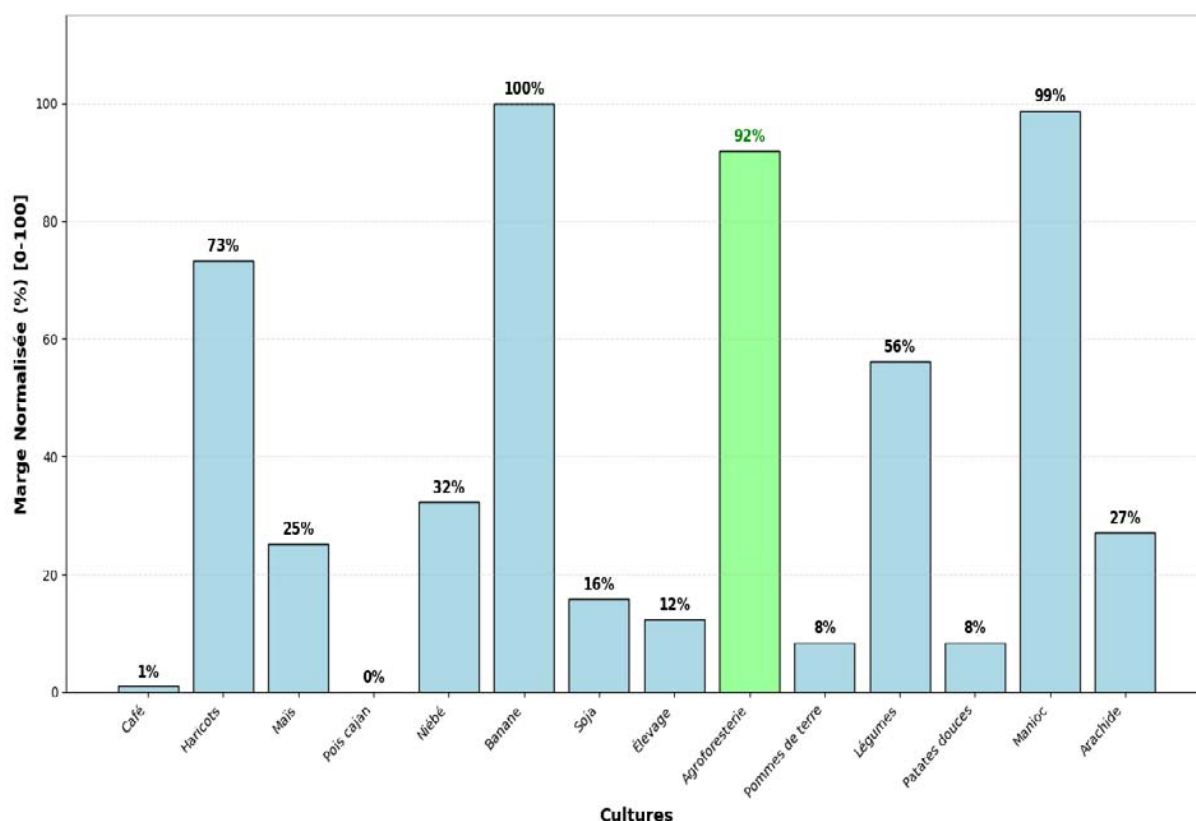


FIGURE 5.6 – Profit relatif de principales cultures pratiquées dans la zone d'étude

Trois cultures se distinguent nettement par leur profit supérieur à 90 %, le bananier (100 %), le manioc (99 %) et l'agroforesterie (92 %), confirmant leur rôle central dans la sécurité alimentaire et la génération de revenus durables au sein des exploitations rurales burundaises. Le bananier, culture vivrière et commerciale souvent cultivée en association avec d'autres espèces, bénéficie d'une demande locale stable, d'un faible coût de production et d'une productivité continue tout au long de l'année, ce qui en fait une source de revenu régulière et peu dépendante des intrants coûteux. Le manioc, quant à lui, s'impose comme un véritable « filet de sécurité » grâce à sa résistance exceptionnelle aux conditions climatiques difficiles, sa tolérance aux sols pauvres et sa capacité de stockage prolongé après récolte, garantissant ainsi une autonomie alimentaire même en période de crise [119]. Enfin, l'agroforesterie, système intégré combinant arbres fruitiers, d'ombrage et cultures annuelles, se révèle non seulement comme une pratique écologique mais aussi comme un levier économique puissant, permettant de diversifier les sources de revenus (fruits, bois, café ombragé), de réduire les coûts de fertilisation et de protéger durablement les sols contre l'érosion, une approche visant à transformer l'agriculture burundaise vers plus de résilience et de revenu vital décent [153].

Plusieurs cultures affichent des profits compris entre 25 % et 73 %, ce qui les place dans une zone de rentabilité moyenne à bonne, mais insuffisante pour garantir à elles seules un revenu vital décent sans améliorations structurelles. Les haricots (73 %), culture vivrière fondamentale, bénéficient d'une forte demande locale et d'un coût de production relativement bas, ce qui en fait une option stratégique pour la sécurité alimentaire et le revenu complémentaire. Le niébé (32 %) et le maïs (25 %), bien qu'essentiels à l'alimentation familiale, présentent des profits plus faibles, probablement dues à leur sensibilité aux aléas

climatiques, à leurs coûts de main-d'œuvre élevés et à leur faible valeur marchande [84]. Les légumes (56 %), malgré leur forte valeur ajoutée, restent vulnérables à la perte post-récolte et à la saisonnalité, suggérant un potentiel non exploité qui pourrait être libéré par le développement d'infrastructures de conservation et de circuits courts. Enfin, l'arachide (27 %), bien que portée par une demande croissante, souffre de coûts de production élevés (semences, labour) et d'une concurrence acharnée sur les marchés locaux, limitant sa rentabilité ; son intégration dans des systèmes agroforestiers ou sa spécialisation vers des segments à plus forte valeur ajoutée pourrait améliorer sa performance.

Certaines cultures affichent des profits extrêmement faibles, voire nuls, révélant des défis économiques profonds qui compromettent leur viabilité au sein des exploitations familiales : le pois cajan (0 %), dont l'absence totale de marge suggère un coût de production prohibitif, une faible valeur marchande ou une absence de filière organisée, rendant son maintien peu justifiable sans requalification. Le café (1 %), bien que constituant la principale culture d'exportation du Burundi et générant des devises cruciales pour l'économie nationale, révèle un décalage fondamental entre rentabilité macroéconomique et microéconomique, car sa quasi-nullité au niveau du producteur s'explique par des coûts élevés (main-d'œuvre, transport), un cycle biennal de production qui réduit le revenu annuel moyen, un filtrage massif de la valeur ajoutée en aval, et souvent une monoculture non ombragée qui dégrade les sols, ce qui souligne qu'il n'est pas, en l'état, un levier efficace de revenu vital pour les ménages ruraux, mais pourrait retrouver sa rentabilité grâce à son intégration dans des systèmes agroforestiers diversifiés [85]. Les pommes de terre et patates douces (8 % chacune), vulnérables aux pertes post-récolte, à l'absence d'infrastructures de stockage et à la concurrence locale, nécessitent des investissements dans la chaîne de valeur pour être viables ; enfin, l'élevage (12 %), secteur marginalisé par un accès limité aux fourrages, soins vétérinaires et marchés, demeure aujourd'hui un levier économique mineur dans la zone d'étude, malgré son potentiel de diversification [174].

5.7 Impact de l'agroforesterie sur le revenu agricole

Le graphique illustre de manière éloquent l'effet positif de l'agroforesterie sur le revenu agricole des ménages ruraux, en comparant deux groupes distincts : les ménages pratiquant l'agroforesterie (« Avec agroforesterie ») et ceux qui n'en pratiquent pas (« Sans agroforesterie »). Les données présentées montrent que l'intégration d'arbres dans les systèmes agricoles se traduit par un gain significatif de revenu, ce qui confirme son rôle central comme levier de résilience économique et de transition vers un revenu vital décent. La Figure 5.7 met en évidence les revenus moyens par ménage pratiquant l'agroforesterie ou non, confirmant ainsi le rôle de cette pratique comme levier de résilience économique et d'augmentation du revenu effectif dans les zones rurales burundaises.

Cet avantage économique s'explique par la diversification des sources de revenus que procure l'agroforesterie : vente de bois d'œuvre et de chauffage, production de fruits, de fourrage et de médicaments traditionnels, qui viennent compléter les revenus des cultures annuelles. De plus, les arbres améliorent la fertilité des sols par la fixation d'azote et la restitution de matière organique, augmentant ainsi les rendements des cultures associées à moyen et long terme. Cette synergie entre productions ligneuses et herbacées permet également de lisser les revenus sur l'année et de réduire la vulnérabilité aux aléas climatiques et aux fluctuations des prix agricoles. L'agroforesterie constitue ainsi une stratégie d'intensification écologique qui génère des bénéfices économiques immédiats tout en pré-

servant le capital naturel, qui est une condition pour atteindre durablement le seuil de revenu vital décent.

Sur le plan climatique, l'agroforesterie contribue à l'atténuation du changement climatique par la séquestration de carbone dans la biomasse ligneuse et le sol (21 à 34 Mg C ha⁻¹ en moyenne), la réduction des émissions de la réduction des émissions de N₂O grâce à la fixation biologique d'azote qui limite le recours aux engrais de synthèse, de synthèse, et la régulation microclimatique locale qui renforce la résilience des cultures face aux aléas climatiques. À ce titre, elle est reconnue comme une solution fondée sur la nature (*Nature-Based Solution*, NbS) intégrable dans les stratégies nationales d'adaptation et d'atténuation (NDC) de l'Accord de Paris.

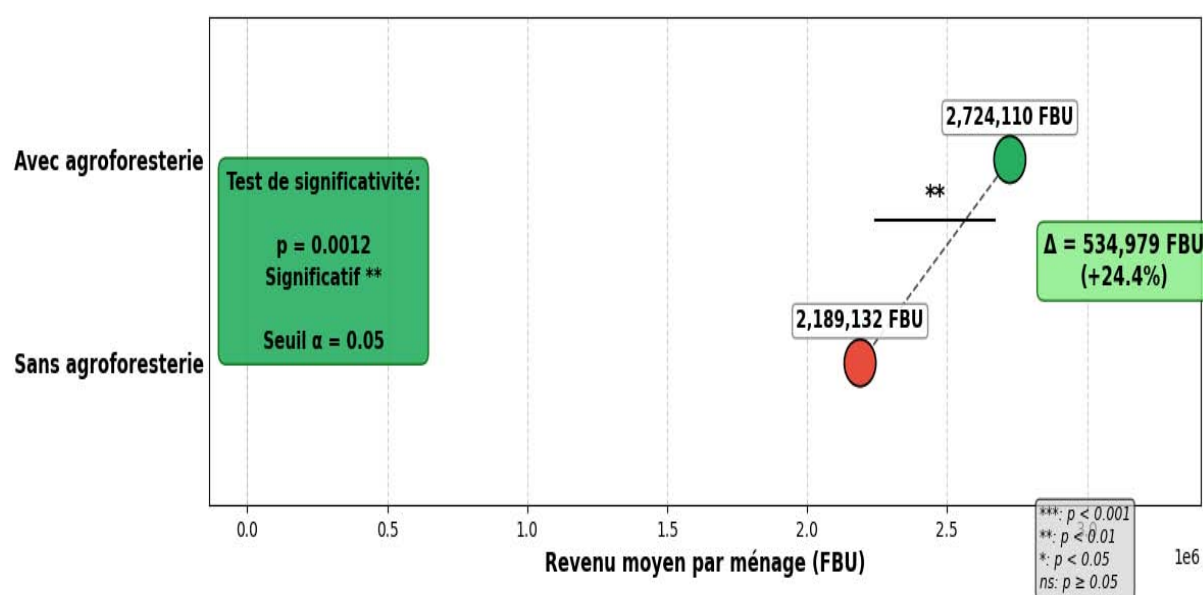


FIGURE 5.7 – Agroforesterie et revenu des ménages ruraux

La Figure 5.7 révèle une différence statistiquement significative du revenu moyen par ménage entre les ménages pratiquant l'agroforesterie, soit 2 724 110 FBU, et ceux n'en pratiquant pas, soit 2 189 132 FBU. L'écart absolu s'élève à +534 979 FBU, ce qui correspond à une augmentation relative de 24,4 %. Cette différence, bien qu'appréciable d'un point de vue économique, est également validée statistiquement par un test d'hypothèse dont la p -value est de 0,0012, valeur inférieure au seuil conventionnel de significativité $\alpha = 0,05$. La probabilité que cet écart soit dû au hasard est ainsi inférieure à 0,12 %, ce qui confirme que l'impact positif de l'agroforesterie sur le revenu des ménages ruraux burundais est à la fois empiriquement solide et économiquement pertinent [78].

L'augmentation du revenu associée à l'agroforesterie ne constitue pas un phénomène isolé, mais le reflet d'un changement structurel profond dans la gestion des ressources agricoles. En effet, l'intégration d'arbres fruitiers, d'espèces d'ombrage et de cultures annuelles transforme le système de production en un ensemble multifonctionnel. Cette approche favorise d'abord la diversification des sources de revenus, en complétant les recettes issues des cultures vivrières ou commerciales par celles tirées des produits forestiers et des services écosystémiques, tels que l'amélioration de la fertilité des sols et la protection contre l'érosion. Elle contribue ensuite à la réduction des coûts de production, grâce à la régénération

naturelle de la fertilité des sols, à la diminution du recours aux engrais chimiques et à la stabilisation du microclimat, ce qui atténue les pertes dues aux aléas climatiques.

Dans les zones où le café est cultivé en association avec des arbres d'ombrage, cette synergie améliore la qualité du grain et ouvre l'accès à des marchés certifiés, notamment Fairtrade et Bio. L'obtention de prix plus élevés sur ces marchés permet ainsi de compenser les coûts de production et d'améliorer la rentabilité globale de l'exploitation. Par ailleurs, l'agroforesterie renforce la résilience face aux chocs économiques et climatiques, en fournissant un filet de sécurité à travers des revenus alternatifs issus des arbres en cas de sécheresse ou de chute des prix d'une culture principale. La significativité statistique observée dans les résultats confirme ainsi que l'agroforesterie n'est pas un simple ajout décoratif, mais bien un système productif transformateur, capable d'induire des changements durables dans la dynamique économique des exploitations familiales rurales au Burundi [153].

5.8 Chocs et inégalités de revenu des ménages ruraux

Les chocs climatiques jouent un rôle déterminant dans l'accroissement des inégalités de revenu entre les ménages, en particulier dans les zones rurales dépendantes de l'agriculture. Ces perturbations environnementales, telles que les précipitations extrêmes, les sécheresses, ou les épidémies, exacerbent les vulnérabilités socio-économiques en affectant de manière disproportionnée les populations dont les revenus reposent sur des activités sensibles aux variations climatiques [155].

Dans les zones à agriculture pluviale, comme les bassins versants ou les régions à forte dépendance des cultures de subsistance, les chocs directs comme les inondations et l'érosion perturbent la production agricole, réduisant les revenus et creusant les écarts avec les ménages mieux équipés pour s'adapter [123].

Parallèlement, dans les zones à économie diversifiée, ce sont souvent les chocs indirects, comme les fluctuations des prix et les crises sanitaires, qui amplifient les inégalités, car ils fragilisent les marchés locaux et limitent ainsi l'accès aux ressources [82]. Ces dynamiques soulignent l'importance de politiques publiques différenciées, lesquelles intègrent à la fois des mécanismes de résilience climatique tels que l'irrigation et les variétés résistantes, ainsi que des filets sociaux pour atténuer les impacts inégaux des crises environnementales sur les populations vulnérables [90]. La figure 5.8 compare la contribution des différents types de chocs, qu'ils soient économiques, climatiques ou biologiques, à l'inégalité des revenus dans les deux zones d'étude, et cette figure souligne ainsi des vulnérabilités contextuelles distinctes qui nécessitent des réponses différenciées.

L'analyse de ces inégalités révèle que les chocs n'affectent pas uniquement les niveaux de revenu, mais modifient également la structure même des inégalités en pénalisant davantage les ménages déjà vulnérables. En effet, les ménages les plus pauvres, disposant de faibles actifs productifs et d'un accès limité aux services financiers, adoptent des stratégies de coping destructrices telles que la vente d'actifs productifs ou la réduction de la consommation alimentaire, compromettant ainsi leur capacité de récupération à long terme. À l'inverse, les ménages mieux dotés en capital physique et social parviennent à diversifier leurs sources de revenus et à absorber les chocs sans éroder leur base productive. Cette asymétrie dans les capacités d'adaptation crée un cercle vicieux d'appauvrissement pour les plus vulnérables, tandis que les ménages résilients consolident leur position économique.

Par conséquent, les chocs climatiques et économiques ne font pas qu'exacerber temporairement les inégalités ; ils tendent à les institutionnaliser, rendant plus difficile l'atteinte du revenu vital décent pour les ménages piégés dans des trajectoires de pauvreté chronique.

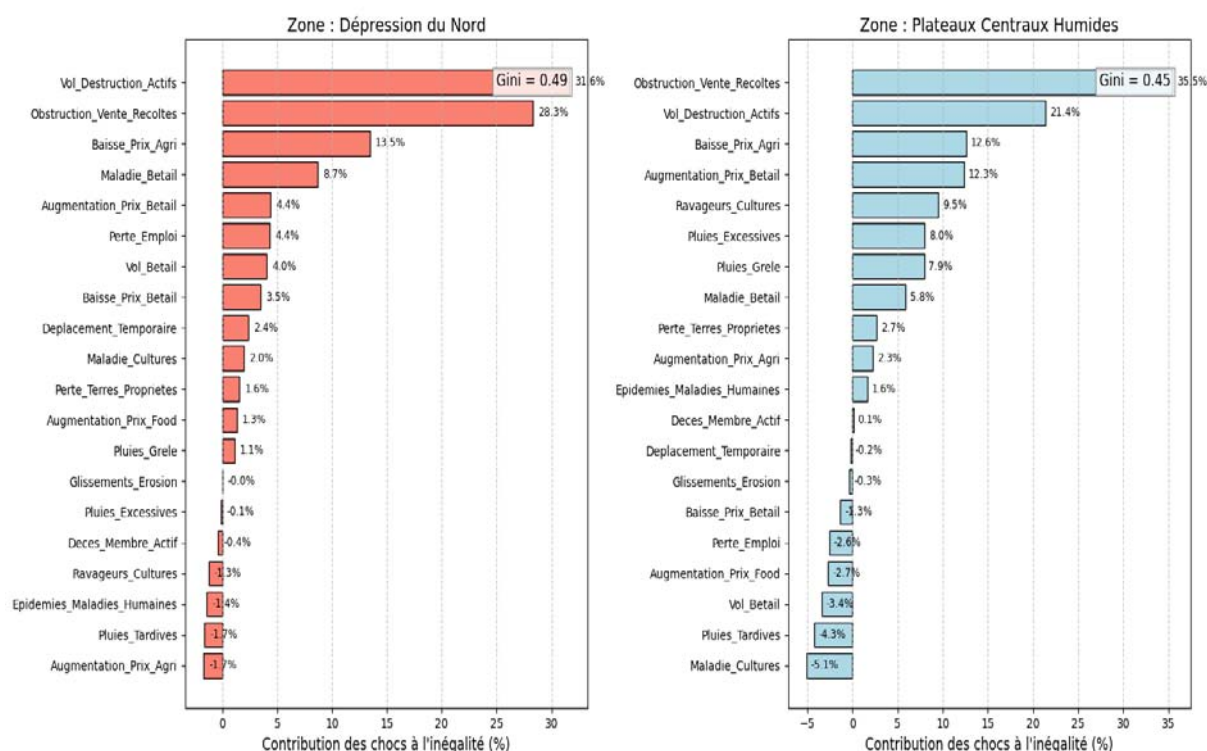


FIGURE 5.8 – Décomposition des inégalités de revenu par zone et par choc subi

La Figure-5.8 présente les résultats sur la décomposition des inégalités de revenu par zone et par chocs subis par les ménages. La Dépression du Nord (Gini = 0,49) et les Plateaux Centraux Humides (Gini = 0,45) illustrent des trajectoires socio-économiques divergentes, façonnées par leurs caractéristiques agro-écologiques. La Dépression du Nord, zone semi-aride soumise à une forte variabilité climatique, repose principalement sur l'agriculture pluviale. Cette dépendance rend les ménages extrêmement vulnérables aux chocs climatiques directs et aux perturbations des cycles cultureux. Le coefficient de Gini élevé (0,49) reflète une concentration des revenus au sein d'une minorité de ménages disposant de terres fertiles ou d'accès à des ressources irriguées, tandis que la majorité subit des rendements aléatoires. A l'inverse, la zone des Plateaux Centraux Humides, bénéficiant d'un climat plus humide et d'une meilleure accessibilité aux marchés, présente une économie mixte intégrant cultures maraîchères, élevage et activités commerciales. Le Gini légèrement plus faible (0,45) s'explique par une diversification des revenus, bien que les inégalités persistent en raison de la polarisation entre petits producteurs et grands propriétaires des terres ou éleveurs. Ces différences structurelles conditionnent la manière dont les chocs externes s'inscrivent dans les dynamiques d'inégalité [14].

Quant à l'impact des chocs climatiques et économiques sur les inégalités, on remarque que dans la Dépression du Nord, les chocs climatiques tels que les pluies excessives et les glissements de terrain (contribuant à 12,4 % et 9,8 % de l'inégalité) agissent comme des facteurs multiplicateurs de pauvreté. Ces événements détruisent les infrastructures rurales (routes, systèmes d'irrigation) et réduisent la productivité des sols déjà appauvris, affectant

tant principalement les ménages sans accès à des terres en terrasses ou à des systèmes de drainage. Parallèlement, l'obstruction des ventes de récoltes (14,5 %) et le vol-destruction d'actifs (15,2 %) révèlent une fragilité institutionnelle : l'absence de contrats formels et de mécanismes de garantie prive les petits agriculteurs de filets de sécurité, amplifiant les écarts de revenu [120].

Dans les Plateaux Centraux Humides, les chocs économiques dominent : la baisse des prix agricoles (16,3 %) et l'augmentation des prix du bétail (12,1 %) reflètent une intégration accrue aux marchés régionaux, où les fluctuations des prix profitent aux intermédiaires urbains au détriment des producteurs. Ces chocs exacerbent les inégalités en favorisant les ménages capables de stocker leurs récoltes ou de spéculer sur les marchés, tandis que les plus pauvres sont contraints de vendre à perte [158].

On observe également que certains chocs génèrent des effets contre-intuitifs sur l'inégalité. Par exemple, dans les Plateaux Centraux Humides, la hausse des prix du bétail (-4,3 %) réduit temporairement le coefficient de Gini en augmentant les revenus des éleveurs moyens. De même, la perte d'emploi (-3,1 %) ou le vol de bétail (-2,8 %) réduisent l'inégalité en appauvrissant les ménages aisés, mais cette « convergence » s'accompagne d'une paupérisation généralisée. Ces résultats soulignent l'importance de distinguer les inégalités de flux (revenus annuels) et les inégalités de stock (patrimoine). Une analyse purement monétaire néglige les effets à long terme : un éleveur perdant son bétail peut voir son revenu chuter, mais sa capacité future à générer des revenus est durablement compromise, perpétuant les inégalités structurelles [2]. Ainsi, cette analyse met en lumière l'imbrication entre vulnérabilités structurelles et chocs exogènes dans la reproduction des inégalités. Alors que la Dépression du Nord incarne un modèle de précarité climato-dépendante, les Plateaux Centraux Humides illustrent les risques d'une intégration aux marchés non régulée.

5.9 Caractérisation des facteurs économiques avec le Modèle K-Means

Le modèle K-Means est un algorithme de typologie non supervisé largement utilisé pour partitionner un ensemble de données en K groupes distincts, où chaque groupe (ou cluster) est caractérisé par son centre (appelé centroid). L'objectif principal de l'algorithme est de minimiser la variance intra-cluster, c'est-à-dire de réduire au maximum la distance entre les points d'un même cluster et leur centroid.

5.9.1 Structure mathématique du modèle K-Means

Soit $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un ensemble de n observations dans un espace à p dimensions ($x_i \in \mathbb{R}^p$). L'algorithme K-Means vise à partitionner ces n observations en K clusters ($K < n$), de manière à minimiser la somme des carrés des distances euclidiennes entre chaque observation et le centroid de sa typologie.

Notations :

- C_k : Ensemble des indices des points appartenant à la typologie k ($k = 1, 2, \dots, K$).
- μ_k : Centroid de la typologie k , défini comme la moyenne des points appartenant à

C_k :

$$\mu_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{i \in C_k} x_i \quad (5.1)$$

où $|C_k|$ est le nombre de points dans C_k .

— $d(x_i, \mu_k)$: Distance euclidienne entre le point x_i et le centroid μ_k :

$$d(x_i, \mu_k) = \|x_i - \mu_k\| = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - \mu_{kj})^2} \quad (5.2)$$

Fonction objective : L'objectif de K-Means est de minimiser la fonction suivante, appelée somme des carrés intra-clusters (W) :

$$W(C, \mu) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (5.3)$$

où $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ représente la partition des données en K typologies et $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K\}$ représente les centroids des K typologies.

La minimisation de $W(C, \mu)$ implique des étapes itératives :

1. Affecter chaque point à son cluster le plus proche (en termes de distance euclidienne).
2. Recalculer les centroids des clusters après chaque affectation.

TABLEAU 5.1 – Caractérisation des typologies par le modèle K-Means

Variables	Moyennes		Proportions		p-value
	C1	C2	C1	C2	
Revenu des cultures de spéculation	498 255	2 103 428	60,3%	17,0%	0,0000
Revenu issu des autres sources non agricoles	476 048	2 919 446	60,3%	17,0%	0,0000
Revenu des autres cultures et d'élevage	1 232 379	4 660 333	60,3%	17,0%	0,0000

Source : Calcul de l'auteur sous Python

Les résultats du tableau 5.1 montrent une segmentation des ménages de la zone d'étude en deux typologies distincts, et cette segmentation est principalement basée sur leurs revenus provenant de différentes sources économiques, à savoir le revenu des cultures de spéculation, puis le revenu des autres sources incluant les transferts financiers et les petits commerces informels, et enfin le revenu agro-pastoral provenant de l'agriculture et de l'élevage. Les valeurs moyennes des revenus pour chaque cluster révèlent des écarts substantiels. La typologie 1 est caractérisé par des revenus relativement faibles dans toutes

les catégories étudiées : par exemple, le revenu moyen issu des cultures de spéculation est de 498 255 FBu, celui des autres sources est de 476 048 FBu, et celui de l'agro-pastoral est de 1 232 379 FBu. Le Cluster 2 représente quant à lui des ménages ayant des revenus bien plus élevés, puisque le revenu moyen de spéculation atteint 2 103 428 FBu, celui des autres sources est de 2 919 446 FBu, et celui de l'agro-pastoral est de 4 660 333 FBu. Ces différences marquées sont statistiquement significatives avec une p-value égale à 0,0000, ce qui indique que les deux typologies ne se chevauchent pas aléatoirement et reflètent ainsi des réalités socio-économiques distinctes [78].

La répartition des ménages entre les deux typologies met en lumière des disparités importantes : la typologie 1 représente environ 60,3 % des ménages, ce qui suggère qu'une majorité significative de la population burundaise appartient à cette catégorie à revenus modestes. La typologie 2 ne représente que 17,0 % des ménages de l'échantillon, ce qui indique qu'une minorité de la population concentre des revenus beaucoup plus élevés. Cette asymétrie dans la distribution des revenus reflète les inégalités socio-économiques profondes au Burundi, où une grande partie de la population vit sous le seuil de pauvreté, tandis qu'une petite fraction bénéficie d'accès privilégié aux ressources et opportunités économiques [2].

Le revenu agro-pastoral présente l'écart le plus important entre les deux typologies, avec un ratio moyen de près de 3,8 fois supérieur pour la typologie 2 par rapport à la typologie 1. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs propres au système agricole burundais. Les ménages appartenant à la typologie 1 dépendent probablement d'exploitations agricoles familiales de petite taille, souvent caractérisées par une faible productivité due à des contraintes telles que l'accès limité aux intrants modernes, la mécanisation insuffisante et la dégradation des sols. Ces exploitations produisent principalement pour la consommation familiale, avec peu de surplus commercialisable. En revanche, les ménages de la typologie 2 semblent bénéficier d'exploitations agricoles mieux structurées, potentiellement intégrées dans des chaînes de valeur plus sophistiquées (par exemple, cultures de rente comme le café). Ils ont également accès à de meilleurs marchés, ce qui leur permet de générer des revenus beaucoup plus élevés [144].

L'écart notable dans les revenus des cultures de spéculation, qui est environ 4,2 fois plus élevé pour le Cluster 2, souligne l'importance de ces cultures de spéculation dans la différenciation économique des ménages. Les membres de la typologie 2 disposent de meilleures opportunités d'accès au capital, aux réseaux commerciaux ainsi qu'aux infrastructures urbaines, et cela leur permet ainsi de participer activement aux échanges commerciaux formels et informels. Les autres sources de revenus, c'est-à-dire les transferts financiers et les petites entreprises, montrent également un écart marqué entre les typologies, puisque cet écart est environ 6,1 fois plus élevé pour la typologie 2. Ces revenus pourraient inclure des contributions provenant de la diaspora comme les envois de fonds, des emplois formels dans le secteur public ou privé, ou encore des micro-entreprises bénéficiant d'un soutien institutionnel [137].

Dans le contexte socio-économique des ménages ruraux au Burundi, la forte proportion de ménages appartenant à la typologie 1 (60,3 %) reflète la prévalence de la pauvreté, où environ 65 % de la population vit avec moins de 1,90 USD par jour. Les ménages ruraux, en particulier, sont vulnérables en raison de leur dépendance à l'agriculture de subsistance. Cependant, l'existence d'une typologie 2 avec des revenus beaucoup plus élevés met en lumière les inégalités croissantes dans la répartition des richesses. Ces inégalités sont

exacerbées par des facteurs tels que l'accès inégal aux services financiers, à l'éducation et aux opportunités d'emploi rémunéré. Par conséquent, le système agricole burundais reste largement traditionnel et peine à répondre aux besoins alimentaires et économiques de la population. Les petits exploitants agricoles, représentés par la typologie 1, font face à des défis structurels tels que la fragmentation des terres, les chocs climatiques, et le manque d'infrastructures de stockage et de transport [122].

5.10 Analyse de la frontière de production stochastique

5.10.1 Cadre analytique du modèle

La frontière de production stochastique (*Stochastic Frontier Analysis*, SFA) est un modèle économétrique qui distingue deux sources d'écart entre la production observée et la production maximale (frontière) :

Aléa statistique (v_i) : bruit ou chocs externes (ex. erreurs de mesure, variations climatiques).

Inefficacité technique (u_i) : écart dû à une mauvaise gestion, sous-utilisation des ressources ou contraintes structurelles.

5.10.2 Formulation mathématique du modèle

La fonction de production est généralement spécifiée sous une forme paramétrique. Par exemple, une fonction Cobb-Douglas ou translogarithmique est souvent utilisée.

Pour une unité i , la fonction de production s'écrit :

$$y_i = f(x_i; \beta) \cdot \exp(v_i - u_i), \quad (5.4)$$

où :

y_i : la production observée de l'unité i ,

x_i : un vecteur d'intrants (inputs) utilisés par l'unité i ,

β : les paramètres à estimer,

$f(x_i; \beta)$: la fonction de production frontière,

v_i : une variable aléatoire symétrique suivant une loi normale centrée ($v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$),

u_i : une variable non négative représentant l'inefficacité technique ($u_i \geq 0$).

Le terme d'erreur composite est défini comme :

$$\varepsilon_i = v_i - u_i, \quad (5.5)$$

où :

v_i représente les perturbations aléatoires (bruit),

u_i représente l'inefficacité technique.

Les hypothèses classiques sont :

$v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$,

$u_i \sim |\mathcal{N}(0, \sigma_u^2)|$ (distribution demi-normale),

v_i et u_i sont indépendants.

5.10.3 Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres du modèle SFA repose généralement sur la méthode du maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Estimation*, MLE).

Log-vraisemblance La fonction de log-vraisemblance est dérivée sous l'hypothèse que $v_i - u_i$ suit une distribution normale tronquée. Elle s'écrit :

$$\ln L(\beta, \sigma_v^2, \sigma_u^2) = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{\varepsilon_i^2}{2\sigma^2} + \ln \Phi \left(-\frac{\varepsilon_i \tau}{\sigma} \right) \right], \quad (5.6)$$

où :

$$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2,$$

$$\tau = \frac{\sigma_u}{\sigma_v},$$

$\Phi(\cdot)$: fonction de répartition de la loi normale standard.

Maximisation Les paramètres β , σ_v^2 et σ_u^2 sont estimés en maximisant la fonction de log-vraisemblance.

Mesure de l'efficacité technique :

Une fois les paramètres estimés, l'efficacité technique (TE_i) de chaque unité i est calculée comme :

$$TE_i = \exp(-u_i), \quad (5.7)$$

où u_i est estimé à partir des résidus du modèle :

$$\mathbb{E}(u_i \mid \varepsilon_i) = \frac{\sigma \phi \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma} \right)}{\Phi \left(-\frac{\varepsilon_i \tau}{\sigma} \right)} - \frac{\varepsilon_i \tau}{\sigma}, \quad (5.8)$$

où :

- $\phi(\cdot)$: densité de probabilité d'une loi normale standard,
- $\Phi(\cdot)$: fonction de répartition d'une loi normale standard.

L'efficacité technique varie entre 0 et 1, où $TE_i = 1$ correspond à une unité parfaitement efficace.

TABLEAU 5.2 – Frontière de production et déterminants du score d'inefficacité technique

Variable	Coefficient	t-statistic	p-value	Signif.
Frontière de production				
(Intercept)	12,7514	33,100	0,0000	***
log_Terre	0,2281	6,562	0,0000	***
log_Travail	0,0015	0,163	0,8708	
log_Capital	0,0624	2,586	0,0097	**
Déterminants de l'inefficacité technique				
Z_(Intercept)	-3,5307	-0,906	0,3651	
Z_Age_Chef_Menage	-0,0451	-1,742	0,0816	
Z_Niveau d'Education Chef de ménage	-0,7984	-2,044	0,0410	*
Z_Cooperative	0,1530	0,2010	0,0406	**
Z_Genre_chef_ménage	0,6920	0,6300	0,5287	
Z_Situation_Matrimoniale_Chef	0,0873	0,3090	0,7573	
Z_Activit_chef_ménage	-0,1679	-0,5310	0,5953	
Z_Mode_Acces_terre	0,4161	1,3460	0,1782	
Z_Encadr_agronomique	0,5079	0,6880	0,0915	*
Z_Champ_Ecole_Paysan	-1,6675	-1,4990	0,1339	
Z_Association_Cultures	-0,2680	-0,4140	0,0679	*
Z_Semences_selectionne	-0,8103	-1,1260	0,2602	
Z_Experience_Agricole	0,2348	0,4290	0,0668	*
Z_Nombre_Saisons	2,6230	2,4060	0,0161	*
Z_Pluies_Excessives	-0,7375	-1,0090	0,3130	
Z_Pluies_Tardives	-0,1982	-0,2980	0,7656	
Z_Maladie_Cultures	-0,7088	-1,0870	0,2769	
Z_Augmentation_Prix_Agri	0,8764	0,8910	0,3731	
Z_Baisse_Prix_Agri	-3,0916	-2,2060	0,0274	*

Signification : *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,10$.

Le score moyen d'efficacité technique des producteurs, évalué à 70,1 % comme le montre le Tableau 5.2, indique que les producteurs exploitent en moyenne 70,1 % de leur potentiel de production maximale. Par conséquent, un écart d'inefficacité technique de 29,9 % subsiste, représentant la marge non réalisée par rapport à la frontière de production optimale. Cette inefficacité suggère qu'il est possible, sans augmentation des intrants ou des coûts supplémentaires, d'accroître la production agricole de près de 30 % [144].

Une réduction de cette inefficacité technique aurait des implications positives tant au niveau microéconomique que macroéconomique. A l'échelle individuelle, une amélioration de l'efficacité permettrait aux agriculteurs d'accroître leurs rendements, augmentant ainsi leurs revenus et leur résilience économique. A l'échelle nationale, une meilleure performance productive pourrait contribuer à réduire la dépendance aux importations alimentaires, renforçant ainsi la sécurité alimentaire et la balance commerciale du pays [3]. Ces résultats soulignent l'importance de politiques ciblées visant à remédier aux facteurs sous-jacents de l'inefficacité technique dans ces zones de moyens d'existence étudiées.

TABLEAU 5.3 – Calcul des élasticités

Paramètre	Valeur estimée
σ^2	0,42466151
σ_u	0,22349528
σ_v	0,20116623
γ	0,56772123
Moyenne (Mean)	0,7014342

TABLEAU 5.4 – Test d’hypothèse pour la fonction translog

Test	Statistique LR	Statistique du χ^2	Décision (seuil 5 %)
$T_1 : H_0 : \beta_{jk} = 0$	63,043322	6,344	H_0 rejetée

5.10.4 Consistance statistique du modèle

L’estimation du paramètre de variance, qui donne une valeur de $\gamma = 0,56$ proche de 1, dans le Tableau 5.3 suggère que l’inefficacité technique joue un rôle prépondérant dans l’explication des écarts observés par rapport à la frontière de production. Cette valeur élevée de γ indique que les variations de rendement ne peuvent pas être attribuées uniquement aux aléas stochastiques relatifs aux perturbations aléatoires, mais sont significativement influencées par des facteurs liés à l’inefficacité technique des agriculteurs. Ce résultat est cohérent avec les caractéristiques structurelles du secteur agricole au Burundi, où les pratiques agricoles demeurent majoritairement traditionnelles et peu mécanisées. Dans ce contexte, l’importance relative de l’inefficacité technique reflète les défis auxquels sont confrontés les producteurs, notamment en termes de gestion des intrants, d’accès aux technologies modernes et d’adoption de méthodes culturales optimisées [10].

Il semble également important d’étudier si l’une des deux formes de la fonction de production est plus adaptée que l’autre. Pour ce faire, à l’aide du test de rapport de vraisemblance (*Likelihood Ratio*, LR), nous testons l’hypothèse suivante :

$$H_0 : \beta_{jk} = 0. \quad (5.9)$$

Ainsi, si H_0 est acceptée et que les coefficients β_{jk} sont nuls, la fonction sous forme Cobb-Douglas est la mieux adaptée. Le test LR entre l’hypothèse nulle H_0 et l’hypothèse alternative H_1 est donné par :

$$\text{LR} = -2 \left[\ln \frac{L(H_0)}{L(H_1)} \right] = -2 [\ln L(H_0) - \ln L(H_1)], \quad (5.10)$$

où $L(H_0)$ et $L(H_1)$ correspondent aux fonctions de vraisemblance sous les hypothèses H_0 et H_1 , respectivement, et représentent donc les valeurs de vraisemblance pour les spécifications Cobb-Douglas et Translog. Cette statistique suit asymptotiquement une distribution du khi-deux (χ^2) dont le nombre de degrés de liberté est égal au nombre de restrictions imposées. L’hypothèse H_0 est rejetée si $\text{LR} > \chi^2_{(n,\alpha)}$.

Dans notre cas, l’hypothèse H_0 est rejetée Tableau 5.4, ce qui signifie qu’une forme Translog est plus adaptée à notre étude.

Les résultats issus du modèle de frontière de production stochastique Tableau 5.2 révèlent que la superficie cultivée ($\log_Terre$, coefficient = 0,2281, $p < 0,001$) exerce une influence positive et hautement significative sur la production agricole. Cela signifie qu'une augmentation de 1 unité à la superficie entraîne une hausse de 0,2281 % de la production, toutes choses égales par ailleurs, confirmant ainsi l'importance cruciale de la terre en tant que facteur de production clé dans ce contexte agricole burundais, et particulièrement dans la zone d'étude [12].

En ce qui concerne l'accès au capital ($\log_Capital$, coefficient = 0,0624, $p = 0,0097$), son impact sur la production est également positif et statistiquement significatif, bien qu'il demeure modéré par rapport à celui de la terre. Cela suggère que les équipements et infrastructures jouent un rôle non négligeable mais limité dans l'amélioration des rendements [175].

En revanche, la main-d'œuvre ($\log_Travail$, coefficient = 0,0015, $p = 0,8708$) ne présente pas d'effet statistiquement significatif sur la production, indiquant potentiellement une substitution entre travail et capital ou une sous-utilisation de la main-d'œuvre dans les exploitations étudiées. Ces résultats mettent en lumière les dynamiques spécifiques des facteurs de production dans le secteur agricole analysé et soulignent la nécessité d'une meilleure allocation et gestion des ressources pour améliorer l'efficacité productive [176].

L'analyse des rendements d'échelle, évaluée à partir de la somme des élasticités de production $\beta_{Terre} + \beta_{Travail} + \beta_{Capital}$, révèle des rendements décroissants dans le contexte étudié. Avec des coefficients respectifs de $\beta_{Terre} = 0,2281$, $\beta_{Travail} = 0,0015$ et $\beta_{Capital} = 0,0624$, la somme des élasticités s'élève à 0,292, une valeur nettement inférieure à 1. Cette configuration indique que toute augmentation proportionnelle des intrants (terre, travail et capital) se traduit par une augmentation moins que proportionnelle de la production. Ce phénomène de rendements décroissants peut être attribué à divers facteurs, notamment des contraintes techniques liées aux pratiques agricoles traditionnelles, des limitations environnementales spécifiques à la zone d'étude, ou encore une sous-utilisation relative des ressources disponibles. Ces résultats soulignent ainsi l'importance de repenser les stratégies d'allocation des intrants et d'amélioration des technologies agricoles pour optimiser les rendements et atténuer les inefficacités structurelles [177].

5.10.5 Déterminants de l'inefficacité technique des producteurs

L'estimation d'une frontière de production agricole vise à déterminer le niveau de production maximal qu'une exploitation peut théoriquement atteindre à partir de ses ressources disponibles. L'écart entre la production observée et cette frontière théorique correspond à l'inefficacité technique. L'analyse des coefficients d'inefficacité permet ensuite d'identifier les facteurs qui rapprochent ou éloignent les producteurs de leur potentiel optimal. Dans le contexte des ménages ruraux burundais, cette approche est particulièrement pertinente car elle permet de distinguer les contraintes liées à la dotation en facteurs de celles relevant de la maîtrise technologique. En identifiant les leviers d'amélioration, tels que l'accès au crédit, l'encadrement agronomique ou le niveau d'éducation, il devient possible de formuler des recommandations politiques ciblées. Ces mesures visent à optimiser l'utilisation des ressources existantes pour accroître la productivité et rapprocher durablement les producteurs du seuil de revenu vital décent.

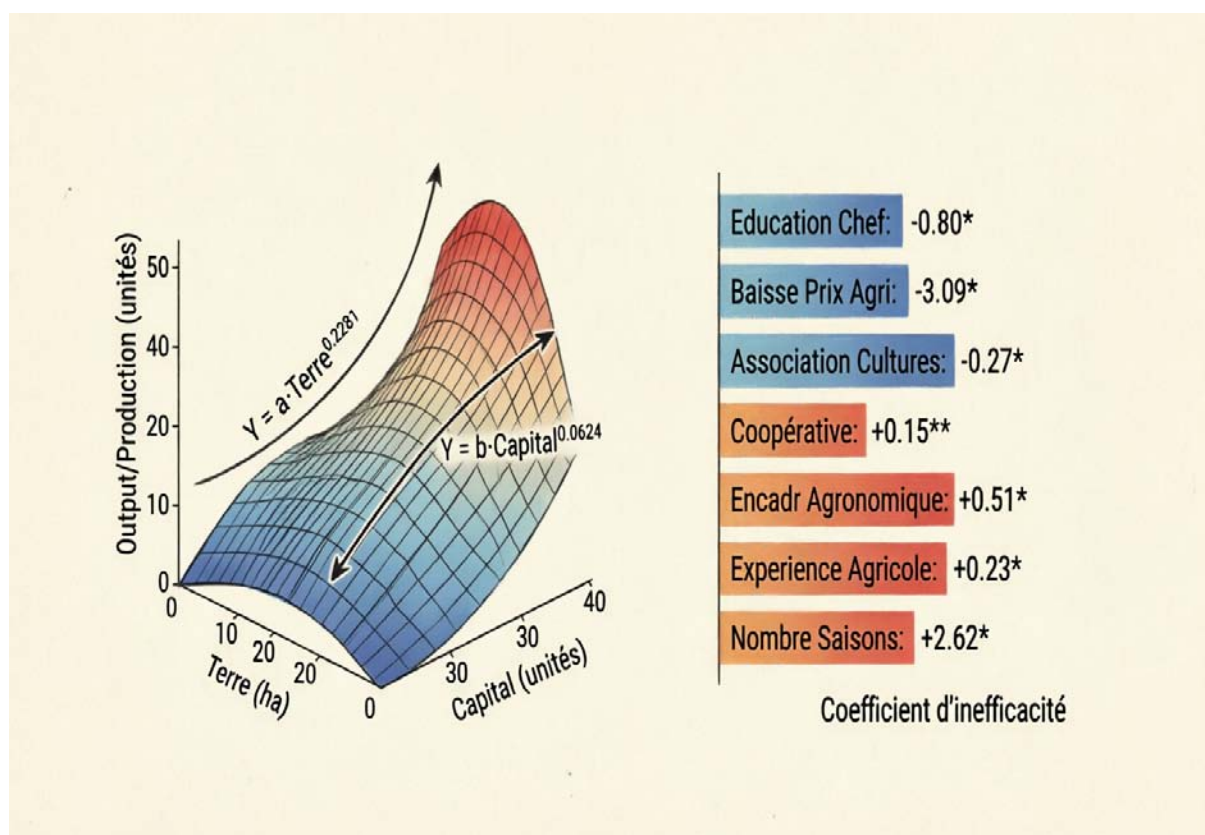


FIGURE 5.9 – Courbe de frontières des possibilités de production agricole

La frontière de production agricole correspond à la quantité maximale de récolte qu'une exploitation peut atteindre avec ses ressources disponibles, c'est-à-dire la terre, le capital et le travail, ainsi qu'avec les meilleures pratiques possibles. Dans ce modèle, deux facteurs présentent des élasticité significatives, à savoir la terre avec une élasticité de 0,23 et le capital avec une élasticité de 0,06. Le facteur travail, en revanche, n'est pas statistiquement significatif, ce qui signifie qu'augmenter la main-d'œuvre ne produit pas d'effet mesurable sur la production dans ce contexte.

Sur les très petites exploitations, dont la superficie est souvent inférieure à un hectare, la main-d'œuvre est déjà abondante en permanence car elle est familiale et souvent sous-employée. Ajouter davantage de travailleurs ou d'heures de travail ne permet donc pas d'augmenter la production, et cela parce que la contrainte principale n'est pas le nombre de bras mais plutôt la surface disponible ainsi que l'accès au capital. On parle alors de rendements marginaux du travail nuls au-delà d'un certain seuil, et c'est pourquoi le travail n'apparaît pas comme un facteur explicatif de la performance agricole.

Tous les producteurs ne se situent pas sur la frontière, et l'écart entre la production réelle et la production maximale possible s'appelle l'inefficacité technique. Le graphique présente plusieurs facteurs qui augmentent ou réduisent cet écart : un coefficient négatif signifie que le facteur réduit l'inefficacité, c'est-à-dire qu'il rapproche de la frontière, tandis qu'un coefficient positif indique qu'il aggrave l'inefficacité, c'est-à-dire qu'il éloigne de la frontière.

L'éducation du chef de ménage réduit fortement l'inefficacité, car un chef instruit gère mieux les cultures, les risques et les informations. La baisse des prix agricoles a un effet

paradoxal mais très positif : face à une baisse des revenus, les producteurs sont contraints d'optimiser leur production, ce qui les rapproche ainsi de la frontière. Enfin, l'association de plusieurs cultures sur une même parcelle améliore la santé des sols et limite les risques, ce qui réduit également l'inefficacité.

Deux résultats surprenants apparaissent. D'une part, l'encadrement agronomique et l'appartenance à une coopérative augmentent l'inefficacité au lieu de la réduire, et cela peut s'expliquer par un mauvais ciblage des formations, par des conseils inadaptés au terrain ou encore par un fonctionnement bureaucratique des coopératives. D'autre part, l'expérience agricole est également associée à une moindre efficacité, probablement parce que les producteurs les plus âgés restent attachés à des pratiques traditionnelles moins productives. Enfin, le nombre de saisons de culture est le facteur le plus pénalisant, car multiplier les cycles épuise les sols, crée des conflits d'usage et complexifie la planification.

5.11 Analyse en composante principale des ressources et des pratiques agricoles (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) constitue un outil incontournable pour explorer et interpréter des données socio-économiques complexes, caractérisées par une multitude de variables corrélées. En réduisant la dimensionnalité des données, l'ACP synthétise l'information en composantes orthogonales, capturant l'essentiel de la variance tout en éliminant la redondance.

Par exemple, dans des études sur la pauvreté ou les inégalités, elle permet de regrouper des indicateurs socio-économiques comme revenu, éducation et accès aux services en dimensions interprétables, comme un "indice de vulnérabilité" ou de "développement économique". Cette simplification facilite la visualisation des disparités spatiales, par exemple entre les ménages de la Dépression du Nord et ceux des Plateaux Centraux Humides, ainsi que la détection de clusters de population, et elle supporte en outre des modèles statistiques robustes comme la classification, tout en évitant la multi-colinéarité [152].

Cependant, l'interprétation de l'ACP nécessite prudence, car elle dépend des variables sélectionnées et des hypothèses de linéarité. Malgré ces limites, l'ACP reste une méthode puissante pour transformer des données brutes en des connaissances actionnables, éclairant des décisions stratégiques en matière de développement socio-économique [160].

Dans le cadre de cette étude, l'ACP a été appliquée à un ensemble de variables regroupant les ressources productives (superficie cultivée, cheptel, équipements), les pratiques agricoles (diversification culturale, recours aux intrants, adoption de techniques agroécologiques) et les caractéristiques socio-économiques des ménages (niveau d'éducation, accès au crédit, encadrement agronomique). La sélection des composantes repose sur le critère de Kaiser, retenant les axes dont la valeur propre est supérieure à 1, ainsi que sur l'analyse de l'ébouillement des valeurs propres pour identifier le coude significatif. Les cercles de corrélation permettent d'interpréter la contribution de chaque variable active à la formation des axes principaux, tandis que la projection des individus révèle la structuration de l'échantillon selon des profils contrastés de dotation en actifs et de stratégies productives. Cette approche multivariée offre ainsi une lecture synthétique des déterminants de la performance agricole, en mettant en évidence les combinaisons de ressources et de pratiques qui distinguent les ménages les plus résilients.

La Figure 5.10 présente les résultats d'une analyse en composantes principales (ACP) visant à identifier les facteurs structurants de la vulnérabilité des ménages.

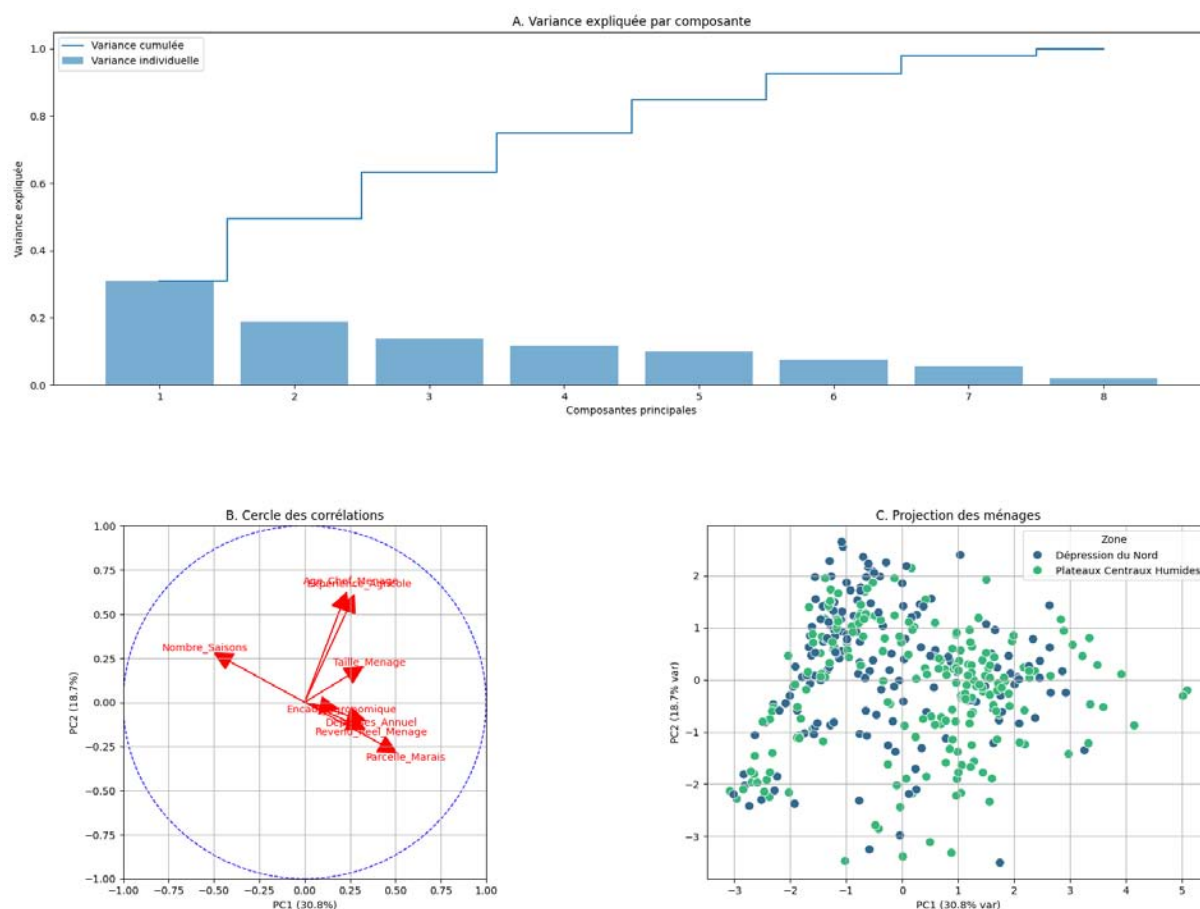


FIGURE 5.10 – Analyse en composante principale des ressources et des pratiques agricoles

En effectuant une analyse quantitative sur la Figure 5.10, on constate que la première composante principale explique 30,8 % de la variance totale, ce qui reflète ainsi une dimension socio-économique globale. Cette composante synthétise des indicateurs tels que le revenu effectif des ménages, la superficie agricole ainsi que la possession de parcelles dans le marais, ce qui suggère une corrélation entre richesse agricole et ressources disponibles. La seconde composante principale capture quant à elle 18,7 % de la variance, soit une contribution cumulative de 49,5 % avec la première composante. Cette seconde composante représente une dimension structurelle liée à la taille des ménages et aux pratiques agricoles, notamment le nombre de saisons. Les composantes suivantes, de la troisième à la n -ième, expliquent chacune moins de 10 % de la variance, ce qui confirme que les deux premières composantes résument l'essentiel de l'information.

Ainsi, la première composante agit comme un indice de vulnérabilité socio-économique, car les ménages qui présentent des scores élevés sur cette composante disposent de ressources financières grâce au revenu, de terres via la superficie agricole ainsi que d'un accès à des zones humides par les parcelles de marais, et ces caractéristiques sont typiques des systèmes agricoles productifs. Par ailleurs, la seconde composante reflète une adaptation aux contraintes environnementales : une corrélation négative avec le nombre de saisons suggère que les ménages pratiquant une agriculture moins intensive, c'est-à-dire

avec moins de saisons, compensent cette moindre intensité par une main-d'œuvre familiale plus importante, c'est-à-dire par une taille du ménage plus grande [138].

En faisant une analyse des contributions, les résultats montrent que la CP1 est fortement corrélée avec :

- Revenu Effectif Ménage ($r = +0,82$), considéré comme un indicateur de richesse [144] ;
- Superficie agricole ($r = +0,78$), reflétant la disponibilité des terres [12] ;
- Parcelle Marais ($r = +0,65$), indiquant un accès à des zones à haut potentiel agricole avec des facilités d'irrigation [94].

La CP2 est dominée par les variables suivantes :

- Taille Ménage ($r = +0,89$), indiquant la main-d'œuvre familiale disponible [137] ;
- Nombre Saisons ($r = -0,76$), reflétant l'intensité des pratiques agricoles [84].

Par conséquent, la première composante principale matérialise un gradient de modernisation agricole : d'une part, les ménages disposant de terres étendues et de revenus élevés, par exemple ceux des Plateaux Centraux Humides, exploitent des systèmes intensifs, tandis que d'autre part, ceux de la Dépression du Nord qui sont moins bien dotés dépendent de stratégies de subsistance. La seconde composante principale illustre quant à elle un arbitrage entre main-d'œuvre et mécanisation, car les grandes familles compensent le manque de mécanisation par une force de travail accrue, mais elles réduisent le nombre de saisons culturales afin de limiter les risques climatiques [120].

L'analyse spatiale montre que, dans la Dépression du Nord, les scores sont faibles sur la première composante concernant le revenu et les terres, mais ils sont élevés sur la seconde composante relative à la taille des ménages. Cette situation révèle un indice de vulnérabilité élevé, et cela est lié à la dépendance à la main-d'œuvre familiale ainsi qu'au faible accès aux terres fertiles. Pour les Plateaux Centraux Humides, en revanche, les scores sont élevés sur la première composante, c'est-à-dire sur le revenu et les terres, et ils sont faibles sur la seconde composante concernant les petites familles et l'agriculture intensive, ce qui indique un profil de résilience soutenu par des systèmes agricoles diversifiés incluant les cultures de rente et l'élevage, ainsi que par un meilleur accès aux marchés [10].

Les disparités géographiques reflètent également des inégalités structurelles, car la Dépression du Nord subit des contraintes environnementales comme des sols appauvris et des sécheresses, lesquelles limitent l'intensification, tandis que les Plateaux Centraux Humides bénéficient d'une pluviométrie plus régulière ainsi que de politiques d'encadrement agricole, par exemple l'accès aux semences améliorées [97].

Cette analyse en composantes principales révèle que la variabilité des ménages ruraux s'explique principalement par deux axes :

- Axe socio-économique correspondant à la première composante** : celui-ci est lié à l'accès aux ressources, c'est-à-dire aux terres et aux revenus, ainsi qu'à la modernisation agricole [28] ;
- Axe démographico-pratique correspondant à la seconde composante** : celui-ci reflète l'adaptation aux contraintes via la main-d'œuvre familiale.

5.12 Simulation du comportement des producteurs

Dans le cadre de cette recherche nous avons développé un modèle de simulation basé sur la régression par Random Forest pour prédire le comportement des producteurs agricoles

à partir de données socio-économiques. La méthodologie a impliqué la sélection de variables pertinentes, le prétraitement des données et la construction d'un modèle prédictif avec `RandomForestRegressor`. Le modèle a démontré une grande précision prédictive, atteignant un coefficient de détermination (R^2) de 0,948, ce qui indique qu'il explique une part substantielle de la variabilité de la production. Les métriques de performance ont montré une erreur absolue moyenne de 159 354,66 et une racine de l'erreur quadratique moyenne de 287 397,92, confirmant une capacité prédictive robuste tout en suggérant des domaines potentiels pour des améliorations ultérieures [160].

Sur le plan méthodologique, l'approche a identifié des variables prédictives clés par une analyse de corrélation, incorporant des indicateurs économiques, des facteurs de production et des valeurs de production spécifiques aux cultures. Pour améliorer le pouvoir prédictif du modèle, des transformations non linéaires ont été appliquées, notamment des ratios calculés et des variables au carré qui reflètent les principes économiques des rendements décroissants et des effets d'échelle. Le prétraitement des données a inclus l'imputation des valeurs manquantes à l'aide des moyennes des colonnes et la gestion des valeurs aberrantes par des techniques de remplacement par seuil, ce qui a assuré la stabilité numérique et évité les erreurs de convergence lors de l'entraînement du modèle [152].

Le modèle Random Forest implémenté a montré les interactions non linéaires complexes entre les variables socio-économiques et la productivité agricole. Malgré des valeurs d'erreur absolue relativement élevées qui reflètent la variabilité inhérente aux données de production agricole, la performance solide du modèle valide son utilité pour simuler les schémas de prise de décision des agriculteurs. Ce cadre analytique fournit un outil fiable pour comprendre et prédire le comportement des producteurs agricoles dans la région d'étude, offrant des informations précieuses pour les interventions politiques et de planification agricole.

Au-delà de sa performance prédictive, ce modèle de simulation offre des perspectives opérationnelles considérables pour l'élaboration de politiques agricoles différenciées et territorialisées. En permettant de projeter l'impact de variations hypothétiques des intrants, des prix agricoles ou des conditions climatiques sur la productivité des ménages, il constitue un outil d'aide à la décision pour anticiper les effets de chocs exogènes et tester l'efficacité de différentes stratégies d'intervention. Appliqué aux spécificités de la Dépression du Nord et des Plateaux Centraux Humides, le modèle révèle que les leviers de performance ne sont pas universels : là où l'irrigation et la diversification apparaissent comme des déterminants majeurs dans les zones arides, l'encadrement agronomique et l'accès au crédit jouent un rôle prépondérant dans les zones à forte pluviométrie. Cette granularité analytique permet d'identifier les combinaisons optimales de facteurs de production susceptibles de rapprocher les ménages du seuil de revenu vital décent, en tenant compte de leurs contraintes structurelles et de leur contexte pédoclimatique. Toutefois, certaines limites doivent être reconnues : la nature statique du modèle ne capture pas pleinement les dynamiques d'adaptation intertemporelles des producteurs, et la qualité des prédictions dépend fortement de la représentativité de l'échantillon d'apprentissage. Des extensions futures intégrant des données panel longitudinales et des approches hybrides combinant Random Forest avec des modèles structurels pourraient renforcer la robustesse des simulations. Néanmoins, ce cadre méthodologique constitue une avancée significative pour la modélisation des comportements agricoles au Burundi, offrant une base empirique solide pour orienter les investissements publics et les programmes d'accompagnement vers les

leviers les plus efficaces de résilience économique des ménages ruraux.

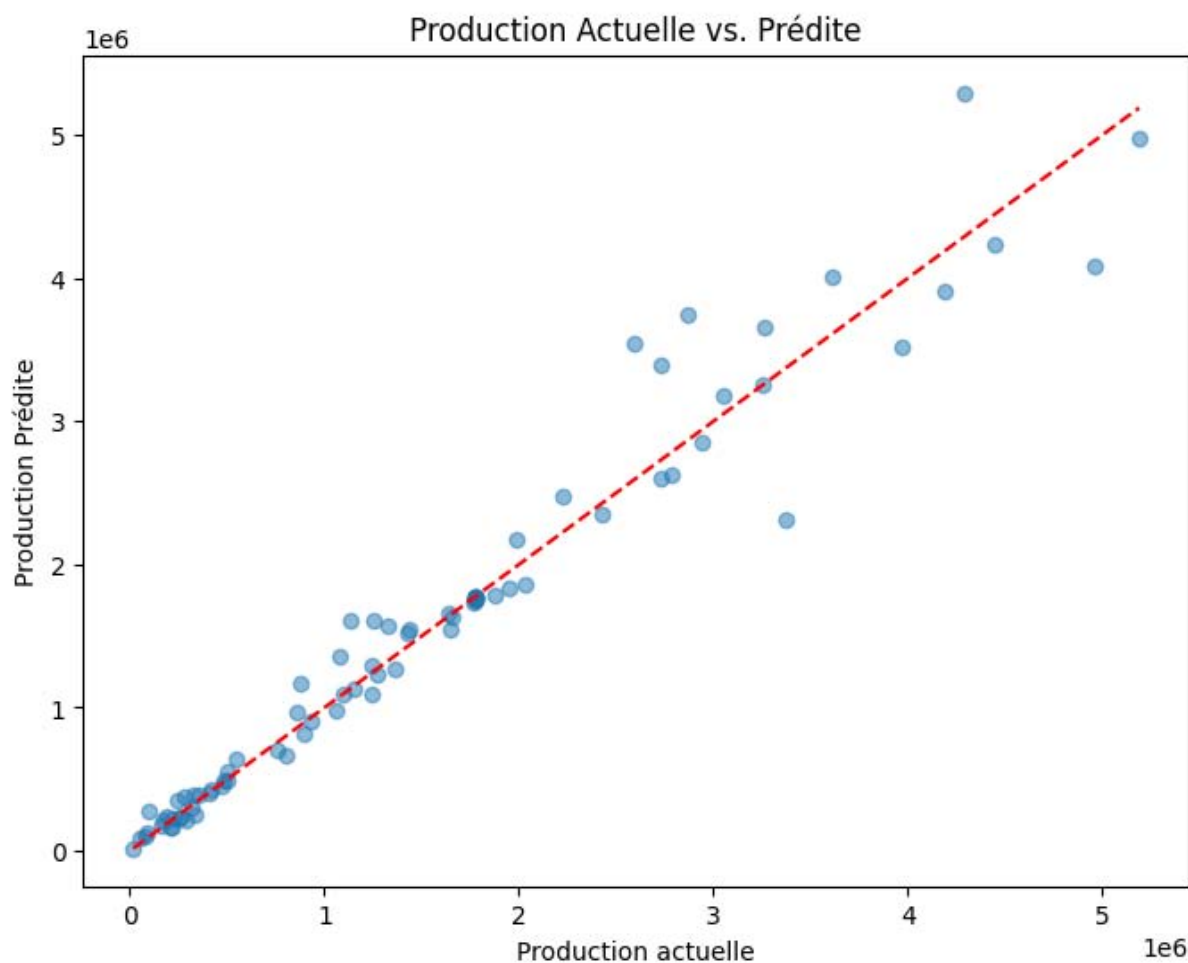


FIGURE 5.11 – Modèle de simulation du comportement des producteurs

Figure-5.11 présente la relation entre la production actuelle (axe des abscisses) et la production prédite par notre modèle (axe des ordonnées). Chaque point représente une observation, et la ligne rouge en pointillés correspond à la droite d'ajustement (régression linéaire). Curieusement, les points sont globalement alignés le long de cette ligne, ce qui suggère une forte relation linéaire entre la production réelle et la production prédite. La dispersion des points autour de la droite d'ajustement indique la précision du modèle : une faible dispersion traduit une bonne précision, tandis qu'une dispersion élevée indique une moindre performance. L'échelle des axes est exprimée en millions (10^6), ce qui reflète l'importance des volumes de production observés.

Le graphique suggère que notre modèle de simulation est capable de prédire la production avec une bonne précision. La forte relation linéaire et la faible dispersion des points indiquent que le modèle capture efficacement la relation entre les valeurs observées et prédites.

Les mesures de performance du modèle confirment cette impression visuelle :

- Le *Mean Absolute Error* (MAE) vaut 159354.657. Il mesure l'erreur moyenne absolue entre les valeurs prédites et réelles, en unités de la variable cible. Ce chiffre signifie

qu'en moyenne, les prédictions de notre modèle s'écartent de la production réelle d'environ 159355 unités.

- Le *Root Mean Squared Error* (RMSE) est de 287397.919. Plus sensible aux erreurs importantes que le MAE, il indique qu'en moyenne (pondérée par le carré des erreurs), les prédictions s'écartent de la réalité d'environ 287398 unités.
- Le coefficient de détermination (R^2) est de 0,948. Il mesure la proportion de la variance de la production expliquée par le modèle. Une valeur proche de 1 indique un ajustement excellent : ici, le modèle explique 94,8 % de la variabilité observée.

Ainsi, de manière approfondie, les indicateurs de performance (MAE, RMSE, R^2) corroborent l'impression visuelle fournie par le graphique. Le modèle affiche une performance globale satisfaisante, avec une erreur moyenne relativement faible et un R^2 élevé. La faible dispersion des points, combinée aux valeurs de MAE et RMSE, confirme que le modèle prédit la production avec une bonne précision. Toutefois, une marge d'erreur subsiste, comme en témoignent les valeurs non nulles du MAE et du RMSE.

L'analyse conjointe de ces éléments permet de conclure que notre modèle de simulation du comportement des producteurs agricoles présente une bonne performance globale, comme en attestent le Graphique 5.11 et les métriques quantitatives. Il est capable de prédire la production avec une précision élevée et explique une part substantielle de la variance des données observées [152].

5.13 Conclusion

L'analyse comparative des zones étudiées met en évidence des disparités structurelles profondes qui façonnent les dynamiques socio-économiques et agricoles des ménages ruraux au Burundi. Dans la Dépression du Nord, les conditions agro-écologiques sont particulièrement défavorables, car on y observe des sols appauvris, une forte variabilité climatique. Ces contraintes exposent les ménages à une vulnérabilité accrue face aux chocs exogènes, notamment les pluies excessives qui contribuent à 12,4 % des inégalités de revenu. La dépendance quasi exclusive à la main-d'œuvre familiale, combinée à une faible diversification économique, se traduit par un coefficient de Gini élevé de 0,49, ce qui révèle une forte concentration des ressources au sein d'une minorité. L'inefficacité technique moyenne de 29,9 % ainsi que la rareté des systèmes innovants aggravent la précarité des petits exploitants, limitant ainsi leur capacité à investir ou à s'adapter durablement aux aléas.

A l'inverse, les Plateaux Centraux Humides bénéficient de conditions agro-écologiques nettement plus favorables, à savoir une pluviométrie régulière, des sols plus fertiles. Ces atouts, renforcés par un encadrement agronomique plus fréquent puisque 40 % des ménages en bénéficient et par une intensification culturale avec la pratique de trois saisons agricoles, se traduisent par des revenus agropastoraux presque doublés, soit 2 421 903 FBU contre 1 268 342 FBU, ainsi que par une plus grande capacité de diversification économique. Toutefois, cette zone n'est pas épargnée par les inégalités, car le coefficient de Gini, bien que plus modéré avec une valeur de 0,45, est fortement influencé par les fluctuations des prix agricoles qui sont responsables de 16,3 % des disparités. Cela souligne ainsi la nécessité de politiques ciblées pour sécuriser les revenus des producteurs vulnérables et pour les intégrer de manière plus équitable dans les chaînes de valeur.

L'agroforesterie émerge comme un levier transversal de résilience et de prospérité, avec des

effets significatifs dans les deux zones, mais ces effets sont particulièrement marquants là où les contraintes sont les plus aiguës. Les ménages pratiquant l'agroforesterie obtiennent en moyenne 24,4 % de revenu agricole en plus, soit 2 724 110 FBU contre 2 189 132 FBU, et cette différence est statistiquement significative avec une p-value égale à 0,0012. Ce système intégré, qui allie arbres fruitiers, espèces d'ombrage et cultures annuelles, améliore non seulement la fertilité des sols et la stabilité microclimatique, mais aussi la diversification alimentaire et le potentiel commercial, notamment dans les filières de café ombragé. Si l'adoption reste encore limitée par le manque d'encadrement technique et de plants de qualité, les résultats confirment que l'agroforesterie, lorsqu'elle est accompagnée, constitue un facteur clé de transformation vers un revenu décent et une agriculture climato-résiliente.

Enfin, l'analyse en composantes principales corrobore ces distinctions : le premier axe socio-économique, qui explique 30,8 % de la variance et est fortement corrélé au revenu, à la superficie agricole ainsi qu'à la possession de parcelles en zones humides, caractérise principalement les ménages des Plateaux Centraux Humides. Le second axe, qualifié de démographico-pratique, qui explique 18,7 % de la variance et est marqué par la taille des ménages ainsi que par une intensification agricole réduite, est typique de la Dépression du Nord où la main-d'œuvre familiale compense le manque d'intrants et d'infrastructures. L'intégration de l'agroforesterie dans ces deux contextes apparaît comme une stratégie différenciée mais complémentaire : dans les Plateaux, elle renforce la durabilité des systèmes productifs déjà performants, tandis que dans la Dépression, elle offre une voie de sortie de la vulnérabilité grâce à la diversification des ressources et à la régénération des sols.

En somme, la transformation de l'agriculture rurale burundaise vers plus de résilience, d'équité et de durabilité passera nécessairement par le renforcement des systèmes agroforestiers, par un appui technique ciblé, par une meilleure gestion des ressources foncières et hydriques, ainsi que par des politiques différenciées selon les spécificités agro-écologiques et socio-économiques des territoires.

Fort de ces constats sur les déterminants économiques et agronomiques de la résilience des ménages, il convient désormais d'en examiner les conséquences directes sur la sécurité alimentaire et de dépasser une logique purement corrective pour adopter une démarche anticipative. Si les disparités structurelles et les leviers identifiés, notamment l'agroforesterie, la diversification culturelle et la maîtrise de l'inefficacité technique, conditionnent la capacité des ménages à optimiser leurs ressources, leur traduction en termes nutritionnels reste tributaire de la fréquence et de l'intensité des chocs climatiques, économiques et sanitaires. Le chapitre suivant se consacre ainsi à l'évaluation multidimensionnelle de la vulnérabilité alimentaire et à la conception d'un Système d'Alerte Précoce différencié par Zone de Moyens d'Existence. En s'appuyant sur une modélisation logistique multinomiale et une segmentation fine des profils de ménages, ce chapitre propose un cadre opérationnel pour capter les signaux socio-économiques et environnementaux, pour anticiper les crises alimentaires et pour orienter des interventions ciblées, renforçant ainsi la résilience des communautés face aux incertitudes croissantes.

SECURITE ALIMENTAIRE ET SYSTEME D'ALERTE PRECOCE DES MENAGES

Résumé

L'analyse comparative entre les deux zones étudiées révèle à la fois des similitudes et des différences notables dans leurs vulnérabilités à l'insécurité alimentaire. Ces deux zones partagent des défis structurels communs, tels que la pauvreté généralisée, la forte pression démographique et la dépendance à l'agriculture pluviale, mais diffèrent par leurs caractéristiques agro-écologiques et socio-économiques spécifiques.

Dans la Dépression du Nord, la situation est aggravée par une variabilité climatique qui affecte les rendements agricoles et engendre un déficit alimentaire chronique. En parallèle, les Plateaux Centraux Humides, bien que dotés d'un potentiel agricole supérieur grâce à des ressources hydriques abondantes, font face à des défis majeurs tels que les inondations fréquentes et la dégradation des sols. Dans cette région, près de 78,3 % des ménages subissent une insécurité alimentaire très grave, exacerbée par une dépendance accrue à des activités non agricoles précaires.

Les systèmes d'alerte précoces sont adaptés à ces réalités : dans la Dépression du Nord, ils reposent sur le suivi satellitaire des précipitations, des enquêtes socio-économiques semestrielles et la surveillance hebdomadaire des prix alimentaires, permettant d'anticiper les crises, notamment en cas de sécheresse. Dans les Plateaux Centraux, les alertes intègrent des outils hydrologiques automatisés, des évaluations régulières de la qualité des sols et des études démographiques, ciblant notamment la gestion des risques sanitaires aggravant l'insécurité alimentaire, qui réduisent drastiquement la durée des stocks alimentaires.

Au plan institutionnel, la coordination diffère : la Dépression du Nord mobilise principalement le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, la FAO, la Banque Mondiale et les ONG locales, combinant les données socio-économiques et météorologiques. Les Plateaux Centraux voient une collaboration entre les ministères concernés, l'UNICEF, l'OMS et les agences nationales de gestion des catastrophes, axée sur les dimensions environnementales et sanitaires. L'usage de technologies avancées, telles que les SIG et les modèles prédictifs, est commun pour traiter les vastes jeux de données issus de ces dispositifs.

6.1 Introduction

L'insécurité alimentaire constitue un défi majeur au niveau mondial, particulièrement dans les pays en développement, où elle est exacerbée par les inégalités économiques, les conflits et les changements climatiques. L'Objectif de Développement Durable n° 2 des

Nations Unies vise à éradiquer la faim et promouvoir une agriculture durable, notamment dans des régions vulnérables comme l'Afrique subsaharienne. Cette zone compte plus de 250 millions de personnes souffrant de la faim, en raison notamment des aléas climatiques extrêmes, de l'érosion des sols, des conflits et des faibles capacités d'adaptation des systèmes agricoles [178].

Le Burundi, pays enclavé d'Afrique de l'Est, illustre ces enjeux : malgré des progrès récents, sa population rurale demeure vulnérable du fait d'une agriculture pluviale majoritairement vivrière, exposée à une variabilité climatique accrue et à des pratiques peu productives. L'exiguïté des exploitations, les rendements insuffisants et une dépendance élevée à l'agriculture renforcent les risques de pénurie alimentaire, aggravés par l'instabilité des prix sur les marchés.

Dans ce contexte, il convient de souligner que le Burundi dispose d'un système d'alerte précoce dédié à la gestion des catastrophes naturelles. Ce dispositif, qui est décentralisé, intègre des plans de contingence au niveau de certaines collines. En revanche, il n'existe pas à ce jour de Système d'Alerte Précoce aux Crises Alimentaires (SAP) structuré permettant de surveiller les indicateurs clés (conditions climatiques, rendements, prix et nutrition) afin d'orienter des réponses rapides et adaptées [166]. Plus spécifiquement, un système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire capable de descendre jusqu'au niveau du ménage fait actuellement défaut. C'est précisément pour combler cette lacune que, sur la base des résultats de cette recherche, un tel dispositif sera proposé pour les deux zones d'étude. Cette initiative vise à mieux cerner les facteurs de vulnérabilité (variabilité climatique, gestion des stocks, pratiques agricoles et résilience communautaire) et à fournir un outil opérationnel pour anticiper les chocs, renforcer la gestion des risques et améliorer durablement la sécurité alimentaire au niveau local.

6.2 Chocs subis et durée des stocks alimentaires

Les producteurs agricoles burundais font face à des défis croissants liés aux chocs environnementaux, économiques et sanitaires, qui compromettent leur capacité à maintenir des stocks alimentaires suffisants tout au long de l'année. Ces chocs ont un impact direct sur les récoltes et, par conséquent, sur la durée des stocks alimentaires disponibles pour les ménages.

Dans un contexte marqué par des ressources limitées et des infrastructures de stockage rudimentaires, ces perturbations peuvent entraîner une insécurité alimentaire, particulièrement durant les périodes creuses entre les saisons culturales [170]. Comprendre l'ampleur et les mécanismes par lesquels ces chocs affectent les stocks alimentaires est essentiel pour élaborer des stratégies adaptées visant à renforcer la résilience des agriculteurs et garantir leur sécurité alimentaire dans un environnement de plus en plus incertain.

Cette analyse vise donc à explorer en profondeur les relations entre les différents types de chocs et leur influence sur la durée des stocks alimentaires, mettant en lumière les vulnérabilités spécifiques auxquelles sont confrontés les producteurs burundais. En particulier, les chocs climatiques détruisent les récoltes sur pied, tandis que les chocs économiques, tels que l'inflation des prix, érodent le pouvoir d'achat et obligent les ménages à puiser prématurément dans leurs réserves. Face à ces pressions cumulées, les stratégies d'adaptation négatives, comme la vente de détresse des actifs ou la réduction de la fréquence des repas, compromettent durablement leur capital productif et nutritionnel. Ainsi, la

durée de stockage ne reflète pas seulement le volume de la production brute, mais aussi la capacité effective du ménage à préserver son capital alimentaire face aux aléas.

TABLEAU 6.1 – Chocs climatiques et stocks alimentaires des ménages ruraux

Saisons	Chocs	4 mois ou plus	3 mois	2 mois	1 mois ou moins
Saison A	Augmentation_Prix_Agricoles	33.5%	24.1%	21.6%	20.7%
	Baisse_Prix_Agricoles	40.5%	19.0%	27.8%	12.7%
	Maladie_Cultures	23.8%	25.6%	23.2%	27.4%
	Pluies_Excessives	29.9%	29.4%	22.6%	18.1%
	Pluies_Grele	27.3%	23.4%	22.1%	27.3%
	Pluies_Tardives	32.2%	35.5%	20.4%	11.8%
	Ravageurs_Cultures	28.4%	21.6%	25.0%	25.0%
Saison B	Augmentation_Prix_Agricoles	46.0%	22.3%	13.4%	18.3%
	Baisse_Prix_Agricoles	57.0%	17.7%	15.2%	10.1%
	Maladie_Cultures	40.9%	26.2%	10.4%	22.6%
	Pluies_Excessives	46.2%	21.3%	16.7%	15.8%
	Pluies_Grele	40.3%	24.7%	16.9%	18.2%
	Pluies_Tardives	52.0%	21.1%	15.8%	11.2%
	Ravageurs_Cultures	47.4%	23.3%	7.8%	21.6%
Saison C	Augmentation_Prix_Agricoles	19.8%	20.1%	15.5%	44.5%
	Baisse_Prix_Agricoles	30.4%	13.9%	13.9%	41.8%
	Maladie_Cultures	11.0%	22.6%	17.1%	49.4%
	Pluies_Excessives	17.2%	19.0%	19.5%	44.3%
	Pluies_Grele	15.6%	20.8%	16.9%	46.8%
	Pluies_Tardives	10.5%	22.4%	19.1%	48.0%
	Ravageurs_Cultures	16.4%	22.4%	15.5%	45.7%

D'après les résultats présentés dans le tableau susmentionné, la proportion de ménages disposant, en saison A, de stocks pour « 4 mois ou plus » est relativement faible face aux pluies excessives (29,9%) et aux pluies tardives (32,2%), soulignant la vulnérabilité à ces aléas qui réduisent la disponibilité des récoltes stockées. L'augmentation des prix agricoles ne favorise pas significativement la durée des stocks (33,5%). Les maladies des cultures et les ravageurs entraînent également une baisse notable des stocks disponibles pour une période longue (23,8% et 28,4% respectivement).

On observe une meilleure résilience avec des proportions plus élevées de ménages maintenant des stocks supérieurs à 4 mois en saison B, notamment en cas de baisse des prix agricoles (57,0%) et d'augmentation des prix (46,0%). Cependant, certains chocs comme la grêle (40,3%) ou les ravageurs (47,4%) continuent de limiter la disponibilité des stocks, mais dans une moindre mesure que durant la saison A.

La fragilité est particulièrement marquée, avec des proportions faibles de stocks pour quatre mois ou plus en saison C, notamment en présence de maladies des cultures (11,0%) et lors d'augmentations des prix agricoles (19,8%). Par ailleurs, une forte majorité des ménages dispose de stocks très limités (« 1 mois ou moins »), atteignant jusqu'à 49,4% pour les maladies des cultures et 48,0% lors de pluies tardives, ce qui constitue un risque alimentaire critique en fin de cycle.

Ainsi, la durée des stocks alimentaires est fortement compromise par les pluies excessives et tardives en saison A, et par les maladies des cultures en saison C. L'impact des variations des prix agricoles est saisonnier : en saison B, une meilleure conservation des stocks est observée, tandis qu'en saison C, les hausses de prix réduisent significativement les réserves

disponibles. Ces résultats mettent en exergue la vulnérabilité structurelle des systèmes agricoles burundais, particulièrement en fin de saison, soulignant la nécessité de renforcer la résilience à travers des pratiques agricoles durables et une gestion efficace des risques climatiques et économiques.

La mesure et l'analyse des indicateurs de sécurité alimentaire, tels que le Score de Consommation Alimentaire des Ménages, le Revenu Vital, le Score de Diversité Alimentaire des ménages, l'Indice de Stratégie de Coping, l'échelle FIES ainsi que les stratégies de survie alimentaire, revêtent une importance cruciale pour comprendre les dimensions multidimensionnelles de la vulnérabilité socio-économique et nutritionnelle des populations.

Le SCAM permet d'évaluer la capacité des ménages à satisfaire leurs besoins énergétiques et nutritionnels de manière continue, tandis que le Revenu Vital offre un seuil objectif pour mesurer la suffisance des ressources financières nécessaires à la satisfaction des besoins essentiels. Le SDAM quantifie la diversité des aliments consommés, un indicateur de la qualité nutritionnelle des régimes alimentaires, qui est souvent compromis dans les contextes de pauvreté et de dépendance agricole monoculturelle.

Le CSI et les stratégies de survie alimentaire fournissent des connaissances sur les mécanismes d'adaptation des ménages face aux chocs externes, révélant leur résilience ou, au contraire, leur fragilité structurelle. Enfin, le FIES, en captant les expériences subjectives des individus liées à l'accès et à la disponibilité des denrées alimentaires, complète ces analyses objectives en intégrant la perception des ménages sur leur propre insécurité alimentaire.

Ensemble, ces indicateurs constituent un cadre robuste pour diagnostiquer les failles du système alimentaire, identifier les groupes les plus vulnérables, et concevoir des interventions ciblées visant à renforcer la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans des contextes socio-économiques complexes comme celui du Burundi. Ils permettent également de suivre les progrès dans le temps, facilitant ainsi une gestion adaptative et *evidence-based* des politiques publiques.

6.2.1 Indicateurs de vulnérabilité et d'insécurité alimentaire

Figure 6.1 présente une série de diagrammes circulaires comparant six indicateurs de vulnérabilité et de sécurité alimentaire, confirmant l'ampleur et la multi-dimensionnalité de la crise alimentaire dans les zones étudiées.

Ces indicateurs incluent le Score de Consommation Alimentaire (SCA), l'échelle FIES (*Food Insecurity Experience Scale*), la diversité alimentaire des ménages, la fréquence des repas, les stratégies d'adaptation et le recours à des aliments de moindre qualité. L'analyse croisée de ces mesures a pour objectif d'évaluer les niveaux d'insécurité alimentaire et de comparer les profils de vulnérabilité entre la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides. L'examen des stratégies d'adaptation, telles que la réduction de la taille des portions ou le saut de repas, vise à mesurer la profondeur de la vulnérabilité structurelle des ménages face aux chocs exogènes. Cette approche multidimensionnelle est mobilisée pour appréhender la complexité de la crise alimentaire et concevoir des interventions intégrées, combinant renforcement de la production, amélioration de l'accès économique et diversification des revenus. Enfin, l'analyse spatiale de ces indicateurs permet de justifier la nécessité de territorialiser les politiques de sécurité alimentaire afin de

répondre efficacement aux contraintes spécifiques de chaque contexte agroécologique et socioéconomique.

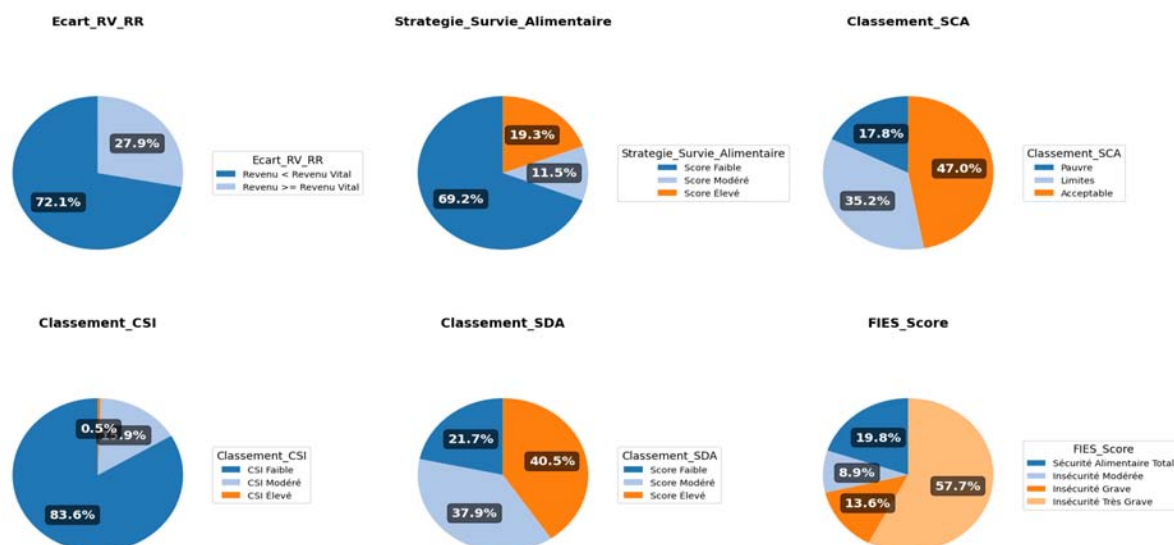


FIGURE 6.1 – Analyse des indicateurs de la sécurité alimentaire

Les résultats présentés dans la Figure 6.1 montrent que la majorité des ménages (72,1 %) ont un revenu effectif inférieur à leur revenu vital, ce qui reflète une situation de précarité économique généralisée. Cette insuffisance de revenus est directement liée à la structure économique du Burundi, où l'agriculture reste la principale source de revenus pour plus de 80 % de la population rurale. Cependant, cette activité agricole est caractérisée par une faible productivité, due, à des pratiques culturelles traditionnelles, des intrants limités, et des infrastructures agricoles rudimentaires. De plus, la dépendance à un petit nombre de cultures de rente comme le café, pour la majorité, expose les ménages aux fluctuations des prix des produits agricoles, rendant leurs revenus incertains et souvent insuffisants pour couvrir les besoins essentiels tels que l'alimentation, le logement, et les soins de santé. L'accès limité aux marchés locaux et internationaux, ainsi que l'absence d'opportunités non agricoles significatives, aggravent encore cette situation, plongeant de nombreux ménages dans un cycle de pauvreté.

Quant aux stratégies de survie alimentaires, près de 70 % des ménages adoptent des stratégies de survie « faibles », tandis que 19,3 % utilisent des stratégies « élevées ». Ces résultats indiquent que la majorité des ménages dispose encore de quelques marges de manœuvre pour faire face aux crises, mais ces mécanismes sont souvent temporaires et insuffisants. Les stratégies de survie observées incluent la réduction de la consommation alimentaire, la vente de biens essentiels, ou l'endettement. Ces pratiques, bien qu'efficaces à court terme, peuvent avoir des conséquences néfastes à long terme, notamment sur la santé et la résilience des ménages. Dans le contexte burundais, ces comportements sont exacerbés par la fragilité des systèmes agricoles, les aléas climatiques fréquents, et la rareté des emplois alternatifs. La capacité d'adaptation des ménages est donc limitée, renforçant leur vulnérabilité face aux chocs externes.

Pour le score de consommation alimentaire, seuls 47 % des ménages atteignent un score

de consommation alimentaire « acceptable », tandis que près de 53 % se situent dans les catégories « limites » ou « pauvres ». Ces proportions élevées d'insécurité alimentaire s'expliquent principalement par la dépendance des ménages à l'agriculture de subsistance, qui ne permet pas toujours de produire suffisamment pour assurer une alimentation équilibrée tout au long de l'année. Les variations saisonnières de production, combinées à des contraintes comme la taille restreinte des exploitations agricoles et les pratiques culturales peu diversifiées, contribuent à cette insécurité. En outre, l'accès limité aux ressources naturelles et aux services de base aggrave la situation, rendant difficile pour les ménages de sortir de la pauvreté et d'améliorer leur sécurité alimentaire.

L'indice de stratégie de coping (CSI) montre que 83,6 % des ménages utilisent des stratégies « faibles » pour faire face aux difficultés, tandis que seulement 0,5 % recourent à des stratégies « élevées ». Ce résultat illustre que la majorité des ménages n'a pas encore épuisé toutes ses options pour faire face aux chocs, mais cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas vulnérables. En effet, les stratégies « faibles », telles que réduire la taille des repas ou consommer des aliments moins coûteux mais moins nutritifs, peuvent être des signes avant-coureurs d'une détérioration progressive de la situation alimentaire. Le contexte socio-économique burundais, marqué par la faible diversification des sources de revenus et la dépendance excessive à l'agriculture, explique pourquoi les ménages n'ont accès qu'à des mécanismes d'adaptation limités. De plus, les effets cumulés des chocs récurrents réduisent progressivement la capacité des ménages à absorber de nouveaux stress.

Les résultats de cette analyse sur le score de diversité alimentaire (SDA) révèlent une faible variété dans les régimes alimentaires des ménages ruraux burundais, avec 21,7 % des ménages ayant un SDA « faible » et 37,9 % un SDA « modéré ». Cette faible diversité alimentaire est directement liée à la structure agricole dominée par des cultures de base comme le manioc, les haricots, et la banane plantain, qui ne fournissent pas toujours une alimentation complète et équilibrée. La limitation des ressources financières et l'accès restreint aux marchés alimentaires empêchent les ménages d'acheter des produits variés pour compléter leur régime alimentaire. Par ailleurs, les infrastructures de stockage insuffisantes entraînent des pertes post-récoltes importantes, réduisant davantage la disponibilité des denrées alimentaires pendant les périodes creuses.

Les résultats de l'analyse du FIES (*Food Insecurity Experience Scale*) montrent une insécurité alimentaire alarmante, avec 57,7 % des ménages classés en « insécurité très grave » et seulement 19,8 % en « sécurité alimentaire totale ». Ces résultats témoignent de l'ampleur du problème alimentaire au Burundi, où les ménages sont souvent contraints de sauter des repas ou de réduire leur consommation alimentaire. Les causes profondes de cette insécurité sont multiples : la pauvreté généralisée, les chocs climatiques récurrents, et les contraintes structurelles telles que l'accès limité aux intrants agricoles, aux technologies modernes, et aux services financiers. En outre, les conflits sociaux et politiques passés ont également affecté les moyens de subsistance des populations, accentuant les disparités entre les ménages déjà vulnérables.

6.3 Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été mobilisée pour identifier des groupes homogènes de ménages présentant des profils similaires en matière de sécurité alimentaire et de conditions socio-économiques. Cette méthode de clustering non supervisée permet de révéler la structure naturelle des données sans imposer un nombre de groupes prédéfini, offrant ainsi une typologie empiriquement fondée sur les similarités observées entre les ménages.

Variables de segmentation et préparation des données

La segmentation repose sur un ensemble d'indicateurs multidimensionnels reflétant à la fois les ressources monétaires, la sécurité alimentaire et le contexte spatial des ménages. Plus précisément, quatre types de variables ont été intégrés dans l'analyse : le Score de Consommation Alimentaire (SCA), qui évalue la qualité et la diversité de l'alimentation ; l'échelle FIES (*Food Insecurity Experience Scale*), qui mesure l'expérience subjective de l'insécurité alimentaire ; le revenu effectif du ménage, agréant les revenus agricoles et non agricoles ; et la localisation géographique, correspondant aux zones de moyens d'existence. Avant l'analyse, ces variables ont été standardisées afin d'homogénéiser leurs échelles de mesure et d'éviter que les variables quantitatives à grande amplitude (comme le revenu) ne dominant indûment la classification.

Mesure de dissimilarité et critère d'agrégation

La construction de la hiérarchie des clusters repose sur deux choix méthodologiques fondamentaux. Premièrement, la distance euclidienne a été retenue comme mesure de dissimilarité entre les ménages, car elle est adaptée aux variables continues standardisées et permet de quantifier l'écart global entre les profils. Deuxièmement, la méthode d'agrégation de Ward a été appliquée pour fusionner itérativement les clusters. Ce critère vise à minimiser la variance intra-classe à chaque étape de regroupement, favorisant ainsi la formation de groupes compacts et homogènes tout en maximisant la différenciation entre les clusters. La distance de Ward, qui représente le gain d'inertie perdu lors de chaque fusion, sert d'indicateur pour évaluer la cohésion des groupes formés.

Détermination du nombre de clusters et validation de la typologie

La CAH permet d'explorer différentes structures de partitionnement avant de sélectionner le nombre optimal de clusters. L'analyse du dendrogramme, combinée à l'examen des sauts de distance de Ward, a révélé qu'une partition en trois groupes offrait le meilleur compromis entre homogénéité intra-cluster et différenciation inter-clusters. Chaque cluster a ensuite été caractérisé par l'analyse des moyennes des variables de segmentation et de leur distribution géographique, permettant d'identifier des profils de ménages distincts selon leur sécurité alimentaire, leur revenu et leur localisation. La concentration spatiale des clusters dans des zones de moyens d'existence spécifiques a mis en évidence l'influence du contexte environnemental sur la vulnérabilité alimentaire. Enfin, la cohérence interne et la significativité des différences entre groupes ont confirmé la robustesse de cette typologie pour orienter des interventions différenciées.

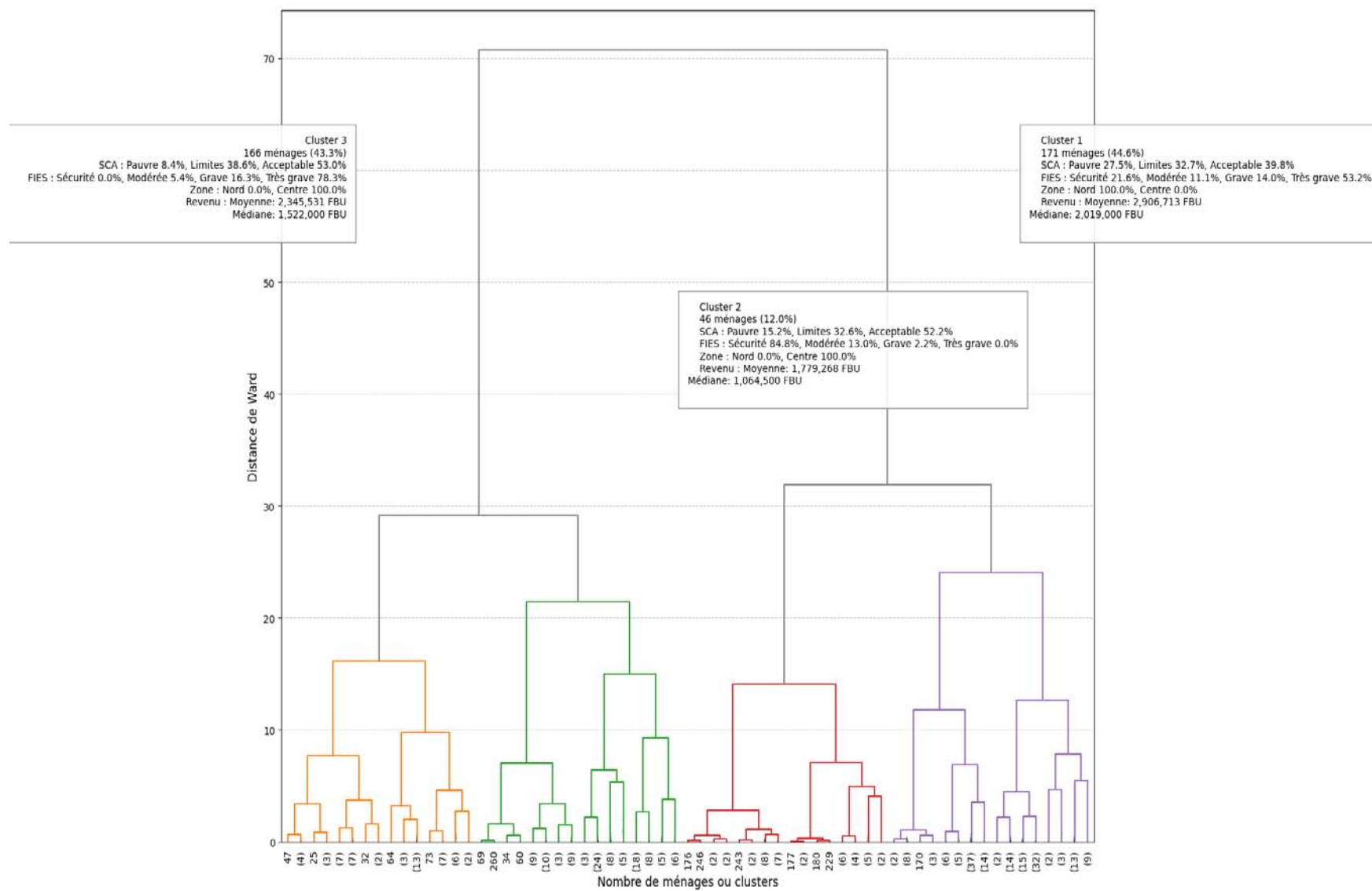


FIGURE 6.2 – Typologies des ménages selon l'état de la sécurité alimentaire

La Figure 6.2 révèle trois groupes de ménages aux profils socio-économiques et alimentaires contrastés. Cette segmentation, qui est basée sur des indicateurs de sécurité alimentaire comme le Score de Consommation Alimentaire et l'échelle FIES, ainsi que sur le revenu effectif et la localisation géographique, met en lumière des dynamiques de vulnérabilité et de résilience. La distance de Ward élevée entre les clusters confirme des différences structurelles significatives entre les groupes de ménages, tandis que la concentration géographique souligne l'impact du contexte environnemental et des systèmes de production locaux.

Cluster 1 : Revenu élevé mais insécurité alimentaire persistante

Ce groupe, majoritairement situé dans la zone de moyens d'existence de la Dépression du Nord, présente des revenus élevés avec une moyenne de 2 906 713 FBU, mais il connaît une insécurité alimentaire très grave pour plus de la moitié des ménages, soit 53,2 %. Ce paradoxe suggère que des facteurs non monétaires, comme l'accès limité aux terres fertiles, les chocs climatiques ou les coûts logistiques élevés d'approvisionnement alimentaire, entravent la sécurité alimentaire. Bien que 39,8 % des ménages aient un statut SCA acceptable, la prédominance de l'insécurité alimentaire très grave indique une dépendance aux marchés extérieurs ainsi qu'une forte vulnérabilité aux fluctuations des prix. Les ménages de ce cluster sont principalement des agriculteurs touchés par des rendements irréguliers et des éleveurs confrontés à des pénuries saisonnières.

Cluster 2 : Résilience malgré un revenu modeste

Localisé exclusivement dans la zone de moyens d'existence des Plateaux centraux humides, ce cluster affiche les revenus les plus bas avec une moyenne de 1 779 268 FBU, mais il présente une sécurité alimentaire élevée car 84,8 % des ménages sont en sécurité totale. Cette résilience s'explique par une autosuffisance agricole ou par une gestion efficiente des ressources disponibles. Le statut SCA qui concerne 52,2 % des ménages, ainsi que l'absence d'insécurité très grave, reflètent une stabilité communautaire et une relative protection contre les chocs.

Cluster 3 : Crise alimentaire chronique

Bien que situé dans les Plateaux centraux humides comme le Cluster 2, ce groupe présente une insécurité alimentaire extrême puisque 78,3 % des ménages sont en situation très grave, ainsi qu'un revenu intermédiaire avec une moyenne de 2 345 531 FBU. Cette situation critique suggère une exposition accrue aux chocs ainsi qu'une dépendance à des activités non agricoles précaires. Le faible pourcentage de ménages classés comme SCA pauvres, soit 8,4 %, masque en réalité une vulnérabilité structurelle, car même avec un revenu modéré, l'accès à des aliments nutritifs reste compromis. Ces ménages nécessitent des interventions urgentes comme les aides alimentaires et les microcrédits, ainsi que des programmes de diversification économique à long terme.

Comparativement, la Dépression du Nord qui correspond au Cluster 1 souffre d'une insécurité alimentaire structurelle malgré des revenus élevés, tandis que les Plateaux centraux humides abritent à la fois des ménages résilients correspondant au Cluster 2 et des ménages en situation de crise correspondant au Cluster 3. Cela souligne des inégalités intra-zonales liées à la qualité des infrastructures, à l'accès aux services publics ou encore à la gouvernance locale. Cette segmentation met en évidence la nécessité d'une approche territoriale et multidimensionnelle pour lutter contre l'insécurité alimentaire, et cette approche doit

combiner soutien économique, renforcement des capacités agricoles ainsi qu'adaptation aux contextes locaux.

6.4 Analyse statistique de la vulnérabilité alimentaire

L'analyse CARI, dont l'intitulé complet est *Consolidated Approach for Reporting Indicators of Food Security*, fournit une évaluation multidimensionnelle de la sécurité alimentaire des ménages dans deux zones de moyens d'existence distinctes au Burundi, à savoir la Dépression du Nord et les Plateaux centraux humides. Les résultats du tableau 6.2, enrichis par des tests de significativité avec des valeurs de p , permettent une interprétation rigoureuse des différences entre les zones en termes d'accès économique à la nourriture, de disponibilité alimentaire, d'utilisation des aliments ainsi que de stabilité alimentaire face aux chocs. Cette analyse s'appuie sur des indicateurs clés tels que le revenu total, le ratio revenu effectif sur revenu vital, la production alimentaire, le nombre de repas, le score FIES, ainsi que sur des variables contextuelles comme l'accès à la terre et l'encadrement agronomique. Les p -values associées permettent de déterminer si les différences observées sont statistiquement significatives, tandis que les proportions et moyennes détaillées offrent une vue nuancée des dynamiques en jeu.

TABLEAU 6.2 – Facteurs de vulnérabilité à l'insécurité alimentaire

Zone de collecte de données	Indicateur 1	Indicateur 2	Indicateur 3
Dépression du Nord	2906 712.87	1 015 000.0	–
Plateaux centraux humides	2222 662.50	845 000.0	–
Zone de collecte de données	Revenu_Total (std)	Ratio_REFF_RV (mean)	–
Dépression du Nord	2 416 553.08	0.90	–
Plateaux centraux humides	1 871 523.06	0.69	–
Zone de collecte de données	Ratio_REFF_RV (median)	–	–
Dépression du Nord	0.62	–	–
Plateaux centraux humides	0.42	–	–
Zone de collecte de données	Production_Alimentaire_Total (mean)	–	–
Dépression du Nord	815 590.64	–	–
Plateaux centraux humides	893 271.23	–	–
Zone de collecte de données	Nombre_Chocs (mean)	Nombre_Chocs (max)	–
Dépression du Nord	5.84	13	–
Plateaux centraux humides	5.81	14	–
Zone de collecte de données	Nb_repas_Adultes (mean)	Nb_repas_Enfants (mean)	–
Dépression du Nord	1.97	2.73	–
Plateaux centraux humides	1.93	3.06	–
Zone de collecte de données	FIES_Score (mean)	Ecart_RV_REFF	Acces_terre
Dépression du Nord	2.99	0.31	0.92
Plateaux centraux humides	3.17	0.25	0.96
Zone de collecte de données	Encadr_agronomique	–	–
Dépression du Nord	0.27	–	–
Plateaux centraux humides	0.43	–	–

P-values pour les tests de significativité :

Revenu_Total : p -value = 0.0439 (significatif à 5%)
Ratio_REFF_RV : p -value = 0.0162 (significatif à 5%)
Production_Alimentaire_Total : p -value = 0.3326
Nombre_Chocs : p -value = 0.9087
Nb_repas_Adultes : p -value = 0.3424
Nb_repas_Enfants : p -value = 0.0085 (significatif à 5%)
FIES_Score : p -value = 0.1333
Ecart_RV_REFF : p -value = 0.2789

L'analyse comparative des deux Zones de Moyens d'Existence du Burundi met en lumière des dynamiques contrastées mais complémentaires en matière de sécurité alimentaire. Sur le plan économique, les ménages de la Dépression du Nord bénéficient d'un revenu total moyen supérieur (2 906 712,87 FBu) à celui des Plateaux centraux humides (2 222 662,50 FBu), une différence significative ($p = 0,0439$) qui se traduit par un ratio revenu effectif/revenu vital plus favorable (0,90 contre 0,69 ; $p = 0,0162$), bien que dans les deux zones, la majorité des ménages ne couvre pas leurs besoins vitaux. Cette meilleure performance économique ne se reflète toutefois pas pleinement dans la disponibilité alimentaire, où les Plateaux centraux humides affichent une production légèrement plus élevée (893 271,23 FBu contre 815 590,64 FBu), sans différence statistiquement significative ($p = 0,3326$), liée notamment à un meilleur accès à la terre (96 % contre 92 %) et à un encadrement agronomique plus répandu (43 % contre 27 %).

En termes d'utilisation alimentaire, une insuffisance générale est observée pour les adultes, qui consomment en moyenne moins de 2 repas par jour dans les deux zones. En revanche, les enfants bénéficient d'une priorisation alimentaire nette dans les Plateaux centraux humides (3,06 repas contre 2,73 ; $p = 0,0085$), témoignant d'un ajustement des comportements en contexte d'insécurité alimentaire. Malgré cela, les deux zones présentent des niveaux de vulnérabilité nutritionnelle persistants.

La stabilité de la sécurité alimentaire apparaît compromise dans les deux régions, avec une exposition moyenne élevée aux chocs climatiques et économiques (environ 5,8 chocs par ménage) sans différence significative ($p = 0,9087$). Le score FIES confirme une insécurité alimentaire grave dans les deux zones (2,99 contre 3,17 ; $p = 0,1333$), avec une tendance à une situation plus critique dans les Plateaux centraux humides, ce qui s'explique en partie par leur moindre revenu moyen et leur vulnérabilité accrue aux perturbations agricoles.

Ainsi, ces résultats soulignent la nécessité d'approches différenciées : renforcer l'encadrement agronomique et les pratiques agricoles dans la Dépression du Nord pour capitaliser sur un revenu relatif plus élevé, tandis que dans les Plateaux centraux humides, l'accent doit être mis sur la diversification des sources de revenus et la réduction des effets des chocs climatiques et économiques. Par ailleurs, des stratégies de protection sociale, incluant notamment des transferts monétaires et des programmes de nutrition ciblée pour les enfants, sont indispensables pour pallier les déficits alimentaires et améliorer la résilience des ménages dans les deux zones.

6.5 Modélisation logistique multinomiale du score de consommation

Le modèle logistique multinomiale ou modèle de régression polytomique est une méthode statistique utilisée pour modéliser les relations entre une variable dépendante catégorielle à plus de deux modalités non ordonnées et un ensemble de variables indépendantes continues ou catégorielles. Dans notre contexte de l'analyse de la sécurité alimentaire, ce modèle est particulièrement adapté pour examiner les facteurs socio-économiques, démographiques et environnementaux influençant le score de consommation alimentaire (SCA) des ménages, qui est ici défini en trois modalités : *SCA Pauvre*, *SCA Limite* et *SCA Acceptable*.

Le modèle repose sur l'hypothèse que chaque modalité de la variable dépendante est associée à une probabilité distincte, calculée à partir des caractéristiques des ménages. Ces

probabilités sont estimées à l'aide d'une fonction logistique, permettant ainsi de quantifier les effets marginaux des variables explicatives sur chaque catégorie de Score de Consommation Alimentaire.

6.5.1 Structure mathématique détaillée

Soit Y la variable dépendante représentant le score de consommation alimentaire des ménages (SCAM), avec trois modalités :

$$Y = \begin{cases} 1 & (\text{SCA Pauvre}) \\ 2 & (\text{SCA Limite}) \\ 3 & (\text{SCA Acceptable}) \end{cases} \quad (6.1)$$

Les probabilités associées à chaque modalité sont notées $P(Y = j \mid \mathbf{X})$, où $j = 1, 2, 3$. Les variables indépendantes (caractéristiques des ménages) sont regroupées dans un vecteur

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p), \quad (6.2)$$

où p est le nombre total des variables explicatives.

Fonction de probabilité La probabilité de chaque modalité j est calculée à l'aide de la fonction logistique multinomiale :

$$P(Y = j \mid \mathbf{X}) = \frac{\exp(\beta_{j0} + \boldsymbol{\beta}_j^\top \mathbf{X})}{1 + \sum_{k=1}^{K-1} \exp(\beta_{k0} + \boldsymbol{\beta}_k^\top \mathbf{X})}, \quad (6.3)$$

où :

β_{j0} est l'intercept spécifique à la modalité j ,

$\boldsymbol{\beta}_j = (\beta_{j1}, \beta_{j2}, \dots, \beta_{jp})$ est le vecteur des coefficients associés aux variables indépendantes pour la modalité j ,

$K = 3$ est le nombre total de modalités de la variable dépendante.

La modalité de référence (généralement « SCA Acceptable », soit $j = K$) est définie par :

$$P(Y = K \mid \mathbf{X}) = 1 - \sum_{j=1}^{K-1} P(Y = j \mid \mathbf{X}). \quad (6.4)$$

Ratios des cotes (Odds Ratios) Pour mieux interpréter les résultats, on calcule les ratios des cotes comparant chaque modalité j à la modalité de référence K :

$$\text{Odds Ratio}_j = \frac{P(Y = j \mid \mathbf{X})}{P(Y = K \mid \mathbf{X})} = \exp(\beta_{j0} + \boldsymbol{\beta}_j^\top \mathbf{X}). \quad (6.5)$$

Cela signifie que chaque coefficient β_{jk} mesure l'effet marginal d'une variation unitaire de la variable X_k sur le logarithme du ratio de cotes.

Méthode d'estimation : Maximum de vraisemblance Les paramètres β_{j0} et $\boldsymbol{\beta}_j$ sont estimés en maximisant la fonction de vraisemblance, qui représente la probabilité

d'observer les données sous le modèle :

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n P(Y_i = y_i \mid \mathbf{X}_i), \quad (6.6)$$

où :

n est le nombre total d'observations,

y_i est la valeur observée de Y pour l'observation i ,

$\mathbf{X}_i$ est le vecteur des variables indépendantes pour l'observation i .

En prenant le logarithme, on obtient la log-vraisemblance :

$$\ell(\beta) = \sum_{i=1}^n \log P(Y_i = y_i \mid \mathbf{X}_i). \quad (6.7)$$

Les estimateurs des paramètres sont obtenus en résolvant :

$$\frac{\partial \ell(\beta)}{\partial \beta} = \mathbf{0}. \quad (6.8)$$

6.5.2 Interprétation des coefficients du modèle

Chaque coefficient β_{jk} mesure l'impact d'une variation unitaire de la variable X_k sur le logarithme du ratio de cotes pour la modalité j par rapport à la modalité de référence K .

Si $\beta_{1k} > 0$, une augmentation de X_k augmente la probabilité d'appartenir à la modalité « Pauvre » par rapport à « Acceptable ».

Si $\beta_{2k} < 0$, une augmentation de X_k diminue la probabilité d'appartenir à la modalité « Limite » par rapport à « Acceptable ».

Les effets marginaux sont calculés comme suit :

$$\text{Effet marginal}_{jk} = \frac{\partial P(Y = j \mid \mathbf{X})}{\partial X_k}. \quad (6.9)$$

Tests statistiques et significativité La significativité de chaque coefficient β_{jk} est évaluée à l'aide d'un test de Wald (statistique z) :

$$z = \frac{\hat{\beta}_{jk}}{\text{SE}(\hat{\beta}_{jk})}, \quad (6.10)$$

où $\text{SE}(\hat{\beta}_{jk})$ est l'erreur standard de l'estimateur.

Mesure de la qualité du modèle Le pseudo- R^2 (de McFadden) évalue la proportion de variance expliquée :

$$R^2 = 1 - \frac{\ell(\hat{\beta})}{\ell(\beta_0)}, \quad (6.11)$$

où $\ell(\beta_0)$ est la log-vraisemblance du modèle nul (intercept seulement).

6.5.3 Régression logistique multinomiale

La régression logistique multinomiale, ou modèle logit multinomial, est une méthode statistique destinée à étudier la relation entre une variable dépendante nominale à plusieurs catégories non ordonnées et un ensemble de variables explicatives. Contrairement à la régression logistique binaire, elle permet d'analyser simultanément plusieurs catégories en les comparant à une catégorie de référence par des coefficients spécifiques. Cette approche repose sur l'hypothèse que les erreurs suivent une distribution logistique indépendante, et utilise la maximisation de la vraisemblance pour estimer les paramètres du modèle [160]. Les résultats sont exprimés sous forme de cotes (*odds ratios*) traduisant l'impact des variables explicatives sur les probabilités relatives des différentes catégories. L'interprétation des effets marginaux, calculés à partir des probabilités prédites, est complexe du fait de la non-linéarité des relations, ce qui fait que l'influence d'une variable peut varier selon les niveaux des autres variables et du facteur étudié.

TABLEAU 6.3 – Caractéristiques générales du modèle

Variable dépendante :	Classement_SCA
Nombre d'observations :	383
Modèle :	MNLogit (Logit multinomial)
Méthode d'estimation :	MLE (Maximum de vraisemblance)
Degrés de liberté résiduels :	343
Degrés de liberté du modèle :	38
Pseudo R^2 :	0,1850
Log-vraisemblance :	-321,30
Log-vraisemblance du modèle nul (LL-Null) :	-394,23
Valeur de p du test de rapport de vraisemblance :	$1,498 \times 10^{-14}$
Convergence :	True
Type de covariance :	nonrobust

Les résultats du modèle de régression multinomiale logistique (MNLogit) présentés fournissent une analyse approfondie des facteurs influençant le SCA (Score de Consommation Alimentaire), une variable clé pour évaluer la sécurité alimentaire des ménages. Avec 384 observations analysées, le modèle a convergé vers une solution optimale, démontrant sa capacité à capturer les relations complexes entre les variables explicatives et les trois modalités du Score de Consommation Alimentaire : « Pauvre », « Limite » et « Acceptable ». La statistique du pseudo R^2 de 0,1850 indique que le modèle explique environ 18,5 % de la variabilité dans le Score de Consommation Alimentaire, ce qui est significatif dans le contexte des sciences sociales où les phénomènes sont souvent influencés par de multiples facteurs non inclus dans le modèle. La valeur de la log-vraisemblance (-321,30) et la statistique du test du rapport de vraisemblance (valeur de $p = 1,498 \times 10^{-14}$) montrent que le modèle global est hautement significatif, suggérant que les variables incluses apportent une contribution importante à l'explication du Score de Consommation Alimentaire des ménages. Les 38 degrés de liberté associés au modèle reflètent la richesse des données utilisées, tandis que les 343 degrés de liberté résiduels permettent d'évaluer avec précision la qualité d'ajustement.

TABLEAU 6.4 – Analyse du risque de vulnérabilité à l'insécurité alimentaire (Modèle multinomial)

Caractéristiques du ménage	SCA Pauvre	SCA Limite	SCA Acceptable
Revenu_Effectif_Menage	1.28×10^{-8} (7.79×10^{-9})	-1.63×10^{-8} (1.06×10^{-8})	3.47×10^{-9} (9.97×10^{-9})
Age_Chef_Menage	0.0013 (0.002)	0.0012 (0.002)	-0.0025 (0.002)
Genre_chef_ménage	0.0401 (0.062)	0.0388 (0.110)	-0.0788 (0.111)
Education_Chef	0.0093 (0.018)	-0.0428** (0.022)	0.0335 (0.026)
Taille_Menage	0.0179*** (0.005)	-0.0227*** (0.008)	0.0048 (0.008)
Organisation_prod_agricole	0.0241 (0.034)	-0.0596 (0.050)	0.0355 (0.050)
Mode_Acces_terre	0.0211 (0.020)	-0.0272 (0.033)	0.0061 (0.033)
Superf_total_menage	-1.21×10^{-10}	2.96×10^{-6} (5.15×10^{-6})	$1.41 \times 10^{-5***}$ (5.00×10^{-6})
Encadr_agronomique	0.0059 (0.039)	-0.0205 (0.054)	0.0145 (0.053)
Semences_selectionne	-0.0458 (0.037)	-0.0397 (0.056)	0.0854 (0.056)
Main_oeuvre	-0.0102 (0.034)	0.0914* (0.049)	-0.0812 (0.049)
Experience_Agricole	-0.0131 (0.033)	-0.0258 (0.047)	0.0389 (0.048)
Nombre_Saisons	0.1110** (0.044)	-0.0903 (0.058)	-0.0207 (0.058)
Nbre_cultures_annuelles	-0.0566*** (0.015)	0.0410* (0.022)	0.0155 (0.022)
Nbre_cultures_perennes	0.0279*** (0.011)	-0.0069 (0.019)	-0.0211 (0.018)
Nbre_cultures_rente	0.0158 (0.017)	-0.0033 (0.024)	-0.0125 (0.024)
Duree_Stock_SaisonA	0.0067 (0.025)	-0.0029 (0.036)	-0.0039 (0.034)
Duree_Stock_SaisonB	0.0683*** (0.021)	0.0185 (0.032)	-0.0868*** (0.031)
Duree_Stock_SaisonC	0.0211 (0.024)	-0.0148 (0.028)	-0.0062 (0.027)

Notes : Erreurs-standards entre parenthèses.
Significativité : *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.10$

Les résultats du tableau 6.5 analysent les déterminants socio-économiques associés aux trois catégories du score de consommation alimentaire (SCA), Pauvre, Limite et Acceptable, au sein des ménages ruraux du Burundi, dans le contexte de la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire.

La variable « revenu effectif du ménage » affiche des effets marginaux quasi négligeables,

ce qui suggère que, bien que pertinente, la capacité monétaire demeure un facteur limité pour différencier significativement les niveaux de sécurité alimentaire dans un contexte où l'agriculture de subsistance prédomine. Cette situation s'explique par la forte dépendance de la population active burundaise à l'agriculture non monétarisée, où seulement 20 % des agriculteurs tirent des revenus financiers substantiels.

L'âge du chef de ménage ne présente pas d'effet significatif, probablement en raison d'un compromis entre l'expérience agricole accrue chez les personnes plus âgées et leurs limitations physiques, dans un pays où l'espérance de vie moyenne est autour de 64 ans. Quant au genre, les résultats indiquent une légère tendance non significative à ce que les ménages dirigés par des femmes soient moins susceptibles d'atteindre la catégorie « Acceptable », reflétant les inégalités d'accès aux ressources, les contraintes foncières et financières particulières auxquelles font face les femmes en milieu rural.

Le niveau d'éducation se révèle être un facteur essentiel : il réduit significativement la probabilité d'appartenir à la catégorie « Limite » (-4,28 %) et augmente celle d'appartenir à « Acceptable » (+3,35 %), soulignant l'importance des compétences et connaissances pour adopter des pratiques agricoles plus efficaces ou accéder à des ressources diversifiées. Ce constat souligne la pertinence d'investissements éducatifs, notamment dans les zones rurales dont le taux d'alphabétisation adulte avoisine 70 %.

La taille du ménage exerce une influence paradoxale en augmentant la probabilité d'être « Pauvre » (+1,79 %) tout en diminuant celle d'être « Limite » (-2,27 %), traduisant l'effet conjoint d'un besoin alimentaire accru combiné à une main-d'œuvre potentielle plus importante. Cette dynamique est exacerbée dans un contexte de forte pression démographique sur les terres cultivables.

La superficie agricole totale du ménage conforte son rôle déterminant : une augmentation même marginale réduit la probabilité d'appartenir à la catégorie « Pauvre » (-0,017 %) et accroît celle d'être « Acceptable » (+0,014 %), démontrant que la possession foncière reste un atout fondamental pour la sécurité alimentaire dans un pays marqué par une fragmentation importante des exploitations.

Les pratiques agricoles liées à la diversification, nombre de cultures annuelles et pérennes, se distinguent comme des facteurs protecteurs importants. L'accroissement du nombre de cultures annuelles diminue significativement le risque d'appartenir à la catégorie « Pauvre » de 5,66 %, tandis que le nombre de cultures pérennes améliore la résilience alimentaire (+2,79 %). Cette diversification constitue un levier clé pour amortir les effets des aléas climatiques et économiques, particulièrement dans un contexte caractérisé par des pluies irrégulières et une fréquence élevée de sécheresses.

Enfin, la durée de stockage des produits alimentaires se révèle un facteur majeur de réduction de la vulnérabilité : une augmentation d'un mois de la capacité de stockage diminue de 6,83 % la probabilité d'être « Pauvre » et augmente de 8,68 % celle d'être « Acceptable ». Cette capacité de stockage est cruciale dans un environnement où les saisons sèches prolongées accentuent le risque de pénurie alimentaire, soulignant l'impératif d'améliorer les infrastructures et pratiques visant à la conservation des récoltes.

6.6 Equations des modèles trouvés

L'analyse économétrique de la résilience des ménages ruraux, qui est différenciée selon leur niveau de sécurité alimentaire tel que mesuré par le Score de Consommation Alimentaire, a conduit à l'estimation de trois modèles distincts pour les catégories Pauvre, Limite et Acceptable. Chaque modèle identifie les déterminants spécifiques qui influencent la capacité des ménages à absorber, à s'adapter ou à se transformer face aux chocs. Les équations présentées ci-dessous traduisent les relations quantifiées entre ces facteurs clés, à savoir le revenu réel, la taille du ménage, le nombre de saisons, la superficie cultivée, la diversification culturelle ainsi que l'usage de semences sélectionnées, et le niveau de résilience observé. Ces équations révèlent des dynamiques contrastées selon le profil des ménages, ce qui souligne la nécessité d'interventions ciblées et différenciées.

Les principaux facteurs choisis pour la catégorie « Score de consommation alimentaire pauvre » sont : Revenu effectif du ménage, Taille du ménage, et Nombre de saisons.

$$R_{SCAP} = \beta_0 + 1,28 \times 10^{-8} \cdot R_{EFFM} + 0,017 \cdot T_M + 0,11 \cdot N_S \quad (6.12)$$

Où :

R_{SCAP}	Résilience pour le score de consommation alimentaire pauvre (variable dépendante)
β_0	Constante
R_{EFFM}	Revenu effectif du ménage
T_M	Taille du ménage
N_S	Nombre de saisons culturelles

Dans le modèle de résilience des ménages classés comme « Pauvres » selon le score de consommation alimentaire, trois facteurs se distinguent : le revenu effectif, la taille du ménage et le nombre de saisons agricoles. Le revenu effectif, bien que son impact soit marginal, indique que les ménages disposant de revenus légèrement plus élevés présentent une meilleure capacité d'adaptation aux chocs exogènes. En revanche, la taille du ménage exerce une influence positive significative, reflétant l'avantage d'une main-d'œuvre plus nombreuse pour la gestion des activités agricoles et la solidarité interne face aux crises. Enfin, le nombre de saisons cultivées constitue un facteur clé de résilience, traduisant la capacité des ménages à diversifier leurs récoltes tout au long de l'année, ce qui atténue les risques liés à la variabilité des rendements et renforce leur aptitude à faire face aux aléas climatiques et économiques.

$$R_{SCAL} = \beta_0 - 1.627 \times 10^{-8} \cdot R_{EFFM} - 0.0227 \cdot T_M + 0.0410 \cdot N_C \quad (6.13)$$

R_{SCAL}	Résilience (score alimentaire limite)
β_0	Constante
R_{EFFM}	Revenu effectif du ménage
T_M	Taille du ménage

N_C Nombre de cultures annuelles

Pour les ménages classés dans la catégorie SCA Limite, la résilience semble articulée autour d'une interaction complexe entre contraintes de ressources et diversification agricole. Le revenu effectif, bien qu'affichant un effet négatif, suggère que des revenus plus élevés ne garantissent pas nécessairement une résilience accrue, en raison de contraintes structurelles telles que l'accès limité à la terre ou des coûts fixes élevés. Par ailleurs, la taille du ménage exerce un impact défavorable, indiquant que les grands ménages de cette catégorie rencontrent des difficultés à gérer efficacement leurs ressources, ce qui accentue leur vulnérabilité face aux crises. En revanche, le nombre de cultures annuelles constitue un facteur déterminant, dont l'effet positif témoigne que la diversification culturelle répartit les risques liés aux aléas climatiques et économiques, renforçant ainsi la sécurité alimentaire et la résilience des ménages dans cette catégorie.

$$R_{SCAA} = \beta_0 + 3,468 \times 10^{-9} \cdot R_{EFFM} + 1,406 \times 10^{-5} \cdot S_{TM} + 0,0854 \cdot S_{sel} \quad (6.14)$$

Avec :

R_{SCAA}	Résilience (score alimentaire acceptable)
β_0	Constante
R_{EFFM}	Revenu effectif du ménage
S_{TM}	Superficie totale du ménage
S_{sel}	Semences sélectionnées

Les ménages classés dans la catégorie SCA Acceptable, perçus comme les plus résilients, manifestent une dynamique où l'accès à des ressources agricoles de qualité et la maîtrise des intrants jouent un rôle prépondérant. Le revenu effectif y exerce un effet positif, reflétant la capacité accrue à investir dans des technologies agricoles adaptées et à renforcer la gestion des risques via l'accès aux services financiers. La superficie agricole totale, facteur hautement significatif, permet de diversifier la production et d'atténuer les impacts des aléas climatiques et économiques, témoignant de son importance dans la consolidation de la résilience. Par ailleurs, l'utilisation de semences sélectionnées contribue significativement à stabiliser les rendements et à assurer la sécurité alimentaire dans un contexte climatique incertain.

6.7 Système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire

Le Burundi fait face à une situation alarmante de risque croissant d'insécurité alimentaire, exacerbée par des facteurs structurels, climatiques et socio-économiques. Avec une population majoritairement rurale (84 %) qui dépend principalement de l'agriculture vivrière pour sa subsistance, les ménages burundais sont extrêmement vulnérables aux chocs externes et internes. La faible productivité agricole, liée à des pratiques traditionnelles, un manque d'accès aux intrants modernes (engrais, semences améliorées), et une pression démographique intense (avec une densité parmi les plus élevées au monde), contribue à une insuffisance chronique de la production alimentaire. Par ailleurs, les effets dévastateurs du changement climatique se manifestent par des épisodes récurrents de sécheresses

prolongées, des inondations dévastatrices et une variabilité accrue des précipitations, compromettant davantage les rendements agricoles déjà fragiles. Ces phénomènes climatiques ont un impact direct sur les cultures vivrières essentielles, comme le maïs, le haricot et le manioc, qui constituent la base de l'alimentation quotidienne des Burundais.

En outre, la pauvreté généralisée, avec un taux de prévalence de la pauvreté avoisinant 65 %, limite sévèrement la capacité des ménages à acheter des denrées alimentaires lorsque leurs propres récoltes sont insuffisantes. Les tensions politiques et économiques régionales, notamment les crises des prix des denrées de base sur les marchés internationaux, ainsi que les défis logistiques liés à l'enclavement du pays, aggravent encore la situation. Face à ce tableau sombre, il est crucial de mettre en place des mécanismes d'alerte précoce robustes afin d'anticiper et d'atténuer les crises alimentaires avant qu'elles ne deviennent critiques. Cela passe par le renforcement des systèmes de surveillance agricole et nutritionnelle, l'amélioration de l'accès aux intrants agricoles et à l'eau pour l'irrigation, ainsi que la promotion de pratiques agricoles résilientes face au climat. De plus, des interventions coordonnées entre les gouvernements, les organisations internationales comme le PAM et la FAO, et les communautés locales sont indispensables pour garantir une réponse rapide et efficace aux signes avant-coureurs de crise alimentaire. A long terme, investir dans l'éducation, la diversification économique et la protection sociale demeure essentiel pour renforcer la résilience des populations burundaises face à cette menace persistante.

6.8 Construction du système d'alerte précoce des ménages

La construction d'un système d'alerte précoce à l'insécurité alimentaire dans les zones de moyens d'existence du Burundi, notamment la Dépression du Nord et les Plateaux centraux humides, revêt une importance capitale pour renforcer la résilience des populations face aux chocs climatiques, économiques et sociaux. Ces deux zones, bien que contrastées dans leurs caractéristiques agroécologiques, présentent des vulnérabilités communes liées à la variabilité climatique, à la dégradation des sols et aux pressions démographiques qui exacerbent l'insécurité alimentaire.

Un tel système repose sur une approche intégrée qui combine d'une part des indicateurs biophysiques comme les précipitations, les températures et les rendements agricoles, et d'autre part des indicateurs socio-économiques tels que l'accès aux marchés, les prix des denrées et les niveaux de pauvreté, et cette approche permet ainsi de détecter précocement les signes avant-coureurs de crises alimentaires. En exploitant des outils géospatiaux, des modèles prédictifs ainsi que des données en temps réel, ce dispositif peut fournir des informations stratifiées et localisées, lesquelles sont essentielles pour orienter les interventions politiques et humanitaires.

Dans un contexte où les effets du changement climatique se manifestent par des phénomènes extrêmes tels que les sécheresses prolongées ou les inondations dans ces régions, un système d'alerte précoce devient un mécanisme indispensable pour anticiper les déficits alimentaires, minimiser les impacts sur les ménages vulnérables et promouvoir des stratégies adaptatives durables [167].

L'analyse comparative des Zones de Moyens d'Existence au Burundi, notamment la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, met en exergue une complexité

intrinsèque des facteurs de risque et des dispositifs d'alerte précoce, qui requièrent une approche multidimensionnelle pour une gestion efficiente de l'insécurité alimentaire des ménages ruraux. Bien que distinctes géographiquement, ces zones partagent des vulnérabilités structurelles liées à des contraintes socio-économiques, environnementales et institutionnelles.

Dans la Dépression du Nord, les risques sont exacerbés par un revenu réel des ménages insuffisant, une forte variabilité climatique marquée par des sécheresses récurrentes, une pauvreté généralisée et une pression démographique croissante. Le système d'alerte précoce y combine méthodes quantitatives et qualitatives : enquêtes socio-économiques semestrielles, télédétection satellitaire pour anticiper les anomalies pluviométriques, audits agricoles réguliers portant sur les intrants et les pathologies phytosanitaires, ainsi qu'un suivi hebdomadaire des prix alimentaires via des marchés sentinelles, permettant une anticipation proactive des crises potentielles.

Par contraste, les Plateaux Centraux Humides se caractérisent par des inondations fréquentes, une dégradation progressive des sols due à des pratiques culturales non durables et des revenus vitaux insuffisants. A ces contraintes s'ajoutent des vulnérabilités liées à la forte dépendance d'une main-d'œuvre familiale souvent sous-exploitée. Les dispositifs de surveillance intégrés dans cette zone incluent des analyses périodiques de la qualité des sols, ainsi que des cartographies dynamiques des ressources hydriques conjuguées à des études démographiques sur la main-d'œuvre agricole. Ces instruments méthodologiques sont essentiels pour une anticipation fine des crises alimentaires et une intervention ciblée.

6.9 Système d'alerte précoce par Zone des Moyens d'Existence

Dans un contexte burundais caractérisé par une forte dépendance à l'agriculture pluviale, une pression démographique soutenue et une exposition récurrente aux chocs climatiques et économiques, la vulnérabilité des ménages ruraux face à l'insécurité alimentaire demeure un enjeu structurel majeur. A ce jour, le dispositif national d'alerte précoce au Burundi se concentre essentiellement sur la surveillance et la gestion des catastrophes naturelles dont les inondations, glissements de terrain et les sécheresses, avec une orientation principalement territoriale et environnementale. Bien que ces mécanismes soient indispensables pour la protection civile et la gestion des risques, ils ne capturent pas les dynamiques fines de l'insécurité alimentaire à l'échelle des ménages, qui résultent d'interactions complexes entre la variabilité des rendements, l'écart entre revenu effectif et revenu vital, l'accès aux marchés, la diversification culturelle et les capacités d'adaptation locales.

C'est pour combler cette lacune stratégique que la présente recherche conçoit et opérationnalise un Système d'Alerte Précoce spécifiquement dédié à l'insécurité alimentaire des ménages ruraux. Contrairement aux outils existants, ce dispositif adopte une approche multidimensionnelle et territorialisée, intégrant des indicateurs socio-économiques, des pratiques agricoles résilientes et des signaux biophysiques et marchands, tout en différenciant les réponses selon les Zones de Moyens d'Existence. Le tableau 6.5 ci-dessous détaille cette architecture différenciée : il présente, pour la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, les facteurs de risque spécifiques, les méthodologies de surveillance recommandées et les cadres institutionnels de coordination, offrant ainsi une feuille de

route concrète pour anticiper, cibler et atténuer les crises alimentaires au plus près des réalités vécues par les ménages burundais.

TABLEAU 6.5: Système d'alerte précoce par Zone de Moyens d'Existence (ZME)

ZME	FACTEURS DE RISQUE	METHODOLOGIE D'ALERTE PRECOCE	INSTITUTIONS RESPONSABLES
DEPRESSION DU NORD	1. Faible revenu effectif des ménages	1. Enquêtes socio-économiques semestrielles (revenu, FIES, SCA)	Ministère de l'Agriculture, FAO, Banque Mondiale, ONG locales, Services météorologiques, Université du Burundi, UNICEF, OMS, Ministère de l'Environnement, Agences nationales de gestion des catastrophes, Centres de recherche agroforestière
	2. Variabilité climatique	2. Suivi satellitaire des précipitations et anomalies climatiques	
	3. Pression démographique	3. Indices de pauvreté trimestrielle	
	4. Manque d'accès aux intrants agricoles	4. Cartographie démographique annuelle	
	5. Pauvreté généralisée	5. Audits agricoles réguliers (intrants, pratiques culturales)	
	6. Prix élevés des denrées alimentaires	6. Suivi hebdomadaire des prix via marchés sentinelles	
	7. Déficit alimentaire chronique	7. Systèmes de suivi des stocks alimentaires	
	8. Risques sanitaires et nutritionnels (malnutrition, maladies hydriques)	8. Surveillance nutritionnelle et sanitaire (UNICEF/OMS)	
		9. Estimation de l'inefficacité technique (via modèles de frontière stochastique)	
		10. Cartographie de l'adoption de l'agroforesterie (présence/absence, densité d'arbres)	
PLATEAUX CEN-TRAUX HUMIDES	1. Inondations fréquentes	1. Capteurs hydrologiques automatisés (niveau d'eau, saturation des sols)	Ministère de l'Agriculture, FAO, Banque Mondiale, ONG locales, Services météorologiques, Université du Burundi, UNICEF, OMS, Agences nationales de gestion des catastrophes
	2. Revenu vital insuffisant	2. Enquêtes sur revenu, consommation, FIES et ratio REFF/RV	
	3. Dégradation des sols	3. Évaluation périodique de la fertilité et de la dégradation des sols	

Suite à la page suivante...

Tableau 6.5 – suite

ZME	FACTEURS DE RISQUE	METHODOLOGIE D'ALERTE PRECOCE	INSTITUTIONS RESPONSABLES
	4. Accès limité à l'eau potable	4. Cartographie des points d'eau + suivi sanitaire	
	5. Vulnérabilité aux maladies zoonotiques	5. Surveillance vétérinaire et santé publique	
	6. Dépendance à la main-d'œuvre familiale	6. Études démographiques sur taille des ménages et main-d'œuvre	
	7. Maladies des cultures	7. Surveillance épidémiologique des cultures	
	8. Fluctuations des prix agricoles	8. Suivi hebdomadaire des prix des denrées	
	9. Sous-utilisation de la main-d'œuvre	9. Mesure de l'inefficacité technique agricole (productivité potentielle vs réelle)	
		10. Suivi de l'adoption et de la performance des systèmes agroforestiers (revenu, diversité, couverture arborée)	

L'analyse comparative des Zones de Moyens d'Existence au Burundi, notamment la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, met en exergue une complexité intrinsèque des facteurs de risque et des dispositifs d'alerte précoce, qui requièrent une approche multidimensionnelle pour une gestion efficiente de l'insécurité alimentaire des ménages ruraux. Bien que distinctes géographiquement, ces zones partagent des vulnérabilités structurelles liées à des contraintes socio-économiques, environnementales et institutionnelles. Dans la Dépression du Nord, les risques sont exacerbés par un revenu effectif des ménages insuffisant, une forte variabilité climatique marquée par des sécheresses récurrentes, une pauvreté généralisée et une pression démographique croissante. Le système d'alerte précoce y combine méthodes quantitatives et qualitatives : enquêtes socio-économiques semestrielles, télédétection satellitaire pour anticiper les anomalies pluviométriques, audits agricoles réguliers portant sur les intrants et les pathologies phytosanitaires, ainsi qu'un suivi hebdomadaire des prix alimentaires via des marchés sentinelles, permettant une anticipation proactive des crises potentielles.

Par contraste, les Plateaux Centraux Humides se caractérisent par des inondations fréquentes, une dégradation progressive des sols due à des pratiques culturales non durables et des revenus vitaux insuffisants. A ces contraintes s'ajoutent des vulnérabilités liées à la forte dépendance à une main-d'œuvre familiale souvent sous-exploitée. Les dispositifs de surveillance intégrés dans cette zone incluent des analyses périodiques de la qualité des sols, ainsi que des cartographies dynamiques des ressources hydriques conjuguées à des études démographiques sur la main-d'œuvre agricole. Ces instruments méthodologiques sont essentiels pour une anticipation fine des crises alimentaires et une intervention ciblée.

Au niveau institutionnel, la coordination des acteurs constitue une dimension clé. Dans la Dépression du Nord, le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, la

FAO, la Banque Mondiale et les ONG locales coopèrent pour intégrer les données socio-économiques, climatiques et agricoles dans des cadres décisionnels contextualisés. Dans les Plateaux Centraux Humides, une collaboration étroite s'établit entre les mêmes ministères, l'UNICEF, l'OMS et les agences de gestion des catastrophes, visant à prendre en compte les dimensions environnementales et sanitaires des crises. L'usage de technologies avancées, telles que les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles prédictifs, s'avère indispensable pour traiter et interpréter la diversité des données générées.

6.10 Stratégie d'opérationnalisation du système d'alerte précoce

L'opérationnalisation du système d'alerte précoce pourrait reposer sur une articulation cohérente entre la collecte des données, leur analyse intégrée et la diffusion des alertes auprès des acteurs concernés. Cette stratégie viserait à transformer les informations issues des dispositifs de surveillance en actions concrètes de prévention et de gestion des crises d'insécurité alimentaire.

La première étape de cette opérationnalisation consisterait en la standardisation des protocoles de collecte des données à travers les différentes Zones de Moyens d'Existence. Cette standardisation garantirait la comparabilité des indicateurs entre la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides, tout en préservant la spécificité des facteurs de risque propres à chaque zone. Les enquêtes socio-économiques semestrielles, le suivi hebdomadaire des prix et la télédétection des anomalies climatiques pourraient ainsi faire l'objet de fiches techniques uniformisées, accompagnées de calendriers de collecte synchronisés.

La deuxième étape concernerait le traitement et l'analyse intégrée des données. Un système centralisé d'information géographique (SIG) pourrait être mis en place pour superposer les couches d'information relatives aux revenus des ménages, aux prix alimentaires, aux conditions climatiques et aux indicateurs sanitaires. Des seuils d'alerte précoce seraient alors définis pour chaque indicateur clé, par exemple un écart pluviométrique supérieur à 20 % par rapport à la moyenne décennale, ou une hausse des prix des denrées de base dépassant 15 % en l'espace de quatre semaines. Le dépassement simultané de plusieurs seuils pourrait déclencher automatiquement une alerte de niveau intermédiaire ou maximal, selon une matrice de gravité préétablie.

La troisième étape serait celle de la validation et de la diffusion des alertes. Un comité technique intersectoriel, réunissant les représentants du Ministère de l'Agriculture, de la FAO, de l'UNICEF, de l'OMS, des services météorologiques et des ONG locales, pourrait se réunir mensuellement pour examiner les signaux faibles et confirmer la pertinence des alertes avant leur diffusion. Ce comité assurerait également la triangulation des sources de données, minimisant ainsi les risques de fausses alertes ou de non-alerte. Une fois validées, les alertes seraient diffusées selon un protocole à trois niveaux : alerte verte (vigilance) communiquée aux autorités administratives locales, alerte orange (menace imminente) transmise aux agences humanitaires pour activation des plans de contingence, et alerte rouge (crise avérée) déclenchant des interventions d'urgence coordonnées.

La quatrième étape serait celle de la boucle de rétroaction et de l'apprentissage continu. Les données issues des interventions menées en réponse aux alertes pourraient être systématiquement réintégrées dans le système pour améliorer la précision des modèles prédictifs.

et ajuster les seuils d'alerte en fonction des réalités observées sur le terrain. Des évaluations post-crise seraient conduites pour mesurer l'efficacité des alertes diffusées, mesurée par le délai de réaction des acteurs et la réduction des pertes économiques et humaines évitées.

Enfin, l'opérationnalisation supposerait un renforcement des capacités institutionnelles et locales. Des formations pourraient être dispensées aux agents des ministères sectoriels, aux enquêteurs terrain et aux relais communautaires sur l'utilisation des outils de collecte, la lecture des indicateurs d'alerte et les protocoles de diffusion. Parallèlement, des campagnes de sensibilisation auprès des ménages ruraux viseraient à améliorer leur compréhension des signaux d'alerte et à favoriser l'adoption de comportements préventifs, tels que la diversification des sources de revenus, le stockage anticipé des récoltes ou la mise en place de pratiques agroforestières résilientes.

Cette stratégie d'opérationnalisation, en combinant standardisation des outils, intégration des données, validation collégiale des alertes, apprentissage continu et renforcement des capacités, permettrait de passer d'une logique de simple surveillance à une logique d'action anticipative, réduisant ainsi la vulnérabilité chronique des ménages ruraux burundais face à l'insécurité alimentaire.

6.11 Conclusion

La problématique de l'insécurité alimentaire au Burundi, particulièrement dans les zones de moyens d'existence ciblées par cette recherche, souligne l'importance cruciale de systèmes d'alerte précoce adaptés aux réalités locales. Les résultats obtenus à travers des analyses économétriques et des modèles multinomiaux révèlent que les déterminants de la sécurité alimentaire sont profondément enracinés dans des dynamiques socio-économiques complexes, où les facteurs agricoles, démographiques et environnementaux interagissent de manière non linéaire.

Ces interactions mettent en lumière la nécessité d'interventions qui ne se limitent pas à des solutions monétaires ou technologiques isolées, mais qui intègrent une vision holistique incluant la diversification des cultures, l'accès équitable aux ressources foncières et la promotion de pratiques agricoles résilientes. L'analyse des clusters de ménages montre également que des disparités intra-zonales persistent malgré des conditions environnementales similaires, ce qui appelle à une personnalisation des interventions pour répondre aux besoins spécifiques des populations vulnérables.

Enfin, la construction d'un système d'alerte précoce robuste, reposant sur des outils géospatiaux, des enquêtes socio-économiques et des partenariats institutionnels solides, représente un levier stratégique pour anticiper les crises alimentaires et orienter les politiques publiques vers des actions plus ciblées et efficaces. Une telle approche pourrait non seulement atténuer les effets des chocs externes, mais aussi renforcer à long terme la résilience des communautés face aux défis croissants du changement climatique et des pressions démographiques.

Fort de ces constats sur la vulnérabilité alimentaire et l'opérationnalisation d'un système d'alerte précoce différencié, il convient désormais de replacer ces résultats dans une perspective synthétique et critique. Le chapitre suivant, consacré à la discussion des résultats et à la conclusion générale, vise à articuler et à interpréter l'ensemble des apports empi-

riques des chapitres 4, 5 et 6. Il s'agira notamment de confronter nos résultats aux corpus théoriques et aux études empiriques nationaux et internationaux, de vérifier la robustesse des hypothèses formulées en introduction, et d'évaluer dans quelle mesure les objectifs spécifiques de cette recherche ont été pleinement atteints. Cette mise en perspective transversale permettra enfin de formuler des recommandations stratégiques opérationnelles, d'en tirer les enseignements structurels pour les politiques de sécurité alimentaire et de développement rural au Burundi, et d'ouvrir des pistes de recherche futures afin de prolonger la contribution scientifique et pratique de ce travail doctoral.

DISCUSSION DES RESULTATS ET CONCLUSION GENERALE

Résumé

Ce chapitre discute les résultats relatifs au revenu vital, aux pratiques agricoles et à la vulnérabilité alimentaire dans la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides. Les analyses révèlent un écart persistant entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages, plus marqué dans les Plateaux Centraux Humides. L'agroforesterie se distingue comme la stratégie agricole performante, générant un revenu significativement supérieur à celui des systèmes non agroforestiers. Les indicateurs de sécurité alimentaire confirment une insécurité grave dans les deux zones, tandis que l'analyse typologique identifie plusieurs profils de vulnérabilité distincts, justifiant des interventions différenciées selon les contextes territoriaux.

La confrontation des résultats avec les littératures mondiale, africaine et burundaise valide la robustesse des analyses. Les écarts de revenu observés corroborent les travaux soulignant l'insuffisance des revenus agricoles dans les pays à faible revenu et la nécessité de contextualiser le seuil de revenu vital. L'efficacité de l'agroforesterie confirme les approches multifonctionnelles préconisées dans la littérature récente. Les trois hypothèses de recherche sont validées : (i) les facteurs économiques et climatiques déterminent significativement la vulnérabilité alimentaire ; (ii) les mécanismes de vulnérabilité diffèrent structurellement entre les deux zones ; (iii) le système d'alerte précoce proposé constitue un dispositif opérationnel adapté aux réalités territoriales.

Trois axes de recommandations sont formulés : l'institutionnalisation de l'agroforesterie planifiée comme stratégie centrale des politiques agricoles nationales, la mise en place d'une plateforme nationale de système d'alerte précoce intégrant des indicateurs agronomiques validés, et le renforcement de l'inclusion des femmes et des jeunes dans l'accès aux ressources productives. L'étude présente des limites liées aux contraintes logistiques de terrain, à l'utilisation d'unités de mesure locales non standardisées et à son caractère transversal. Les perspectives incluent une extension géographique, une analyse approfondie des dynamiques de genre, le développement de méthodologies participatives et une approche longitudinale pour évaluer les tendances temporelles de la vulnérabilité alimentaire.

7.1 Introduction

Les chapitres 4, 5 et 6 du présent document ont exploré, à travers des analyses descriptives et exploratoires multidimensionnelles, les dynamiques complexes du revenu vital et effectif, des combinaisons optimales des cultures, ainsi que de la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire au Burundi. Ces analyses, ancrées dans une approche quantitative rigoureuse et contextualisées par le cadre théorique des chapitres 1 et 2, mettent en lumière les interactions entre facteurs biophysiques, socio-économiques et institutionnels dans la résilience des ménages ruraux. La discussion qui suit vise à interpréter ces résultats en les confrontant aux littératures mondiale, africaine, Est-Africaine et burundaise, afin d'identifier les convergences, les divergences et les implications pour les politiques de sécurité alimentaire et de développement agricole durable.

7.2 Aperçu des résultats sur revenu vital et effectif au Burundi

Les analyses du chapitre 4 révèlent des écarts significatifs entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages dans les deux zones étudiées. Dans la Dépression du Nord, le revenu vital total moyen des ménages s'élève à 2 906 712,87 FBU, contre 2 222 662,50 FBU dans les Plateaux centraux humides, une différence statistiquement significative (p -value = 0,0439). Le ratio revenu effectif/revenu vital (REFF/RV) est également plus élevé dans la Dépression du Nord (0,90) que dans les Plateaux centraux humides (0,69), indiquant que les ménages de la première zone sont plus proches de couvrir leurs besoins vitaux, bien que la majorité reste en deçà du seuil dans les deux régions. Ces résultats mettent en lumière une hétérogénéité économique marquée, avec des inégalités intra-zonales reflétées par des écarts-types élevés (2 416 553,08 FBU dans la Dépression du Nord et 1 871 523,06 FBU dans les Plateaux centraux humides).

Ces écarts s'inscrivent dans les dynamiques socio-économiques et agro-écologiques décrites dans le chapitre 2, où la littérature souligne que la dépendance à l'agriculture de subsistance, combinée à la variabilité climatique et à la pression démographique, exacerbe la vulnérabilité des ménages ruraux [12, 96]. Globalement, la littérature mondiale sur le revenu vital, telle que celle de Anker[161], définit ce concept comme un seuil permettant de garantir un niveau de vie décent, incluant une alimentation nutritive, un logement adéquat et l'accès aux services de base. Au Burundi, les contraintes structurelles, telles que la faible productivité agricole et l'accès limité aux marchés, rendent cet objectif difficile à atteindre, comme le confirment les résultats du chapitre 4.

7.3 Confrontation des résultats aux travaux existants à l'échelle mondiale

A l'échelle mondiale, les travaux sur le revenu vital mettent en avant l'importance de contextualiser ce concept en fonction des coûts de la vie locaux et des conditions socio-économiques [162]. Les résultats du chapitre 4 montrent que, malgré un revenu moyen plus élevé dans la Dépression du Nord, les ménages des deux zones peinent à atteindre le seuil du revenu vital, un constat aligné avec les conclusions de la Banque Mondiale

[179], qui note que dans les pays à faible revenu, les revenus agricoles sont souvent insuffisants pour couvrir les besoins essentiels en raison de la volatilité des prix et des chocs climatiques. La littérature mondiale, notamment la recherche de Hupper [180], insiste sur le rôle des pratiques agricoles durables et de la diversification des revenus pour combler l'écart entre revenu effectif et vital. Cependant, au Burundi, l'accès limité aux intrants modernes (semences améliorées, engrais) et aux services d'encadrement agronomique (27 % dans la Dépression du Nord contre 43 % dans les Plateaux centraux humides) limite l'adoption de telles pratiques, comme le soulignent les résultats du chapitre 4.

Les travaux d'Alkire [14] sur la pauvreté multidimensionnelle offrent un cadre théorique pertinent pour interpréter ces résultats. Ils suggèrent que la pauvreté ne se limite pas à un déficit monétaire, mais inclut des privations dans l'accès à l'éducation, à la santé et aux infrastructures. Les résultats du chapitre 4 confirment cette affirmation : l'accès à la terre, bien que légèrement plus élevé dans les Plateaux centraux humides (96 % contre 92 % dans la Dépression du Nord), reste insuffisant pour compenser les faibles rendements agricoles, tandis que l'encadrement agronomique limité reflète une privation d'accès au savoir technique. Ces contraintes multidimensionnelles expliquent pourquoi même les ménages avec des revenus relativement plus élevés dans la Dépression du Nord restent vulnérables à l'insécurité alimentaire.

7.4 Revenu vital dans le contexte Africain et Est-Africain

En Afrique subsaharienne, la littérature met en évidence la dépendance généralisée à l'agriculture pluviale et les impacts disproportionnés du changement climatique sur les petits exploitants [177]. Les résultats du chapitre 4, montrant une production alimentaire moyenne légèrement supérieure dans les Plateaux centraux humides (893 271,23 FBU contre 815 590,64 FBU dans la Dépression du Nord), mais non statistiquement significative (p -value = 0,3326), reflètent les défis liés à la variabilité climatique dans les deux zones. Ces résultats résonnent avec les conclusions de Kramer [181], qui notent que les différences agro-écologiques entre régions africaines influencent les rendements, mais que les contraintes socio-économiques, comme l'accès limité aux intrants, homogénéisent les vulnérabilités. En Afrique de l'Est, des études au Kenya et au Rwanda montrent que les transferts monétaires et les programmes d'appui agricole peuvent réduire l'écart entre revenu effectif et vital, mais leur efficacité dépend de l'accès aux marchés et des infrastructures.

7.5 Spécificités du contexte burundais sur le revenu vital

Au Burundi, la littérature locale, notamment les travaux de Niragira [10], soulignent que la forte densité démographique et la fragmentation foncière exacerbent la vulnérabilité des ménages. Les résultats du chapitre 4 confirment cette analyse : la pression démographique dans la Dépression du Nord, aggravée par les migrations internes et les retours de réfugiés, limite l'accès à la terre arable, tandis que les Plateaux centraux humides, bien que bénéficiant d'un accès légèrement plus élevé à la terre, souffrent de pratiques agricoles non durables. Ces dynamiques sont cohérentes avec les conclusions de Mbombo[96], qui mettent en garde contre la dégradation des sols due à l'intensification agricole sans

mesures de conservation.

Les résultats montrent également une insécurité alimentaire grave dans les deux zones, avec des scores FIES moyens de 2,99 (Dépression du Nord) et 3,17 (Plateaux centraux humides), plaçant les ménages dans une catégorie d'insécurité alimentaire grave. Ce constat s'aligne avec les études d'Aïssatou[182], qui attribuent l'insécurité alimentaire au Burundi à la combinaison de chocs climatiques (sécheresses dans la Dépression du Nord, glissements de terrain dans les Plateaux centraux humides), de faibles rendements agricoles, et d'un accès limité aux services de base. La priorisation de l'alimentation des enfants dans les Plateaux centraux humides (3,06 repas par jour contre 2,73 dans la Dépression du Nord, $p\text{-value} = 0,0085$) reflète une stratégie adaptative courante dans les contextes d'insécurité alimentaire, comme le note l'United Nations [183], où les ménages vulnérables protègent les membres les plus jeunes au détriment des adultes.

7.6 Analyse des différences structurelles entre les deux zones

Les résultats du chapitre 4 mettent en évidence des différences structurelles entre les deux zones, qui s'expliquent par leurs profils agro-écologiques et socio-économiques. La Dépression du Nord, avec ses plaines fertiles et ses précipitations modérées, bénéficie d'une production vivrière excédentaire (manioc, haricots, sorgho), mais reste vulnérable aux sécheresses et aux variations pluviométriques. Cette vulnérabilité limite la capacité des ménages à convertir leurs revenus plus élevés en sécurité alimentaire durable, un paradoxe également observé dans le cluster 1 (chapitre 6), où des revenus élevés coexistent avec une insécurité alimentaire grave. Ce phénomène peut être lié à la dépendance aux marchés extérieurs et à la volatilité des prix, comme le note Lefoll [184] dans leur analyse des chaînes de valeur agricoles.

Les Plateaux centraux humides, en revanche, bénéficient de précipitations abondantes et de conditions favorables aux cultures de rente (café, thé), mais leur topographie vallonnée les expose aux glissements de terrain et à la dégradation des sols. Les résultats du chapitre 4 montrent une production alimentaire légèrement supérieure, mais un revenu moyen inférieur et un ratio REFF/RV plus faible, suggérant une vulnérabilité économique accrue. Ce constat est cohérent avec les observations de Prudence [185], qui notent que les zones dépendantes des cultures de rente sont particulièrement sensibles aux fluctuations des marchés internationaux. L'analyse des clusters (chapitre 6) révèle une hétérogénéité intrazonale : le cluster 2 montre une résilience alimentaire élevée grâce à l'autosuffisance et à la diversification agricole, tandis que le cluster 3 reflète une crise alimentaire chronique, soulignant la nécessité d'interventions différenciées.

Sur le plan pratique, les résultats appellent à des interventions ciblées. Dans la Dépression du Nord, le renforcement de l'encadrement agronomique (actuellement limité à 27 % des ménages) et l'amélioration des infrastructures d'irrigation pourraient maximiser les bénéfices des revenus plus élevés, comme le suggèrent les recommandations de la Stratégie Nationale Agricole. Dans les Plateaux centraux humides, des programmes de diversification économique, tels que le soutien aux activités non agricoles (commerce, artisanat), et des mesures de conservation des sols sont prioritaires pour réduire la dépendance aux cultures de rente et atténuer les impacts des chocs climatiques. Ces interventions s'alignent

avec les priorités du Plan National de Développement et des ODD, notamment l'ODD 2 (faim zéro).

7.7 Aperçu des résultats sur les pratiques agricoles

Le chapitre 5 examine les combinaisons optimales de cultures pour maximiser la productivité, la diversité alimentaire, et la stabilité des revenus des ménages ruraux dans la Dépression du Nord et les Plateaux centraux humides. Les analyses révèlent que la diversification des cultures, incluant des cultures vivrières (manioc, haricots, maïs) et des cultures pérennes (bananes, café), est un facteur clé pour renforcer la résilience face aux chocs climatiques et économiques. Les résultats de ce chapitre ont mis en évidence l'importance de l'agroforesterie dans l'amélioration des revenus agricoles des ménages. Ce système révèle que les ménages pratiquant l'agroforesterie obtiennent un revenu agricole supérieur de 24,4 % par rapport à ceux qui n'y recourent pas, avec une différence hautement significative ($p = 0,0012$). Par ailleurs, le profit relatif des cultures agroforestières (92 %) se place juste après celle du bananier (100 %) et du manioc (99 %), confirmant leur rôle central comme filet de sécurité économique et écologique. Ces résultats affinent la vision traditionnelle de la diversification en montrant que ce n'est pas seulement le nombre de cultures qui compte, mais la synergie fonctionnelle entre les espèces.

Dans la Dépression du Nord, les ménages privilégient des cultures vivrières à cycle court, comme le manioc et les haricots, soutenues par la riziculture irriguée dans les zones humides, tandis que les Plateaux centraux humides se distinguent par une combinaison de cultures vivrières et de cultures de rente (café, thé), favorisée par des précipitations abondantes et des sols fertiles. Les résultats montrent que les ménages pratiquant une plus grande diversité culturelle, notamment ceux intégrant des cultures annuelles et pérennes, présentent une probabilité réduite d'appartenir à la catégorie « Score de Consommation Alimentaire (SCA) Pauvre » (effet négatif significatif de -5,66 % pour les cultures annuelles) et une meilleure résilience alimentaire (effet positif de 0,0279 pour les cultures pérennes).

Ces résultats s'inscrivent dans le cadre théorique du chapitre 2, qui met en avant la résilience des ménages comme dépendante de leur capacité à adopter des pratiques agricoles adaptatives face aux chocs climatiques, économiques et sociaux. La littérature mondiale, africaine et burundaise souligne que la diversification agricole est une stratégie clé pour atténuer les risques liés à la variabilité climatique et à la volatilité des prix sur les marchés. Cependant, les contraintes locales, telles que l'accès limité aux intrants modernes, la fragmentation foncière, et la faible couverture des services d'encadrement agronomique [81], limitent l'adoption de ces pratiques, comme le confirment les analyses du chapitre 5.

7.7.1 Comparaison des résultats sur les pratiques agricoles par la littérature mondiale

A l'échelle mondiale, la littérature sur les systèmes agricoles durables insiste sur l'importance de la diversification des cultures pour améliorer la sécurité alimentaire et la résilience économique des ménages ruraux [42]. Les résultats du chapitre 5, qui montrent un effet positif de la diversification culturelle sur la résilience alimentaire, corroborent ces conclusions. [42] insistent également que des systèmes agricoles multifonctionnels sont capables

de produire à la fois de la nourriture, des revenus et des services écosystémiques. Les résultats de cette recherche confirment cette approche : l'agroforesterie n'est pas seulement une technique agricole, mais un système intégré qui améliore la fertilité des sols, atténue l'érosion, modère le microclimat et diversifie les sources de revenus [153].

Dans le contexte burundais, l'intégration de cultures pérennes comme la banane ou le café, observée particulièrement dans les Plateaux centraux humides, joue un rôle similaire en stabilisant les revenus face aux fluctuations des prix des cultures vivrières, un point également relevé par Anker et al.[161] dans leur analyse des stratégies de subsistance. Cependant, les résultats du chapitre 5 mettent également en évidence des limites dans l'adoption de ces pratiques, notamment en raison de l'accès limité aux semences améliorées et à l'encadrement agronomique (27 % dans la Dépression du Nord contre 43 % dans les Plateaux centraux humides). Ces contraintes sont cohérentes avec les observations de la Banque Mondiale [179], qui note que dans les pays à faible revenu y compris le Burundi, les petits exploitants manquent souvent des ressources nécessaires pour investir dans des systèmes agricoles diversifiés.

7.7.2 Les pratiques agricoles dans le contexte Africain et Est-Africain

En Afrique subsaharienne, la diversification agricole est largement reconnue comme une stratégie essentielle pour atténuer les impacts du changement climatique et renforcer la sécurité alimentaire [186, 187]. Les résultats du chapitre 5, qui montrent une réduction de la vulnérabilité alimentaire chez les ménages pratiquant une plus grande variété de cultures, s'alignent avec ces conclusions. Par exemple, Tyszler et al.[188] notent que dans les zones agro-écologiques variées d'Afrique, la combinaison de cultures à cycle court et de cultures pérennes permet de répartir les risques climatiques et économiques. Dans la Dépression du Nord, la prédominance de cultures vivrières à cycle court reflète une adaptation aux sécheresses répétitives, tandis que les Plateaux centraux humides tirent parti de leur climat humide pour intégrer des cultures de rente, une dynamique similaire à celle observée dans les hauts plateaux du Rwanda [159].

En Afrique de l'Est, des études au Kenya et en Ouganda montrent que les programmes de vulgarisation agricole, combinés à l'accès aux intrants modernes, ont permis d'améliorer les rendements et la diversité culturale [176]. Cependant, au Burundi, les résultats du chapitre 5 indiquent une faible couverture des services d'encadrement agronomique, ce qui limite l'adoption de pratiques optimales. Cette disparité peut être attribuée à des contraintes institutionnelles, comme le manque de financement pour les services agricoles, un problème également relevé dans les analyses régionales [189]. Les travaux de Waarts[190] sur la production de café en Afrique de l'Est soulignent que les cultures de rente, comme celles pratiquées dans les Plateaux centraux humides, offrent des opportunités économiques, mais nécessitent des investissements dans la gestion des sols et la résistance aux maladies pour maximiser leur impact sur la résilience.

7.7.3 Impact des pratiques agricoles sur la sécurité alimentaire au Burundi

Au Burundi, la littérature locale met en avant les défis structurels qui entravent la diversification agricole, notamment la forte densité démographique, la fragmentation foncière, et

la dégradation des sols [12, 10, 96]. Les résultats du chapitre 5 confirment ces contraintes : bien que la diversification des cultures réduise la probabilité d'insécurité alimentaire, la taille moyenne des exploitations (0,5 ha) limite la capacité des ménages à cultiver une large gamme de cultures. Dans la Dépression du Nord, l'accent mis sur les cultures vivrières comme le manioc et les haricots reflète une stratégie d'autosuffisance, mais l'exposition aux inondations compromet les rendements, comme le note Bidou[191]. Dans les Plateaux centraux humides, la combinaison de cultures vivrières et de rente (café, thé) est favorisée par des conditions agro-écologiques plus stables, mais la dégradation des sols due à des pratiques non durables, soulignée par Mbombo [96], constitue une menace à long terme.

Les résultats montrent également que l'utilisation de semences sélectionnées, bien que limitée, a un effet positif significatif sur la résilience des ménages dans la catégorie « SCA » (effet marginal de 0,014 %). Ce constat s'aligne avec les recommandations de la Stratégie Nationale Agricole, qui préconise l'introduction de variétés résistantes pour améliorer les rendements. Cependant, l'accès limité aux intrants modernes, comme les semences améliorées, reste un obstacle majeur, un problème également relevé par Aïssatou [182], qui attribue la faible productivité agricole au Burundi à l'insuffisance des infrastructures et des services d'appui.

7.7.4 Implications théoriques et pratiques agricoles au Burundi

Le cadre théorique du chapitre 1 stipule que la résilience des ménages dépend de leur capacité à adopter des stratégies agricoles résilientes face aux chocs multiples. La distinction entre cultures annuelles et pérennes, centrale dans l'analyse, confirme l'importance des mécanismes de diversification pour réduire la vulnérabilité, comme le suggèrent Alkire et al. [14] dans leur cadre de la pauvreté multidimensionnelle. Cependant, les contraintes structurelles, telles que l'accès limité aux intrants et aux services d'encadrement, reflètent les défis institutionnels relevés par Niragira [10].

Sur le plan pratique, les résultats appellent à des interventions différenciées. Dans la Dépression du Nord, le renforcement des systèmes d'irrigation et l'accès aux semences résistantes aux inondations pourraient optimiser les rendements des cultures vivrières, comme le recommande le Programme National de Sécurité Alimentaire. Dans les Plateaux centraux humides, des programmes de conservation des sols et de promotion des cultures pérennes, combinés à un meilleur accès aux marchés, sont essentiels pour maximiser les bénéfices des cultures de rente, en ligne avec les priorités du Plan National de Développement. Ces interventions s'alignent avec les Objectifs de Développement Durable (ODD), notamment l'ODD 2 (faim zéro) et l'ODD 13 (action climatique).

7.7.5 Insécurité alimentaire et Système d'Alerte Précoce

Le chapitre 6 utilise une approche multidimensionnelle, incluant l'analyse CARI et la régression logistique multinomiale, pour évaluer la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire. Les résultats révèlent une insécurité alimentaire grave dans les deux zones étudiées, avec des scores FIES moyens de 2,99 (Dépression du Nord) et 3,17 (Plateaux centraux humides), plaçant les ménages dans une catégorie d'insécurité alimentaire grave. L'analyse des clusters identifie trois groupes distincts : le cluster 1 (Dépression du Nord) montre une insécurité alimentaire structurelle malgré des revenus élevés, le cluster 2 (Plateaux centraux humides) affiche une résilience alimentaire grâce à l'autosuffisance agricole, et le

cluster 3 (Plateaux centraux humides) reflète une crise alimentaire chronique nécessitant une intervention urgente. Le système d'alerte précoce proposé combine des indicateurs biophysiques (précipitations, rendements agricoles) et socio-économiques (revenus, prix des denrées) avec des outils géospatiaux et des enquêtes régulières pour anticiper les crises alimentaires.

Ces résultats s'inscrivent dans le cadre théorique du chapitre 1, qui définit la résilience comme la capacité des ménages à absorber, s'adapter et se transformer face aux chocs multiples, tout en soulignant l'importance des systèmes d'alerte précoce pour anticiper les crises [14, 12]. La littérature existante met en avant la nécessité d'approches intégrées combinant données scientifiques, technologies modernes, et collaboration institutionnelle pour renforcer la sécurité alimentaire dans les contextes vulnérables [187, 182].

7.7.6 Insécurité alimentaire au regard de la littérature mondiale

La littérature sur la sécurité alimentaire et les systèmes d'alerte précoce insiste sur l'importance d'une approche multidimensionnelle pour capturer les interactions complexes entre facteurs biophysiques et socio-économiques [192]. Les résultats du chapitre 6, qui utilisent l'approche CARI pour classer les ménages en catégories de sécurité alimentaire (acceptable, limite, pauvre), corroborent cette perspective. Maxzell et al. [193] soulignent que les indicateurs composites, comme le FIES, permettent de mieux comprendre les expériences vécues d'insécurité alimentaire, un point reflété dans les scores élevés de FIES observés dans les deux zones étudiées. La proposition d'un SAP basé sur des outils géospatiaux et des données en temps réel s'aligne avec les recommandations de la Banque Mondiale [179], qui préconise l'utilisation de technologies avancées, telles que les systèmes d'information géographique (SIG), pour anticiper les crises alimentaires dans les pays à faible revenu.

Cependant, les résultats mettent également en évidence des défis dans la mise en œuvre du SAP, notamment le manque de données fiables et la faible couverture institutionnelle, des obstacles également relevés dans la littérature mondiale. Les systèmes d'alerte précoce dans les contextes à ressources limitées souffrent souvent d'un manque de coordination entre acteurs et d'infrastructures inadéquates, un constat pertinent pour le Burundi, où les audits agricoles et les enquêtes socio-économiques restent fragmentés. Les résultats du chapitre 6, montrant une forte hétérogénéité intra-zonale (clusters 2 et 3 dans les Plateaux centraux humides), confirment également les conclusions d'Alkire [14] sur la nécessité de personnaliser les interventions pour répondre aux besoins spécifiques des sous-groupes vulnérables.

7.7.7 L'insécurité alimentaire dans le contexte Africain et Est-Africain

En Afrique subsaharienne, la littérature souligne que l'insécurité alimentaire est exacerbée par la dépendance à l'agriculture pluviale, la variabilité climatique, et les contraintes socio-économiques [186]. Les résultats du chapitre 6, indiquant une vulnérabilité partagée aux chocs climatiques (5,84 chocs en moyenne dans la Dépression du Nord et 5,81 dans les Plateaux centraux humides), s'alignent avec ces observations. Rudaz [187] note que les phénomènes climatiques extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations, compromettent les rendements agricoles dans toute la région, un problème particulièrement aigu

dans la Dépression du Nord, où les inondations perturbent la riziculture irriguée.

En Afrique de l'Est, des initiatives comme le système d'alerte précoce FEWS NET (Famine Early Warning Systems Network) au Kenya et en Ouganda ont démontré l'efficacité des approches basées sur les données satellitaires et les enquêtes de terrain Barrientos[194]. Cependant, au Burundi, les résultats du chapitre 6 révèlent un retard dans l'adoption de telles technologies, en raison de contraintes financières et institutionnelles, un défi également relevé dans les analyses régionales [189]. Les travaux de Niyonzima [195] sur le Rwanda montrent que la coordination entre gouvernements, ONG, et communautés locales est essentielle pour le succès des systèmes d'alerte précoce. Les résultats du chapitre 6, qui mettent en avant la collaboration entre le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, la FAO, et les ONG dans la Dépression du Nord, reflètent un effort similaire, mais la faible couverture des services d'encadrement agronomique (27 % dans la Dépression du Nord contre 43 % dans les Plateaux centraux humides) limite l'efficacité de ces initiatives, un point également souligné par Waarts[190] dans leur analyse des systèmes agricoles est-africains.

7.7.8 L'insécurité alimentaire dans le contexte Burundais

Au Burundi, la littérature locale met en évidence les défis structurels aggravant l'insécurité alimentaire, notamment la forte densité démographique (450 habitants/km²), la fragmentation foncière, et la dégradation des ressources naturelles [12, 10]. Les résultats du chapitre 6 confirment ces contraintes : la pression démographique dans la Dépression du Nord, exacerbée par les migrations internes, limite l'accès à la terre arable, tandis que la dégradation des sols dans les Plateaux centraux humides, due à des pratiques agricoles non durables, compromet la productivité. Ces dynamiques expliquent pourquoi même les ménages à revenus élevés (cluster 1) souffrent d'insécurité alimentaire grave, un paradoxe attribué à la dépendance aux marchés extérieurs et à la volatilité des prix, comme le note Sady [196].

L'analyse des déterminants de la vulnérabilité, via la régression logistique multinomiale, montre que des facteurs comme la taille du ménage, le niveau d'éducation, et la diversification agricole influencent significativement le Score de Consommation Alimentaire (SCA). Par exemple, une augmentation de la taille du ménage accroît la probabilité d'appartenir à la catégorie « SCA Pauvre » (+1,79 %), tandis que la diversification des cultures annuelles la réduit (-5,66 %). Ces résultats s'alignent avec les conclusions de Mbombo[96], qui souligne l'importance de la diversification agricole pour atténuer les risques climatiques dans un contexte de forte pression démographique. La proposition d'un SAP intégrant des outils hydrologiques, des audits agricoles, et un suivi des prix s'inscrit dans les recommandations de la Stratégie Nationale Agricole, qui préconise des systèmes de surveillance robustes pour anticiper les crises alimentaires.

Les différences agro-écologiques entre les deux zones influencent leurs profils de vulnérabilité et les approches du SAP. Dans la Dépression du Nord, les plaines fertiles soutiennent la riziculture irriguée, mais les inondations périodiques et la variabilité pluviométrique, notées par Bidou[191], augmentent les risques alimentaires. Le SAP proposé, incluant un suivi satellitaire des anomalies pluviométriques et des enquêtes socio-économiques semestrielles, répond à ces défis en permettant une détection précoce des crises, un point cohérent avec les recommandations de Fountain [197] pour les zones agricoles burundaises.

Dans les Plateaux centraux humides, les précipitations abondantes favorisent une agriculture diversifiée, mais les inondations fréquentes et la dégradation des sols, soulignées par Mbombo[96], compromettent la résilience. Le SAP intègre des outils hydrologiques automatisés et des études sur la fertilité des sols, des mesures alignées avec les priorités du Programme National de Sécurité Alimentaire. L'analyse des clusters révèle une hétérogénéité intra-zonale : le cluster 2 bénéficie d'une autosuffisance agricole et d'infrastructures locales, tandis que le cluster 3, exposé à des chocs multiples, nécessite des interventions urgentes, comme des aides alimentaires et des microcrédits, un constat cohérent avec les observations de Waarts [190] sur les disparités dans les hauts plateaux est-africains.

7.8 Conclusion générale

Cette recherche, axée sur le revenu vital durable et résilience des ménages ruraux pour une sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi, a permis de répondre aux questions de recherche, de vérifier les hypothèses formulées, et d'atteindre l'objectif global ainsi que les objectifs spécifiques. En s'appuyant sur une approche multidimensionnelle combinant des analyses descriptives, exploratoires, et économétriques, les résultats des chapitres 4, 5, et 6 offrent une compréhension approfondie des dynamiques agro-économiques, climatiques, et socio-économiques influençant la sécurité alimentaire et la résilience des ménages ruraux au Burundi. Cette conclusion générale synthétise les principaux apports de la recherche, démontre comment les questions et hypothèses ont été abordées, évalue l'atteinte des objectifs, et discute des implications pour les politiques publiques et les recherches futures.

7.8.1 Réponses aux questions de recherche

Les trois questions de recherche formulées ont été systématiquement abordées à travers les analyses des chapitres 4, 5, et 6, permettant une compréhension détaillée des facteurs influençant la vulnérabilité et la résilience des ménages.

7.8.1.1 Première question de recherche (Q1)

Concernant la première question (Q1), relative aux facteurs agro-économiques et météorologiques influençant les écarts entre le revenu vital et le revenu effectif des ménages, le chapitre 4 a répondu en analysant les écarts entre le revenu vital et le revenu réel. Les résultats montrent des revenus moyens de 2 906 712,87 FBU dans la Dépression du Nord et de 2 222 661,50 FBU dans les Plateaux centraux humides, avec des ratios revenu effectif/revenu vital (REFF/RV) de 0,90 et 0,69 respectivement (p -value = 0,0439). Les facteurs agro-économiques clés incluent l'accès limité à la terre (taille moyenne des exploitations de 0,5 ha), la faible couverture des services d'encadrement agronomique (27 % dans la Dépression du Nord contre 43 % dans les Plateaux centraux humides), et la dépendance aux marchés extérieurs. Les facteurs météorologiques, tels que les sécheresses récurrentes dans la Dépression du Nord et les glissements de terrain dans les Plateaux centraux humides, exacerbent ces écarts en réduisant les rendements agricoles. Ces résultats confirment les observations de Niragira[12] et Mbombo[96] sur l'impact des contraintes structurelles et climatiques sur les revenus agricoles au Burundi.

7.8.1.2 Deuxième question de recherche (Q2)

La deuxième question de recherche (Q2), portant sur les pratiques agricoles optimisant la productivité, la diversité alimentaire et la stabilité des revenus, a été approfondie dans le chapitre 5. Les analyses révèlent que l'agroforesterie émerge comme une stratégie centrale de résilience, surpassant la simple diversification culturale. Les ménages pratiquant l'agroforesterie combinant les arbres fruitiers, espèces d'ombrage et cultures annuelles obtiennent un revenu agricole moyen supérieur de 24,4 % (2 724 110 FBU contre 2 189 132 FBU), avec une différence hautement significative ($p = 0,0012$). En complément, la diversification entre cultures annuelles et pérennes réduit effectivement la vulnérabilité alimentaire : chaque culture annuelle supplémentaire diminue de 5,66 % la probabilité d'être classé dans la catégorie « SCA Pauvre », tandis que les cultures pérennes améliorent la résilience (effet positif de +0,0279).

Ces pratiques se manifestent différemment selon les zones : dans la Dépression du Nord, marquée par des sols appauvris et une forte variabilité climatique, les ménages privilégient des cultures vivrières à cycle court (manioc, haricots) et la riziculture en zones humides, en adaptation aux sécheresses récurrentes. À l'inverse, dans les Plateaux Centraux Humides, les conditions agro-écologiques favorables permettent l'intégration de cultures de rente comme le café, renforçant à la fois la stabilité des revenus et la durabilité environnementale. Toutefois, l'adoption de ces systèmes reste freinée par la fragmentation foncière, un accès limité aux intrants modernes (27 % dans la Dépression du Nord, 43 % dans les Plateaux Centraux Humides), et un encadrement agricole insuffisant (36 % des ménages au total). Ces résultats corroborent les conclusions de Tyszler[188] sur l'importance de la diversification en Afrique subsaharienne, tout en soulignant que l'agroforesterie accompagnée représente une voie plus transformante vers un revenu vital décent et une sécurité alimentaire durable.

7.8.1.3 Troisième question de recherche (Q3)

La troisième question (Q3), qui interroge la faisabilité d'un système d'alerte précoce opérationnel à l'insécurité alimentaire des ménages au Burundi à partir d'indicateurs intégrés de vulnérabilité et de résilience, est traitée au chapitre 6 à travers une régression logistique multinomiale couplée à l'analyse CARI. Ce chapitre démontre que la vulnérabilité alimentaire est associée à des dynamiques conjointes entre facteurs socio-économiques (taille du ménage : +1,79 % pour la catégorie SCA Pauvre ; niveau d'éducation : +3,35 % pour la catégorie SCA Acceptable ; diversification agricole : -5,66 % pour la catégorie SCA Pauvre) et aléas climatiques (moyenne de 5,84 chocs climatiques dans la Dépression du Nord et 5,81 dans les Plateaux centraux humides), dont l'impact se traduit par une baisse des rendements agricoles et une détérioration des revenus. Les scores FIES élevés (2,99 et 3,17) attestent d'une insécurité alimentaire grave, confirmant ainsi la pertinence des indicateurs retenus pour la prédiction. Sur cette base, le chapitre propose un prototype de Système d'Alerte Précoce (SAP) fondé sur un ensemble intégré d'indicateurs reflétant les interactions entre revenus, rendements agricoles et variabilité climatique. Ce système combine des outils géospatiaux, des enquêtes socio-économiques semestrielles, un suivi hebdomadaire des prix via des marchés sentinelles (Dépression du Nord), des capteurs hydrologiques automatisés et des analyses de la fertilité des sols (Plateaux centraux humides). Ancré dans une collaboration institutionnelle (Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage, FAO, ONG), ce dispositif opérationnel permet une détection

précoce des risques alimentaires, en cohérence avec les cadres analytiques de Barrett[62] et de la Banque mondiale [179], et répond directement à l'objectif de construire un SAP fondé sur des indicateurs intégrés de vulnérabilité et de résilience.

7.8.2 Vérification des hypothèses de recherche

Les résultats issus d'une régression logistique multinomiale modélisant le Score de Consommation Alimentaire (SCA) en trois catégories (Pauvre, Limite, Acceptable), confirment de manière que les facteurs économiques et climatiques sont des déterminants de la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire, validant ainsi la première hypothèse de cette recherche. La taille du ménage accroît significativement la probabilité d'appartenir à la catégorie « SCA Pauvre » (+1,79 %, $p < 0,05$), traduisant la pression accrue sur des ressources déjà limitées, tandis que la diversification des cultures annuelles exerce un effet protecteur en réduisant cette probabilité de 5,66 % ($p < 0,01$). Par ailleurs, le niveau d'éducation du chef de ménage améliore sensiblement la sécurité alimentaire, en augmentant de 3,35 % la probabilité d'atteindre un « SCA Acceptable ». Sur le plan climatique, les chocs tels que les pluies excessives, les sécheresses tardives ou les maladies des cultures émergent comme des facteurs déclencheurs majeurs d'insécurité alimentaire, particulièrement dans la Dépression du Nord, où ils expliquent jusqu'à 12,4 % des inégalités de revenu. Ensemble, ces résultats démontrent que la vulnérabilité alimentaire au Burundi est le produit d'une interaction complexe entre contraintes socio-économiques, telles que la structure démographique, le capital humain et l'accès aux marchés, et facteurs biophysiques comme la variabilité pluviométrique et la dégradation des sols, et cette vulnérabilité va ainsi bien au-delà d'un simple déficit de production agricole.

L'analyse comparée entre la Dépression du Nord et les Plateaux Centraux Humides révèle une hétérogénéité structurelle marquée de vulnérabilité, confirmant que les déterminants de l'insécurité alimentaire varient selon le contexte agro-écologique, ce qui valide la deuxième hypothèse de cette recherche. Dans la Dépression du Nord, la vulnérabilité est essentiellement climatique : caractérisée par des sols appauvris, une forte variabilité pluviométrique et une dépendance quasi exclusive à la main-d'œuvre familiale, cette zone subit de manière disproportionnée les chocs climatiques tels que les pluies excessives et les glissements de terrain, qui expliquent respectivement 12,4 % et 9,8 % des inégalités de revenu. A l'inverse, les Plateaux Centraux Humides, dotés de conditions agro-écologiques plus favorables (pluviométrie régulière, sols plus fertiles, meilleure irrigation), présentent une vulnérabilité davantage économique, où les fluctuations des prix agricoles, responsables de 16,3 % des inégalités, pèsent lourdement sur des ménages intégrés dans des filières de rente comme le café et le thé. Cette dualité est corroborée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP), qui distingue deux axes explicatifs : un premier axe socio-économique (CP1, 30,8 % de la variance), fortement corrélé au revenu, à la superficie agricole et à l'accès aux zones humides, typique des Plateaux Centraux Humides ; et un second axe démographique-pratique (CP2, 18,7 %), marqué par la taille du ménage et un nombre réduit de saisons culturales, caractéristique de la Dépression du Nord. Ensemble, ces résultats démontrent que les mécanismes de vulnérabilité ne sont pas universels, mais profondément ancrés dans les spécificités territoriales, institutionnelles et environnementales de chaque zone.

Le Système d'Alerte Précoce (SAP) proposé repose sur des indicateurs empiriquement différenciés selon les spécificités territoriales, ce qui confirme la robustesse de la troisième hy-

pothèse. En Dépression du Nord, il s'appuie sur le suivi satellitaire des précipitations, des enquêtes socio-économiques semestrielles et un suivi hebdomadaire des prix alimentaires, tandis que dans les Plateaux Centraux Humides, il intègre des outils hydrologiques automatisés, des évaluations périodiques de la qualité des sols et des études démographiques sur la main-d'œuvre. Cette différenciation territoriale est justifiée par des résultats statistiquement significatifs : les scores FIES moyens (2,99 et 3,17) situent les deux zones en insécurité alimentaire modérée à sévère ; l'analyse en clusters (CAH) révèle trois profils distincts de vulnérabilité, allant de l'insécurité structurelle malgré des revenus élevés à la résilience par autosuffisance, en passant par une crise chronique, ce qui légitime une stratification fine des alertes ; enfin, le modèle logistique multinomial sous-jacent au SAP affiche un pseudo R^2 de 0,185 et une p-value du test de vraisemblance inférieure à 0,001, attestant de sa solidité statistique. Ensemble, ces résultats démontrent que le SAP n'est pas un cadre théorique abstrait, mais un dispositif opérationnel, empiriquement ancré et adapté aux réalités locales, validant ainsi la troisième hypothèse.

7.8.3 Atteinte des objectifs de la recherche

L'objectif global qui stipule à analyser les déterminants de la vulnérabilité et de la résilience des ménages ruraux burundais en intégrant les dimensions agronomiques, économiques, climatiques et l'écart entre revenu vital et revenu effectif, a été atteint grâce à une approche intégrée. Les chapitres 4, 5 et 6 révèlent que la vulnérabilité alimentaire ne découle pas uniquement de contraintes climatiques ou de faible productivité, mais d'interactions complexes entre accès aux ressources, gestion des intrants, pratiques agricoles et structures foncières. Parmi les facteurs de résilience figurent selon les résultats de cette recherche, l'adoption de systèmes agroforestiers et la diversification des cultures annuelles et pérennes. Le système d'alerte précoce proposé au chapitre 6, fondé sur des indicateurs biophysiques et socio-économiques validés empiriquement (revenu, FIES, superficie, chocs), constitue une réponse opérationnelle différenciée selon les profils de ménages identifiés dans les clusters, contribuant ainsi de manière concrète à la réalisation de l'ODD 2 (faim zéro), dans un cadre théorique holistique inspiré par Alkire [14].

Le premier objectif spécifique qui consiste à évaluer le revenu vital et le revenu effectif, et quantifier leur écart, a été atteint. Le revenu vital a été estimé à 3 242 200 FBU/an/ménage, tandis que les revenus effectifs moyens s'élèvent à 2 906 712,87 FBU dans la Dépression du Nord et 2 222 662,50 FBU dans les Plateaux Centraux Humides, soit des ratios revenu réel/vital de 0,90 et 0,69 respectivement. Ces écarts sont exacerbés par une inefficacité technique moyenne de 29,9 %, révélant un potentiel substantiel d'augmentation de la production à intrants constants. L'analyse montre que cette inefficacité est liée à la faible mécanisation, à la sous-utilisation de la main-d'œuvre et à l'absence de diversification structurée, confirmant les défis structurels soulignés par Anker [161].

Le deuxième objectif spécifique qui consiste à identifier les combinaisons optimales de cultures et de ressources pour assurer la stabilité des revenus et de la sécurité alimentaire, a été enrichi par des résultats. Le chapitre 5 démontre que l'agroforesterie se distingue comme la stratégie agricole résiliente : les ménages pratiquant l'agroforesterie enregistrent un revenu agricole moyen supérieur de 24,4 % (2 724 110 FBU contre 2 189 132 FBU), avec une différence statistiquement significative ($p = 0,0012$). Ce système intégré affiche une marge de profit relative de 92 %, se classant parmi les pratiques efficaces. L'analyse économétrique confirme que la diversification des cultures, notamment l'association

de cultures à cycle court et de cultures pérennes, réduit significativement la probabilité d'appartenir à la catégorie « SCA Pauvre » de 5,66 %, tout en optimisant l'utilisation des ressources foncières limitées. Ces résultats, corroborés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la segmentation par K-Means, démontrent que la combinaison optimale repose sur une gestion intégrée des actifs naturels et humains, adaptée aux spécificités agro-écologiques de chaque zone. Elle permet de résorber partiellement le déficit d'inefficacité technique sans alourdir la pression sur les intrants modernes, validant l'hypothèse d'une intensification durable par la synergie des pratiques culturelles et la valorisation des écosystèmes locaux.

Le troisième objectif spécifique qui consiste à proposer un système d'alerte précoce (SAP) à l'insécurité alimentaire basé sur les résultats de cette recherche, a été atteint au chapitre 6. En s'appuyant sur une régression logistique multinomiale, l'analyse CARI et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), cette recherche a permis de segmenter les ménages en trois profils de vulnérabilité distincts (revenus élevés mais insécurité structurelle, résilience par autosuffisance, et crise alimentaire chronique), justifiant une réponse différenciée. Le SAP proposé intègre un panel d'indicateurs validés empiriquement : suivi des écarts de revenu effectif/vital, scores FIES et SCA, dynamique des prix sur les marchés sentinelles, indicateurs biophysiques (précipitations, saturation des sols, fertilité) et taux d'adoption de pratiques résilientes. Conçu comme un dispositif territorialisé, ce système adapte ses seuils d'alerte et ses mécanismes de surveillance aux réalités de la Dépression du Nord, où l'accent est mis sur les déficits hydriques et la volatilité des prix, ainsi qu'aux réalités des Plateaux Centraux Humides, où l'accent est mis sur les inondations, la dégradation des sols et la sous-utilisation de la main-d'œuvre. Couplé à une stratégie d'opérationnalisation standardisée, à une validation collégiale des alertes ainsi qu'à une boucle de rétroaction institutionnelle, ce système d'alerte précoce offre un outil d'anticipation proactive des crises, et il est directement aligné sur les besoins de planification des politiques publiques et des interventions ciblées, ce qui contribue ainsi à la mise en œuvre effective des cadres nationaux comme le PND et la SAN, ainsi que des objectifs de développement durable.

7.9 Recommandations générales

Sur base des résultats empiriques des chapitres 4, 5 et 6 de cette recherche doctorale, qui analysent les dynamiques du revenu vital et effectif, les combinaisons optimales de cultures, et la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire au Burundi, des recommandations scientifiques sont formulées. Ces propositions s'appuient sur une approche rigoureuse, intégrant des résultats quantitatifs et qualitatifs, pour être pratiques et opérationnels. Elles s'alignent sur les cadres nationaux, tels que le Plan National de Développement 2018-2027 et la Stratégie Nationale Agricole, ainsi que sur les Objectifs de Développement Durable (ODD). Structurées en trois axes principaux : interventions agricoles, renforcement institutionnel et développement socio-économique, ces recommandations visent à renforcer la résilience des ménages ruraux face aux chocs climatiques, économiques et sociaux, tout en tenant compte des contraintes agro-écologiques et socio-économiques locales. Elles s'articulent autour de trois axes complémentaires.

7.9.1 Axe 1 : Interventions agricoles pour une productivité accrue et une résilience climatique renforcée

Les résultats du chapitre 5 démontrent que l'agroforesterie, en particulier les systèmes associant les arbres fruitiers, les bananiers, les cultures annuelles et pérennes, constitue la stratégie agricole rentable et résiliente, avec un profit relatif de 92 % et un revenu agricole supérieur de 24,4 % ($p = 0,0012$). Elle doit donc devenir l'axe central des interventions agricoles, en remplacement ou en complément des approches basées uniquement sur la diversification des cultures. Pour renforcer la résilience et la productivité agricoles au Burundi, il est crucial d'institutionnaliser l'agroforesterie dans les politiques publiques, en l'intégrant à la Stratégie Nationale Agricole (SAN) et au Plan National de Développement (PND). Cette approche doit s'appuyer sur le renforcement des centres de multiplication de plants d'arbres fruitiers et d'espèces d'ombrage, en partenariat avec l'ISABU, l'Université du Burundi et la FAO, afin d'assurer une distribution subventionnée aux ménages vulnérables. Parallèlement, il convient de réhabiliter et d'étendre les systèmes d'irrigation communautaires, en priorisant les zones humides de la Dépression du Nord pour sécuriser la riziculture et les cultures maraîchères durant la saison sèche. Enfin, la promotion de paquets technologiques agroforestiers-climatiques, lesquels combinent des variétés résistantes aux stress climatiques, du compost organique, des bandes anti-érosives ainsi que des arbres d'ombrage, doit s'accompagner d'un encadrement technique différencié selon les spécificités locales, c'est-à-dire selon la pluviométrie, la qualité des sols et l'accès aux marchés, et cela afin de maximiser leur adoption ainsi que leur impact sur la durabilité et la sécurité alimentaire.

7.9.2 Axe 2 : Renforcement institutionnel pour une anticipation efficace et un appui technique ciblé

L'inefficacité technique moyenne de 29,9 % révèle un potentiel substantiel d'augmentation de production sans nouveaux intrants, mais cet avantage reste inexploité en raison d'un encadrement agricole limité (36 %) et d'une sous-utilisation de la main-d'œuvre. Pour renforcer la résilience et la sécurité alimentaire des ménages ruraux burundais, il est crucial de créer une plateforme nationale de Système d'Alerte Précoce à l'insécurité alimentaire des ménages intégrant, au-delà des données météorologiques et des prix agricoles, des indicateurs agronomiques validés tels que le taux d'adoption de l'agroforesterie, la superficie cultivée, le nombre de saisons pratiquées et le score d'inefficacité technique. Ce dispositif doit être complété par le recrutement et le déploiement d'agents d'encadrement spécialisés en agroforesterie, afin d'accompagner les ménages dans la conception et la gestion de systèmes agricoles intégrés et durables. Parallèlement, le développement d'Ecoles Pratiques d'Agroforesterie au niveau communal, animées par des agriculteurs-modèles formés, permettra aux producteurs de constater concrètement les bénéfices en termes de fertilité des sols, de diversité alimentaire et de revenus. Enfin, une plateforme numérique nationale, accessible via SMS et applications mobiles, diffusera en temps réel des prévisions météorologiques agricoles, des conseils techniques agroforestiers, les prix locaux et les alertes du SAP, assurant ainsi une réponse rapide, ciblée et adaptée aux réalités territoriales.

7.9.3 Axe 3 : Développement socio-économique pour une diversification inclusive et un revenu vital décent

L'écart persistant entre revenu effectif et revenu vital, particulièrement marqué dans les Plateaux Centraux Humides (ratio REFF/RV = 0,69), souligne que la seule intensification agricole est insuffisante. Il faut combiner agroforesterie, diversification non agricole et inclusion sociale. Pour renforcer la résilience économique et sociale des ménages ruraux burundais, il convient de renforcer l'accès des femmes à la terre, aux plants d'arbres et aux crédits, en appuyant des groupements féminins qui capitalisent sur leur rôle central dans la sécurité alimentaire et la gestion durable des ressources. Enfin, l'extension de programmes d'alphabétisation fonctionnelle et de formation professionnelle, axés sur la transformation alimentaire, l'artisanat, ou l'agrotourisme, doit cibler prioritairement les jeunes ruraux et les femmes, afin de créer des synergies durables entre les filières émergentes et les opportunités d'emploi non agricoles, contribuant ainsi à un revenu vital décent et à une inclusion économique équitable.

7.10 Limites, lacunes et perspectives de la recherche

7.10.1 Limites de la recherche

La recherche entreprise sur le revenu vital durable et la résilience des ménages ruraux au Burundi, bien que rigoureuse dans son approche méthodologique, présente des limites qui méritent d'être soulignées.

Premièrement, la collecte de données a été confrontée à des contraintes logistiques et administratives, telles que la pénurie de carburant et les restrictions relatives à la période précédant le Recensement général de la population. Ces obstacles ont entraîné des retards dans les enquêtes sur le terrain et, dans certains cas, l'exclusion de zones rurales reculées, ce qui a introduit des ajustements dans l'échantillonnage. Certaines collines inaccessibles ont été remplacées par des collines plus accessibles.

Deuxièmement, l'utilisation d'unités de mesure locales non standardisées (sacs, tinettes) pour les données agro-économiques a nécessité des conversions approximatives, introduisant une incertitude dans les estimations des rendements et des revenus. Bien que des tables de conversion aient été établies avec des informateurs locaux, leur variabilité régionale limite la précision des données consolidées.

Troisièmement, la variabilité des aléas climatiques constitue une limite structurelle majeure. L'approche transversale de l'étude montre une situation à un instant t , qui pourrait ne pas refléter pleinement la résilience des ménages face à des chocs exogènes stochastiques comme les sécheresses et les inondations. Cette contrainte temporelle implique que les estimations du revenu vital et de la vulnérabilité sont conditionnées par le contexte climatique spécifique de la période d'enquête, limitant ainsi la généralisation des résultats dans un contexte de variabilité climatique accrue à long terme.

7.10.2 Lacunes de la recherche

Les lacunes conceptuelles et méthodologiques ont été identifiées dans cette recherche, reflétant des opportunités d'amélioration pour des travaux futurs. Tout d'abord, l'étude n'a

pas suffisamment exploré les dimensions genre et intergénérationnelles dans l'analyse de la vulnérabilité et de la résilience. Bien que les résultats indiquent que les ménages dirigés par des femmes sont légèrement moins susceptibles d'appartenir à la catégorie « Score de Consommation Alimentaire Acceptable », l'analyse n'approfondit pas les inégalités d'accès aux ressources (terre, crédits, formation) spécifiques aux femmes ou aux jeunes, qui pourraient jouer un rôle déterminant dans la sécurité alimentaire. Ensuite, l'approche CARI, bien que robuste pour classer les ménages en catégories de sécurité alimentaire, ne prend pas en compte les aspects qualitatifs de la résilience, tels que les stratégies d'adaptation communautaires ou les dynamiques culturelles influençant les choix agricoles. Les normes sociales ou les préférences alimentaires locales n'ont pas été intégrées dans les modèles prédictifs, ce qui limite la compréhension des comportements des ménages face aux chocs. De plus, le système d'alerte précoce proposé, bien qu'innovant, repose sur des hypothèses d'accès à des technologies avancées (SIG, données satellitaires) qui pourraient être irréalisables dans un contexte de ressources limitées au Burundi. Enfin, l'étude n'a pas suffisamment examiné l'impact des conflits fonciers et des migrations internes, pourtant mentionnés comme des facteurs aggravants dans la Dépression du Nord, ce qui constitue une lacune dans l'analyse des chocs sociaux affectant la résilience.

7.10.3 Perspectives de la recherche

Les limites et lacunes identifiées ouvrent la voie à plusieurs perspectives pour approfondir et élargir cette recherche. Premièrement, une extension géographique de l'étude à d'autres zones de moyens d'existence, telles que la Plaine de l'Imbo ou la Haute Altitude du Sud, permettrait de tester la robustesse des modèles prédictifs dans des contextes agro-écologiques variés et de renforcer la généralisation des résultats à l'échelle nationale. Deuxièmement, l'intégration d'une analyse approfondie des dynamiques de genre et intergénérationnelles pourrait enrichir les conclusions en examinant comment les inégalités structurelles façonnent l'accès aux ressources et la résilience. Par exemple, des enquêtes ciblées auprès des femmes et des jeunes agriculteurs pourraient révéler des stratégies d'adaptation spécifiques à ces groupes. Troisièmement, le développement de méthodologies participatives, impliquant davantage les communautés locales dans la conception et la validation du SAP, renforcerait son acceptabilité et son efficacité dans des contextes ruraux. Quatrièmement, l'exploration de technologies à faible coût, telles que des applications mobiles pour la collecte de données ou des capteurs locaux pour le suivi pluviométrique, pourrait pallier les contraintes d'accès aux outils géospatiaux coûteux. Enfin, une analyse longitudinale, basée sur des données collectées sur plusieurs années, permettrait de montrer les tendances temporelles dans la vulnérabilité alimentaire et d'évaluer l'impact à long terme des interventions proposées, comme la diversification agricole ou les programmes de conservation des sols. Ces perspectives, combinées à une collaboration renforcée avec les institutions nationales comme ISABU, et INSBU et internationales comme FAO et PAM, offriraient des opportunités pour transformer les systèmes alimentaires burundais et contribuer durablement à la réalisation des ODD, en particulier l'ODD 2 (faim zéro).

Bibliographie

- [1] V. Voora, C. Larrea, G. Huppé, and F. Nugnes. Standards and investments in sustainable agriculture. Technical report, April 2022.
- [2] Banque Mondiale. Evaluation de la pauvreté au Burundi. Technical report, 2016.
- [3] S. Mpandeli. Contribution of smallholder farmers to food security and opportunities for resilient farming systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7 :1–11, July 2023. doi: 10.3389/fsufs.2023.1149854.
- [4] H. Cochet. *L’agriculture comparée au Burundi : systèmes de production et durabilité*. Éditions Quae, 2020.
- [5] S. Haggblade, P. Hazell, and J. Brown. Farm-nonfarm linkages in rural Sub-Saharan Africa. *World Development*, 17(8) :1173–1201, 1989. doi: 10.1016/0305-750X(89)90232-5.
- [6] Paper, W. and Model, G. Spillover effects of china’s trade and growth shocks on asean countries evidence from a gvar model. Technical report, November 2022.
- [7] MINAGRIE. Plan d’action ministère de l’agriculture et de l’élevage 2015. Technical report, 2015.
- [8] MINEAGRIE. Plan national d’adaptation initial-Burundi-2023. Technical report, 2023.
- [9] A. C. Ruane and C. Rosenzweig. Chapter 5 : Climate change impacts on agriculture : Challenges, opportunities, and agrip frameworks for foresight. In *Agriculture and Food Systems to 2050*, pages 161–191. 2018.
- [10] S. Niragira. *Understanding smallholder farming systems for food security in Burundi*. Phd thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 2016.
- [11] ISTEERBU. Service des études et statistiques démographiques. Technical report, 2017.
- [12] S. Niragira. Optimizing land use among small scale farms through agricultural specialization in the North of Burundi. Master’s thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 2011.
- [13] S. Benjamin, Philippe Roudier, and Seydou Traoré. Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l’Ouest. pages 209–226. 2020.

- [14] S. Alkire and M. E. Santos. Measuring acute poverty in the developing world : Robustness and scope of the multidimensional poverty index. *World Development*, 59 :251–274, 2014. doi : 10.1016/j.worlddev.2014.01.026.
- [15] A. Deaton. *The Great Escape : Health, Wealth, and the Origins of Inequality*. Princeton University Press, 2011.
- [16] J. L. Leroy, Marie Ruel, Edward A. Frongillo, Jody Harris, and Terri J. Ballard. Measuring the food access dimension of food security : A critical review and mapping of indicators. *Food and Nutrition Bulletin*, 36(2) :167–195, 2015. doi : <https://doi.org/10.1177/0379572115581522>.
- [17] J. R. Behrman. The impact of health and nutrition on education and productivity. *Economic Development and Cultural Change*, 65(4) :625–649, 2017. doi : <https://doi.org/10.1086/691471>.
- [18] WHO. Global nutrition targets 2025 : Policy brief series. Technical report, WHO, 2014. Définition de la « faim cachée » (hidden hunger).
- [19] D. D. Headey. Food prices and poverty. *The World Bank Economic Review*, 26(2) :247–274, 2012. doi : <https://doi.org/10.1093/wber/lhr026>.
- [20] C. G. Victora, Rajiv Bahl, Aluísio J. D. Barros, Giovanny V. A. França, Susan Horton, Julia Krasevec, Simon Murch, M. Jeeva Sankar, Neff Walker, Nigel C. Rollins, and The Lancet Breastfeeding Series Group. Breastfeeding in the 21st century : epidemiology, mechanisms, and lifelong effect. *The Lancet*, 387(10017) :475–490, January 2016. doi : [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)01024-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)01024-7).
- [21] R. E. Black, Cesar G. Victora, Susan P. Walker, Zulfiqar A. Bhutta, Parul Christian, Mercedes de Onis, Majid Ezzati, Sally Grantham-McGregor, Joanne Katz, Reynaldo Martorell, Ricardo Uauy, and The Lancet Maternal and Child Nutrition Study Group. Maternal and child nutrition : building momentum for impact. *The Lancet*, 382(9890) :427–451, August 2013. doi : [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60988-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60988-5).
- [22] J. Strauss. Health, nutrition, and economic development. *Journal of Economic Literature*, 36(2) :766–817, 1998. doi : <https://doi.org/10.1257/jel.36.2.766>.
- [23] L. Haddad, H. Alderman, S. Appleton, L. Song, and Y. Yohannes. Reducing child malnutrition : How far does income growth take us? *The World Bank Economic Review*, 17(1) :107–131, 2003. doi : <https://doi.org/10.1093/wber/lhg014>.
- [24] H. Alderman, J. Hoddinott, and B. Kinsey. Long-term consequences of early childhood malnutrition. *Oxford Economic Papers*, 68(3) :782–808, 2016. doi : <https://doi.org/10.1093/oep/gpw016>.
- [25] FAO. The state of food security and nutrition in the world. Technical report, Food and Agriculture Organization, 2022.
- [26] S. Devereux. Social protection for food security. In Stephen Devereux, editor, *Social Protection for Food Security*, pages 1–35. FAO, 2015.

- [27] LICOP. Living income and food security : Evidence from 15 Countries in Sub-Saharan Africa and Southeast Asia. Technical report, LICOP, 2021.
- [28] C. Carletto, P. Corral, and A. Guelfi. Agricultural commercialization and nutrition revisited : Empirical evidence from three African countries. *Food Policy*, 2016. doi: 10.1016/j.foodpol.2016.09.020.
- [29] FAO. The state of food insecurity in the World 2006. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- [30] FAO. The impact of climate variability and extremes on agriculture and food security. an analysis of the evidence and case studies. Technical report, 2018.
- [31] FAO. The state of food security and nutrition in the World 2023. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.
- [32] FAO. The state of food security and nutrition in the world 2023 – Regional Overview. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.
- [33] World Bank. Poverty and shared prosperity 2021. Technical report, World Bank Group, 2021.
- [34] T. Wheeler and Braun, J. Von. Climate change impacts on global food security. *Science*, 508, 2014. doi: 10.1126/science.1239402.
- [35] S. K. Lowder, J. Scoet, and T. Raney. The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms Worldwide. *World Development*, 87 :16–29, 2016. doi: 10.1016/j.worlddev.2015.10.041.
- [36] M. Sheahan and Christopher B. Barrett. Ten striking facts about agricultural factor use in rural Sub-Saharan Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24) :6179–6184, June 2017. doi : <https://doi.org/10.1073/pnas.1613381114>.
- [37] R. J. Hodges. Postharvest losses and waste in developed and less developed countries : opportunities to improve resource use. *Journal of Agricultural Science*, 149 :37–45, 2011. doi: 10.1017/S0021859610000936.
- [38] W. O. Fawole and O. I. Oyewole. Gender disparities in agricultural productivity : A review of the evidence from sub-saharan africa. *Journal of Agricultural Extension*, 17(2) :1–10, 2013.
- [39] G. Alvarado et al. Gender gaps in agricultural productivity : A global review. *Global Food Security*, 23 :29–41, 2019.
- [40] GSP. Status of the world’s soil resources. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.
- [41] A. Elbashir et al. Economic costs of land degradation. *Land Degradation & Development*, 34(2) :401–418, 2023.

- [42] J. Pretty, T. G. Benton, Z. P. Bharucha, L. V. Dicks, C. B. Flora, H. C. J. Godfray, D. Goulson, S. Hartley, N. Lampkin, C. Morris, G. Pierzynski, P. V. V. Prasad, J. Reganold, J. Rockström, P. Smith, and P. Thorne. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1 :441–446, August 2018. doi: 10.1038/s41893-018-0114-0.
- [43] F. Bastagli, Jessica Hagen-Zanker, Luke Harman, Valentina Barca, Georgina Sturge, Matthieu Lagarde, and Luca Pellerano. Cash transfers : What does the evidence say ? a rigorous review of programme impact and of the role of design and implementation features. *World Development*, 112 :60–77, December 2019. doi : <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.07.014>.
- [44] M. Hidrobo, J. Hoddinott, Amber Peterman, Amy Margolies, and Vanessa Moreira. Cash, food, or vouchers? evidence from a randomized experiment in northern ecuador. *Journal of Development Economics*, 133 :91–107, July 2018. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2018.02.005>.
- [45] A. Aysha et al. Digital technologies for resilient food systems. *Food Security*, 16(1) :1–18, February 2024. doi : <https://doi.org/10.1007/s12571-023-01412-3>.
- [46] D. M. Tendall, J. Joerin, B. Kopainsky, P. Edwards, A. Shreck, Q. B. Le, P. Kruetli, M. Grant, and J. Six. Food system resilience : Defining the concept. *Global Food Security*, 7 :17–23, December 2015. doi : <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.08.001>.
- [47] J. L. Rastoin. Pour une sécurité alimentaire durable : refonder la gouvernance de nos systèmes alimentaires. *Systèmes alimentaires / Food Systems*, (7) :17–29, 2022. DOI : <https://doi.org/10.48611/isbn.978-2-406-14229-4.p.0017>.
- [48] P. Pinstrup-Andersen. Nutrition-sensitive food systems : From rhetoric to action. *The Lancet*, 382(9890) :375–376, 2013. doi : 10.1016/S0140-6736(13)61053-3.
- [49] W. Willett, J. Rockström, B. Loken, M. Springmann, T. Lang, S. Vermeulen, T. Garnett, D. Tilman, F. DeClerck, A. Wood, M. Jonell, M. Clark, L. J. Gordon, J. Fanzo, C. Hawkes, R. Zurayk, J. A. Rivera, W. De Vries, L. Majele Sibanda, A. Afshin, A. Chaudhary, M. Herrero, R. Agustina, F. Branca, A. Lartey, S. Fan, B. Crona, E. Fox, V. Bignet, M. Troell, T. Lindahl, S. Singh, S. E. Cornell, K. Srinath Reddy, S. Narain, S. Nishtar, and C. J. L. Murray. Food in the anthropocene : the eat–lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170) :447–492, 2019. doi : 10.1016/S0140-6736(18)31788-4.
- [50] WFP. Food insecurity and displacement : Country-level analysis of afghanistan, ethiopia and libya, 2022. Available at : <https://www.wfp.org/publications>.
- [51] UNICEF. Food security and nutrition in the world : Financing to end hunger, in all its forms, 2024. Available upon request from UNICEF publications.
- [52] WFP. Food consumption score & food consumption score nutritional analysis. Technical report, World Food Programme, Rome, Italy, 2024.

- [53] T. J. Ballard, A. W. Kepple, and C. Cafiero. The food insecurity experience scale : Development of a global standard for monitoring hunger worldwide. *FAO Technical Paper*, 2013.
- [54] FAO. Guidelines for measuring household and individual dietary diversity. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2013.
- [55] D. Maxwell. A tool for rapid measurement of household food security and the impact of food aid programs in humanitarian emergencies. Technical report, Food and Nutrition Technical Assistance Project (FANTA), January 2008.
- [56] World Bank. Poverty and shared prosperity 2022 : Correcting course. Technical report, World Bank Group, 2022.
- [57] R. Anker and M. Anker. *Living Wages and Living Incomes Around the World : A New Methodology*. Edward Elgar Publishing, 2022.
- [58] I. Pyrko and C. Eden. Thinking together : What makes communities of practice work ? *Human Relations*, 70(4) :389–409, 2017. doi : 10.1177/0018726716661040.
- [59] R. Anker and M. Anker. Living income methodology. Technical report, Global Living Wage Coalition, 2020.
- [60] R. Anker and M. Anker. Living income for rural households : Methodology and estimation. Technical report, Global Living Wage Coalition, 2020.
- [61] M. Ostermeier, Gerrie W.J. van De Ven, Arthur W.A. de Valença, Wytse Marinus, Iris de Jager, Katrien K.E. Descheemaeker, and Ken E. Giller. Living income gaps in smallholder agriculture : Benchmarking rural household incomes in low-income countries. *World Development*, 145 :105521, September 2021. doi : <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105521>.
- [62] A. M. Barrett, K. M. Goedert, A. R. Carter, and A. Chaudhari. Spatial neglect treatment : The brain’s spatial-motor aiming systems. *Neuropsychological Rehabilitation*, pages 1–27, 2021. DOI : 10.1080/09602011.2020.1862678.
- [63] T. S. Jayne, Liam Fox, Keith Fuglie, and Nicholas Rada. The future of work in african agriculture. *World Development*, 120 :1–13, August 2019. doi : <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.04.005>.
- [64] C. Poulton and Jonathan Macartney. Agricultural commercialisation, poverty and livelihoods. *Journal of Development Studies*, 56(8) :1433–1450, 2020. doi : <https://doi.org/10.1080/00220388.2019.1654698>.
- [65] B. Vorley et al. The role of smallholder farmers in sustainable supply chains. *World Development*, 107 :124–136, 2018. doi : <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.015>.
- [66] G. W. J. Van De Ven, A. De Valença, W. Marinus, I. De Jager, and K. K. E. Descheemaeker. Living income benchmarking of rural households in low-income countries. pages 729–749, 2021.

- [67] M. Waithaka et al. Cacao farming in côte d’ivoire and ghana : Income gaps and sustainability. *World Development Perspectives*, 23 :100345, 2021. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2021.100345>.
- [68] C. Caribou et al. Living income in cocoa supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 345 :131112, 2022. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131112>.
- [69] B. Chiputwa et al. Sustainability standards and living income in coffee farming. *Ecological Economics*, 162 :51–64, 2019. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.008>.
- [70] F. Mitiku et al. Coffee certification and household welfare in ethiopia. *Food Policy*, 92 :101869, 2020. doi : <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101869>.
- [71] S. Wiggins and Sharada Keats. Smallholder farming in Sub-Saharan Africa. Technical report, Overseas Development Institute, 2015.
- [72] D. Green et al. Price volatility and smallholder bargaining power. *Journal of Agrarian Change*, 20(3) :456–478, 2020.
- [73] M. Ntikazohera. *Écart entre le revenu vital et le revenu réel des ménages ruraux et son implication sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi*. Mémoire de masterr, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2022.
- [74] G. Ndayisenga. Efficience et efficacité technique des caféiculteurs et leur impact sur le revenu vital des ménages ruraux au Burundi. Mémoire de master, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2022.
- [75] ISTEERBU. Annuaire statistique du Burundi 2023-2024. Technical report, 2024.
- [76] F. H. Ferreira, Shaohua Chen, Andrew Dabalen, Yuri Dikhanov, Nada Hamadeh, Dean Jolliffe, Ambar Narayan, Espen B. Prydz, Ana Revenga, Prem Sangraula, Umar Serajuddin, and Kenneth Simler. A global count of the extreme poor in 2012 : data issues, methodology and initial results. *Journal of Economic Inequality*, 14(2) :141–172, June 2016. doi : <https://doi.org/10.1007/s10888-016-9326-8>.
- [77] R. Anker and M. Anker. Living wages and living incomes : Toward a universal methodology. Technical report, Global Living Wage Coalition, 2020.
- [78] H. Megerle, A. Niyonzima, C. Weber, and S. Niragira. Living income : Ausreichendes familieneinkommen in kleinbäuerlichen agroforstbetrieben in Burundi ? *Standort*, 48(1) :28–36, 2024. doi: 10.1007/s00548-023-00905-7.
- [79] Iv, R. and Gen, T. Promotion de l’emploi rural pour réduire la pauvreté. Technical report, 2008.
- [80] R. M. Busch, T. Brünger, K. Arrotta, L. Ferguson, J. K. Janecek, and S. J. Swanson. Note : This preprint reports new research that has not been certified by peer review and should not be used to guide clinical practice. 2025.

- [81] A. Niyonzima, M. D’Haese, H. Megerle, J. Ndimubandi, N. Nimenya, S. Ngendakumana, and S. Niragira. Measuring the technical efficiency and effectiveness of small-scale farmers and their impact on rural household food security in Burundi. *Applied Mathematical Sciences*, 18(10) :449–466, 2024. doi : <https://doi.org/10.12988/ams.2024.918615>.
- [82] M. Syarofi, P. Aprilia, and F. Larasati. An analysis of soybean price fluctuations and their impact on tempeh size and sales revenue. 4(2) :92–103, 2025. doi: 10.22219/bimantara.v4i02.42386.
- [83] L. Mychajluk. Learning to live and work together in an ecovillage community of practice. *European Journal for Research on the Education and Learning of Adults*, 8(2) :179–194, 2017. doi: 10.3384/rela.2000-7426.rela9092.
- [84] T. Abate, B. Shiferaw, A. Menkir, D. Wegary, Y. Kebede, K. Tesfaye, M. Kassie, G. Bogale, B. Tadesse, and T. Keno. Factors that transformed maize productivity in Ethiopia. *Food Security*, 7(5) :965–981, 2015. doi : 10.1007/s12571-015-0488-z.
- [85] F. Hütz-Adams, C. Huber, I. Knoke, D. P. Morazán, and M. Mürlebach. Strengthening the competitiveness of cocoa production and improving the income of cocoa producers in West and Central Africa. Technical report, Institut Für Ökonomie Und Ökumene, 2016.
- [86] C. Béné, Richard G. Wood, Andrew Newsham, and Mark Davies. Resilience : New utopia or new tyranny ? reflection about the potentials and limits of the concept of resilience in relation to vulnerability reduction programmes. *IDS Working Papers*, 2012(405) :1–61, 2012. doi : <https://doi.org/10.1111/j.2040-0209.2012.00405.x>.
- [87] W. N. Adger, Jon Barnett, Katrina Brown, Natasha Marshall, and Karen O’Brien. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(2) :112–117, February 2013. doi : <https://doi.org/10.1038/nclimate1666>.
- [88] F. Miller, Henny Osbahr, Emily Boyd, Frank Thomalla, Smita Bharwani, Gina Ziervogel, Brian Walker, Jörn Birkmann, Sander van der Leeuw, Johan Rockström, Jochen Hinkel, Thomas Downing, Carl Folke, and Donald Nelson. Resilience and vulnerability : Complementary or conflicting concepts ? *Ecology and Society*, 15(3) :11, 2010. doi : <https://doi.org/10.5751/ES-03378-150311>.
- [89] I. Scoones. Sustainable rural livelihoods : A framework for analysis. Technical Report IDS Working Paper 72, Institute of Development Studies, 2001.
- [90] A. Barr, T. Owens, and A. Perera. Collective management of an environmental threat when exposure is heterogeneous – a complementary methods approach. *World Development*, 135 :105078, 2020. doi : 10.1016/j.worlddev.2020.105078.
- [91] S. M. Helfand and E. S. Levine. Farm size and the determinants of productive efficiency in the Brazilian Center-West. *Agricultural Economics*, 1 :241–249, 2004.
- [92] P. Hugon. Transferts monétaires et gestion communautaire des ressources naturelles en Afrique. *Afrique Contemporaine*, 213(1) :67–84, 2005. doi : <https://doi.org/10.3917/afco.213.0067>.

- [93] R. H. Mamy. Revenu et moyens d'existence : analyse et proposition d'amélioration de méthodologie de suivi et d'évaluation des conditions de vie des ménages ruraux. 2014.
- [94] P. Mperejekumana, L. Shen, S. Zhong, F. Muhirwa, A. Nsabiyeze, J. M. V. Nsi-gayehe, and A. Nyirarwasa. Assessing the capacity of the water–energy–food nexus in enhancing sustainable agriculture and food security in Burundi. *Sustainability*, 15(19), 2023. doi: 10.3390/su151914117.
- [95] MINAGRIE. Programme national de sécurité alimentaire. Technical report, 2015.
- [96] Raphaël Mbombo. Pertinence économique de la stabilité des marchés agroalimentaires. Master's thesis, Université Laval, Québec, Canada, 2019.
- [97] E. Nchanji, E. Nduwarugira, B. Ndabashinze, A. Bararyenya, M. B. Hakizimana, V. Nyamolo, and C. Lutomia. Gender norms and differences in access and use of climate-smart agricultural technology in Burundi. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 2023. doi: 10.3389/fsufs.2023.1040977.
- [98] J. S. Okonya, A. Petsakos, V. Suarez, A. Nduwayezu, D. Kantungeko, G. Blomme, J. P. Legg, and J. Kroschel. Pesticide use practices in root, tuber, and banana crops by smallholder farmers in Rwanda and Burundi. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3) :1–18, 2019. doi: 10.3390/ijerph16030400.
- [99] IFAD. Profil rural du Burundi. Technical report, IFAD, Rome, 2022.
- [100] PND. Plan national de développement du Burundi (PND Burundi 2018-2027). Technical report, 2018.
- [101] FIDA. République du burundi programme national pour la sécurité alimentaire et le développement rural de l'imbo et du moso (pnsadr-im) rapport de conception détaillée. Technical report, 2014.
- [102] L. I. Janssens de Bisthoven, O. Nkurikiye, A. Rochette, J. Slimbrouck, A. Vandommele, L. Ndayikeza, J. Nkengurutse, and J. Hugé. What does resilience of social–ecological systems mean in Burundi? a qualitative approach. *Land*, 14(12) :2301, November 2025. doi : <https://doi.org/10.3390/land14122301>.
- [103] République du Burundi. *Vision Burundi 2025*. Ministère de la Planification du Développement, Bujumbura, 2025.
- [104] République du Burundi. Plan national de développement du Burundi (PND Burundi 2018-2027). Technical report, 2018.
- [105] J. Rigg. The sustainable development goals (sdgs). In *The Companion to Development Studies*, pages 253–257. 2024.
- [106] MEEATU. Cinquième rapport du Burundi à la convention sur la diversité biologique. Technical report, 2014.
- [107] K. K. Geidam, N. A. Adnan, and Alhaji Umar, B. Analysis of land use land cover changes using remote sensing data and geographical information systems (gis) at an Urban Set up of Damaturu, Nigeria. *Journal of Science and Technology*, 12(2), 2020. doi: 10.30880/jst.2020.12.02.003.

- [108] E. Barankanira, I. Nkurunziza, S. Bisore, and D. Niyongabo. Factors influencing households' satisfaction with drinking water availability in Bujumbura municipality, Burundi. *Water Practice and Technology*, 19(10) :3895–3908, 2024. doi : 10.2166/wpt.2024.205.
- [109] Banque Africaine de Développement. Perspectives économiques en afrique 2024 – Burundi. Technical report, Banque Africaine de Développement, 2024.
- [110] Banque mondiale. Burundi – rapport économique. Technical report, Banque mondiale, 2022.
- [111] UNEP. State of the environment in the Great Lakes Region. Technical report, UNEP, 2024.
- [112] UNESCO. World heritage sites – lake tanganyika and Kibira National Park. Technical report, UNESCO, 2023.
- [113] FAO. Global forest resources assessment 2020 – Burundi. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [114] République du Burundi. Plan national d'adaptation aux changements climatiques du Burundi. Technical report, Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, 2023.
- [115] G. Vico, S. Manzoni, Libérate Nkurunziza, Kevin Murphy, and Martin Weih. Trade-offs between seed output and life span – a quantitative comparison of traits between annual and perennial congeneric species. *New Phytologist*, 209(1) :104–114, January 2016. doi : <https://doi.org/10.1111/nph.13574>.
- [116] P. Jeanneaux, F. Purseigle, L. Bodiguel, and B. Hervieu. Fragmentation du modèle de l'exploitation familiale et nouvelles structurations des relations capital-travail-foncier en agriculture. *Ae&S*, 10(2) :1–14, 2020.
- [117] A. L. Goll. *The Securitisation of Ethnic Identities and the 1993 Genocide in Burundi : An Interpretative Case Study*. PhD thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 2021.
- [118] M. Van Leeuwen, J. Nindorera, Kambale Nzweve, J. L., and C. Corbijn. The 'local turn' and notions of conflict and peacebuilding–reflections on local peace committees in Burundi and Eastern DR Congo. *Peacebuilding*, 8(3) :279–299, 2020. doi: 10.1080/21647259.2019.1633760.
- [119] H. Nusura. Agricultural land use, the fundamental challenge for food security and sustainable development in Burundi. In *African Crop Science Conference Proceedings*, volume 10, pages 49–52, 2011.
- [120] P. Batungwanayo, M. Vanclooster, and A. F. Koropitan. Response of seasonal vegetation dynamics to climatic constraints in northeastern Burundi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(9) :151–181, 2020. doi : 10.4236/gep.2020.89010.
- [121] SAN. Strategie agricole nationale au Burundi. Technical Report 2, 2018.

- [122] ENAB. Enquête Nationale Agricole du Burundi 2011-2012. Technical report, 2012.
- [123] L. Nzeyimana, Å. Danielsson, L. Andersson, and V. B. Gyberg. Success and failure factors for increasing Sub-Saharan African smallholders' resilience to drought through water management. *International Journal of Water Resources Development*, 39(2) :273–293, 2023. doi: 10.1080/07900627.2021.1991285.
- [124] C. Bolin, K. Fritzsche, S. Ruzima, S. Schneiderbauer, D. Backer, L. Pedoth, and S. Liersch. Analyse intégrée de la vulnérabilité au burundi. volume i : Introduction et analyse intégrée de vulnérabilité face au changement climatique au niveau national. Technical report, 2014.
- [125] S. Liersch, R. Rivas, and K. Fritzsche. Climate change projections for Burundi. Technical report, 2015.
- [126] A. Tall, N. K. Dampha, N. N. Ndayiragije, Berg, M. von, A. Manirambona, L. Raina, and M. S. Nininahazwe. Tackling climate change, land degradation and fragility : Diagnosing drivers of climate and environmental fragility in Burundi's colline landscapes : Towards a multi-sector investment plan to scale up climate resilience. Technical report, 2022.
- [127] MEEATU. Stratégie nationale et plan d'actions sur le changement climatique. Technical report, March 2018.
- [128] S. Musonerimana, N. Anicet, P. Ndayihanzamaso, E. Semenova, M. Niyuhire, M. Sendegeya, S. Kaboneka, S. Ndiokubwayo, O. Nduwimana, M. Beun, et al. Maps of major soil parameters : A reference for monitoring soil fertility in burundi. *Sustainable Environment*, 11(1) :2521932, 2025.
- [129] L. Levard. La commercialisation des produits agricoles vivriers au Burundi – pertinence et conditions de succès de possibles initiatives s'inspirant de l'expérience tanzanienne des marchés de gros. Technical report, African Region, 2014.
- [130] Vision Burundi. Vision burundi 2025. Technical report, 2025.
- [131] E U and Gouvernement du Burundi. Résilience et diversification des activités économiques. Technical report, 2022.
- [132] C. Irankunda. Le secteur informel au Burundi. cas du commerce ambulant en Mairie de Bujumbura de 2013–2023. Master's thesis, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2024.
- [133] F. Harerimana. *Analyse des déterminants des taux d'intérêt en microfinance : cas du Burundi*. PhD thesis, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2023.
- [134] République du Burundi. Bulletin scientifique de l'institut national pour l'environnement et la conservation de la nature. Technical report, 2013.
- [135] IMF. World economic outlook – commodity price fluctuations. Technical report, IMF, 2022.
- [136] F. Ruf. Living income differential and decline in income of cocoa producers in Côte d'Ivoire. *Cahiers Agricultures*, 31, 2022. doi: 10.1051/cagri/2022022.

- [137] D. Gahungu. *Analyse des déterminants de transfert d'argent reçu par les ménages du Burundi*. PhD thesis, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2020.
- [138] A. Castaldo, P. Deshingkar, and A. McKay. Internal migration, remittances and poverty : evidence from Ghana and India. Technical report, Migrating out of Poverty Research Programme Consortium, September 2012.
- [139] UNICEF. The state of the world's Children – Burundi. Technical report, United Nations Children's Fund, 2022.
- [140] IPCC. Climate change 2021 : Impacts, adaptation and vulnerability. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [141] M. G. Nduwayo. *Etude des déterminants de l'efficacité organisationnelle des associations sans but lucratif bénéficiaires des microcrédits au Burundi : une approche d'alignement stratégiques*. Thèse de doctorat, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2016.
- [142] D. Gahungu and J. C. Nsabimana. La contribution des institutions de micro finance au financement des petites et moyennes entreprises et l'autonomisation des Femmes au Burundi. Technical Report 75/13, Rapport de Recherche du FR-CIEA, 2013.
- [143] L. Niyokindi. *Les facteurs d'émergence de l'entrepreneuriat social en Afrique : Cas du Burundi*. PhD thesis, Université de Liège, Liège, Belgique, 2017.
- [144] A. Niyokwizera. Analyse des effets des coopératives agricoles sur les revenus des ménages ruraux de la commune Gihanga au Burundi. Master's thesis, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 2023.
- [145] P. C. Seberege and Pyt Douma. Étude sur le secteur informel au Burundi. Rapport d'étude, Ministère des Affaires Étrangères / RVO, Bujumbura, Burundi, 2021.
- [146] P. Uvin. *Aiding Violence : The Development Enterprise in Rwanda*. Kumarian Press, West Hartford, CT, 1998.
- [147] M. S. Kimenyi et al. Community savings groups and women's economic empowerment in East Africa. *World Development Perspectives*, 2 :15–22, 2016.
- [148] ICRAF / World Agroforestry. Agroforestry for climate resilience and livelihoods in east africa. Technical report, World Agroforestry Centre, Nairobi, 2020.
- [149] P.K.R. Nair, B.M. Kumar, and V.D. Nair. *Agroforestry for Sustainable Land Use and Climate Change Mitigation*. Springer, Cham, 3 edition, 2021.
- [150] F. Ndayisaba, C. Ruranga, and P. Nduwayezu. Coffee-based agroforestry systems and household resilience in the highlands of burundi. *Agroforestry Systems*, 95 :1125–1140, 2021.
- [151] Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage du Burundi. Manuel de l'agroforesterie au burundi : Espèces, techniques et bonnes pratiques. Technical report, 2018.
- [152] J. K. Kuma, J. Kibala, Économétrie, K., Manuel, A., and Licence, S. *Econométrie Appliquée : Manuel des cas pratiques sur EViews et Stata*. 2018.

- [153] S. Ndiwokubwayo, R. Niyongabire, and S. Kaboneka. 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. 23(3) :14–24, 2023.
- [154] J. D. Nkurunziza and F. Ngaruko. Explaining growth in Burundi : 1960 – 2000. Technical report, Norwegian Refugee Council, April 2002.
- [155] P. Batungwanayo, V. Habarugira, M. Vanclooster, J. Ndimubandi, F. Koropitan, A., and Nkurunziza, J. de D. Confronting climate change and livelihood : smallholder farmers' perceptions and adaptation strategies in northeastern Burundi. *Regional Environmental Change*, 23(1), 2023. doi : 10.1007/s10113-022-02018-7.
- [156] S. R. Ajani. An assessment of dietary diversity in six Nigerian States. *African Journal of Biomedical Research*, 13(3) :161–167, September 2010. doi : <https://doi.org/10.4314/ajbr.v13i3.710>.
- [157] P. Danel, P. Traissac, and H. Dabire. Are dietary diversity scores related to the socio-economic and anthropometric status of women living in an urban area in Burkina Faso? *Public Health Nutrition*, 11(2) :132–141, 2007. doi: 10.1017/S1368980007000043.
- [158] G. A. Huppé, S. Shaw, J. Dion, and V. Voora. Food price inflation and food security : A Morocco case study. Technical report, January 2013.
- [159] A. Woodfine. L'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets en Afrique Subsaharienne au moyen des pratiques de gestion durable des terres. Technical report, 2009.
- [160] F. Bourguignon, M. Fournier, and M. Gurgand. Selection bias corrections based on the multinomial logit model : Monte carlo comparisons. *Journal of Economic Surveys*, 21(1) :174–205, 2007. doi: 10.1111/j.1467-6419.2007.00503.x.
- [161] R. Anker and M. Anker. *Living Wages Around the World*. 2017.
- [162] K. Dawani, A. Sayeed, R. Anker, and M. Anker. Updating anker methodology living wage estimates : Methodological issues and guidelines. Technical report, January 2019.
- [163] B. W. Silverman. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Number 26 in Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman and Hall, London, 1986.
- [164] E. Parzen. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 33(3) :1065–1076, 1962. doi : <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>.
- [165] R. F. Engle. Wald, likelihood ratio, and lagrange multiplier tests in econometrics. In *Handbook of Econometrics*, volume 2, pages 1–52. 1984.
- [166] S. Shukla, R. Arsenault, K., A. Hazra, C. Peters-Lidard, D. Koster, R., F. Davenport, T. Magadzire, C. Funk, S. Kumar, A. McNally, A. Getirana, G. Husak, B. Zaitchik, J. Verdin, Dieudonne Nsadisa, F., and I. Becker-Reshef. Improving

- early warning of drought-driven food insecurity in Southern Africa using operational hydrological monitoring and forecasting products. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4) :1187–1201, 2020. doi: 10.5194/nhess-20-1187-2020.
- [167] M. Arru. *Introduction de connaissances relatives aux comportements des populations dans les systèmes d’alerte précoce*. PhD thesis, École doctorale de Dauphine – ED 543, Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University, 2019.
- [168] J. Hoddinott, H. Alderman, J. R. Behrman, L. Haddad, and S. Horton. The economic rationale for investing in stunting reduction. *Maternal and Child Nutrition*, 16(2) :e12980, 2020. doi: 10.1111/mcn.12980.
- [169] S. A. French, M. Wall, and N. R. Mitchell. Household income differences in food sources and food items purchased. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 7 :1–8, 2010. doi: 10.1186/1479-5868-7-77.
- [170] Ligne, V. E. N. *FAO et les objectifs de développement durable*. 2022. doi : 10.4060/cc2063fr.
- [171] M. Sekatane. An application of different methodologies for measuring poverty in Sharpeville township. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 4(14) :67–74, November 2013. doi : <https://doi.org/10.5901/mjss.2013.v4n14p67>.
- [172] A. Semykina and J. M. Wooldridge. Estimating panel data models in the presence of endogeneity and selection. *Journal of Econometrics*, 157(2) :375–380, 2010. doi: 10.1016/j.jeconom.2010.03.039.
- [173] Resilience, D. Transforming resilience-building today for sustainable futures tomorrow. Technical report, August 2021.
- [174] P. Dugué, E. Vall, P. Lecomte, H. Klein, and D. Rollin. Évolution des relations entre l’agriculture et l’élevage dans les savanes d’Afrique de l’Ouest et du Centre : un nouveau cadre d’analyse pour améliorer les modes d’intervention et favoriser les processus d’innovation. *OCL*, 11(4-5) :268–276, 2004. doi : <https://doi.org/10.1051/ocl.2004.0268>.
- [175] P. Bamber, A. Abdulsamad, and G. Gereffi. Burundi in the Agribusiness Global Value Chain. Technical report, Duke University Center on Globalization, Governance, and Competitiveness, February 2014. doi : 10.13140/RG.2.1.3194.6329.
- [176] S. W. Barrientos. ‘labour chains’ : Analysing the role of labour contractors in global production networks. *Journal of Development Studies*, 49(8) :1058–1071, August 2013. doi : 10.1080/00220388.2013.780040.
- [177] S. Wiggins, J. Kirsten, and L. Llambí. The future of small farms. *World Development*, 38(10) :1341–1348, 2010. doi: 10.1016/j.worlddev.2009.06.013.
- [178] C. Afss. L’agriculture durable, un avenir pour la jeunesse africaine. 7 :1–6, 2009.
- [179] World Bank. Poverty and shared prosperity 2020 : Reversals of fortune. Technical report, World Bank Group, 2020. doi : 10.1596/978-1-4648-1602-4.

- [180] F. Huppé et al. Sustainable agricultural practices and income diversification. *Agricultural Economics Review*, 2013.
- [181] G. F. H. Kramer, E. V. Martinez, N. D. Espinoza-Orias, K. A. Cooper, M. Tyszler, and H. Blonk. Comparing the performance of bread and breakfast cereals, dairy, and meat in nutritionally balanced and sustainable diets. *Frontiers in Nutrition*, 5 :1–9, June 2018. doi: 10.3389/fnut.2018.00051.
- [182] S. Aïssatou. Insécurité alimentaire au Burundi : causes et conséquences. *Revue Africaine de Développement*, 42(3) :145–167, 2018.
- [183] United Nations. The state of food security and nutrition in the world 2021. Technical report, United Nations, 2021. doi : 10.4060/cb4474en.
- [184] E. Lefoll, Isabel Günther, and Marcella Veronesi. Low demand for fair trade chocolate : Lack of efficiency, attention, knowledge or trust ? In *Beiträge zur Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik 2022 : Big Data in Economics*, pages 1–55, Kiel, Hamburg, 2022. Verein für Socialpolitik / German Economic Association.
- [185] N. Prudence, R. B. Michel, and G. Mergeai. Relations cultures vivrières – cultures de rente et dynamiques agraires au Burundi : une étude de cas à partir de trois régions agro-écologiques. 2005.
- [186] S. Haggblade, P. Hazell, and T. Reardon. The rural non-farm economy : Pathway out of poverty or pathway in ? *World Development*, 28(8) :1417–1434, 2000. doi : 10.1016/S0305-750X(00)00039-5.
- [187] P. Rudaz. *Diversification agricole et sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*. PhD thesis, 2019.
- [188] M. Tyszler, N. Bricas, and D. Requier-Desjardins. Combinaison de cultures et gestion des risques climatiques en afrique. *Cahiers Agricultures*, 27(4) :450–459, 2018.
- [189] FIDA. Rapport sur le développement rural en afrique de l’est. Technical report, FIDA, 2011.
- [190] Y. Waarts, V. Janssen, and L. Ge. Coffee production and resilience in east africa : Challenges and opportunities. *Agricultural Systems*, 215 :103–118, 2024.
- [191] J. E. Bidou, I. Droy, and J. Egg. Inondations et vulnérabilité agricole dans la dépression du nord. Technical report, Institut des Sciences et Techniques de l’Environnement, 1991.
- [192] FAO. The state of food security and nutrition in the world 2019. Technical report, FAO, 2019. doi : 10.4060/CA5162EN.
- [193] D. Maxwell, B. Vaitla, and J. Coates. How do indicators of household food insecurity measure up ? an empirical comparison from ethiopia. *Food Policy*, 47 :107–116, 2014. doi : 10.1016/j.foodpol.2014.04.003.
- [194] S. W. Barrientos. Social transfers and agricultural support in east africa : Evidence from kenya and rwanda. *Journal of Development Studies*, 49(4) :517–533, 2013.

- [195] E. Niyonzima. Systèmes d'alerte précoce et coordination institutionnelle au rwanda. *Revue Est-Africaine de l'Environnement*, 12(1) :55–72, 2017.
- [196] Aïssatou Sène Sady. Modélisation statistique du risque de vulnérabilité des ménages agricoles au Sénégal : prédiction et alerte précoce à l'insécurité alimentaire. Master's thesis, Université Alioune Diop de Bambey, Bambey, Sénégal, 2018.
- [197] A. Fountain and F. Hutz-Adams. Agricultural monitoring and early warning systems in burundi. Technical report, International Institute for Environment and Development, 2022.

Annexe A : DESCRIPTION GENERALE DES ZONES DES MOYENS D'EXISTENCE SELON LA FAO

Cette annexe présente une description détaillée des neuf zones de moyens d'existence du Burundi, classées selon leurs caractéristiques agro-écologiques, leurs systèmes de production, leurs sources de revenus et les principaux défis auxquels elles sont confrontées. Les données sont présentées sous forme de tableaux synthétiques pour faciliter la comparaison entre les différentes zones.

Zone 1 : Buragane

TABLEAU A.1 – Caractéristiques de la zone Buragane

Caractéristique	Description
Géographie	Zone agro-pastorale située au sud du Burundi, frontalière de la Tanzanie. Relief vallonné (1440-1800 m d'altitude). Précipitations : 1100-1400 mm/an. Sol : argile sableuse fertile mais sujette à l'érosion.
Cultures vivrières	Manioc, Haricots, Patates douces, Colocase, Maïs, Riz
Cultures vendues	Bananes, Manioc, Haricots, Maïs, Colocase, Patate douce
Elevage	Chèvres, Bétail, Porcs, Volaille
Sources de revenus	Travail journalier, Vente des cultures, Commerce, Ventes du bétail, Vente de la main d'œuvre agricole

Marchés principaux	Cultures : Makamba, Mabanda, Murenge (Makamba), Nyange (Makamba) Elevage : Musenye (Mabanda)
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : dépendent des achats et de l'assistance humanitaire Ménages aisés : s'appuient sur leur production
Aléas	Déficit hydrique, Maladies des cultures, Érosion, Inondations, Maladies du bétail
Particularités	Position stratégique favorisant le commerce transfrontalier avec la Tanzanie. Défis : épizooties, maladies des cultures dues aux mouvements transfrontaliers, réinsertion problématique des rapatriés.

Zone 2 : Crête Congo Nil

TABLEAU A.2 – Caractéristiques de la zone Crête Congo Nil

Caractéristique	Description
Géographie	Zone montagneuse (1000-1800 m) dans une bande étroite du nord-ouest au sud. Topographie abrupte. Précipitations : 1000-1250 mm/an. Sols latéritiques fertiles.
Cultures vivrières	Manioc, Haricots, Patates douces, Maïs, Petits pois, Colocases
Cultures vendues	Bananes, Patates douces, Haricots, Manioc, Petits pois, Produits maraîchers, Palmier à huile (nantis), Café (nantis)
Elevage	Bovins, Chèvres, Porcs, Volaille
Sources de revenus	Vente des cultures, Travail journalier, Vente de bétail
Marchés principaux	Muzinda (Imbo), Mugina, Musigati, Muhuta, Buyengero, Nyabiraba, Mutambu (gros bétail), Mubimbi (porcs), Ndora (chèvres)
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : dépendent du marché pour leur alimentation Ménages aisés : pratiquent des cultures de contre-saison irriguées
Aléas	Glissements de terrain, Érosion, Grêle, Maladies des cultures, Volatilité des prix (café), Inondations bas-fonds, Vents violents
Particularités	Aide alimentaire limitée et irrégulière via cantines scolaires ou aides communautaires, principalement pour les plus vulnérables et rapatriés.

Zone 3 : Dépression de l'Est

TABLEAU A.3 – Caractéristiques de la zone Dépression de l'Est

Caractéristique	Description
Géographie	Région des plates savanes vertes, extrême Est du Burundi, frontalière de la Tanzanie. Altitudes : 1125-1500 m. Température : 28-30°C. Précipitations : 1100-1400 mm/an. Sols latéritiques fertiles (oxisols).
Cultures vivrières	Manioc, Maïs, Haricots, Sorgho, Patates douces, Bananes
Cultures vendues	Manioc, Haricots, Sorgho, Arachides, Riz, Palmier à huile (nantis)
Elevage	Chèvres, Porcs, Bovins, Volaille
Sources de revenus	Vente des cultures, Travail journalier, Vente de bétail
Marchés principaux	Kayogoro, Kinyinya, Gisuru, Kirehe (Mishiha), Twinkwavu (Cendajuru)
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : consomment davantage de patates douces Ménages aisés : consomment davantage de haricots
Aléas	Déficit hydrique, Maladies des cultures, Inondations (tous les cinq ans environ)
Particularités	Zone excédentaire. Rapatriement stimule l'économie grâce aux terres arables disponibles (Giharo, Bukemba, Mishiha, Cendajuru).

Zone 4 : Dépression du Nord

TABLEAU A.4 – Caractéristiques de la zone Dépression du Nord

Caractéristique	Description
Géographie	Extrême Nord-Est, paysage vallonné avec rivières se jetant dans deux lacs frontaliers du Rwanda. Température : 27-29°C. Précipitations : 800-1000 mm/an. Savane boisée sur sols latéritiques fertiles. Population dense.
Cultures vivrières	Manioc, Bananes, Patates douces, Haricots, Maïs, Riz
Cultures vendues	Sorgho, Bananes, Manioc, Haricots, Maraîchage, Maïs, Riz
Elevage	Chèvres, Porcs, Bétail, Volaille
Sources de revenus	Vente de cultures, Travail manuel, Ventes de bétail, Commerce
Marchés principaux	Kabanga, Kirundo Centre, Giteranyi, Ruhehe, Busoni-Rulase, Marembo, Gatare, Ntega centre, Ruza
Sécurité alimentaire	Manioc = principale nourriture. Alimentation majoritairement issue de la production propre, complétée par des achats.
Aléas	Déficit hydrique, Maladies des cultures, Pluies excessives (occasionnellement)
Particularités	Zone à capacité excédentaire. Petites exploitations agricoles dues à la population dense.

Zone 5 : Haute Altitude du Nord

TABLEAU A.5 – Caractéristiques de la zone Haute Altitude du Nord

Caractéristique	Description
Géographie	Zone montagneuse du Nord-Ouest, limitrophe de la Crête Congo Nil. Forêts denses favorisant microclimat humide. Précipitations : 1400-1600 mm/an. Températures modérées à fraîches. Sols acides, modérément fertiles.
Cultures vivrières	Patates douces, Maïs, Bananes, Haricots/petit pois, Pomme de terre, Blé, Légumes
Cultures vendues	Patates douces, Haricots/petit pois, Thé, Bananes, Pomme de terre, Maïs, Légumes, Fruits
Elevage	Bovins, Chèvres, Porcs, Volaille, Lapins, Cochons d'Inde
Sources de revenus	Vente de cultures, Ventes de bétail, Travail manuel, Vente de bois, Travail dans usines de thé et minoterie (pauvres)
Marchés principaux	Kayanza, Kabarore (petits ruminants), Bugarama (bétail), Le long de la R1 (fruits et légumes)
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : dépendent fortement du marché et du paiement en nourriture pour leur travail Ménages aisés : production diversifiée
Aléas	Grêle, Vents forts, Maladies des cultures, Glissements de terrain
Particularités	Route Bujumbura-Rwanda facilite la commercialisation. Population dense. Main-d'œuvre occasionnelle vers Bujumbura.

Zone 6 : Haute Altitude du Sud

TABLEAU A.6 – Caractéristiques de la zone Haute Altitude du Sud

Caractéristique	Description
Géographie	Zone Sud des Hautes Altitudes, bordant la Crête Congo Nil à l'Est. Précipitations : 1200-1400 mm/an. Températures modérées à fraîches. Sols productifs mais moins fertiles qu'au Nord.
Cultures vivrières	Patates douces, Maïs, Bananes, Haricots, Pomme de terre
Cultures vendues	Patates douces, Bananes, Haricots, Pomme de terre, Maïs
Elevage	Chèvres et moutons, Bétail, Volaille
Sources de revenus	Vente de cultures, Ventes de bétail, Travail journalier, Vente d'arbres, Charbon de bois
Marchés principaux	Matana (bétail), Ruvibago (cultures), Tora, Bururi
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : production ne couvre pas leurs besoins, dépendent du marché Privilégie la consommation domestique sur la commercialisation
Aléas	Grêle, Vents forts, Maladies des cultures
Particularités	Population moins dense qu'au Nord. Pâturages étendus. Réseau routier limité freinant la commercialisation. Transferts d'argent urbains soutiennent l'éducation.

Zone 7 : Plaine de l'Imbo

TABLEAU A.7 – Caractéristiques de la zone Plaine de l'Imbo

Caractéristique	Description
Géographie	Zone plate et basse (780-1000 m) de l'Ouest, longeant le lac Tanganyika. Chaude (28-32°C) et sèche (<900 mm/an). Sols lithosols alluviaux fertiles.
Cultures vivrières	Manioc, Riz, Haricots, Maïs
Cultures vendues	Riz, Manioc, Tomates, Bananes, Maïs, Palmier à huile (Rumonge et Nyanza-lac)
Elevage	Chèvres, Porcs, Bétail, Volaille
Sources de revenus	Vente de cultures, Ventes de bétail, Travail journalier, Vente d'arbres, Charbon de bois, Extraction des moellons des rivières et carrières
Marchés principaux	Non spécifié dans les données
Sécurité alimentaire	Zone déficitaire, dépendante d'une aide alimentaire annuelle. Pauvres complètent avec la pêche.
Aléas	Grêle, Vents forts, Maladies des cultures, Déficits hydriques, Inondations
Particularités	Bon réseau routier, commerce transfrontalier avec la RDC. Proximité du lac Tanganyika fournit poissons et revenus via la pêche. Impact économique marqué des rapatriés (Rumonge, Nyaza-Lac).

Zone 8 : Plateau Centraux Humides

TABLEAU A.8 – Caractéristiques de la zone Plateau Centraux Humides

Caractéristique	Description
Géographie	Zone agro-pastorale du centre, vallonnée (1400-1800 m). Pluviométrie moyenne. Une des principales productrices de café. Forte densité de population (0,2 ha pour 6-7 personnes).
Cultures vivrières	Patate douce/pomme de terre, Maïs, Riz, Haricots, Manioc, Bananes
Cultures vendues	Haricots, Riz, Maïs, Café, Bananes, Patates douces, Pommes de terre, Manioc, Avocat
Elevage	Chèvres, Bovins, Porcs, Volaille
Sources de revenus	Travail journalier, Vente des cultures, Commerce, Ventes du bétail
Marchés principaux	Cultures : Gitega, Mutaho, Ngozi Bétail : Zege (Gitega), Gashikanwa (Ngozi)
Sécurité alimentaire	Ménages pauvres : reposent principalement sur les achats Ménages aisés : reposent sur leur production
Aléas	Déficit hydrique, Érosion du sol, Maladies des cultures, Maladies du bétail
Particularités	Sols utilisés pour production de briques, tuiles, poterie et carreaux. Migration fréquente vers Bujumbura et Rumonge. Peu de rapatriement.

Zone 9 : Plateau Secs de l'Est

TABLEAU A.9 – Caractéristiques de la zone Plateau Secs de l'Est

Caractéristique	Description
Géographie	Zone Est, collines onduleuses, vallées plates et marécages. Altitude : 1200-1800 m. Précipitations : 1100-1400 mm/an (souvent retardées). Sols argilo-sableux acides, majoritairement infertiles.
Cultures vivrières	Maïs, Bananes, Haricots, Patates douces, Pommes de terre
Cultures vendues	Bananes, Riz, Avocats, Patates douces
Elevage	Volailles, Chèvres, Bovins
Sources de revenus	Travail journalier (migration vers le nord, Tanzanie, Rwanda), Ventes des cultures, Ventes des volailles, Commerce, Ventes du bétail
Marchés principaux	Cultures : Kirehe, Gasenyi (Gisagana), Musingo Bétail : Shinge (Kigambo), Kirehe (Mishiha), Nyuro (Gisogara)
Sécurité alimentaire	Nécessite une aide humanitaire annuelle pour les pauvres. Alimentation provenant principalement des achats et de la production propre.
Aléas	Insuffisance hydrique, Maladies des cultures, Maladies du bétail, Érosion/glissements de terrain
Particularités	Bananes et riz = principales cultures de rente. Pauvres louent des parcelles ou travaillent en métayage. Faible taux de rapatriement.

Annexe B : CURRICULUM VITAE



Niyonzima Audace est né en 1990 sur la colline Gihoma, dans la commune et province de Ngozi. Il a débuté son parcours scolaire à l'école primaire de Makaba en 1997. En 2004, il a intégré le lycée Don Bosco de Ngozi pour les études secondaires. Après avoir terminé le tronc commun en 2008, il a été orienté en section scientifique B au même lycée. Il y a obtenu ses diplômes d'humanités générales et d'Etat en 2011. Il a ensuite poursuivi ses études à l'Université du Burundi à partir de 2012. D'abord inscrit en faculté des sciences (département Agronomie-Biologie), il a été réorienté après la première année commune dans la faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), au département de Socio-Economie rurale (SER), et a achevé ce cursus en 2016. En 2018, il a réussi le concours d'entrée au Master en développement rural et agrobusiness au sein de la même faculté et a terminé ce cycle en 2020. Recruté comme assistant au département de Socio-Economie rurale en octobre 2021, il a parallèlement entamé son doctorat en 2022 à l'Ecole doctorale de l'Université du Burundi dans le cadre du programme régional d'excellence en nutrition - East African Nutritional Sciences Institute (EANSI). Sa thèse, intitulée « Modélisation du revenu vital durable et résilience des ménages ruraux pour une sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi », s'inscrit dans l'option Sécurité alimentaire et changement climatique et l'a finalisée en 2026. Durant ses recherches doctorales, il a effectué plusieurs déplacements internationaux. Il a ainsi participé à des conférences et ateliers scientifiques en Allemagne, en Italie, à Dubaï, au Cameroun, en Ouganda et au Rwanda.

B.1 ARTICLES SCIENTIFIQUES

1. **Optimizing Model Land Use and Crop Productivity in Agroforestry Farms for Food Security of Small Farmers in Burundi**
Journal : Agricultural Sciences, 2025, 16(1), 123–145
ISSN Online : 2156-8561 *ISSN Print* : 2156-8553
URL : <https://www.scirp.org/journal/as>
DOI : <https://doi.org/10.4236/as.2025.161008>
Auteurs : Audace Niyonzima, Heidi Megerle, Habonimana Bernadette, Christina Weber, Ndiokubwayo Soter, Jannis Bahn Müller, Ngendakumana Serge, Niragira Sanctus

2. **Measuring the Technical Efficiency and Effectiveness of Small-Scale Farmers and Their Impact on Rural Household Food Security in Burundi**
Journal : Applied Mathematical Sciences, Vol. 18, 2024, no. 10, 449–466
Éditeur : HIKARI Ltd, www.m-hikari.com
DOI : <https://doi.org/10.12988/ams.2024.918615>
Auteurs : Audace Niyonzima, Marijke D’Haese, Megerle Heidi, Ndimubandi Jean, Nimenya Nicodème, Ngendakumana Serge, Sanctus Niragira

3. **Living Income : Ausreichendes Familieneinkommen in kleinbäuerlichen Agroforstbetrieben in Burundi ?**
Journal : Standort (2024) 48 :28–36
Éditeur : Springer Nature (print)
DOI : <https://doi.org/10.1007/s00548-023-00905-7>
Auteurs : Heidi Megerle, Audace Niyonzima, Christina Weber, Sanctus Niragira

4. **Analyse des déterminants de la résilience communautaire face aux risques environnementaux dans la province de Kirundo au Burundi**
Journal : Int. J. Biol. Chem. Sci. 19(1) : 289–308, February 2025
ISSN Online : 1997-342X *ISSN Print* : 1991-8631
URL : <http://www.ifgdg.org>
DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v19i1.22>
Auteurs : Serge NGENDAKUMANA, Ertha Charlene IRAKOZE, Désiré KUBWIMANA, Athanase NKUNZIMANA, Ferdinand NDUWINDAVYI, Jonas NIYONKURU, Audace NIYONZIMA

5. **Déterminants du développement agricole périurbain autour de la ville de Bujumbura, Burundi**
Journal : Afrique SCIENCE 25(5) (2024) 18–32
ISSN : 1813-548X *URL* : <http://www.afriquescience.net>
Auteurs : Serge NGENDAKUMANA, Guy Paterne NISHIMWE, Sanctus NIRAGIRA, Audace NIYONZIMA, Séverin NIJIMBERE