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

# Evaluation de l’hétérogénéité culturale et régionale de l’impact économique du changement climatique au Burundi

**Mfisumukiza, Elysée; Sous la direction du : Directeur : Pr. Ndayitwayeko Willy Marcel; Co-directeur : Pr. Ndoricimpa Arcade**

**2025-11**
UB - FSEG
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2223

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

**UNIVERSITE DU BURUNDI**

**FACULTE DES SCIENCES ECONOMIQUES ET DE GESTION**

**MASTER EN ECONOMIE RURALE, SOCIALE ET DE L'ENVIRONNEMENT**

# EVALUATION DE L'HETEROGENEITE CULTURALE ET REGIONALE DE L'IMPACT ECONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU BURUNDI

Par:

MFISUMUKIZA Elysée

Mémoire

présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en Economie Rurale, Sociale et de l'Environnement

**Option :** Economie de l'Environnement et de Ressources Naturelles

**Sous la direction du :**

Directeur : Pr. NDAYITWAYEKO Willy Marcel

Co-directeur : Pr. NDORICIMPA Arcade

**Bujumbura, Novembre 2025**

**MEMBRES DU JURY**

Président : Dr. Ir. Patrice NDIMANYA

Directeur : Pr. Willy Marcel NDAYITWAYEKO

Co-directeur : Pr. Arcade NDORICIMPA

Secrétaire : Pr. Diomède MANIRAKIZA

**DEDICACES**

A mes chers parents ;

A mes frères et sœurs ;

A tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire.

**MFISUMUKIZA Elysée**

**REMERCIEMENTS**

Bien que je me suis donnée corps et âme pour la réalisation de ce mémoire, sans certaines personnes et institutions je n'aurai pu atteindre l'objectif de ce travail tel qu'il est. Dans cette partie, je veux avec des mots simples mais avec un cœur plein de reconnaissances exprimer mes sincères remerciements envers toute personne ou institution qui d'une manière ou d'une autre a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes co-directeurs, les Professeurs Arcade NDORICIMPA et Willy Marcel NDAYITWAYEKO. Le Professeur Arcade m'a accompagné depuis le choix du sujet jusqu'à la dernière version, toujours disponible pour me guider, m'encourager et améliorer la qualité de mon travail par ses commentaires pertinents. J'ai également accueilli avec joie l'accord du Professeur Willy Marcel, malgré ses nombreuses responsabilités de Directeur Général de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, pour codiriger ce mémoire ; de la note conceptuelle à la version finale, il a pris le temps de lire chaque page et de m'offrir des remarques instructives dont la sagesse et la constance m'ont profondément motivé.

Je remercie l'ensemble des enseignants du programme de Master pour la qualité de leurs enseignements. Ma gratitude va particulièrement au Dr.Ir. Patrice NDIMANYA pour la passion de l'écologie qu'il m'a transmise, ainsi qu'au Dr Salvator NDABIRORERE, dont son cours « Gestion des écosystèmes et l'adaptation au changement climatique » a inspiré le sujet de ce mémoire.

Je remercie sincèrement l'Institut National de la Statistique du Burundi (INSBU) pour l'accès aux données utilisées dans ce travail. Ma gratitude va particulièrement à M. Ambroise NIKWIBITANGA et à son équipe du SESAE pour leurs indications précieuses, ainsi qu'aux personnels du Service Méthodologie et du SESP. Je remercie également Thierry NSHIMIRIMANA pour son aide constante dans l'orientation vers les services appropriés. Je remercie également l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) pour m'avoir accordé l'accès aux données météorologiques nécessaires à la réalisation de cette étude.

Mes remerciements vont également au Dr Pedro NASO, qui m'a initié pour la première fois à l'analyse des données agricoles dans le cadre d'un travail d'assistant de recherche. Cette expérience m'a grandement facilité la tâche lors du traitement des données agricoles utilisées dans ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance au Dr David NIYUKURI pour ses précieux conseils, ses encouragements constants, le partage des données météorologiques des années 2018 et 2019, ainsi que pour m'avoir autorisé à travailler dans les locaux de l'Interdisciplinary Research Group in Public Health (IRG-PH) qu'il coordonne.

Ma gratitude s'adresse également au Dr Kelly Joëlle GATORE SINIGIRIRA, alumini de IRG-PH, pour ses orientations précieuses concernant l'accès et le traitement des projections climatiques issues des Modèles de Circulation Générale (MCG).

Je remercie également Dr. Ir. Soter NDIHOKUBWAYO de la faculté de FABI qui m'a partagé les fichiers de forme (Shapefile) des zones agroclimatiques du Burundi, sans ces données il serait presque impossible d'atteindre l'objectif de ce mémoire. Mes reconnaissances vont également envers Msc Jean BUDURHA MIRHANYO et Dr Athanase NKUNZIMANA qui ont facilité la prise de contact avec Dr. Ir. Soter NDIHOKUBWAYO.

Je tiens aussi à remercier mes collègues et amis du programme de Master. Apprendre et progresser à vos côtés a été une expérience à la fois stimulante et inspirante, marquée par l'entraide et le partage.

Alors que mon humeur était devenue une fonction de l'état d'avancement de mon travail : la joie devant un résultat prometteur, la déception face à un modèle inattendu, ou encore la frustration devant une rédaction qui n'avance pas, une chose demeurait constante : le soutien indéfectible de la famille et des amis. Je remercie donc du fond du cœur mes amis et ma famille, pour leur appui inestimable tout au long de cette période de recherche.

J'ai surement omis certaines personnes. Je remercie donc tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu d'une manière ou d'autre.

Enfin je rends grâce à Dieu maitre des lois qui régissent l'univers infiniment petit et grand de m'avoir donné le souffle de vie, la santé nécessaire et la force de réaliser ce mémoire malgré une multitude d'obstacles.

**RESUME**

La littérature empirique sur la relation entre le changement climatique, l'agriculture et l'économie au Burundi, n'aborde pas comment les impacts économiques du changement climatique varient selon les cultures agricoles et les régions agroclimatiques. Ce mémoire vise à évaluer l'hétérogénéité des impacts économiques du changement climatique sur les huit principales cultures à travers les régions agroclimatiques du Burundi. Trois objectifs spécifiques y concourent : (i) Evaluer le changement climatique passé et futur au Burundi. (ii) Estimer dans chaque région l'effet du climat sur le choix de culture à cultiver et sur le revenu net de cette culture. (iii) Simuler les impacts des futurs changements climatiques sur le choix des cultures à cultiver et le revenu net de ces cultures pour chaque région agroclimatique. Le changement climatique a été mesuré en comparant le climat de référence (1991-2019) au passé (1975-1990) et aux projections des MCG pour 2021-2040 et 2041-2060. Le modèle logit multinomial par l'approche quasi-expérimentale IV-2SRI a été estimé pour déterminer l'effet du climat sur le choix de culture tandis que le Modèle Structurel Ricardien par l'approche quasi-expérimentale IV-2SLS a été utilisé pour estimer l'effet du climat sur le revenu net de la culture choisie. Ces modèles déterminent le revenu net sous le climat de référence et de simuler le revenu net sous les projections climatiques, la différence entre ces deux revenus nets est l'impact économique du changement climatique.

Les résultats montrent qu'en 2021-2040, le Burundi connaîtra un réchauffement de 1,15-1,18 °C, atteignant 2,09-2,81 °C en 2041-2060. Ce réchauffement, accompagné d'une légère hausse des précipitations avec contrôle d'autres variables socioéconomiques, modifiera les choix culturaux : le maïs restera dominant, tandis que le riz, le haricot et la patate douce seront moins choisis, surtout dans les régions chaudes. Le changement climatique réduira le revenu du haricot, du riz et de la banane dans les régions de la Plaine de l'Imbo, Plateau central et Dépressions Nord/Est mais l'augmentera pour le manioc et le haricot-manioc dans les régions plus fraîches (Mumirwa, Crête Congo-Nil). Au niveau national, le manioc (+0,85 à +10,93%), haricot-manioc (+4,78 à +5,92%) et patates douces seront plus résilients, tandis que le riz (-23,85 à -5,0%) et la banane seront plus vulnérables. Le Plateau centrale (-6,1 à -4,07%) et la Plaine de l'Imbo (-14,08 à -1,01%) seront vulnérables, tandis que les régions initialement humides seront résilientes. Ces résultats suggèrent d'une part les stratégies d'adaptation ciblées selon les cultures et les régions et d'autre part les activités et programmes d'atténuation pour ralentir le changement climatique.

**Mots clés :** Changement climatique, adaptation, revenu agricole, zones agroclimatiques, Burundi, Modèle Structurel Ricardien, variables instrumentales, Interpolation spatiale.

**ABSTRACT**

The empirical literature on the relationship between climate change, agriculture, and the economy in Burundi does not address how the economic impacts of climate change vary across agricultural crops and agro-climatic regions. This thesis aims to assess the heterogeneity of the economic impacts of climate change on the eight main crops across Burundi's agro-climatic regions. Three specific objectives contribute to this aim: (i) Assess past and future climate change in Burundi; (ii) Estimate, in each region, the effect of climate on crop choice and on the net revenue of the chosen crop; (iii) Simulate the impacts of future climate change on crop choice and net crop revenue for each agro-climatic region. Climate change was measured by comparing the reference climate (1991–2019) with the past (1975–1990) and with GCM projections for 2021–2040 and 2041–2060. The multinomial logit model using the quasi-experimental IV-2SRI approach was estimated to determine the effect of climate on crop choice, while the Structural Ricardian Model using the quasi-experimental IV-2SLS approach was used to estimate the effect of climate on the net revenue of the chosen crop. These models determine net revenue under the reference climate and simulate net revenue under climate projections; the difference between these two net revenues represents the economic impact of climate change.

The results show that in 2021–2040, Burundi will experience a warming of 1.15–1.18 °C, reaching 2.09–2.81 °C in 2041–2060. This warming, accompanied by a slight increase in precipitation and controlling for other socioeconomic variables, will modify crop choices: maize will remain dominant, while rice, beans, and sweet potatoes will be less frequently chosen, especially in warmer regions. Climate change will reduce the revenue of beans, rice, and bananas in the Imbo Plain, Central Plateau, and Northern/Eastern Depressions, but will increase the revenue of cassava and cassava-bean systems in cooler regions (Mumirwa, Congo-Nile Ridge). At the national level, cassava (+0.85 to +10.93%), cassava-bean (+4.78 to +5.92%), and sweet potatoes will be more resilient, while rice (-23.85 to -5.0%) and bananas will be more vulnerable. The Central Plateau (-6.1 to -4.07%) and the Imbo Plain (-14.08 to -1.01%) will be vulnerable, while the initially humid regions will be more resilient. These results suggest, on the one hand, the need for adaptation strategies targeted to specific crops and regions, and on the other hand, mitigation activities and programs to slow down climate change.

**Keywords:** Climate change, adaptation, agricultural income, agroclimatic zones, Burundi, Structural Ricardian Model, instrumental variables, spatial interpolation.

**TABLE DES MATIERES**

**MEMBRES DU JURY** ..... **i**
**DEDICACES** ..... **ii**
**REMERCIEMENTS** ..... **iii**
**RESUME** ..... **v**
**ABSTRACT** ..... **vi**
**TABLE DES MATIERES** ..... **vii**
**LISTE DES TABLEAUX** ..... **x**
**LISTE DES FIGURES** ..... **xii**
**LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS** ..... **xiii**
**AVANT-PROPOS** ..... **xv**
**CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE** ..... **1**
I.1. Contexte de l'étude ..... 1
I.2. Problématique de l'étude ..... 3
I.3. Objectifs de l'étude ..... 5
I.3.1. Objectif global ..... 5
I.3.2. Objectifs spécifiques ..... 5
I.4. Hypothèses de recherche ..... 5
I.5. Intérêt du sujet ..... 5
Conclusion du premier chapitre ..... 8
**CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE** ..... **9**
II.1. Cadre théorique ..... 9
II.1.1. Approche basée sur les expériences de laboratoire contrôlées ..... 10
II.1.2. Modèles de croissances de cultures ..... 12
II.1.3. Modèles agro-économiques ..... 14
II.1.4. Modèle Ricardien ..... 17
II.1.4.1. Présentation de l'approche ricardienne ..... 17
II.1.4.2. Critiques du modèle ricardien ..... 18
II.1.5. Modèle Structurel Ricardien ..... 20
II.2. Revue de la littérature empirique ..... 21
II.3. Cadre Conceptuel ..... 24
Conclusion du deuxième chapitre ..... 26
**CHAPITRE III : METHODOLOGIE** ..... **27**
III.1. Introduction ..... 27
III.2. Sources de données ..... 27
III.3. Traitement de données ..... 29
III.3.1. Variables dépendantes ..... 30
III.3.1.1. Choix de culture ou de la combinaison des cultures ..... 30

III.3.1.2. Revenu net agricole par hectare ..... 31
III.3.2. Variables indépendantes ..... 35
III.3.2.1. Variables climatiques ..... 35
III.3.2.2. Variables de contrôle ..... 46
III.4. Méthodologie d'analyse de données ..... 48
III.4.1. Méthodologie pour le premier Objectif ..... 48
III.4.2. Méthodologie pour le Second Objectif ..... 50
III.4.2.1. Estimation du Modèle du choix de culture à cultiver ..... 51
III.4.2.1.1. Spécification du modèle du choix de culture ..... 51
III.4.2.1.2. Endogenéité des variables climatiques et l'estimation du modèle logit multinomial par l'approche 2SRI (Two Stage Residual Included) ..... 51
III.4.2.1.3. Evaluation de la précision de l'estimateur de Maximum de Vraisemblance (MLE) par sa variance ..... 55
III.4.2.1.4. Calcul des effets marginaux moyens et leurs écart-types ..... 57
III.4.2.2. Modélisation du revenu net conditionnel à la culture/combinaison de cultures choisie ..... 58
III.4.2.2.1. Spécification du modèle ..... 58
III.4.2.2.2. Estimation du modèle de revenu conditionnel au choix de la culture 2SLS ..... 59
III.4.2.2.3. Evaluation de la précision de l'estimateur IV/2SLS par la variance ..... 60
III.4.3. Méthodologie pour le troisième Objectif ..... 61
III.4.4. Définition des variables utilisées dans la modélisation ..... 63
Conclusion du troisième chapitre ..... 66
**CHAPITRE IV : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS ..... 67**
IV.1. Résultats sur le premier objectif ..... 67
IV.1.1. Description du climat de la période ciblée (1991-2019) ..... 67
IV.1.2. Comparaison du climat de différentes périodes 1975-1990 ;1991-2019 ; 2021-2040 et 2041-2060 ..... 69
IV.1.3. Evolution annuelle des paramètres climatiques de chaque saison agricole de 1991 à 2019 ..... 75
IV.1.4. Conclusion sur la première hypothèse ..... 79
IV.2. Résultats concernant le deuxième objectif ..... 80
IV.2.1. Présentation des résultats d'analyse descriptive de données socioéconomiques et agricoles ..... 80
IV.2.1.1. Caractéristiques démographiques et socio-économiques des ménages agricoles au Burundi ..... 80
IV.2.1.2. Caractéristiques agro-environnementales des parcelles au Burundi ..... 81
IV.2.1.3. Structure de l'exploitation agricole au niveau des ménages et des parcelles ..... 83
IV.2.1.4. Informations sur les intrants, productions et revenus ..... 85

IV.2.2. Présentation des résultats de la modélisation de la relation climat-agriculture .....89
IV.2.3. Analyse de l'hétérogénéité régionale de l'effet du climat sur le choix des cultures ..98
IV.2.4. Analyse de l'hétérogénéité régionale et culturale de l'effet du climat sur le revenu net.....106
IV.2.5. Conclusion sur la deuxième hypothèse.....114
IV.3. Résultats concernant le troisième objectif.....115
IV.3.1. Simulations de l'impact du changement climatique sur le choix de cultures.....115
IV.3.2. Simulations de l'impact du changement climatique sur le revenu net agricole .....120
IV.3.3. Impact moyen national par région du changement climatique sur le revenu net agricole.....124
IV.3.4. Impact moyen national par culture du changement climatique sur le revenu net agricole.....126
IV.3.5. Conclusion sur la troisième hypothèse .....127
IV.4. Résultats concernant le quatrième objectif.....128
IV.5. Discussion des résultats.....130
IV.5.1. Discussion des résultats du premier objectif .....130
IV.5.2. Discussion des résultats du second objectif.....132
IV.5.3. Discussion des résultats du troisième objectif .....136
**CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE, RECOMMANDATIONS ET LIMITES 143**
V.1. Conclusion générale.....143
V.2. Recommandations.....144
V.3. Limites et perspectives .....146
**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....147**
**ANNEXES.....163**

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Etudes d'impact utilisant les modèles de croissance des cultures ..... 13
Tableau 2 : Etudes d'impact utilisant les Modèle agro-économique en Amérique ..... 16
Tableau 3 : Paramètres optimaux des modèles d'interpolation des variables climatiques ..... 41
Tableau 4 : Opérationnalisation des variables ..... 64
Tableau 5 : Description du climat pour la période de référence 1991-2019 du Burundi ..... 68
Tableau 6 : Moyenne des variables climatiques pour chaque période ..... 71
Tableau 7 : Résultats du test de Mann-Kendall ..... 78
Tableau 8 : Description démographique et socio-économique des ménages agricoles ..... 81
Tableau 9 : Description des pratiques agricoles et de l'environnement des parcelles ..... 82
Tableau 10 : Statistique descriptive sur le nombre de cultures et de parcelles par ménage ..... 83
Tableau 11 : Répartition des parcelles selon le nombre de cultures occupant la parcelle ..... 84
Tableau 12 : Répartition des parcelles selon les cultures/combinaison des cultures ..... 84
Tableau 13 : Statistique descriptive des données des intrants, productions et revenus pour les parcelles occupées par 8 premières cultures ou combinaison des cultures ..... 86
Tableau 14 : Statistiques descriptives des chocs climatiques ..... 88
Tableau 15 : Première étape de 2SRI : Modélisation des variables endogènes en fonction des instruments ..... 89
Tableau 16 : Effets marginaux moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir une culture/combinaison de cultures pour tout le pays ..... 91
Tableau 17: Estimation du modèle Ricardien conditionnel IV/2SLS du Revenu Net agricole pour tout le pays ..... 94
Tableau 18 : Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir les bananes, haricots et haricots- manioc ..... 100
Tableau 19: Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir la combinaison Haricots-Manioc et le Maïs ..... 103
Tableau 20 : Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir le manioc, patates douces et le riz ..... 105
Tableau 21 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO) du Revenu Net agricole pour les bananes et les haricots ..... 107
Tableau 22 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Haricots-Maïs et Haricots-Manioc ..... 109
Tableau 23 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Maïs et les Manioc ..... 111
Tableau 24 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Patates Douces et le Riz ..... 113
Tableau 25 : Impacts du future changement climatique (2021-2040) sur le choix d'une culture ou combinaison de cultures ..... 117

Tableau 26 : Impacts du future changement climatique (2041-2060) sur les probabilités de choix d'une culture .....119
Tableau 27 : Impact du future changement climatique (2021-2040) sur le revenu net agricole (Fbu/ha).....121
Tableau 28 : Impact du future changement climatique (2041-2060) sur le revenu net agricole (Fbu/ha).....123
Tableau 29 : Impact moyen national par région du changement climatique sur le revenu net agricole .....125

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cadre conceptuel de l'évaluation de l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture. Boite grise = Variable conceptuelle non observée.Flèche pointillée = Relation conceptuelle non estimée. .....24

Figure 2 : Localisations géographiques des stations météorologiques pour la période de 1991-2019. Source : IGEBU ; cartographie : auteur (2025).....37

Figure 3 : Comparaison du climat passé (1975-1990, 1991-2019) et du futur climat (2021-2040 et 2041-2060).....70

Figure 4 : Comparaison spatiale de la température de la saison agricole A pour les deux périodes 1975-1990 et 1991-2019.....169

Figure 5 : Comparaison spatiale du nombre de degré-jour de la saison agricole A pour les deux périodes 1975-1990 et 1991-2019. .....73

Figure 6 : Distribution spatiale de la balance hydrique de la saison agricole A pendant la période 1991-2019. .....73

Figure 7 : Distribution spatiale des projections futures du nombre de degrés-jour au niveau des collines pour l'avenir proche 2021-2040 et l'avenir moyen terme 2041-2060. .....74

Figure 8 : Tendances et variabilité à long terme de la température moyenne saisonnière. L'amplitude de la tendance annuelle et la valeur p sont indiquées en haut à droite de chaque graphique. .....75

Figure 9 : Tendances et variabilité à long terme des anomalies totales des précipitations annuelles moyennes. La ligne horizontale en pointillés représente un écart type par rapport à la moyenne. La ligne courbe Représente le lissage Lowess.....76

Figure 10 : Evolution du SPEI-3 et SPEI-18 saisonniers. Conditions sèches (en rouge) et humides (en bleu). .....77

Figure 11: Schema du fonctionnement d'une application web shiny interactive. Source : (Cura & Vaudor, 2018).....129

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2SLS : Two Stage Least Squares

2SRI : Two Stage Residual Included

ASA : Advisory Services and Analytics (Services consultatifs et analytiques, Banque mondiale)

CCC : Canadian Climate Center

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques

CCSR : Center for Climate System Research (Centre de recherche sur le système climatique, Japon

CCSR : Centre for Climate System Research

CHIRPS : Climate Hazards InfraRed with Precipitations Stations

CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

CropSyst : Cropping Systems Simulation Model

DOI : Dipôle de l'Océan Indien

DSSAT : Decision Support System for Agrotechnology Transfer

EICVMB : Enquête Intégrée sur les Conditions de Vie des Ménages au Burundi

EPIC : Environmental Policy Integrated Climate

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

FAO : Food Agriculture and Organisation

FEM : Fonds pour l'Environnement Mondial

FOLUR : Food Systems, Land Use and Restoration

GCF : Green Climate Fund (Fonds Vert pour le Climat)

GES : Gaz à Effet de Serre

GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GISS : Goddard Institute for Space Studies

IDW : Inverse Distance Weighting

IFAD : International Fund for Agricultural Development (Fonds International pour le Développement Agricole)

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

INSBU : Institut National de la Statistique du Burundi

IRLS : Iterative Reweighted Least Squares

IV : Instrumental Variable

l'INSBU : Institut National de la Statistique du Burundi

LOOC : Leave-One-Out Cross-validation

LOWESS : Locally Weighted Scatterplot Smoothing

MAS : Modèle Agricole Sectoriel

MCG : Modèle de Circulation Générale

MCO : Moindres Carrés Ordinaires

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

MLE : Maximum Likelihood Estimation

MNL : MultiNomial Logit

ND-GAIN : Notre Dame Global Adaptation Initiative

OCHA : Office for the Coordination of Humanitarian Affairs

OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie

PCM : Parallel Climate Model

PDF : Probability Density Function

PDSI : Palmer Drought Severity Index

PIB : Produit Intérieur Brut

RMSE : Root Squared Mean Error

SESAE : Service Etudes et Statistiques Agricoles et Environnementales

SESP : Service Etudes et Statistiques des Prix

SPEI : Standard Precipitation Evapotranspiration Index

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

SRM : Structural Ricardian Model (Modele Structurel Ricardien)

SSP2-4.5 : Shared Socioeconomic Pathway 2 avec scénario de concentration radiative 4,5 $W/m^2$

SSP5-8.5 : Shared Socioeconomic Pathway 5 avec scénario de concentration radiative 8,5 $W/m^2$

VI : Variables Instrumentales

ZD : Zone de Dénombrement

## AVANT-PROPOS

Ayant suivi un parcours initial en statistique, j'ai développé un intérêt particulier pour l'utilisation des modèles statistiques en intelligence artificielle. Cette passion m'a conduit à appliquer la modélisation au credit scoring lors de mon projet de fin d'études de Baccalauréat en Statistique. En intégrant le domaine de l'économie, j'ai découvert l'importance centrale de la causalité, souvent plus déterminante que la corrélation orientée vers la performance prédictive. Cela m'a amené à m'intéresser au champ émergent de « l'Intelligence Artificielle Causale ». C'est lors du cours de « Gestion des Écosystèmes et Adaptation au Changement Climatique » que l'idée initiale de travailler sur les effets causaux des stratégies d'adaptation a émergé. Toutefois, la littérature m'a montré que l'élaboration de bonnes stratégies d'adaptation nécessite une compréhension préalable de l'intensité et des mécanismes de l'impact du changement climatique. Ce constat m'a orienté vers l'évaluation de l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture. J'ai soumis ce sujet à mes co-directeurs, Prof. Arcade NDORICIMPA et Prof. Willy-Marcel NDAYITWAYEKO, qui ont accepté de l'encadrer.

En approfondissant le thème, j'ai remarqué que, bien que la question ait déjà été étudiée au Burundi, une analyse de l'hétérogénéité des impacts selon les cultures et les régions agroclimatiques restait nécessaire. C'est dans cette perspective que ce mémoire a été conçu. Ce travail m'a également permis d'acquérir des connaissances nouvelles en agronomie, en géostatistique, en économétrie spatiale et en inférence causale, renforçant ainsi la dimension pluridisciplinaire de cette recherche.

Ce mémoire s'inscrit parfaitement à mon parcours de Master Economie Rurale, Sociale et de l'Environnement. Spécialité : Economie de l'environnement et des ressources naturelles. Cette étude a été alors effectuée dans le cadre académique en vue d'obtention du diplôme de Master dans cette spécialité. J'espère qu'il contribuera à une meilleure compréhension des impacts et des stratégies d'adaptation agricoles face au changement climatique au Burundi.

# CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE

## I.1. Contexte de l'étude

La dépendance de l'agriculture au climat et les phénomènes climatiques extrêmes , fait que parmi les divers domaines de la vie humaine menacés par le réchauffement de la Terre, l'agriculture et la sécurité alimentaire soient restées jusqu'à présent en tête de liste, depuis les débuts marqués par la création du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (Seo, 2015). Ce projet de mémoire explore les domaines de l'économie de l'environnement, de ressources naturelles et agricole dans le but de réaliser une évaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture au Burundi. Dans ce pays où il y a très peu d'études sur ce sujet (*proposition du burundi pour l'agriculture et le changement climatique lors de la 39ème session DE SBSTA*, 2012), ce mémoire s'avère alors nécessaire et utile.

L'attention portée à ce sujet par la communauté internationale et les scientifiques depuis la fin du 20$^{e}$ siècle, n'est pas expliquée simplement par la relation forte qui existe entre le climat et l'agriculture mais surtout par les effets négatifs potentiels que pourrait avoir le réchauffement climatique sur l'agriculture, un domaine indispensable pour la survie de la société humaine. En effet, la dépendance de la survie humaine à la nourriture (produits agricoles et agroalimentaires) fait que la vie humaine serait impossible sur notre planète sans l'agriculture : La source de cette nourriture. Cette obligation biochimiquement naturelle imposée à l'homme de satisfaire ses besoins en nourriture explique les raisons du rôle socio-économique important de l'agriculture (Maslow, 1943; Özdağlar, 2015). En effet, sur le plan économique, la part de l'industrie agro-alimentaire varie entre 10 à 30% du PIB mondial et sur le plan social, l'agriculture joue un rôle important en termes de la sécurité alimentaire et de la souveraineté alimentaire des pays qui en son tour rend fort ces derniers dans le domaine de la géopolitique et des relations internationales. Ces éléments qui prouvent l'importance capitale de l'agriculture justifient les motivations de différents acteurs tels que les agriculteurs, les agronomes, les économistes et les décideurs politiques, les organisations mondiales, etc à s'intéresser à l'identification et à la gestion des facteurs qui influencent la production agricole.

L'un des principaux facteurs clés de la production agricole qui fait l'objet de cette étude est le climat plus précisément le changement climatique (Omoyo et al., 2015). Pour être plus précis, la productivité des cultures dépend des éléments du climat tels que la température, les précipitations, les évènements climatiques extrêmes tels que la sécheresse, les inondations, etc. Ces éléments du climat varient à court et à long terme et ces variations peuvent influencer négativement ou positivement la productivité agricole (Ginbo, 2022).

Des preuves récentes, cependant, suggèrent un potentiel ralentissement de la croissance de la productivité en raison du changement climatique. Ces tendances sont inquiétantes et montrent que la durabilité des systèmes agroalimentaires n'est pas seulement une vision futuriste, mais aussi une réalité frappante (Mkondiwa et al., 2024).

Afin de mieux surveiller le changement climatique et son influence sur les différents aspects socio-économiques y compris la production agricole, la Convention Cadre des Nations unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) a été créée suite à la Conférence Mondiale sur l'Environnement et le Développement en 1992. Selon le rapport de Ceres2030, aujourd'hui, plus de 10 millions d'hectares de terres sont déjà perdus chaque année à cause de l'érosion. La sécheresse et la chaleur réduisent les rendements. À l'avenir, l'eau deviendra une ressource rare et vitale (Laborde, D.; Murphy, S.; Parent, M.; Porciello, J.; Smaller, 2020). Afin de mieux gérer les impacts négatifs de ce changement climatique, en Afrique de l'Ouest, un projet intitulé Grande Muraille Verte a été mise en place pour lutter contre la sécheresse. Ce projet fournit un aperçu des progrès réalisés par les pays pour créer un corridor vert de 15 km de large et de 8 000 km de long traversant l'Afrique, du Sénégal à Djibouti.

Le Burundi comme d'autres pays africains se situe dans les tropiques avec des températures qui compromettent déjà la production agricole (Etwire et al., 2019). En effet, Le pays est situé entre les longitudes 29,00° et 30,54° à l'est, et les parallèles 2,20° et 4,28° au sud. Certaines variabilités climatiques et des évènements climatiques extrêmes ont été enregistré au Burundi, pour le cas des inondations, À partir d'octobre 2023, un épisode du phénomène climatique El Niño combiné à un dipôle positif de l'océan Indien (DOI, en anglais IOD) a provoqué des inondations dans toute l'Afrique de l'Est, y compris le Burundi. Ainsi, d'octobre 2023 à mars 2024, Selon les estimations du Secteur de la Sécurité Alimentaire et des moyens d'existence, sur la même période, ces catastrophes naturelles ont impacté près de 40 000 hectares de champs cultivés soit 10% des superficies sous cultures vivrières du pays pour la saison culturale 2024 A (OCHA, 2024).

Les études réalisées dans le cadre de la première, la deuxième et la troisième communication nationale sur le changement climatique et sur l'évolution des paramètres climatiques au Burundi à l'horizon 2050 sur base du modèle de circulation générale, montrent que la température moyenne annuelle va augmenter de 1°C à 3°C. La pluviométrie accusera une hausse de + ou - 10% et le régime pluviométrique sera perturbé de façon qu'il ne comporte plus que deux grandes saisons de six mois chacune : une saison pluvieuse qui s'étend de novembre à avril et une saison sèche. Ces changements de climat vont entrainer beaucoup de risques liés aux phénomènes suivants : (i) modification des saisons ; (ii) inondations des marais et bas-fonds ; (iii) dégradation des terres et perte de la fertilité des sols ; (iv) pénurie des ressources en eaux souterraines ; (v) avènements de

phénomènes climatiques extrêmes (grêle, averses violentes, vents forts, etc.) ;(vi) modifications des cycles végétatifs des plantes cultivées et autres sylvestres ;(vii) phénomènes phytosanitaires imprévisibles (Mugisha, 2020). En plus de cela le Burundi a été classée 178-ème sur 181 pays selon le ND-GAIN (Notre Dame Global Adaptation Initiative) country index 2023, donc le Burundi fait aussi partie des pays les moins préparés à répondre aux conséquences du changement climatique (Notre Dame Global Adaptation Initiative, 2025).

Etant donné toutes ces prévisions climatologiques, le Burundi devrait agir en commençant par la compréhension de la nature et du degré de la relation existant entre ces changements climatiques et le secteur agricole. Cette prise de conscience permettrait une mise en place des stratégies d'adaptation mieux adéquates à la situation réelle de l'impact du changement climatique sur l'agriculture.

### I.2. Problématique de l'étude

Au Burundi, l'agriculture dépend essentiellement des précipitations, occupe plus de 80% de la population active. Selon les données de l'INSBU (Institut National de la Statistique du Burundi), la part de l'agriculture dans le PIB est environ 30% au PIB, fournit 95% des apports alimentaires, et plus de 60% des recettes en devises. Le Burundi pour sortir de la crise économique dont elle fait face actuellement qui est causée par le manque des devises et pour atteindre la vision Burundi Pays Emergent en 2040 et Pays Développé en 2060 a mis en place des politiques agricoles dont l'objectif est de booster la production agricole afin d'accroitre les exportations des produits agricoles qui contribueront ainsi à l'amélioration significative de la balance commerciale. Egalement des politiques avancées ont été mises en place pour atténuer le changement climatique.

Est-ce que cette initiative a pris en compte des stratégies d'adaptation aux changements climatiques ? Oui, mais à l'absence des évidences concernant la situation actuelle et futur des impacts du changement climatique sur cette agriculture prise comme une voie de sortie de la pauvreté que fait face actuellement le pays. Le Oui à la question est justifié car, selon le rapport des Services consultatifs et analytiques (ASA) de la Banque mondiale (Tall et al., 2022): Le Burundi a mené des activités et programmes pour atténuer ces impacts ; il s'agit entre autre l'aménagement des bassins versants (African Development Bank, 2013); le reboisement à travers le programme national *Ewe Burundi Urambaye* (République du Burundi; Ministère de l'Environnement; de l'Agriculture et de l'Élevage, 2022); la protection des sources d'eau et des zones tampons (Sinarinzi & Nayisi, 2016); la restauration des zones dénudées sans oublier l'exploitation et substitution du bois de chauffage pour lutter contre le déboisement des collines et le Gouvernement du Burundi a exprimé sa vision de lutte contre le changement climatique

comme étant "un État qui promeut un développement résilient aux effets néfastes du changement climatique".

Au niveau institutionnel, le ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, à travers ses départements et institutions personnalisées s'occupe des questions relatives au changement climatique au Burundi. En 2018, la Banque mondiale a initié des interventions fondées sur l'approche paysagère au Burundi à travers (a) le Projet de Restauration et de Résilience du Paysage du Burundi (2018-2023) couvrant 22 collines, et (b) le Financement Additionnel du FEM par le FOLUR (2021-2023) qui a étendu les activités de restauration du paysage et de résilience communautaire du projet parent à 9 collines de la province de Kayanza. Ensemble, les deux projets ne devraient couvrir que 31 collines au total d'ici 2023. Il est nécessaire d'étendre les activités de restauration du paysage et de résilience climatique aux 2 608 collines restantes du Burundi.

Malgré ces efforts indéniables fournis depuis 2018, selon ce même rapport de la Banque mondiale il y a un besoin urgent de comprendre l'amplitude des impacts attendus sur l'agriculture. En plus, toutes ces stratégies d'adaptation et/ou d'atténuation citées ci-haut ont été mises en place sans une bonne compréhension de la nature (impact positif, négatif ou les deux) et de l'amplitude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture.

C'est dans ce cadre que ce mémoire intervient pour répondre la question suivante : **Quel est l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture au Burundi ?** Avec des questions sous-jacentes telles que :

- Le changement climatique persiste-t-il au cours du temps au Burundi en considérant comme référence la période de 1991-2019 et les projections actualisées du climat au Burundi en 2021-2040 et 2041-2060 selon les modèles de circulation générale (MCG) sous différents scenarios ?
- Quelle est la relation existant entre le climat et l'agriculture selon les cultures et régions agroclimatiques au Burundi?
- Quels sont les impacts futurs du changement climatique sur les grandes cultures dans les différentes zones agroclimatiques ?

En conclusion, bien que plusieurs initiatives aient été entreprises pour renforcer la résilience de l'agriculture burundaise face au changement climatique, la compréhension de ses effets demeure limitée. Ce mémoire contribue à combler cette lacune en évaluant l'impact économique du changement climatique selon les cultures et les régions agroécologiques, offrant ainsi une base empirique essentielle pour l'élaboration de politiques d'adaptation différenciées et efficaces.

## I.3. Objectifs de l'étude

### I.3.1. Objectif global

L'objectif général du présent travail est d'évaluer l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture au Burundi.

### I.3.2. Objectifs spécifiques

- ✓ Evaluer le changement climatique passé et futur au Burundi selon les données historiques et différentes prévisions du climat par les Modèles de Circulation Générale (MCG) sous différents scenarios pour les horizons 2021-2040 et 2041-2060 ;
- ✓ Estimer la relation statistique entre le climat et l'agriculture des principales cultures au Burundi et dans chaque région agroclimatique ;
- ✓ Simuler les impacts des futurs changements climatiques (2021-2040 et 2041-2060) sur le choix et le revenu net agricole des 8 principales cultures selon les zones agroclimatiques;
- ✓ Mettre en place un tableau de bord (application web interactive) qui permettra les différentes parties prenantes (agriculteurs, moniteurs agricoles, organisations gouvernementales et non gouvernementales, chercheurs, etc.) d'accéder aux résultats obtenus dans cette étude et pouvant servir d'outil d'aide à la décision.

## I.4. Hypothèses de recherche

Les hypothèses de recherche sont les suivantes :

- ✓ Hypothèse 1 : Le changement climatique persiste au cours du temps au Burundi ;
- ✓ Hypothèse 2 : Le climat a un effet économique hétérogène sur chacune des 8 principales cultures et dans chacune des régions agroclimatiques du Burundi ;
- ✓ Hypothèse 3 : Le changement climatique exerce un impact économique hétérogène à la fois pour les cultures et régions agroclimatiques ;

## I.5. Intérêt du sujet

Pour les agriculteurs, cette étude, à travers son objectif de créer une application web accessible en ligne, jouera un rôle important en leur permettant, ainsi qu'aux moniteurs agricoles, d'accéder aux informations concernant les impacts du changement climatique et les stratégies d'adaptation appropriées selon leurs régions climatiques et les types de cultures exploitées, afin d'optimiser leurs revenus nets agricoles (FAO, 2022; Mkondiwa et al., 2024; Tsoumas et al., 2023). Les coopératives agricoles pourront également se référer aux résultats de cette étude pour élaborer des guides de formation personnalisés selon les zones climatiques destinées aux agriculteurs.

Pour les décideurs politiques, l'intérêt de ce travail se présente sous plusieurs angles. Les prévisions des impacts économiques futurs issues de cette étude permettront d'élaborer des politiques d'anticipation en matière d'exploitation rationnelle et optimale des ressources naturelles, notamment l'eau utilisée pour irriguer les champs et s'adapter au réchauffement climatique (Ali et al., 2021; Da Cunha et al., 2015; Kurukulasuriya et al., 2011). Ces politiques d'anticipation sont particulièrement importantes car les ressources deviennent de plus en plus rares en raison du changement climatique. L'irrigation, par exemple, est devenue un enjeu majeur de géopolitique et de conflits intra- et internationaux (Serfati, 2006; Valantin, 2017). Par ailleurs, cette étude fournit aux décideurs du secteur agricole des recommandations utiles pour l'élaboration de stratégies et de technologies d'adaptation au changement climatique, ainsi que pour les actions d'information, d'éducation et de communication sur le changement climatique. Ces deux aspects ont été définis comme prioritaires dans le 9e sous-axe (développement de la résilience au changement climatique) du premier axe stratégique (Accroissement durable de la production agricole, animale et halieutique) de la Stratégie Agricole Nationale (2018-2027) (MINEAGRIE, 2018). Concernant les institutions financières et le secteur de l'assurance agricole, les résultats de cette étude sont essentiels pour comprendre les probabilités de pertes liées au climat et pour ajuster les primes et les couvertures en fonction des risques climatiques propres à chaque région (Kapsambelis, 2022). En effet, les activités agricoles sont fortement exposées aux aléas climatiques, et les études indiquent qu'il y aura une augmentation de la fréquence et de l'intensité des conditions climatiques extrêmes au Burundi d'ici 2050 (Tall et al., 2022).

Enfin, cette étude revêt une importance particulière pour le milieu académique, car le nombre de recherches sur les impacts economiques potentiels du changement climatique sur l'agriculture au Burundi reste limité, et le débat sur la meilleure approche méthodologique pour évaluer cet impact se poursuit (Ochou, 2018). Bien qu'une étude ait déjà examiné l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture au Burundi (Ntagahoraho & Kamgnia, 2023), aucune ne prend explicitement en compte les stratégies d'adaptation mises en œuvre par les agriculteurs, telles que le choix des espèces à cultiver ou la pratique des polycultures, ni ne montre comment cet impact varie selon les régions agroclimatiques ou les types de cultures, informations cruciales pour une gestion efficace et stratifiée des risques.

En ce sens, le présent travail présente un double avantage : il permet d'une part de formuler des recommandations pour des stratégies d'adaptation optimales et personnalisées à chaque région et culture étudiée ; et d'autre part, il contribue à économiser des ressources financières en évitant des dépenses pour des stratégies d'adaptation inefficaces en termes de coûts-bénéfices (Etwire et al., 2019; Ginbo, 2022; N. Seo & Mendelsohn, 2008). Ainsi, cette étude constitue à la fois une référence académique et un guide pratique pour améliorer la résilience du secteur agricole burundais face au changement climatique.

**Conclusion du premier chapitre**

Pour conclure, ce chapitre a mis en évidence la forte dépendance de l'agriculture burundaise au climat et la vulnérabilité accrue du pays face aux effets du changement climatique. Malgré les efforts déjà engagés pour renforcer la résilience du secteur, la compréhension des impacts économiques de ces changements sur l'agriculture reste limitée. Cette étude s'inscrit donc dans la nécessité d'évaluer ces impacts selon les cultures et les régions agroécologiques, afin d'éclairer la formulation de politiques d'adaptation différenciées et fondées sur des données empiriques. Elle offre ainsi une contribution scientifique et pratique essentielle pour un développement agricole durable et résilient au Burundi.

# CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE

Afin de se baser sur d'autres études qui ont été réalisées sur l'évaluation d'impact du changement climatique sur l'agriculture, une consultation de plusieurs articles et livres parlant à ce sujet a été réalisée. Ce chapitre à travers sa première partie présente l'état actuel de connaissances sur les différents modèles théoriques et approches utilisés par les économistes dans l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. Avant de présenter le modèle ricardien ou hédoniste (Mendelsohn et al., 1994) et sa variante modifiée appelée Modèle Structurel Ricardien (Da Cunha et al., 2015; Etwire et al., 2019; Kurukulasuriya et al., 2011) utilisé dans ce travail, les limites d'autres modèles qui ont motivé l'introduction du modèle ricardien seront d'abord présentées. Bien que l'approche ricardienne a été choisie pour la présente étude, ses limites feront également parties de l'objet de ce chapitre ainsi que le modele structurel ricardien proposé comme solution au problème de l'endogénéité de l'adaptation. En deuxième lieu, les différentes études empiriques réalisées dans le cadre d'une approche ricardiene seront présentées. Enfin, un cadre conceptuel du présent travail est abordé.

## II.1. Cadre théorique

Bien que le modèle ricardien est celui qui est utilisé dans ce travail, il existe d'autres méthodes diverses utilisées en modélisation d'impact du changement climatique sur l'agriculture. Le choix d'un modèle se fait nécessairement selon la dimension de l'agriculture qui intéresse le chercheur. En effet, ce dernier peut être intéressé soit par la dimension biophysique des cultures cultivées soit par la dimension socioéconomique de l'agriculture (Feenstra et al., 1998).

Pour ces deux dimensions de l'agriculture qui conditionnent le choix du modèle, ces auteurs distinguent quatre niveaux d'analyse de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. Parmi ces quatre niveaux, (i) il n'y a qu'un seul qui est associé à la dimension biophysique de l'agriculture dont l'analyse se limite uniquement aux impacts du changement climatique sur le rendement des cultures (S. R. Adams et al., 2001; Newton, 1990). Les trois autres niveaux d'analyse d'impact s'intéressent respectivement (ii) aux effets du changement climatique sur la production et le revenu de l'exploitation ou du village (Mendelsohn et al., 1994), (iii) aux effets sur la production nationale et régionale (Easterling et al., 1993; Kaiser et al., 1993) et (iv) enfin le niveau qui s'occupe aux impacts du changement climatique sur les produits et les prix mondiaux (Nelson et al., 2010).

Cette diversité des niveaux d'analyse d'impact du changement climatique sur l'agriculture suite à la considération de la dimension socioéconomique de l'agriculture provient dans le fait que l'analyse économique elle-même s'opère à deux niveaux différents.

Le niveau (ii) correspond à l'analyse économique d'équilibre partielle qui s'intéresse à l'équilibre d'un seul marché ou à un sous ensemble de marché en considérant que cette équilibre est indépendante d'autres marchés (Kaiser et al., 1993). C'est le cas pour le présent travail, l'équilibre du marché agricole est considéré indépendant d'autres marchés. Les niveaux d'analyse (iii) et (iv) se font dans le cas où l'économie est considérée comme un ensemble complet des marchés et interdépendants entre eux on parle de l'analyse économique d'équilibre général (Nelson et al., 2010), on tient compte de l'interdépendance du secteur agricole avec les autres secteurs de l'économie.

La littérature montre que les modèles ou les approches les plus utilisés pour l'évaluation d'impact économique du changement climatique sur l'agriculture sont : (i) les modèles de régression économétrique tel que l'approche ricardienne appliquée soit aux données de coupes transversales soit aux données de panel (Blanc & Reilly, 2017; Husnain et al., 2018), la littérature la plus récente ajoute à ces derniers, les modèles non-paramétriques plus ou moins complexes utilisés en Intelligence Artificielle (Crane-Droesch, 2018) ; (ii) les modèles agro économiques dont certains sont classés au niveau des modèles d'équilibre partielle et d'autres au niveau des modèles d'équilibre générale (Blanc & Reilly, 2017; Mendelsohn & Dinar, 1999), dont Mendelsohn et Dinar (1999) ajoutent à ceux-ci les modèles d'analyse des zones agro écologiques.

Cependant, les deux derniers modèles reposent sur les résultats d'un modèle de croissance des cultures qui en son tour est calibré à partir des résultats des modèles basés sur les expériences de laboratoires contrôlées (Mendelsohn & Dinar, 1999) d'où l'intérêt dans cette étude de décrire d'abord ces modèles qui s'intéressent aux effets du changement climatique sur les rendements de cultures.

### II.1.1. Approche basée sur les expériences de laboratoire contrôlées

La manière la plus correcte d'évaluer avec précision l'impact du changement climatique sur l'agriculture serait de réaliser des expériences contrôlées (Feenstra et al., 1998). Cependant, cela est impossible parce que non seulement l'agriculture admet une composante socioéconomique dont ses éléments surtout le comportement humain est difficile à contrôler, mais il est également difficile de contrôler tous les éléments climatiques et environnementaux biotiques et abiotiques qui interviennent dans le mécanisme qui produit la relation de cause à effet entre le changement climatique et l'agriculture.

Pour contourner ces défis, les expérimentateurs décident de s'intéresser uniquement aux impacts de certains éléments du climat et de l'atmosphère tel que le gaz carbonique $CO_2$ et les autres gaz sur les rendements et le comportement des cultures (Newton, 1990) et pas à l'agriculture de

manière générale c'est-à-dire sans considération de toutes les dimensions socio-économiques de l'agriculture.

Pour ce faire, les cultures sont plantées dans des chambres expérimentales qui permettent non seulement d'éviter les influences extérieures non souhaitées mais également de capturer les réponses des cultures au niveau des rendements ou de la biomasse suite aux changements de certaines variables climatiques comme la température et des variables atmosphériques comme les gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique ($CO_2$). L'un des exemples de ce genre d'expérimentation est celui qui a été fait sur l'analyse de l'effet de température sur la croissance et le développement des tomates (S. R. Adams et al., 2001). A partir des données obtenues dans ces expériences, un modèle sous forme d'équation tel que le modèle de temps thermique est estimé pour permettre en son tour non seulement de prédire l'effet de température pour chaque niveau de croissance d'une plante mais aussi de prédire l'impact du changement climatique sous différents scenarios prévus par les modèles de circulation générale (MCG) sur une culture analysée. Ces études ont conclu qu'il y a et aura des effets positifs/négatifs du changement climatique sur les rendements des cultures selon les scenarios de $CO_2$, le type des cultures et les régions (Grohs et al., 2020).

Bien que ces modèles sont précis grâce au contrôle exercé sur les autres sources de variations de rendements des cultures à travers les chambres d'expérimentation qui leur permettent par conséquent d'estimer correctement une relation de cause à effet entre le changement climatique et les rendements des cultures, ils présentent deux grands majeurs inconvénients : ils ne peuvent pas estimer l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture du fait qu'ils ne tiennent pas compte de la capacité des agriculteurs qui sont des agents économiques dont leur objectif de maximiser le profit les incitent à s'adapter d'une manière ou d'une autre aux changements climatiques ; n'étant pas capable alors de tenir compte implicitement ou explicitement de ces stratégies d'adaptation mise en place par les agriculteurs comme par exemple l'adoption des cultures compatibles aux nouvelles conditions climatiques, ces expériences de laboratoire contrôlées auront tendance à surestimer les effets négatifs du changement climatique et à sous-estimer ceux qui sont positifs.

En plus de ce problème de surestimation des dommages du changement climatique dans le monde réel, ces expériences de laboratoire contrôlées exigent beaucoup de moyens logistiques en termes d'infrastructures nécessaires et trop de temps d'observations, il est presque impossible de les réaliser dans des échelles plus larges comme à l'échelle nationale (Feenstra et al., 1998; Feng et al., 2023).

Afin de contourner ce défi, les modèles de croissance de cultures ont été développés. Dans le point suivant, nous présentons les caractéristiques et le fonctionnement de ces modèles.

### II.1.2. Modèles de croissances de cultures

Les modèles de croissance de cultures présentent des alternatives pour les inconvénients imposés par les expériences de laboratoire contrôlées pour modéliser l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures (Mahdi & Singh, 2022). En effet, les expériences de laboratoire contrôlées en cherchant à contrôler plusieurs facteurs susceptibles d'influencer les rendements des cultures par le moyen des chambres d'expérimentations afin de mettre en évidence l'effet de chaque variable y compris les variables climatiques (température, eau, etc.) se retrouvent dans un environnement qui s'éloigne de plus en plus de l'environnement réel dans lequel les agriculteurs cultivent leurs cultures et ça deviennent encore plus difficile voire même impossible de généraliser les résultats sur un territoire plus ou moins vaste.

Pour remédier à ces problèmes, les modèles de croissance de cultures sont estimés à partir des données collectées régulièrement dans les conditions réelles de champs des cultures, cette approche permet également à ces modèles de croissance de prendre en compte des conditions environnementales (variations saisonnières, les conditions climatiques locales, etc) ; des caractéristiques du sol (Hétérogénéité des sol, la structure du sol, et les interactions complexes avec les racines des plantes) surtout la capacité d'étendre l'étude sur une grande échelle (Deryng et al., 2011) ; des pratiques culturales ( Pratiques agricoles liées aux préférences des agriculteurs) et des interactions des inputs (la relation entre la disponibilité des nutriments, l'eau, et les conditions climatiques) (Asseng et al., 2015) qui sont difficiles ou impossible de simuler dans les laboratoires.

Les modèles de croissance de cultures estiment alors plusieurs équations (Equation différentielle de la croissance de la biomasse en fonction du temps, une équation caractérisant la photosynthèse, etc.) qui relient les variables appelées les entrées (inputs) du modèle concernant le climat, les caractéristiques du sol (physiques et chimiques), l'atmosphère, les pratiques agricoles avec les sorties du modèle qui sont les données des variables observées pendant la période de croissance d'une culture (le poids total des plantes, la hauteur des plantes, le nombre de feuilles, le taux de photosynthèse) et les données mesurées après la récolte comme la production récoltée (Annie et al., 2023) ; certaines études ont ajouté progressivement dans les résultats du modèle la qualité de la récolte (Pan et al., 2006).

Depuis la première estimation du modèle de croissance des cultures dans les années 1980, plusieurs modèles ont été estimés et ils ont été mis en œuvre dans les différents plateformes comme DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator), EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), CropSyst (Cropping Systems Simulation Model), etc. (Asseng et al., 2015). Pour améliorer la performance, les modèles de croissance de cultures peuvent être calibrés en intégrant les résultats obtenus dans les expériences en laboratoire contrôlées. Le bilan de quelques études d'analyse d'impact du changement climatique sur l'agriculture montre que la plupart de ces études prédisent des impacts négatifs.

**Tableau 1 : Etudes d'impact utilisant les modèles de croissance des cultures**

| **Etude** | **Région** | **Cultures** | **Impact** |
|---|---|---|---|
| Smith et al. (1996) | Africa | Maïs | $-14\%$ à $-12\%$ |
| | Egypte | Riz | $-51\%$ à $-5\%$ |
| | | Blé | $-25\%$ à $-3\%$ |
| Anwar et al. (2007) | Australie | Blé | $-29\%$ |
| Rosenzweig and Iglesias (1994) | Etats-Unis d'Amérique | Blé | $-20\%$ à $-2\%$ |
| | | Maïs | $-30\%$ à $-15\%$ |
| | | Soja | $+40\%$ à $15\%$ |
| de Siqueira et al. (1994) | Brésil | Blé | $-50\%$ à $-15\%$ |
| | | Maïs | $-25\%$ à $-2\%$ |
| | | Soja | $-61\%$ à $-6\%$ |
| Brklacich et al. (1994) | Canada | | $-40\%$ à $+234\%$ |
| Liverman and O'Brien (1991) | Mexique | Maïs | $-61\%$ à $-6\%$ |
| Aggarwal and Kalra (1994) | Inde | Blé | $-18{,}3\%$ à $-3{,}9\%$ |
| | | Riz | $16{,}8\%$ à $-1\%$ |

**Source** : Mahdi et Singh (2022)

Les modèles de croissance de cultures présentent deux limites principales à savoir : La dépendance à plusieurs facteurs de la croissance des cultures exige un coût énorme en terme de temps et de l'argent pour la collecte de données sur tous ces facteurs.

Une autre limite de ces modèles de croissance des cultures est qu'ils ne tiennent pas en compte des stratégies d'adaptation surtout celle du changement de culture mise en place par les agriculteurs, ils ont alors tendance à surestimer les pertes dues au changement climatique. Cependant, ils jouent un rôle crucial car les modèles économiques s'y reposent pour capturer les effets économiques et sociaux du changement climatique. Dans ce qui suit nous présentons les modèles qui intègrent la dimension économique de l'agriculture afin de mesurer l'impact économique du changement climatique.

### II.1.3. Modèles agro-économiques

Les modèles biophysiques n'étant pas capable de mesurer l'impact socio-économique du changement climatique, les chercheurs économistes ont mise en place des modèles dites agro-économiques qui défient ce problème. L'approche de l'évaluation d'impact du changement climatique fondée sur la modélisation agro-économique consiste comme son nom l'indique à intégrer les résultats des modèles agronomiques des cultures dans un modèle d'économie agricole nationale (R. M. Adams et al., 1990).

Le secteur agricole d'un pays est représenté par un Modèle Agricole Sectoriel (MAS) (ASM : Agricultural Sector Model en anglais) utilisé par les chercheurs américains (N. Seo, 2015)) est un système d'équations contenant : la fonction d'offre, de demande, les prix, l'importation, l'exportation pour les différentes cultures ; avec ces informations, le modèle agricole sectoriel fournit aussi la possibilité de connaitre le surplus à la fois du producteur et du consommateur. Le Modèle Agricole Sectoriel (MAS) est construit à partir des données collectées auprès des exploitations représentatives choisies dans des régions de production homogènes (homogènes en termes, l'utilisation des terres, la disponibilité en eau et l'irrigation, etc.) (Kaiser et al., 1993). Les surplus des producteurs et des consommateurs permettent alors de calculer le bien-être social qui n'est que leur somme.

Pour calculer l'impact socio-économique du changement climatique à travers l'agriculture, il faut reconstruire le modèle agricole sectoriel (MAS) sous le changement climatique. Pour ce faire, on procède comme suit :

- Sélection des cultures à étudier ;
- Diviser le pays en régions de production homogènes (homogènes en termes de l'utilisation des terres, la disponibilité des ressources et l'irrigation, etc.) ;
- Choix des exploitations agricoles représentatives dans chaque région de production homogène ;

- Estimer un modèle de croissance de cultures sur les régions agro-climatiques d'un pays par exemple comme c'est le cas pour Adams et al. (1990) ;
- Sous un scénario du changement climatique (double du niveau de $CO_2$ émis dans l'atmosphère par rapport au niveau actuel), estimer les impacts de ce scenario au niveau des rendements des cultures, de la disponibilité en eau, de l'utilisation de ressources en utilisant le modèle de croissance de cultures estimé dans l'étape précédente ;
- Mettre à jour les données des exploitations agricoles représentatives dans chaque région de production homogène en intégrant les impacts du changement climatique obtenus pour l'étape précédente ;
- Avec ces nouvelles données des exploitations représentatives des régions de production homogènes obtenu en considérant qu'un scenario du changement climatique s'est produit reconstruit un Modèle Agricole Sectoriel ;
- A partir de ce nouveau modèle agricole sectoriel sous un changement climatique, calculer le nouveau bien-être social (somme des surplus des producteurs et des consommateurs).

  L'impact économique du changement climatique est alors la différence entre le bien-être social sans le scenario d'un changement climatique et le bien-être social calculé avec la considération d'un scenario du changement climatique. Cette différence représente le revenu net du secteur agricole gagné ou perdu par les producteurs et les consommateurs (les résidents et les étrangers ensemble du fait que le modèle agricole sectoriel contient les équations qui décrivent les importations et les exportations) dû au changement climatique.

  Etant donné que l'objectif des producteurs et des consommateurs est de maximiser leurs surplus donc cette différence, ils vont mettre en place des stratégies d'adaptation qui peuvent être enregistrées dans les différentes variables du modèle agricole sectoriel national. De ce fait, deux constants en découlent : (i) les modèles agro-économiques capturent certaines sortes d'adaptation des agriculteurs ce qui est une grande amélioration par rapport aux deux premiers modèles biophysiques qui ne capturent que des effets sur les rendements des cultures ; (ii) l'objectif des consommateurs et des agriculteurs de maximiser leurs surplus est un problème d'optimisation sous contraintes d'où l'utilisation des techniques de la programmation quadratique pour résoudre ces modèles après l'insertion des effets sur les rendements obtenus par les modèles de croissance de cultures. (R. M. Adams et al., 1990; Kaiser et al., 1993).

Les résultats obtenus par Adams et al. (1990) et Adams et al. (1999) sous l'hypothèse que la demande et la technologie restent inchangées sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 2 : Etudes d'impact utilisant les Modèle agro-économique en Amérique**

| | Consommateurs | Producteurs | Surplus étranger | Total |
|---|---|---|---|---|
| Adams et al. (1990) : En supposant que la demande et la technologie restent inchangées | | | | |
| Baseline | 77.32 $10^9$ $ | 17.8 $10^9$ $ | | 95.2 $10^9$ $ |
| GISS(Goddard Institute for Space Studies) with $CO_2$ doubling | +12.0% | +8.9% | | +11.4% |
| GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) with CO2 doubling | −18.0% | +19.9% | | −10.9% |
| Adams et al. (1990) : En supposant une référence de 2060 | | | | |
| GISS with CO2 doubling | +20.6 $10^9$$ | +45.4.6 $10^9$$ | +50.6 $10^9$$ | +116.6 $10^9$$(environ +7% de la valeur total du secteur agricole) |
| GFDL with CO2 doubling | −65.7 $10^9$$ | +52.2 $10^9$$ | −3.4 $10^9$$ | −16.9 $10^9$$(environ −1% de la valeur total du secteur agricole) |

Source : ( Seo, 2015)

Les Modèles Agro-Economiques en intégrant la dimension économique dans l'analyse de l'impact du changement climatique sur l'agriculture deviennent plus optimiste que les modèles de croissance de cultures et les expériences en laboratoire contrôlées. En effet, les modèles agro-économiques captent les adaptations des producteurs surtout la manière dont ces derniers peuvent augmenter les prix suite à la diminution de leur production (offre) dû au changement climatique. Le constant est que les consommateurs selon ce modèle, ce sont eux qui enregistrent des effets négatifs par rapport aux producteurs.

Une limite pour ces modèles est qu'ils ne peuvent pas capter les adaptations des agriculteurs qui sont en dehors de la manipulation des prix, par exemple, si les agriculteurs s'adaptent à travers le changement d'espèces à cultiver ; ils ne capteront pas ce type d'adaptations.

Pour la suite, on représente les modèles qui sont capables de capter les adaptations des agriculteurs qui consiste même à changer des espèces cultivées, l'irrigation, le choix de type d'exploitation, etc.

### II.1.4. Modèle Ricardien

#### II.1.4.1. Présentation de l'approche ricardienne

Le modèle ricardien peut-être abordé comme suit :

Supposons l'existence d'un système bien structuré de fonctions d'offre de forme :

$Q_i = Q_i(K_i, E)$ , $i = 1,2, \ldots\ldots, n$
(2.1)

Où :

$K_i = [K_{i1}, \ldots\ldots, K_{ij}, \ldots\ldots K_{iJ}]$ avec $K_{ij}$ la quantité de l'intrant $j$ acheté et utilisé dans la production du bien $i$.

De la même manière on a :

$E = [E_1, \ldots\ldots E_m, \ldots\ldots, E_M]$ ;

Où $E_m$ est un intrant environnemental considéré comme exogène $m$ $(m = 1, \ldots\ldots, M)$ dans la production des biens. Dans le contexte agricole qui fait l'objet d'étude ici, $E$ représente plusieurs éléments dont la qualité du sol et les variables climatiques telles que la température, la précipitation.

Étant donné un ensemble de prix des facteurs $w_j$ pour $K_j$, $E$, et la fonction de production $Q$, l'objectif de minimisation des coûts permet d'établir une fonction de coût suivante :

$C_i = C_i(Q_i, W, E)$ (2.2)

Où :

$C_i$ est le coût de production du bien $i$ et

$W = (W_1, \ldots\ldots, W_j, \ldots\ldots, W_J)$ est l'ensemble des prix des quantités d'intrants utilisés pour produire le bien $i$.

Supposons que les consommateurs aient un système bien structuré de fonctions de demande inverse pour tous les biens et services qui leur permettent sous contraintes de leur budget de prendre des décisions optimales concernant la maximisation de leur utilité. Cela permet d'établir un système de fonctions de demande inverse suivant :

$$P_i = D^{-1}(Q_1, Q_2, \ldots, Q_n, Y); \quad i = 1, \ldots, n \tag{2.3}$$

Où :

$P_i$ et $Q_i$ sont respectivement le prix et la quantité du bien $i$ et $Y$ est le revenu agrégé.

Sachant les prix du marché, et en considérant la terre, $L_i$ comme un facteur de production distinct avec les caractéristiques $E$ et un coût ou loyer annuel $p_{LE}$ , les agriculteurs maximisent leur profit pour une site (ou une parcelle) donnée de cultures comme suit :

$$\max_{Q_i} P_i Q_i - C_i(Q_i, W, E) - p_{LE} L_i \tag{2.4}$$

Les agriculteurs égalisent le prix de leurs produits avec le coût marginal de production et sous l'hypothèse de la concurrence parfaite (la libre entrée et sortie des agriculteurs et des consommateurs dans le marché) on a :

$$P_i Q_i^* - C_i^*(Q_i^*, W, E) - p_{LE} L_i = 0 \tag{2.5}$$

Si $i$ est la meilleure utilisation de la terre étant donné $E$ et $W$, le loyer observé sur le marché pour la terre sera égal aux profits nets annuels de la production du bien $i$.

En réarrangeant l'équation (2.5) pour obtenir la valeur de la terre on a :

$$p_{LE} = \frac{P_i Q_i^* - C_i^*(Q_i^*, W, E)}{L_i} \tag{2.6}$$

Le loyer de la terre doit être égal aux revenus nets générés par la terre. En prenant la valeur actuelle de ce flux de revenus au fil du temps, on peut en déduire que la valeur de la terre, $V_{LE}$ , est égale à la valeur actuelle des flux de revenus nets futurs.

$$V_{LE} = \int_0^{\infty} \frac{[P_i Q_i^* - C_i^*(Q_i^*, W, E)] e^{-rt}}{L_i} dt \tag{2.7}$$

### II.1.4.2. Critiques du modèle ricardien

Comme les autres modèles évoqués ci-haut, l'approche ricardienne a été sujet de différent critiques. Les plus grands critiques du modèle ricardien sont les suivants :

- **Omission de la variable irrigation :** Les différents auteurs ont montré que le modèle ricardien tel que présenté par Mendelsohn et al. (1994) avait un problème de non considération de l'irrigation qui pourrait être à l'origine de la convexité de la courbe reliant les variables climatiques et les valeurs des terres agricoles ce qui est contraire à l'évidence de la recherche agronomique dans les expériences en laboratoire ou dans les champs expérimentales qui stipule que la courbe reliant les variables climatiques (la température et les précipitations) et la productivité agricole est concave (Fisher & Hanemann, 1998).

- **L'hypothèse de la constance des prix**, c'est une hypothèse qui stipule que si l'offre des produits agricoles diminue suite au changement climatique au niveau local, alors elle sera remplacée par l'offre provenant de l'extérieur et pour ce le prix ne va pas changer. Cette hypothèse justifie pourquoi l'analyse ricardienne des valeurs des terres agricoles ne mesure que les impacts qui sont capitalisés dans les terres agricoles, sans toutefois tenir compte des impacts sur les consommateurs. Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, alors le modèle présente un biais de surestimer les effets positifs du changement climatique. Les auteurs de modèle ricardien répliquent en acceptant d'abord que cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée mais qu'avec les calculs qu'ils ont faits, le biais est négligeable proportionnellement à la variation du surplus total constaté. En effet, ils montrent que Pour des élasticités raisonnables de l'offre et de la demande, le biais est selon leurs calculs inférieur à 2% pour un choc d'offre de 10% et inférieur à 5% pour un choc d'offre de 25% (Mendelsohn & Dinar, 1999). De toute évidence, le biais de l'hypothèse d'un équilibre partiel est beaucoup moins important que d'obtenir la taille du choc en premier lieu.

- **Adaptation sans coût :** Le modèle ricardien étant une approche statique comparative, les auteurs supposent que les adaptations resteront inchangées ce qui n'est pas toujours vrai (Quiggin & Horowitz, 1999). Les auteurs du modèle ricardien avouent ce problème et argumentent que les coûts mise en place par les agriculteurs d'une année en année n'exigent pas des coûts énormes (Ochou, 2018).

- **Exogénéité d'adaptation** : Bien que le modèle ricardien permet de prendre en compte l'adaptation, il le fait de manière implicite cela présente alors deux problèmes : (i) il ne renseigne ni le type d'adaptation que l'agriculteur a mise en place ni à quel degré et sens cette stratégie a permis ou permettra d'éviter les dommages économiques agricoles du changement climatique alors que cela est indispensable dans le but de savoir les pratiques d'adaptation à encourager ou abandonner. (ii) le deuxième problème est technique, en effet, l'adaptation d'une part explique le revenu net agricole de l'agriculteur et d'autre part elle est à son tour expliquée par les variables climatiques (température, précipitation, etc.), environnementales (la

qualité du sol, hydrologie, etc.) et socioéconomiques (éducation, capital, âge, etc.). La non prise en compte de cette structure qui montre les effets directs et indirects du climat fait que les estimations obtenues par le modèle standard ricardien soient biaisées. C'est le biais d'endogénéité d'une part et de sélection d'autre part. Par exemple l'adaptation la plus considérée par les auteurs du modèle standard ricardien est le choix du type de culture effectué par les agriculteurs dans le but de s'adapter (Mendelsohn & Dinar, 1999). Ils supposent que cette adaptation est exogène, cependant plusieurs travaux ont montré que le choix d'espèce de culture à cultiver est endogène (Da Cunha et al., 2015; Etwire et al., 2019).

Pour corriger le problème d'endogénéité des stratégies d'adaptations mise en place par les agriculteurs un modèle ricardien modifié a été proposé. Il s'agit d'un modèle intitulé Model Ricardien Structurel (SRM : Structural Ricardian Model en anglais)

### II.1.5. Modèle Structurel Ricardien

Dans un modèle ricardien traditionnel de productivité agricole, on suppose que les agriculteurs allouent leurs terres à différentes cultures de manière à maximiser le profit, et par conséquent, les valeurs foncières reflètent la valeur actualisée des revenus agricoles futurs (Mendelsohn et al., 1994; Mendelsohn & Dinar, 1999). Ce modèle a été critiqué pour son manque d'attention aux facteurs influençant le choix des cultures (FAO, 2015; Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008; N. Seo & Mendelsohn, 2008), et le modèle structurel ricardien répond à cette critique en intégrant un modèle explicite du choix de culture par l'agriculteur. Dans cette version du modèle, supposons que l'attrait de la culture j sur la parcelle i soit donné par :

$$y_{ij}^{*} = \beta_j x_i + v_{ij} \quad (2.8)$$

Ici, $x_i$ représente un vecteur de caractéristiques de la ferme et $\beta_j$ un vecteur de paramètres à estimer. Si le terme d'erreur $v_i$ suit une distribution de Gumbel et si l'agriculteur de la parcelle $i$ choisit la culture la plus désirable, alors la probabilité que la culture $j$ soit choisie parmi $J$ alternatives ($P_{ij}$) est donnée par l'équation suivante :

$$P_{ij} = \frac{exp(\beta_j x_i)}{\sum_{k=0}^{J} exp(\beta_k x_i)} \quad (2.9)$$

Supposons en outre que le revenu net annuel par hectare de la culture $j$ ($\varphi_{ij}$) soit donnée par la fonction suivante :

$$\frac{\varphi_{ij}^{(\theta)} - 1}{\theta} = \alpha_j z_i + w_{ij} \quad (2.10)$$

Ici, $z_i$ représente un vecteur de caractéristiques de l'exploitation agricole (excluant au moins une

des $x_i$variables), $\alpha_j$ représente un autre vecteur de paramètres à estimer, et $w_{ij}$ représente un terme d'erreur distribué normalement. Le côté gauche de l'équation (2.10) est une transformation de Box-Cox intégrant le paramètre $\theta$ (Box & Cox, 1964). L'estimation directe de cette équation est susceptible de souffrir d'un biais de sélection mais, en ayant ajusté l'équation (2.11) aux données en utilisant un modèle logit multinomial, le biais peut être corrigé en ajustant l'équation suivante (Dubin et McFadden, 1984 ; Bourguignon et al., 2007 ; Seo et Mendelsohn, 2008) :

$$\frac{\boldsymbol{\varphi_{ij}^{(\theta)}-1}}{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\alpha_j z_i} + \boldsymbol{\sigma}\frac{\sqrt{6}}{\boldsymbol{n}}\sum_{\boldsymbol{k\neq j}} \boldsymbol{r_{kj}}\left(\frac{\boldsymbol{P_{ik}ln(P_{ik})}}{\boldsymbol{1-P_{ik}}} + \boldsymbol{ln(P_{ij})}\right) + w_{ij} \qquad (2.11)$$

Ici, $\boldsymbol{r_{kj}} = \boldsymbol{corr}(w_{ij}, v_{ik})$ et $\sigma$ est le paramètre variance. $\sigma r_{kj}$ Peut-être estimé directement. (Salvo, 2013) pour une application précédente du SRM de la transformation de Box-Cox. Cette transformation permet à l'équation pour le revenu net de prendre diverses formes fonctionnelles alternatives, englobant des équations en niveaux (Coster & Adeoti, 2015; Kurukulasuriya & Ajwad, 2007; S. N. Seo & Mendelsohn, 2008) ainsi que des fonctions inverses et semi-logarithmiques (Chatzopoulos & Lippert, 2015; Fezzi & Bateman, 2013). Une autre caractéristique intéressante de la transformation de Box-Cox est sa capacité à compenser l'hétéroscédasticité (Blaylock et al., 1980). Dans le cas particulier de $\theta = 1$, nous avons un modèle en niveaux, dans le cas de $\theta = 0$, nous avons un modèle logarithmique, et dans le cas de $\theta = -1$, nous avons une transformation inverse (Box & Cox, 1964).

Etant donné, la capacité de ce modèle pour gérer l'endogénéité des stratégies d'adaptation (Le choix de culture à cultiver, adoption de l'irrigation, etc.), il sera utilisé dans notre application pour l'évaluation d'impact économique du changement climatique au Burundi

### II.2. Revue de la littérature empirique

Etant donné que nous évaluons l'impact du changement climatique en utilisant une extension du modèle ricardien, la revue de la littérature empirique développée dans ce mémoire s'intéresse uniquement au modèle structurel ricardien utilisé dans le présent travail.

Depuis le premier modèle ricardien classique initié par Mendelsohn et al. (1994) plusieurs applications de ce modèle à travers plusieurs pays ont été réalisées. Parmi ces applications, il y a celles qui ont contribué à l'amélioration du modèle de départ soit en ajoutant d'autres variables pour gérer le biais induit par l'omission de certaines variables significatives soit en proposant l'utilisation de données de panel (Deschênes & Greenstone, 2007; Massetti & Mendelsohn, 2011; Schlenker & Lobell, 2010) ou de données des ventes des terres agricoles répétées (Bareille & Chakir, 2023) d'autres encore ont proposé l'utilisation du semi-log du revenu net agricole ou du prix de la terre comme variable dépendante (Schlenker et al., 2004). La présente revue de la

littérature empirique s'intéresse spécifiquement aux différents résultats obtenus dans les différents localités en utilisant le modèle structurel ricardien.

En 2008, le modèle structurel ricardien a été appliqué dans une étude menée dans les onze pays africains (Burkina Faso, Cameroun, Egypte, Ethiopie, Kenya, Ghana, Niger, Sénégal, Afrique du Sud, Zambie et Zimbabwe), en considérant les combinaisons de cultures comme des choix uniques (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008). Les résultats montrent que les agriculteurs adaptent leurs choix en fonction des conditions climatiques locales : le niébé et le mil dominent dans les régions chaudes, tandis que le maïs reste adapté à divers climats. Les combinaisons de cultures (par ex. maïs-haricots ou mil-arachide) offrent une meilleure résistance au changement climatique que les monocultures. L'estimation des revenus nets indique que, selon les scénarios climatiques, le bien-être agricole pourrait légèrement croître ou décliner, mais les agriculteurs qui n'ajustent pas leurs choix de cultures subiraient des pertes beaucoup plus importantes.

Le modèle structurel ricardien a été réalisé dans les dix pays africains en intégrant explicitement le type d'exploitation (pluviale, irriguée, mixte ou élevage seul) comme stratégie d'adaptation (N. Seo & Mendelsohn, 2008). Les résultats montrent que les températures élevées incitent à adopter des exploitations mixtes plutôt que spécialisées, tandis que l'augmentation des précipitations favorise les cultures pluviales par rapport à l'irrigation. L'analyse révèle également que l'usage d'un modèle ricardien standard, sans prise en compte explicite du type d'exploitation, surestime les pertes de revenu agricole d'environ 35 % par rapport au modèle structurel, ce qui souligne l'importance d'intégrer les choix d'exploitation dans l'évaluation des impacts climatiques.

Une étude également pour les onze pays africains a été fait en tenant explicitement compte de l'irrigation dans le modèle (Kurukulasuriya et al., 2011). Contrairement aux études citées ci-dessus, ces auteurs utilisent le modèle probit pour modéliser le choix de l'irrigation au lieu du modèle multinomiale logit, pour éviter les résultats biaisés des tests de significativité des paramètres, ils utilisent des erreurs-standards robustes calculer à partir de l'estimateur de la variance de Huber-White qui corrige le problème d'heteroskedasticite. Les résultats montrent que : l'effet annuel de températures plus élevées est l'augmentation de la probabilité d'adopter l'irrigation ; la probabilité d'adopter l'irrigation diminue avec l'augmentation de précipitations dans chaque saison, sauf en été. Enfin, les auteurs trouvent que les agriculteurs privilégient l'irrigation dans les climats africains plus chauds et plus secs, avec un bon débit d'eau au printemps et en automne.

Afin d'éviter le problème des variables omises qui sont liées au pays, les auteurs estiment de nouveau le modèle probit de choix de l'irrigation et le modèle de revenu net agricole conditionné par la probabilité de choix d'irrigation avec des effets fixes au niveau des pays. Ils trouvent que les agriculteurs au Cameroun et au Kenya sont plus susceptibles d'irriguer, en contrôlant pour le reste des variables indépendantes. Les résultats montrent qu'en maintenant l'irrigation à son niveau actuel, les modèles exogènes prédisent qu'un tel scénario n'apporterait qu'un petit bénéfice de 9 %. En permettant une expansion de l'irrigation sous le scénario PCM, le modèle endogène prévoit un bénéfice de 35 %.

En Asie du Sud-Est (Bangladesh, Indonésie, Sri Lanka, Thaïlande et Vietnam) le modèle structurel ricardien a été estimé pour analyser l'impact du changement climatique sur l'agriculture (Abidoye et al., 2017). Le choix du nombre de saisons cultivées est modélisé par un logit multinomial comme stratégie d'adaptation, et le revenu net par une régression MCO conditionnée à ce choix. Les auteurs montrent que les précipitations influencent de façon non linéaire le choix du nombre de saisons, tandis que l'effet de la température est non significatif. Les résultats indiquent que le changement climatique pousse les agriculteurs à privilégier l'agriculture d'une saison, ce qui permet d'accroître le revenu net, contrairement aux systèmes à deux ou trois saisons où les pertes s'accentuent. Enfin, l'impact économique projeté reste globalement négatif, avec des intensités variables selon les pays.

A Taiwan, une étude empirique utilisant le modèle structurel ricardien a été réalisée pour analyser l'impact du climat sur le choix des cultures et la production de riz, légumes et fruits (Luh & Chang, 2021). Les variations de température et de précipitations influencent différemment chaque culture selon la saison et la région. Les projections climatiques (RCP : Representative Concentration Pathways) montrent un risque de baisse de production de riz à l'horizon 2100, avec des effets variables sur les légumes et les fruits.

En appplicant le modele structurel ricardien au Ghana, les auteurs ont montré que la sensibilité du revenu agricole au climat varie selon la culture, leurs nouvelles contributions consistent à montrer que la sécurisation foncière favorise les cultures à plus forte intensité d'intrants, comme le maïs et qu'il y a une forte hétérogénéité selon les formes fonctionnelles retenues (linéaire, semi-logarithmique, Box-Cox), soulignant que des hypothèses trop restrictives peuvent biaiser les conclusions (Etwire et al., 2019). Enfin, les simulations climatiques du GIEC projettent une substitution progressive vers des cultures plus tolérantes à la chaleur, comme le mil, illustrant à la fois la capacité d'adaptation et les pertes de revenu potentielles.

En 2015, pour la première fois en Europe une approche structurelle ricardienne a été utilisée pour examiner les impacts du changement climatique sur différents types de fermes en Allemagne (Chatzopoulos & Lippert, 2015). En combinant les données du recensement agricole et du service météorologique, les auteurs modélisent le type de ferme comme fonction de la température, des précipitations et de variables géographiques. Les résultats montrent que le type de ferme dépend du climat. Les prix de location augmentent avec la température et présentent une relation concave avec les précipitations. L'étude souligne que l'adaptation se fait via le choix du type de ferme et que la taille des exploitations ou les revenus hors ferme modèrent ces effets. L'approche intègre des variables instrumentales (IV/2SLS) pour corriger l'endogénéité du climat. Ces résultats confirment que le climat influence significativement la structure agricole et les valeurs foncières.

### II.3. Cadre Conceptuel

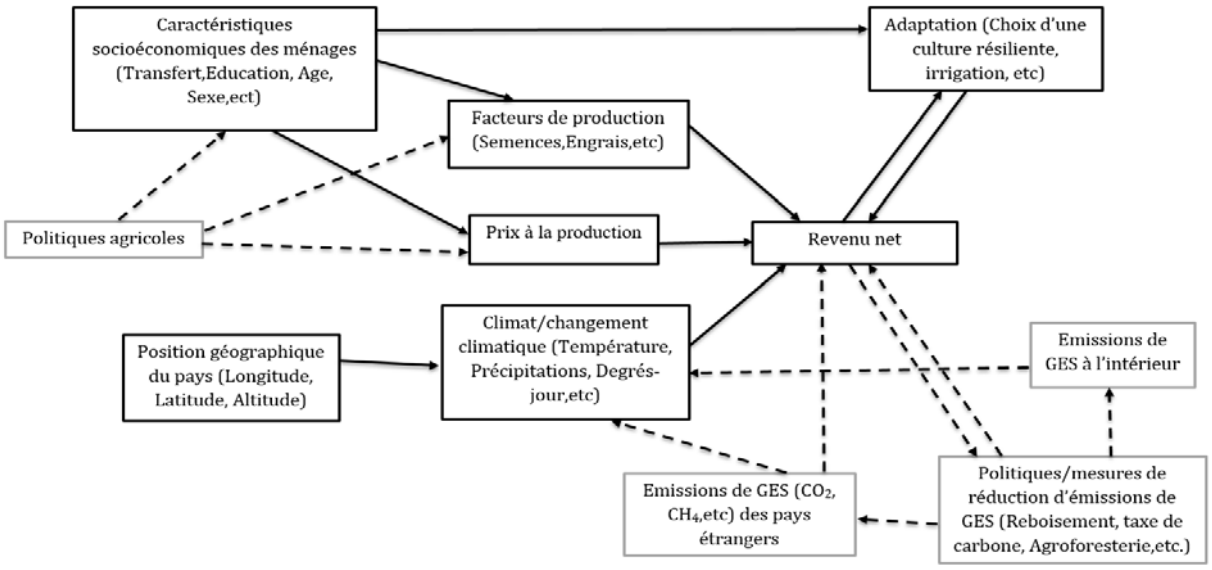



**Figure 1: Cadre conceptuel de l'évaluation de l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture. Boite grise = Variable conceptuelle non observée. Flèche pointillée = Relation conceptuelle non estimée.**

**Source : Auteur (2025).**

Afin d'illustrer le fondement des hypothèses formulées au chapitre précèdent, de justifier schématiquement la méthodologie utilisée dans le présent travail, de donner la base d'interprétation et de discussion des résultats obtenus dans cette étude, nous présentons au niveau de la figure 1 le cadre conceptuel de notre recherche. De ce cadre conceptuel, nous illustrons qu'il y a différentes interactions entre facteurs socioéconomiques, climatiques et politiques influençant le revenu net agricole par hectare.

Les caractéristiques des ménages, telles que le sexe, l'âge ou le niveau d'éducation, déterminent l'accès et l'utilisation des facteurs de production (semences, engrais, intrants), ce qui conditionne directement la productivité (Maniriho, 2024; Udry, 1996). Ces mêmes caractéristiques influencent également le choix et la mise en œuvre des stratégies d'adaptation, comme l'adoption de cultures résilientes ou l'irrigation (Bryan et al., 2013; Hirpha et al., 2020). Le revenu agricole est donc directement lié aux caractéristiques des ménages, qui déterminent leur capacité de décision, leur efficacité productive et le prix des produits vendus par les ménages (Aker, 2010). Les facteurs de production ainsi que le prix à la production exercent un effet direct sur le revenu net agricole. Par ailleurs, les politiques agricoles jouent un rôle central puisqu'elles influencent l'accès aux intrants, la fixation des prix et le soutien au revenu agricole.

Le climat ou le changement climatique, à travers les variables de température, précipitations ou degrés-jours, ont un impact direct sur la productivité agricole et donc sur les revenus (Chatzopoulos & Lippert, 2015; Etwire et al., 2019; Mendelsohn et al., 1994; Schlenker et al., 2004). Néanmoins, les ménages peuvent atténuer ces effets négatifs grâce à des stratégies d'adaptation qui améliorent leur résilience au niveau des revenus (Antle & Capalbo, 2010).

La position géographique du pays (latitude, longitude, altitude) détermine le climat et l'exposition aux aléas climatiques (IPCC, 2014). Le Burundi, bien que n'émettant qu'une très faible part des gaz à effet de serre mondiaux, subit les conséquences des émissions des pays industrialisés, ce qui renforce sa vulnérabilité (Tall & Dampha, 2023). Ainsi, les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) étrangères contribuent indirectement aux pressions climatiques locales. En réponse, les politiques de réduction des émissions nationales, telles que le reboisement, l'agroforesterie ou la taxation carbone, peuvent limiter les émissions domestiques et à s'inscrire dans la dynamique mondiale de l'Accord de Paris (Nations Unies, 2015). Enfin, l'exposition accrue aux impacts climatiques renforce la nécessité de politiques publiques d'atténuation et d'adaptation (IPCC, 2014).

Dans l'ensemble, ce cadre met en évidence que le revenu net agricole résulte d'un enchevêtrement de facteurs socioéconomiques, climatiques, géographiques et politiques, dont les interactions conditionnent la résilience des ménages agricoles face au changement climatique.

**Conclusion du deuxième chapitre**

Ce chapitre présente une revue de la littérature théorique et empirique sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture. Les modèles biophysiques surestiment souvent les dommages en négligeant les stratégies d'adaptation des agriculteurs, tandis que les modèles socioéconomiques considèrent l'équilibre partiel ou général des marchés et atténuent cette surestimation. Le modèle ricardien, et surtout son extension structurelle, permet d'intégrer explicitement l'adaptation des agriculteurs pour mesurer plus précisément l'impact économique. La littérature empirique montre que cet impact varie selon les cultures et les régions, mais peu d'études africaines utilisent ce modèle. Le présent travail applique le modèle structurel ricardien au Burundi, utilise des données climatiques interpolées et corrige l'endogénéité par IV/2SLS, fournissant ainsi une estimation robuste de l'impact économique différencié du changement climatique.

# CHAPITRE III : METHODOLOGIE

## III.1. Introduction

Pour atteindre l'objectif de mesurer l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture nous estimons le modèle structurel ricardien décrit précédemment comme une relation entre le climat et la valeur économique de l'agriculture. Cette relation est estimée à partir des données climatiques qui captent le climat et les données sur le revenu net agricole par hectare qui capte l'agriculture à travers sa dimension économique. D'autres variables agricoles, environnementales et socioéconomiques qui influencent le revenu net agricole ont été ajoutées dans le modèle afin que le modèle mette en évidence une bonne estimation de l'effet des variables climatiques sur le revenu net agricole par hectare. Les différentes sources de ces données et la méthodologie utilisée pour les traiter, les analyser et la modélisation sont décrites dans ce chapitre.

## III.2. Sources de données

Cette étude utilise trois principales sources de données pour estimer l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture. Premièrement, nous extrayons les données agricoles et socioéconomiques des agriculteurs dans la base de données construite à partir de l'Enquête Intégrée des Conditions de Vie des Ménages au Burundi (EICVMB, 2019-2020) réalisée par l'Institut National de la Statistique au Burundi (INSBU).

L'EICVMB, 2019-2020 est basée sur un plan de sondage aléatoire et stratifié à deux degrés où la première étape consiste à sélectionner les Zones de Dénombrements (ZD) dans chaque milieu rural et urbain pour chaque province[1] et enfin on sélectionne aléatoirement 10 ménages dans chaque ZD sélectionnée. L'enquête couvre 8358 ménages en total. L'enquête s'est déroulée de Mars 2020 au Février 2021, un questionnaire de 21 sections est adressé aux ménages enquêtés.

Les données agricoles utilisées dans cette étude se trouvent dans la section 16 intitulée agriculture qui admet à son tour trois sous sections – Dans la sous-section A nommée '*Parcelles'* nous y avons extrait les données liées à la main d'œuvre agricole (le montant dépensé pour le main d'œuvre, le nombre d'homme-jour par hectare a été pris ensemble pour les hommes, femmes et enfants), la source d'eau, la fertilité de la parcelle, le type du sol de la parcelle, la topographie de la parcelle, le temps qu'il faut avec le moyen usuel pour se rendre à la parcelle de l'habitation et le mode de la gestion de la parcelle. Au total, 19 390 parcelles ont fait l'objet de l'enquête.

[1] Sauf pour Bujumbura Mairie car elle est totalement urbaine.

Les données concernant les intrants : quantités des engrais inorganiques et organiques, des semences, des produits phytosanitaires ainsi que leurs dépenses ont été tirées dans la sous-section agricole B intitulé '*Coût des intrants'*. Cependant, l'unité d'observation dans cette sous-section est le ménage alors que la présente étude se fait au niveau des parcelles, nous détaillons dans le point suivant, la méthodologie utilisée pour ramener ces données au niveau des parcelles dans le point suivant. La dernière sous-section C de la section agriculture de l'EICVMB est appelée '*Cultures'***,** cette sous-section nous a fourni les données concernant le nom de la culture que l'agriculteur a décidé de cultiver dans sa parcelle, le type de semence amélioré ou locale, la quantité récoltée pour chaque culture (Les quantités de différentes utilisations de la quantité récoltée sont renseignées dans cette section ; ces utilisations sont la consommation su ménage, la vente, le stock, enfin la quantité offerte à d'autres ménages).

Les données de l'EICVMB sur le mode de gestion des parcelles montrent que 82.77% des parcelles sont gérées collectivement dans le ménage, en supposant que le profil varie d'un ménage à l'autre et que le profil de la collectivité qui gère la parcelle peut influencer indirectement le revenu net agricole ; cette étude insère alors les informations démographiques telles que l'âge, le sexe, le niveau d'études qui caractérisent les membres du ménage susceptibles de participer dans la gestion de la parcelle, cette analyse s'intéresse aux membres dont l'âge est compris entre 12 et 60 ans. Pour chaque parcelle et chacune de ces variables démographiques, nous calculons une valeur qui caractérise la collectivité qui gère la parcelle. Ces données sont obtenues grâce aux informations fournies dans la section 1 de l'EICVMB concernant les caractéristiques sociodémographiques des membres du ménage. La taille du ménage est obtenue également dans cette section. Les caractéristiques du chef de ménage sont aussi obtenues à partir de cette section, il s'agit des informations telles que l'âge du chef de ménage, son sexe, son statut matrimonial, son niveau d'études, son accès à l'internet et s'il possède ou pas le téléphone mobile. Vu le rôle que joue le chef du ménage dans la prise de décision, son profil est supposé influencer de manière indirecte le revenu net agricole par hectare. Les données sur le revenu hors emplois et l'accès au crédit proviennent respectivement dans la section Revenue hors emploi au cours des 12 derniers mois et la section Epargne et Crédit.

Les données sur les prix des cultures concernées par cette étude ont été fournies par les services statistiques de l'INSBU. Vu que la production récoltée par les ménages est destinée soit à la consommation ou à la vente et d'autres utilisations évoquées précédemment, deux types de prix ont été collectés – le prix à la consommation et le prix à la production obtenus respectivement auprès du Service Etudes et Statistiques des Prix (SESP) de l'INSBU et le Service Etudes et Statistiques Agricoles et Environnementales (SESAE).

Les données sur les prix à la production sont collectées mensuellement dans les deux grands marchés primaires de chaque province à l'exception du capital économique Bujumbura-Mairie ; le prix moyen d'un produit pour ces deux marchés est le prix enregistré comme le prix de ce produit dans cette province.

En total, 69 et 70 produits agricoles ont été enregistré respectivement pour 2020 et 2021, les répondants sont les producteurs. Contrairement aux prix à la consommation où les répondants sont les consommateurs finaux. La période choisie dans cette étude correspond à la période du déroulement de l'EICVM afin de trouver la valeur de la récolte au moment de l'enquête. Par ailleurs les variables mois et l'année de collecte avec les noms des produits ont servi comme variable de fusion de ces deux sources de données – les données agricoles de l'EICVMB, 2019-2020 et les données des prix enregistrés par les services de l'INSBU. L'identification et la gestion des prix atypiques tels que les prix manquants ou aberrants sont discutées dans le point suivant qui évoque le traitement de données.

Troisièmement, les données climatiques proviennent de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) qui enregistre chaque jour ces observations climatiques à un intervalle de temps régulier ; ces observations sont captées par 21 stations météorologiques reparties à travers le Burundi. Les agents de l'IGEBU compilent alors ces données journalières afin d'obtenir les observations à une autre fréquence non journalière telle que la fréquence mensuelle et annuelle. L'institut nous a fourni les données de la température minimale (en degré Celsius), maximale (en degré Celsius) et les données sur les précipitations totales (en millimètre) mensuelles pour une période de 1991-2020 dont les détails sur son choix ainsi que la méthodologie utilisée pour interpoler ces observations au niveau des parcelles afin de les georéférencer et corriger les données anormales comme les valeurs manquantes et aberrantes sont développés dans le point suivant.

### III.3. Traitement de données

Avant de commencer l'analyse empirique sur ces données qui permet de répondre aux questions de recherche posées dans cette étude, le traitement des données a été effectué. En effet, comme dans la quasi-totalité des données d'enquêtes ou celles obtenues à partir des stations météorologiques, les données obtenues dans les différentes sources citées ci-haut présentent quelques problèmes tels que la non cohérence des valeurs d'une même variable, les valeurs manquantes, les observations aberrantes, etc. De plus, les données qu'exige le modèle structurel ricardien utilisé dans cette étude ne sont pas toutes observées en tant que telles dans les sources des données qu'on dispose, une transformation des données existantes dans ces sources ou un calcul de nouvelles variables à partir des données collectées ont été également effectués. Les

méthodes utilisées pour réaliser tous ces traitements sont développées dans le présent point. Les logiciels utilisés pour ces traitements sont Excel, SPSS et R.

### III.3.1. Variables dépendantes

Pour modéliser l'impact du changement climatique en tenant compte de l'adaptation que l'agriculteur a mise en place dans le cadre conceptuel du modèle structurel ricardien, nous modélisons d'abord l'adaptation des agriculteurs et puis l'impact du climat sur l'agriculture sachant qu'une adaptation donnée a été choisie (N. Seo & Mendelsohn, 2008). En supposant que l'agriculteur s'adapte au changement climatique en sélectionnant une culture qui maximise son revenu net agricole, deux variables dépendantes ont été définies : le choix de la culture ou la combinaison de cultures cultivée dans une parcelle est la variable dépendante pour le modèle de sélection de culture tandis que le revenu net agricole par hectare est la variable dépendante dans le modèle de l'impact du climat sur l'agriculture (Etwire et al., 2019; Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008).

#### III.3.1.1. Choix de culture ou de la combinaison des cultures

La première variable dont on veut expliquer dans notre analyse est le choix de culture ou de la combinaison des cultures que l'agriculteur fasse. En effet, on suppose que ce choix est une stratégie d'adaptation que l'agriculteur adopte afin de résilier économiquement au changement climatique.

Les données de l'EICVMB montrent qu'il existe une grande diversité des cultures cultivées par les agriculteurs burundais, on recense 52 cultures. Cependant, certaines de ces cultures ne sont que les différentes variétés d'une même culture. Comme cette étude se fait au niveau des parcelles et que l'étude de toutes ces cultures est complexe, on est intéressé plutôt à connaitre les cultures ou les combinaisons de cultures qui sont présentent dans la parcelle et de choisir les cultures et les combinaisons qui occupent la majorité des parcelles. En agrégeant les 35346 données des cultures au niveau des parcelles nous avons obtenu 19395 observations concernant les parcelles. Les données de l'EICVMB montrent que la majorité (55,40%) de ces parcelles sont occupées par les cultures ou combinaisons des cultures suivantes[2] : Haricots (14,54%), Patates douces (9,51%), Haricots-Manioc (7,12%), Manioc (5,90%), Haricots-Maïs (5,89%), Maïs (5,72%), Riz (3,66%) et Banane (3,06%). Le modèle structurel ricardien utilisé dans la présente étude concerne alors les parcelles occupées par ces cultures et combinaisons de cultures.

[2] Lors de l'agrégation des données des cultures au niveau des parcelles, les différentes variétés d'une même culture ont été considérées comme l'unique culture. C'est le cas d'une étude sur les bananes qui a été faite sans considération des variétés (Varma & Bebber, 2019)

Prendre le choix de la culture ou de la combinaison des cultures comme variable dépendante fait que cette étude présente deux grandes contributions importantes sur la littérature existante au Burundi. Premièrement, ça met en évidence comment la nature et l'amplitude de l'impact du changement climatique varie selon la culture. En effet, il est connu que l'impact du changement climatique est spécifique aux cultures. Deuxièmement, le fait de considérer la combinaison des cultures comme le choix que l'agriculteur puisse mettre en place, fait que cette étude tienne compte de la réalité de l'agriculture burundaise liée à la pratique de l'association des cultures dans une même parcelle. Par ailleurs plusieurs évidences ont montré que les agriculteurs des pays subsahariens adoptent ou renoncent à l'association des cultures pour résilier au changement climatique (Etwire et al., 2019; Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008).

### III.3.1.2. Revenu net agricole par hectare

Le revenu net agricole par hectare, n'est pas directement observé dans la base de données de l'EICVMB. Pour l'obtenir, nous utilisons la formule suivante :

$$RN_i = \frac{Rev_tot_i - Coût_tot_i}{Sup_i}$$

(3.1) Où $RN_i$ est le revenu net agricole par hectare exprimée en Fbu/ha associe à la parcelle $i$ ; $Rev_tot_i, Coût_tot_i$ et $Sup_i$ sont respectivement le revenu brut (exprimé en Fbu), le montant total dépensé pour les intrants (exprimé en Fbu) et la superficie déjà récoltée lors de l'enquête (exprimée en ha) pour la parcelle $i$**.** Les éléments de cette expression sont soit obtenus par calcul soit observés dans la base de données de l'EICVMB :

Le revenu total de la parcelle $i$, $Rev_tot_i$ est calculé en sommant les revenus des $J$ cultures cultivées dans la parcelle $i$. En effet, presque la moitié des parcelles (48,35%) au Burundi sont occupées par les cultures en association.

$$Rev_tot_i = \sum_{j=1}^{J} Rev_{ij} \; ; \qquad (3.2)$$

où $Rev_{ij}$ est le revenu brut de la culture $j$ cultivee dans la parcelle $i$

$$Rev_{ij} = p^v_{lamj} \times q^v_{ij} + p^c_{lamj} \times (q^c_{ij} + q^s_{ij} + q^o_{ij}) \qquad (3.3)$$

Où $p^v_{lamj}$ et $p^c_{lamj}$ sont respectivement les prix à la production et à la consommation au lieu $l$, pour la méthodologie de l'INSBU ce lieu est la province[3] pour une année $a$, mois $m$ pour la culture $j$. Le prix à la consommation ou à la production manquant d'un produit $j$ pour la

[3] Le Service Etudes et Statistiques des Prix (SESP) de l'INSBU collecte chaque auprès des points de vente les données des prix à la consommation dans chaque province.

province $l$ du mois $m$ de l'année $a$ a été remplacé par le prix moyen des prix disponibles du même produit et dans la même province que le prix manquant[4] mais dont les mois d'observations sont plus proches du mois d'observation de prix manquant[5] . Cependant, pour certaines provinces et produits, les prix manquants sont restés ainsi du fait qu'il n'y avait aucune donnée disponible pour fournir le prix moyen. Afin de remédier à ce problème, nous avons remplacé ces prix manquants par le prix moyen des prix du même produit dans la même province sans toutefois considérer les mois et les années d'observations de ces prix[6].

Les prix manquants qui n'ont pas été remplacé par cette méthode sont imputés par le prix moyen des prix du même produit observé dans les provinces voisines que celle admettant les prix manquants pour ce produit. Après l'application de ces méthodes pour gérer les prix manquants, les prix à la production de deux observations sont restés manquants, ils ont été remplacés par leurs prix à la consommation diminués la différence moyenne entre le prix à la consommation et le prix à la production. Sachant qu'en principe le prix à la consommation devrait être supérieur au prix à la production pour que l'agriculteur puisse obtenir le profit mais que dans certains cas la différence entre le prix à la consommation et le prix à la production est négative, nous avons remplacé le prix à la consommation dans le cas où cette différence était inférieure au quatrième décile de toutes les différences par le prix à la production augmenté la différence moyenne des différences positives entre le prix à la consommation et le prix à la production obtenues avant le remplacement des prix manquants[7].

$q_j^v; q_j^c; q_j^s;\ q_j^o$ toutes exprimées en Kg sont respectivement la quantité vendu, consommée par le ménage, stockée et la quantité que le ménage producteur du culture $j$ a offert à un autre ménage. La somme de ces quantités est la quantité récoltée de la culture $j$. Seule la quantité vendue au marché primaire est évaluée au prix à la production les autres quantités sont évaluées au prix à la consommation. En effet, ne pas valoriser ces quantités au prix du marché violerait l'hypothèse très importante pour l'approche ricardienne qui stipule que les agriculteurs sont des agents rationnels qui cherchent à maximiser le profit, cela mène alors au reniement de la théorie de la maximisation de profil (De Janvry et al., 1991; FAO, 2024; Moll, 2005; Singh et al., 1986);

[4] Peu de données sur les prix manquants ont été remplacé par le prix moyen des prix du même produit, province, collectés au mois le plus proche de la même année que le prix manquant car la plupart de telles agrégations détaillées n'admettait pas souvent de données disponibles pour calculer le prix moyen, surtout pour les données de prix à la consommation.

[5] Nous considérons qu'entre les mois les plus proches, les prix ne varient pas beaucoup

[6] Etant donné que l'enquête a été réalisée dans la période d'une annee allant de Mars 2020 au Février 2021, la non considération des mois n'affectent pas beaucoup les prix estimés.

[7] En effet, cette valeur est crédible car elle est calculée aux données réellement observées. Tandis que la différence calculée après le remplacement des prix manquants peut-être biaisée du fait que les méthodes de remplacement peuvent sous-estimer ou surestimer le vrai prix.

l'ajustement proposé par ces auteurs ont été déjà utilisé par les auteurs du modèle structurel ricardien (S. N. Seo & Mendelsohn, 2008). Cependant, la quantité stockée devrait être valorisée au prix de stockage. L'hypothèse que l'on fait sur le prix de stockage est qu'il est supérieur au prix à la production. En effet, le prix de stockage est égal au prix à la production augmenté le coût de stockage qui dépend des pertes dues au stockage, du coût d'opportunité de l'investissement financier lié à l'immobilisation du produit stocké, etc. Etant donné que nous ne disposions aucune information sur ces données, et que le prix à la consommation est supérieur du prix à la production nous avons valorisé la quantité stockée au prix à la consommation.

Cette étude s'intéresse uniquement aux parcelles déjà récoltées c'est-à-dire qu'il fallait éliminer toutes les parcelles dont la quantité récoltée est nulle, mais l'action a été menée prudemment. En effet, la quantité récoltée en unité standard pouvait être nulle alors que la quantité récoltée telle qu'elle a été déclarée par l'agriculteur (en unité de mesure locale ou en Kg) pouvait être différente de zéro mais nulle pour la quantité convertie Kg ; cette situation a été constatée pour 3597 observations dont 3338 pour le cas où l'unité de mesure locale est le Kg et 259 observations pour le cas où l'unité de mesure locale n'est pas le Kg. La gestion de ce problème varie selon le cas pour le premier cas, la quantité a été retenue en tant que telle, pour le deuxième cas un facteur de conversion moyen[8] a été alors calculé par nature de l'unité de mesure locale et par produit afin de l'utiliser pour convertir les quantités non converties, après cette solution adoptée 32 observations n'ont pas été converties du fait qu'il n'y avait pas leurs correspondances dans les données déjà converties par les agents de l'INSBU donc c'était impossible de trouver un facteur de conversion pour les convertir. Cependant, pour les bananes à vin et l'unité de mesure intitulée "Main (ihando)" le facteur de conversion de la banane à cuire a été utilisé. Toutes ces quantités ont été valorisées au prix à la consommation[9].

Le montant total dépensé pour les intrants utilisés dans la parcelle $i$ $Coût_tot_i$ est obtenu en additionnant les coûts de chaque type d'intrant :

$$Coût_tot_i = Coût_Trav_i + Coût_Sem_i + Coût_Engr_i + Coût_Fum_i + Coût_Phyto_i \quad (3.4)$$

Où $Coût_Trav_i$ , $Coût_Sem_i$, $Coût_Engr_i$, $Coût_Fum_i$ et $Coût_Phyto_i$ sont respectivement le montant dépensé pour la main d'œuvre, les semences, les engrais chimiques, la fumure (y compris les ordures ménagères utilisées pour enrichir les éléments nutritifs) et les produits phytosanitaires.

[8] En effet, dans la base de données de EICVMB deux produits exprimées en une même unité de mesure locale ne donnaient pas obligatoirement la même quantité en Kg, il faut donc calculer le facteur de conversion pour chaque conversion pour ensuite retenir la moyenne de ces facteurs de conversion.

[9] Si on garde les données dont les différentes utilisations de la quantité récoltée sont indiquées dans l'EICVMB, l'analyse montre qu'en moyenne les ménages burundais consomment 86,62% de leur récolte d'où la valorisation de la récolte dont l'utilisation n'est pas connue au prix à la consommation.

Les données sur les coûts de ces intrants à l'exception du montant dépensé pour la main d'œuvre agricole sont collectées au niveau des ménages. Pour les ramener au niveau de la parcelle $i$, chaque coût de l'intrant est multiplié par le pourcentage que représente la superficie déjà récoltée de la parcelle $i$ lors de l'enquête par rapport à la superficie totale exploitée par le ménage.

Le coût du main d'œuvre $Coût_Trav_i$ couvre la main d'œuvre familial et non familial ainsi que les différents types de travail : Semi et labour, sarclage et récolte. La main d'œuvre familiale a été valorisée monétairement au prix du marché (Singh et al., 1986), les quantités du fumier et les ordures ménagères non achetées ont été valorisées au prix du marché. En effet, certains ménages les achètent et leurs prix sont disponibles dans la base de données de l'EICVMB.

Avant de calculer le revenu net agricole par hectare, les valeurs aberrantes pour les données de l'EICVMB qui interviennent dans son calcul (la quantité récoltée, les quantités des intrants et leurs prix) ont été identifiées et gérées[10]. L'identification et la gestion de ces valeurs aberrantes ont respecté le processus proposé par différents auteurs (Aguinis et al., 2013; Planchon, 2005). La méthode graphique univariée boxplot de Tukey (Tukey, 1997) par sa simplicité a été utilisée pour les identifier :

$$X_{inf} = max\left\{x_1;\ q_1 - \frac{3}{2} \times (q_3 - q_1)\right\}, \quad (3.5)$$

$$X_{sup} = min\left\{x_n;\ q_3 + \frac{3}{2} \times (q_3 - q_1)\right\}. \quad (3.6)$$

Où $x$ est la variable dont on veut détecter les valeurs aberrantes, $x_1$ et $x_n$ sont respectivement la plus petite et grande valeur de $x$. $q_1$ et $q_3$ sont respectivement le premier et le troisième quartile de $x$. $X_{inf}$ et $X_{sup}$ sont respectivement les bornes inferieures et supérieures de la boxplot, les valeurs de $x$ qui sont inférieures à $X_{inf}$ sont considérées comme extrêmement petites et celles qui sont supérieures à $X_{sup}$ comme extrêmement grandes. $n$ est le nombre totale d'observations de la variable. Les valeurs indiquées par cette méthode comme valeurs aberrantes ont été corrigées en les remplaçant par la valeur médiane pour la culture $j$ de la province $l$. Cependant, cette méthode est moins sensible pour détecter les valeurs extrêmement petites dans le cas où la distribution de $x$ n'est pas symétrique et qu'elle est compressée au niveau de ces petites valeurs (Adil & Irshad, 2015; Hubert & Vandervieren, 2008), ces petites valeurs non détectées pour la variable quantité récoltée ont minimisé le revenu brut $Rev_tot_i$ par conséquent, le revenu net agricole par hectare devient négatif pour ces parcelles.

[10] En effet, Pendant les enquêtes, les participants pour plusieurs raisons peuvent fournir des mauvaises réponses qui peuvent biaiser les résultats (Osborne & Overbay, 2004), ces réponses sont nommées des valeurs aberrantes (outliers en anglais). Par exemple Les participants peuvent tendre à minimiser leur revenu net agricole en surestimant les quantités des intrants et en sous-estimant les quantités récoltées.

En supposant que les coûts aberrants des intrants ont été bien gérés et que la fonction de production de Cobb-Douglas relie le coût total des intrants $Coût_tot_i$ et le revenu brut agricole $Rev_tot_i$ ; nous avons estimé un modèle Log-Linéaire de la fonction de Cobb-Douglas en utilisant la méthode d'estimation de Tukey qui estime une ligne résistante aux données aberrantes de coûts des intrants et/ou de revenu brut agricole (Johnstone & Velleman, 1983; Velleman, P. F., 2004). Cette droite estimée est la suivante :

$$ln(Rev_tot_i) = 0{,}70 \times ln(Coût_tot_i) + 3.88 \quad (3.7)$$

Cette droite a été estimé uniquement aux données dont le revenu net agricole par hectare est positif, elle est ensuite utilisée par méthode d'imputation pour remplacer les revenus aberrants.

### III.3.2. Variables indépendantes

Bien que les variables climatiques sont les variables d'intérêt dans la présente étude, les autres variables susceptibles d'influencer directement ou indirectement le revenu net agricole ont été utilisées comme variables de contrôle permettant d'isoler l'effet du climat sur le revenu net agricole. Parmi ces variables de contrôle on a les variables environnementales, socioéconomiques et celles concernant les pratiques agricoles des agriculteurs.

#### III.3.2.1. Variables climatiques

Pour capter le climat nous avons agrégé les données mensuelles météorologiques des deux principales caractéristiques du climat (La température et les précipitations) fournies par l'IGEBU pour une période allant de 1991 à 2019[11]. Cette période a été choisie pour deux raisons : i) Cette période fait partie des normales climatologiques standards proposés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990 et 1991-2020)[12] (Diniz et al., 2018). ii). La dernière normale climatologique a été considérée dans cette étude car le climat de cette période correspond à l'année agricole 2019-2020 dont nous disposons les données.

[11]La normale climatologique devrait être 1991-2020. Cependant, nous considérons que l'ajout des données d'une seule année ne modifie pas significativement les moyennes des données climatiques de 29 années.

[12] Les régulations de l'Organisation Mondiale Météorologique ont défini que les normales climatologiques standards sont les moyennes des données météorologiques calculées pour des périodes de 30 années consécutives suivantes : De Janvier 1901 à Décembre 1930, De Janvier 1931 à Décembre 1960 et De Janvier 1961 à Décembre 1990, De Janvier 1991 à Décembre 2020.

La normale climatologique 1961-1990 est considérée comme période de référence[13] dans cette étude. L'IGEBU nous a fourni les données sur les températures minimales moyennes, les températures maximales moyennes et les précipitations totales pour chaque mois de la période 1961-2019.

Ces données sont collectées auprès de 20 stations météorologiques pour les températures maximales et précipitations et 21 stations météorologiques pour les températures minimales. Pour la période 1991-2019, ce nombre de stations a été réduit en éliminant les stations avec les données manquantes pour plus de deux années pendant les normales climatologiques standards considérées dans cette étude ; avec ce processus de sélection des stations météorologiques, 13, 14 et 17 stations météorologiques ont été gardées respectivement pour les températures minimales, les températures maximales et les précipitations totales. A cause de plusieurs données manquantes, on n'a pas pu obtenir les données de la normale 1961-1990, nous avons considéré alors 1975-1990 comme période de référence.

[13] C'est-à-dire que si nous voulons estimer les effets actuels du changement climatique déjà observées on se réfère à cette normale climatologique standard.

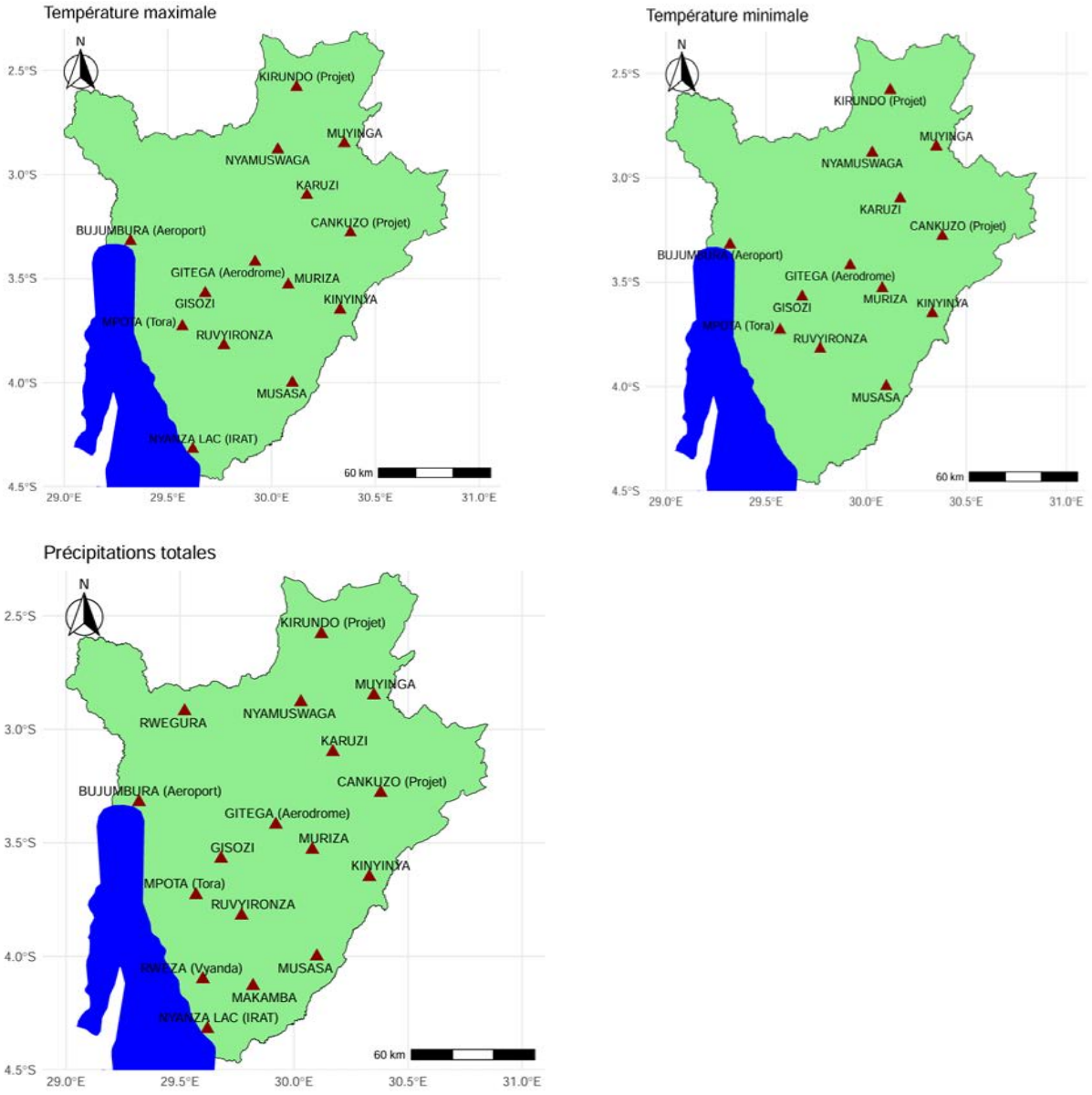



**Figure 2 : Localisations géographiques des stations météorologiques pour la période de 1991-2019. Source : IGEBU ; cartographie : auteur (2025)**

Ces données climatiques des stations météorologiques devraient nous permettre à l'aide des techniques d'interpolation d'estimer les températures et les précipitations pour chaque parcelle afin de lier la productivité agricole de la parcelle et son climat. Cependant, les parcelles ne sont pas georeferencées dans la base de données de l'EICVMB 2019-2020, seuls les ménages agricoles le sont mais pour des raisons confidentielles, l'INSBU ne nous a pas fourni les coordonnées géographiques des ménages. Pour contourner ce défi, nous avons utilisé les données climatiques interpolées au niveau des collines.

En effet, la colline constitue l'unité administrative la plus petite qui est en même temps georeferencée et investiguée dans l'EICVMB. Avec ces données, nous obtenons les données climatiques qui couvrent tout le territoire du Burundi depuis 1975-2019.

**Interpolation des variables climatiques aux points non mesurés**

Différentes méthodes ont été développées pour estimer les mesures climatiques aux points non mesurées à partir des points où les mesures de ces paramètres climatiques ont été effectuées (Hadi & Tombul, 2018). En tenant compte de l'évidence que le climat est d'une part déterministe et d'autre part stochastique (Chatzopoulos & Lippert, 2016; Dinku et al., 2014) ; un interpolateur hybride a été mise en place dans le présent travail . La partie déterministe du climat est captée par une régression linéaire de la variable climatique (Température maximale, minimale et précipitation totale) sur une variable explicative du climat, pour capter la partie stochastique du climat, les résidus de cette régression linéaire sont interpolées au point non mesuré par un modèle spatial ou géostatistique. L'estimation du climat est obtenue alors en additionnant la valeur de sa composante déterministe et la valeur de sa composante stochastique.

*i) Interpolation de la température maximale et minimale moyenne mensuelle.*

L'altitude a été choisie comme variable auxiliaire à introduire dans la régression linéaire pour capter la composante déterministe de la température maximale moyenne mensuelle. En effet, plusieurs études confirment ce choix et le nuage des points entre la température maximale moyenne mensuelle et l'altitude justifie également ce choix.

Le modèle de la température maximale moyenne mensuelle est la suivante :

$$temp.max_{ima} = \beta \times altitude_i + \varepsilon_{ima} \quad (3.8)$$

Où $temp.max_{ima}$ est la température maximale moyenne mensuelle (exprimée en ℃) mesurée à la station météorologique $i$ au mois $m$ de l'année $a$ ; $altitude_i$ est l'altitude (exprimée en mètres) de l'endroit où se situe la station météorologique $i$ elle n'est pas indexée par $m$ et $a$ car nous supposons qu'il n'y a pas eu de modifications significatives d'altitude pendant la période de 1975-2019, $\beta$ est la variation de la température maximale moyenne mensuelle si on fait varier l'altitude d' 1 mètre ce coefficient est estimé par l'estimateur des moindres carrées ordinaires ; $\varepsilon_{ima}$ représente la composante stochastique de $temp.max_{ima}$. Nous estimons ce modèle pour 14 stations, pour chaque mois de l'année de la période concernée.

Pour estimer la composante stochastique du climat, les résidus du modèle précèdent ont été interpolées par le modèle spatial IDW (Inverse Distance Weighting). Ce modèle a été choisi par sa simplicité et sa performance (Borges, Pablo de Amorim; Franke, Johannes; da Anunciação,

Yumiko Marina Tanaka; Weiss, Holger; Bernhofer, 2016; Hadi & Tombul, 2018; Perry & Hollis, 2005).

*Inverse Distance Weighting (IDW)*

L'hypothèse fondamentale de ce modèle est que les résidus du climat (température maximale moyenne mensuelle, température minimale moyenne mensuelle) estimé par le modèle linéaire au point non mesuré (pour notre cas les centroïdes des collines du Burundi) ressemble plus aux résidus du climat des points les plus proches de lui (pour notre cas ces points sont les stations météorologiques les plus proches du centroïde de la colline dont on veut connaitre le climat) et moins semblable aux résidus du climat des points les plus éloignés (Borges, Pablo de Amorim; Franke, Johannes; da Anunciação, Yumiko Marina Tanaka; Weiss, Holger; Bernhofer, 2016; Shepard, 1968).

L'expression mathématique de l'IDW est la suivante :

$$\hat{\varepsilon}(s_0) = \sum_{i=0}^{N} \lambda_i \varepsilon(s_i) \qquad (3.9)$$

Où $\hat{\varepsilon}(s_0)$ est la valeur estimée du résidu $\varepsilon$ (écart entre la température réellement observée et la température estimée par le modèle linéaire) au point $s_0$ , $\varepsilon(s_i)$ est l'écart mesuré entre la température observée et la température estimée par le modèle linéaire au niveau de la station météorologique $s_i$, $\lambda_i$ est le poids ou le degré de l'importance de $\varepsilon(s_i)$ dans l'estimation de $\hat{\varepsilon}(s_0)$ et $N$ est le nombre de stations météorologiques utilisé dans l'estimation. Le poids ou le degré de l'importance de $\varepsilon(s_i)$ à la station $s_i$ est calculé comme suit :

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{d_i^p}\right) \Big/ \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{d_i^p}\right) \qquad (3.10)$$

Où $d_i$ est la distance entre $s_0$ (le point non mesuré le centroïde de la colline pour cette étude) et $s_i$, $p$ est le paramètre puissance. Cette formule montre que le poids de la station $s_i$ diminue quand la distance augmente et cette diminution est grande si $p$ est grand. Les stations les plus proches de la centroïde de la colline dont on veut estimer l'écart entre la température mensuelle réelle et la température mensuelle estimée par le modèle linéaire auront plus d'influence sur l'écart à estimer (Nalder & Wein, 1998).

Les paramètres clés pour ce modèle sont le paramètre puissance $p$ et le nombre de stations météorologiques maximale $N$ à inclure dans l'estimation du valeur de l'écart. Pour choisir les valeurs de $p$ et $N$ qui optimise la performance de l'interpolation, nous avons utilisé la technique de validation croisée intitulée *Leave-One-Out Cross-validation* (LOOC). Cette technique consiste à exclure une station météorologique qui sert à évaluer la prédiction du modèle IDW ; pour un même

couple des paramètres $(p, N)$ on estime $N$ modèles IDW et chaque modèle est estimé pour les $N-1$ stations météorologiques. Le critère d'évaluation de la performance choisi dans cette étude est le *Root Squared Mean Error* (RMSE), ce critère de performance a été choisi parce qu'il est le plus utilisé dans l'évaluation des modèles interpolateurs (Frazier et al., 2016; Hadi & Tombul, 2018; Nalder & Wein, 1998; Perry & Hollis, 2005). Il est défini comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\varepsilon(s_i) - \hat{\varepsilon}(s_i)\right)^2} \quad (3.11)$$

Où $\varepsilon(s_i)$ est l'écart entre la température réellement mesurée à la station $s_i$ et la température estimée par la régression linéaire a cette même station $s_i$ mais qui n'a pas participé dans l'interpolation et $\hat{\varepsilon}(s_i)$ est la valeur de l'écart estimée par le modèle IDW.

Pour notre application, les différentes valeurs de $p$ évaluées sont {1,2,3}(Hadi & Tombul, 2018) pour toutes les variables climatiques (températures maximales, températures minimales et précipitations totales mensuelles) et les différents nombres maximales de stations météorologiques testés sont {2,3,4,5}, {2,3,4,5,6,7} et {2,3,4,5,6,7,8} respectivement pour les températures maximales moyennes mensuelles, températures minimales moyennes mensuelles et les précipitations totales mensuelles c'est à dire que pour la détermination des paramètres $p$ et $N$ optimisant le RMSE, nous avons estimé respectivement 168 (3 valeurs de $p$ × 4 valeurs de $N$ × 14 stations météorologiques), 234 et 357 modèles pour la température maximale moyenne mensuelle, température minimale moyenne mensuelle et les précipitations totales mensuelles.

Etant donné que nous estimons la variable climatique pour chaque mois de l'année faisant partie de la période 1991-2019 et pour chaque colline parmi les 2644 collines appartenant dans shapefile administratif du niveau 3 (ADM3) utilisé pour cartographier les collines du Burundi, on a 920112 (2644 collines × 12 mois × 29 années) prédictions à faire respectivement pour la température maximale moyenne mensuelle et la température minimale moyenne mensuelle. Pour la température maximale et minimale moyenne mensuelle, les modèles linéaires et IDW estimés sont respectivement au nombre de 348 modèles (12 mois × 29 années (1991-2019)).

Le tableau suivant illustre les valeurs de $p$ et $N$ qui optimisent plusieurs IDW pour les résidus de la température maximale moyenne mensuelle et les résidus de la température minimale moyenne mensuelle.

**Tableau 3 : Paramètres optimaux des modèles d'interpolation des variables climatiques**

| Variable climatique | Période | $p$ (Puissance de la distance séparant la colline et la station météorologique) | $N$ (Nombre maximale de stations météorologiques a utiliser pour interpoler) | pourcentage de mois estimés par $p$ et $N$ (%) | RMSE (en ℃) |
|---|---|---|---|---|---|
| Température maximale moyenne mensuelle | 1975-1990 | 3 | 2 | 78,13 | 0,43 |
| | 1991-2019 | 1 | 5 | 70,32 | 0,95 |
| Température minimale moyenne mensuelle | 1975-2019 | 1 | 5 | 45,31 | 1,74 |
| | 1991-2019 | 1 | 7 | 70,11 | 1,43 |

Source : Auteur (2025) à partir des données de l'IGEBU

Les résidus interpolés $\widehat{\varepsilon_{\imath ma}}$ par ces modèles IDW sont ajoutés aux températures estimées par le modèle linéaire pour obtenir la température maximale et minimale moyenne mensuelle de la colline.

$$\widehat{temp.max}_{\imath ma} = \hat{\beta} \times altitude_i + \widehat{\varepsilon_{\imath ma}} \quad (3.12)$$

De la même manière, la température minimale d'une colline donnée pour le mois $m$ et l'année $a$ est obtenue comme suit :

$$\widehat{temp.min}_{\imath ma} = \hat{\theta} \times altitude_i + \widehat{\epsilon_{\imath ma}} \quad (3.13)$$

La température moyenne mensuelle d'une colline $i$ pour le mois $m$ de l'année $a$ a été calculée comme la moyenne arithmétique de $\widehat{temp.max}_{\imath ma}$ et $\widehat{temp.min}_{\imath ma}$.

*ii) Interpolation des précipitations totales mensuelles*

Contrairement aux températures maximales et minimales dont la composante déterministe est captée par la régression linéaire sur l'altitude, la composante déterministe des précipitations totales n'est pas captée par leur relation linéaire avec l'altitude, donc une autre variable auxiliaire est nécessaire.

Nous avons utilisé la variable très utilisée dans la littérature, il s'agit des précipitations totales obtenues grâce à un produit CHIRPS (Climate Hazards InfraRed with Precipitations Stations) basé sur les données satellitaires (Funk et al., 2015; Tall et al., 2022). Le modèle linéaire s'écrit :

$$precip_{ima} = \alpha\, chirps_{ima} + \varepsilon_{ima} \quad (3.14)$$

Où $precip_{ima}$ est la quantité des précipitations totales moyennes mensuelles au point $i$ pour le mois $m$ de l'année $a$, $chirps_{ima}$ est la quantité des précipitations totales mensuelles estimées par CHIRPS, $\alpha$ est la quantité de $precip_{ima}$ qui augmente ou diminue suite à une variation de 1mm de $chirps_{ima}$, cette quantité a été estimée par l'estimateur de Moindres Carrées Ordinaires (MCO) et $\varepsilon_{ima}$ est l'écart entre les précipitations réelles et les précipitations estimées par la régression linéaire, cet écart une fois mesuré aux stations météorologiques, nous les interpolons aux centroïdes des collines par le modèle IDW comme ça été fait pour les températures maximales et minimales moyennes mensuelles.

Les précipitations totales mensuelles estimées au niveau des collines du Burundi pour la période 1991-2019[14] sont obtenues comme suit alors :

$$\widehat{precip_{ima}} = \hat{\alpha}\, chirps_{ima} + \widehat{\varepsilon_{ima}} \quad (3.15)$$

Où $\widehat{precip_{ima}}$ sont les précipitations totales mensuelles dans la colline $i$ pour le mois $m$ de l'année $a$, $\hat{\alpha}$ le coefficient estimé par MCO et $\widehat{\varepsilon_{ima}}$ est l'écart entre les précipitations totales mensuelles réelles de la colline $i$ et les précipitations totales mensuelles estimés par le modèle IDW, les paramètres optimaux obtenus grâce à LOOC varient selon le mois. Contrairement aux températures minimales et maximales où il y a une des combinaisons optimaux $(p, N)$ utilisée pour estimer la majorité des résidus, pour les précipitations, cette combinaison n'existe pas. Cependant, la plupart des résidus du modèle linéaire des précipitations totales mensuelles sur CHIRPS ont été interpolées par IDW avec la combinaison des paramètres ($p = 1,\ N = 8$) avec une erreur de prédiction égale à 34,50 mm.

*iii) Calcul de la variable agro-climatique : Nombre de Degré-Jour*

Bien que les températures moyennes mensuelles, la température moyenne annuelle ou les températures moyennes saisonnières ont été utilisées dans le modèle ricardien ou structurel par la plupart des économistes pour capter l'effet économique du climat sur l'agriculture (Luh & Chang, 2021; Mendelsohn et al., 1994; Ntagahoraho & Kamgnia, 2023). Schlenker et al. (2004) et d'autres auteurs qui l'ont suivi ont incorporé le climat par le nombre de degré-jour, une variable agro-climatique suggérée par la littérature agronomique et démontré qu'elle explique mieux les revenus nets agricole (Fezzi & Bateman, 2013; Schlenker et al., 2004). En effet, une étude dont l'objectif était de la comparer avec les différentes températures a montré que le nombre de degré-jour est interchangeable avec les températures journalières (Massetti et al., 2016). C'est pour cette raison que nous incluons cette variable dans le modèle.

[14] Pour la période de référence 1975-1990, nous avons gardé seulement les précipitations totales mesurées au niveau des stations météorologiques. En effet, les données CHIRPS ne sont disponibles que depuis 1981.

Le concept de nombre de degré-jour est construit à partir deux réalités agronomiques : i) L'effet de la température sur une plante est capté par son exposition cumulative à la chaleur. ii) Il existe un seuil minimal de la température (température de base ou zéro de végétation) en dessous duquel, l'effet de la température sur la croissance d'une plante est nul et un seuil maximal au-dessus duquel, la température devient nuisible et la plante arrête de se développer. En se basant sur ces constants, la littérature agronomique conclu que la réponse du taux de croissance d'une plante à la température est linéaire entre ces deux seuils.

Le nombre de degré-jour est calculé comme la somme des degrés au-dessus du seuil minimale et en dessous d'un seuil supérieur pendant la saison de croissance. Ces degrés sont définis comme suit :

$$D = \begin{cases} t_{sup} - t_b, & t_{sup} < t \\ t - t_b, & t_b < t \leq t_{sup} \\ 0, & t < t_b \end{cases}$$

(3.16) Où :

- $D$ est le degré-jour,
- $t_b$ et $t_{sup}$ sont respectivement la température de base (zéro de végétation) et la température limite supérieur au-dessus duquel la plante cesse croitre. Les valeurs de $t_b$ et $t_{sup}$ varient selon les cultures, la croissance de différentes plantes est linéaire dans l'intervalle $8 - 32℃$, nous prenons alors $t_b = 8℃$ et $t_{sup} = 32℃$ (Ritchie & NeSmith, 1991).
- $t$ est la température moyenne journalière. Cette température est obtenue en faisant la moyenne de la température maximale et minimale journalière. Etant donné qu'on dispose seulement les moyennes des températures minimales et maximales mensuelles, nous avons utilisé la formule de Hitchin pour calculer le nombre de degré-jour mensuel (Hitchin, 1983) dont la formulation est la suivante :

$$DD = \frac{N(t_{moy} - t_b)}{1 - e^{-k(t_{moy} - t_b)}} \quad (3.17)$$

Où $DD$ est le nombre de degré-jour mensuel, $N$ est le nombre de jours du mois, $t_{moy}$ est la température moyenne mensuelle, $k$ est calculé en utilisant la formule suivante :

$$k = \frac{2.5}{\sigma} \quad (3.18)$$

Où $\sigma$ est l'écart-type des températures journalières pour le mois, $\sigma$ est inconnu et il est estimé par $\sigma_m\sqrt{N}$ (Thom, 1966). En supposant que la température suit une distribution normale $\sigma_m$ est calculé à son tour comme suit :

$$\sigma_m = \frac{tmax - tmin}{4} \quad (3.19)$$

Avec le nombre de degré-jour mensuel $DD$, nous pouvons calculer le nombre de degré-jour pour la période de croissance de chaque culture qui est la variable que nous introduisons dans le modèle. L'agriculture burundaise se fait généralement pendant trois saisons : Saison A (Du 15 Septembre au 14 Février), Saison B (Du 15 Février au 14 Juin) et la Saison C (Du 15 Juin au 14 Septembre). Cependant, les mois de la saison A appartiennent les uns (Septembre, Octobre, Novembre et Décembre) dans l'année $a-1$ et d'autres dans l'année $a$. La formule utilisée alors pour obtenir les degré-jours de la saison A pour une année agricole $a$ - $a-1$ est suivante[15]:

$$DD^a_{saisonA} = 0.5 \times DD^{a-1}_{sept} + DD^{a-1}_{octo} + DD^{a-1}_{nov} + DD^{a-1}_{dec} + DD^a_{jav} + 0.5 \times DD^a_{fev} \quad (3.20)$$

Où $DD^a_{saisonA}$ est le nombre de degré-jour de la saison A pour l'année en cours $a$, $DD^{a-1}_{sept}$, jusqu'au $DD^{a-1}_{dec}$ sont respectivement les degrés-jour de mois de Septembre jusqu'au mois de Décembre et $DD^a_{jav}$ , $DD^a_{fev}$ sont respectivement les nombres de degré-jour du mois de Janvier et de Février. Les degré-jour du mois de début et de la fin de la saison sont divisés par 2. En effet, seule la moitié des jours de ces mois sont incluses dans la saison A. Cependant, cette formulation est valable seulement pour les degré-jour et les précipitations totales du fait qu'ils sont obtenus en additionnant les valeurs de ces variables pour les mois de la saison A. Pour d'autres paramètres tels que la température minimale, maximale et moyenne, nous ne divisons pas par 2 du fait que la moyenne est un indicateur distribué uniformément pour tous les jours du mois et nous calculons plutôt la moyenne de la température des mois constituant la saison au lieu de la somme.

$$t^{min}_{saisonB} = \frac{1}{n_{saisonB}} \times \left(\sum_{i=1}^{n_s} t_i^{min}\right) \quad (3.21)$$

Certaines cultures concernées dans la présente étude comme la banane et le manioc admettent une période de croissance qui dépasse plus ou moins une année. Dans ce cas, nous obtenons les données annuelles à partir des données mensuelles. L'information sur la période de croissance pour chaque parcelle est disponible dans la base de données de l'EICVMB[16].

[15] Pour les autres saisons

[16] La saison précédente à la saison agricole pendant laquelle l'enquête a été effectuée est estimée comme la période de croissance. En effet, la production demandée dans l'EICVMB est celle cultivée pendant la saison agricole précédente à celle de l'enquête.

*iv) Calcul de l'indice climatique de sécheresse : SPEI (Standard Precipitation Evapotranspiration Index)*

Autre paramètre climatique analysé dans ce mémoire est la sécheresse. Bien qu'il existe plusieurs méthodes et indices pour calculer et surveiller les différentes caractéristiques de la sécheresse, dans le présent travail, nous analysons la sécheresse à partir de l'Indice Normalisé de Précipitations et d'Evapotranspiration (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010). Le choix du SPEI est motivé par (i) le fait qu'elle incorpore à la fois les précipitations et la température, pendant que les autres sont uniquement basées sur les précipitations. Une autre raison du choix de cette indice (ii) est qu'il y a plusieurs études qui montrent qu'elle est performante et robuste par rapport au SPI (Standardized Precipitation Index).

Etant donné que SPEI pour un mois donné est basé sur le cumul des surplus et/ou déficits de l'eau pour un intervalle de temps donné et que le surplus/déficit de l'eau est la différence entre précipitations $P$ et évapotranspiration $ETP$ pour un mois $i$:

$$D_i = P_i - ETP_i \tag{3.22}$$

La nécessité du calcul de l'ETP s'impose. Plusieurs formules simples et complexes ont été développées pour la calculer. Nous utilisons la formule la plus simple de Thornthwaite qui n'exige au minimum que la température moyenne mensuelle et la latitude pour estimer l'ETP. En effet, il est démontré que les résultats des indices de sécheresse comme PDSI (Palmer Drought Severity Index) sont similaires si l'on utilise la formule complexe ou pas du calcul de l'ETP. Apres l'application numérique de cette formule, nous pouvons simplement obtenir $D_i$ ainsi que $D_{i,j}^k$ qui représente la somme des surplus/déficits de l'eau correspondant au $j^{ieme}$ mois et les $k-1$ mois qui lui précèdent. Le calcul de la différence cumulée entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) à différentes échelles de temps est la suivante :

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^{j} D_{i,l}, \text{ si } j < k \text{ et} \tag{3.23}$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^{j} D_{i,l}, \text{ si } j \geq k \tag{3.24}$$

Où $X_{i,j}^k$ représente la différence cumulée entre les précipitations et la ETP à l'échelle de temps $k$ au $j^{\text{ieme}}$ mois de l'année $i$ considérée ; $D_{i,l}$ est la différence entre les précipitations et la PET au $l^{\text{ieme}}$ mois de cette année particulière. Pour l'estimation de la valeur du SPEI, la différence entre les bilans hydriques climatiques est normalisée sous forme d'une distribution de probabilité log-logistique. L'équation exprime la fonction de densité de probabilité (PDF) comme suit :

$$f(h) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{h-\gamma}{\alpha}\right)\left[1+\left(\frac{h-\gamma}{\alpha}\right)\right]^{-2} \quad (3.25)$$

Où , $\beta$ et $\gamma$ représentent respectivement les paramètres d'échelle, de forme et de position. Ainsi, la fonction de densité de probabilité (FDP ou PDF : Probability Density Function en anglais) peut être exprimée comme suit :

$$F(h) = \left[1+\left(\frac{\alpha}{h-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (3.26)$$

Le SPEI peut être calculé sur la base des équations introduites par Vicente et al. (2010) :

$$SPEI = W - \frac{C_0+C_1W+C_2W^2}{1+d_1W+d_2W^2+d_3W^3} \quad (3.27)$$

Dans le cas $P \leq 0.5$, $W = \sqrt{-2\ln(P)}$ et $P > 0.5$, $W = \sqrt{-2\ln(1-P)}$, $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.8028$ , $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ (Ndayiragije & Li, 2022; Vicente-Serrano et al., 2010).

Dans cette étude, nous utilisons le SPEI à l'échelle de trois mois (SPEI-3) en raison de l'effet potentiel de la sécheresse sur les cultures saisonnières, pour les cultures semi-pérennes on a calculé le SPEI à l'échelle de dix-huit mois (SPEI-18).

**III.3.2.2. Variables de contrôle**

Les données des variables concernant les quantités des intrants utilisés (les semences, les engrais inorganiques, la fumure, la main-d'œuvre et les produits phytosanitaires) dans la parcelle ainsi que la superficie de la parcelle déjà récoltée sont toutes obtenues dans la base de données de l'EICVMB. Afin de contrôler l'effet de la précipitation (une variable climatique), la variable décrivant la source de l'eau nécessaire pour la croissance des cultures cultivées dans les parcelles a été ajoutée dans le modèle, les données de cette variable sont disponibles dans la base de données de l'EICVMB avec plusieurs modalités mais dans cette étude, ces modalités ont été groupées dans les trois grandes catégories : *pluviale, irrigation et marrais*[17].

Vu que les données sur *le type du sol* fournies par les bases de données en ligne sont obtenues au niveau d'une grille plus large que les parcelles, les données utilisées dans cette étude proviennent de l'EICVMB dans les réponses rapportées par les enquêtées, dans cette base de données on trouve les sols *limoneux, glacis, sableux, argileux et autre*. Les données sur la *fertilité* du sol ont été également obtenues dans la même base de données, les agriculteurs classent la fertilité du sol de leurs parcelles dans l'une des trois modalités *bonne, moyenne et faible*. Les données sur *la distance entre le ménage et la parcelle*, la *mode de gestion* de la parcelle, le *type de semence* et la

[17] Avant la combinaison, les modalités étaient : Irrigation canal, Irrigation ruisseau, Irrigation, propre puits, Marais/"wetlands", Pluviale

*topographie* des parcelles sont collectées dans la base de données de l'EICVMB et les modalités de ces trois dernières variables sont *collective* et *individuelle* pour la mode de gestion, *améliorée* et *locale* pour le type de semence et *pente douce, pente raide, plaine et vallée* et *autre* pour la topographie de la parcelle.

Toutes les données socioéconomiques utilisées proviennent de la base de données de l'EICVMB 2019-2020. Plusieurs études montrent qu'il existe différents modèles de ménage, le ménage unitaire de Becker (Becker, 1991) et le ménage collectif de Boserup (Doss & Quisumbing, 2020); nous introduisons une variable binaire décrivant alors la mode de gestion de la parcelle. Comme nous supposons que les membres de la collectivité n'ont pas le même poids dans la prise de décision, nous introduisons également dans le modèle les informations décrivant le profil du chef de ménage[18]. Pour capter l'impact de l'expérience des agriculteurs sur le choix de la culture à cultiver et le revenu net agricole, nous avons introduit à la fois l'âge synthétique de la collectivité gestionnaire[19] et l'âge du chef de ménage.

Plusieurs évidences ont montré qu'il y a la différence entre les hommes et les femmes au niveau d'accès aux intrants, choix des cultures, créant ainsi un écart de productivité agricole et de capacité d'adaptation au changement climatique (Charan et al., 2016; Sawadogo, 2021), afin d'éviter le biais dû à l'omission de cette variable, nous introduisons dans le modèle la variable binaire décrivant le sexe du chef de ménage ; nous y ajoutons également le ratio femme-homme pour capter l'impact du sexe dominant dans la collectivité gestionnaire de la parcelle sur le choix de culture et la productivité agricole. Le niveau d'étude du chef de ménage a été inclut dans le modèle du fait qu'on a supposé que plus il a un niveau avancé d'études plus il aura les connaissances lui permettant de mettre en place des bonnes pratiques agricoles lui permettant de maximiser son revenu net agricole et de s'adapter au climat. Pour la collectivité gestionnaire, nous avons calculé et inclut le niveau d'éducation moyen des membres du ménage ayant l'âge supérieur à 12 ans[20].

[18] Nous considérons que le décideur principal est le chef de ménage et que son profil joue un rôle important dans la prise de décision par conséquent influence indirectement les variables dépendantes à la fois le choix de la culture et le revenu net agricole.

[19] Vu que la base de données de l'EICVMB n'indique pas les membres du ménage qui composent la collectivité gestionnaire, quatre types d'âge synthétique ont été calculés (i) l'âge médian de tous les membres du ménage, (ii) l'âge moyen de tous les membres du ménage, (iii) âge moyen tronqué obtenu après l'élimination des 5% des valeurs extrêmement petites et grandes. (iv) âge moyen des membres de ménage dont l'âge est compris entre 12 et 65 ans. Parmi ces âges synthétiques, celui qui optimise le modèle est gardé.

[20] Nous choisissons cet âge, car on a considéré qu'un membre du ménage ayant l'âge inférieur à 12 ans ne peut pas faire partie de la collectivité gestionnaire.

Pour capter l'impact des normes sociales, la vulnérabilité sociale et économique, les ressources disponibles associées aux chefs de ménage sur la productivité agricole, nous incluons le statut matrimonial du chef de ménage. Il est supposé que plus les membres de ménage augmentent, plus la productivité agricole augmente. En effet, dans les ménages ruraux la main d'œuvre agricole est composée principalement par les membres de ménage (De Janvry et al., 1991), c'est pourquoi nous avons ajouté dans le modèle la taille du ménage.

Les revenus non agricoles et l'accès au crédit ont été inclus dans le modèle, car ils influencent indirectement le revenu net agricole en supportant les coûts des intrants qui augmentent en leur tour la productivité agricole. La possession du téléphone et l'accès à l'internet ont été aussi considérées comme variables de contrôle, en effet, ces variables constituent les sources d'informations utiles aux agriculteurs pour acquérir les connaissances et pratiques leur permettant de résilier au changement climatique et de maximiser leur revenu net agricole (Di Falco et al., 2011). Pour capter l'effet des chocs climatiques sur le choix de la culture et le revenu net agricole, nous introduisons des variables binaires qui sont égales à 1 si le ménage a connu le choc dans les trois dernières années qui précèdent l'enquête. Les six chocs introduits dans le modèle sont les suivants : La sécheresse, l'inondation, le taux élevé de maladies des cultures, la grêle, les ravageurs et le glissement de terrain.

### III.4. Méthodologie d'analyse de données

Trois types d'analyse statistique ont été mises en application pour produire les résultats associés aux différents objectifs du présent mémoire, il s'agit d'analyse descriptive, inferentielle et la modélisation.

#### III.4.1. Méthodologie pour le premier Objectif

Afin de déterminer le changement climatique qu'a déjà connu le Burundi et le futur changement climatique que le pays peut s'attendre, nous avons analysé les données historiques (1975-2019) et les projections futures du climat des deux périodes : l'avenir proche (2021-2040) et l'avenir moyen terme (2041-2060). Ces deux périodes ont été choisies pour soutenir les processus de prise de décision sur la vision du pays « Vision Burundi pays émergent en 2040 et pays développé en 2060.

Nous commençons à réaliser une analyse décrivant le climat la période concernée dans cette étude (1991-2019). Après, nous effectuons une comparaison des climats pour les périodes historiques (1975-1990 et 1991-2019) et les périodes futures (2021-2040 et 2041-2060). Les données sur les projections futures du climat proviennent de WorldClim v2.1[21] à une résolution

[21]Les projections futures du climat sont téléchargeables dans ce lien WorldClim https://www.worldclim.org/data/index.html

spatiale de 2,5 minutes d'arc (~4,6km)[22], basées sur les projections des modèles climatiques de la phase 6 du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6).

L'utilisation de CMIP6 nous a permis de bénéficier des projections climatiques les plus récentes et précises, intégrant les avancées récentes en modélisation climatique et assurant la comparabilité avec les travaux scientifiques contemporains. Dans ce mémoire, nous avons récupéré les projections de WorldClim basées sur les 8 Modèles de Circulation Générale parmi les 9 proposés par la plateforme, quatre de ces modèles ont été choisis pour leurs performances en terme de précision démontrées dans les pays proches du Burundi (EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR) (Omay et al., 2023) et les autres parce qu'ils ont été utilisés par d'autres études concernant le changement climatique au Burundi (CMCC-ESM2, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, UKESM1-0-LL) (Kim et al., 2021; Tall et al., 2022).

La projection médiane ou moyenne de ces modèles est souvent considérée comme la valeur à utiliser dans l'analyse mais dans ce travail nous avons considéré la projection moyenne uniquement pour les précipitations tandis que pour les températures minimales et maximales, on a utilisé la projection maximale de ces 8 modèles. En effet, utiliser la projection moyenne de ces températures sous-estime le nombre de degrés-jour, car ce dernier est en principe sensé être calculé à partir les données journalières ou mensuelles pendant que WorldClim fourni la valeur mensuelle moyenne des 20 années.

$$precipitation_{cm}^{h} = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} prec_MCG_{cmi}^{h} \quad (3.28)$$

$$tmin_{cm}^{h} = \max_{i}(tmin_MCG_{cmi}^{h}) \quad (3.29)$$

$$tmax_{cm}^{h} = \max_{i}\left(tmax_MCG_{cmi}^{h}\right) \quad (3.30)$$

Où $precipitation_{cm}^{h}$ , $tmin_{cm}^{h}$ et $tmax_{cm}^{h}$ indique respectivement la projection des précipitations, de la température minimale et maximale de la colline $c$ pour le mois $m$ {1,2,…,12} de l'horizon $h$ {2021-2040 , 2041-2060}. Et puis le nombre de degré-jour a été calculé comme nous l'avons montrée précédemment.

En plus de la comparaison temporelle du climat, nous avons effectué à l'aide des cartes thématiques produits par le logiciel R (Giraud, 2025) une comparaison spatio-temporelle au niveau des collines pour identifier les régions susceptibles d'être vulnérables du réchauffement

[22] Cette petite résolution nous a permis d'obtenir les données climatiques de chaque colline. Pour les cas des collines qui se trouvent entre deux ou plusieurs grilles, nous avons considéré la moyenne des valeurs de ces différentes grilles comme la valeur de cette colline.

climatique ce qui peut nous donner des connaissances a priori sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture dans les différentes régions du Burundi. Etant donné que le changement climatique est un processus progressif, nous avons examiné la tendance du climat par son évolution annuelle selon les saisons agricoles. La significativité de la tendance est analysée à partir de l'estimateur de la pente de Theil-Sen et le test de Mann-Kendall.

*Estimateur de la pente de Theil-Sen et le test de Mann-Kendall*

Vu que les variables climatiques admettent parfois des valeurs aberrantes, modéliser leur tendance par des méthodes comme les droites des moindres carrées ordinaires qui ne tiennent pas compte de ces valeurs peut mal refléter la réalité de cette tendance. Pour cela nous calculons une droite robuste aux valeurs aberrantes dont la pente appelée pente de Theil-Sen est définie comme suit (Johnstone & Velleman, 1983; Sen, 1968) :

$$b_{Sen} = mediane\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (3.31)$$

$b_{Sen}$ est la pente de Theil-Sen $i$ et $j$ sont les rangs des deux années différentes avec $1 \leq i < j \leq n$ et Où $x$ indique la variable climatique (Précipitation, Température moyenne et le nombre de degrés-jour). Pour tester la significativité de cette pente, nous utilisons un test non paramétrique dit Test de Mann-Kendall dont l'hypothèse nulle stipule qu'il n'y a pas de tendance (ni croissante ni décroissante) des variables climatiques de chaleur (température moyenne et le nombre de degré-jour) d'humidité et/ou de sècheresse (Précipitations et l'Indice Normalisée de Précipitations et d'Evapotranspiration).

En appliquant, la méthodologie décrite ici, nous pouvons répondre à la question relative à l'objectif numéro 1 (Evaluer le changement climatique passé et futur au Burundi selon les données historiques et différentes prévisions du climat par les Modèles de Circulation Générale (MCG) sous différents scenarios pour les horizons 2021-2040 et 2041-2060) de la présente étude ainsi que d'être capable de confirmer ou infirmer l'hypothèse sous-jacente de cet objectif.

### III.4.2. Méthodologie pour le Second Objectif

Nous commençons d'abord à donner une description globale de l'agriculture burundaise et puis afin de déterminer et de comprendre la relation économique du climat et de l'agriculture de chacune des cultures concernées dans le présent travail, nous avons modélisé d'abord la manière dont le climat influence le choix des agriculteurs et enfin comment les revenus nets de ces cultures choisies par les agriculteurs sont impactés à leur tour par le climat. Cette approche présente deux avantages : premièrement elle met en évidence de dynamique des cultures occupant les parcelles agricoles dans le contexte du changement climatique, et deuxièmement

comme évoqué au chapitre de la revue littéraire, elle nous permet d'utiliser le modèle de sélection des cultures pour corriger le biais de sélection causé par les facteurs non observées qui influencent à la fois le choix et le revenu net des cultures en utilisant le terme de correction de Dubin-McFadden estimé à partir des probabilités de choisir chacune des cultures étudiées.

### III.4.2.1. Estimation du Modèle du choix de culture à cultiver

#### III.4.2.1.1. Spécification du modèle du choix de culture

Nous modélisons le choix des agriculteurs par un modèle logit multinomial :

$$P_{ij} = \frac{exp(\beta_{j|b} x_i)}{\sum_{k=0}^{J} exp(\beta_{k|b} x_i)} \quad (3.32)$$

$P_{ij}$ représente la probabilité que la culture $j$ soit choisie par l'agriculteur dans la parcelle $i$. Pour assurer l'axiome de la complétude nous modélisons le choix de la culture $j$ par rapport la culture de référence/base $b$ «Haricot » qui est la culture la plus fréquente. $J$ est le nombre total des cultures/combinaisons de cultures étudiées dans cette étude. Ces cultures sont : Haricot, Haricot-Manioc, Haricots-Maïs, Maïs, Patates douces, Banane, Riz, Manioc ; $x_i$ représente l'ensemble des variables incluses dans le modèle pour expliquer le choix des agriculteurs. Pour notre cas $x_i$ représente le nombre de degrés-jour, les précipitations totales de la saison de croissance de la culture choisie ainsi que son carré pour capter l'effet non linéaire des précipitations suggéré dans la littérature (Chatzopoulos & Lippert, 2015; Etwire et al., 2019), les variables agro-environnementales de la parcelle telles que la topographie de la parcelle, la fertilité de la parcelle, la superficie de la parcelle et la variable binaire indiquant si l'agriculteur a une autre source de revenu autre que l'agriculture.

#### III.4.2.1.2. Endogenéité des variables climatiques et l'estimation du modèle logit multinomial par l'approche 2SRI (Two Stage Residual Included)

La littérature sur le modèle hédonique met en évidence la corrélation entre les variables climatiques et le terme d'erreur dudit modèle (Anselin & Lozano-Gracia, 2008). Par conséquent l'effet estimé du climat sur le choix des cultures est biaisé ; englobant à la fois l'effet réel du climat et l'effet du/des facteurs non observés du choix des cultures. Nous utilisons la méthode quasi-expérimentale dite des variables instrumentales pour corriger ce biais. Les variables instrumentales présentent un avantage d'être corrélées linéairement avec le climat mais sans l'être avec le terme d'erreur du modèle. Pour les modèles non linéaires comme le modèle logit que nous utilisons ici, la littérature recommande d'utiliser l'approche 2SRI pour opérationnaliser la méthode des variables instrumentales (Terza et al., 2008). Cette approche comme son nom l'indique passe par deux étapes.

*1ere Etape (Régression du climat par ses instruments)*

La première étape de 2SRI consiste à subdiviser le climat en deux composantes : La composante exogène indépendante du terme d'erreur du modèle de choix et la composante endogène du climat c'est-à-dire corrélée avec les facteurs non observés du choix de culture

$$C_i = \pi Z_i + u_i \quad (3.33)$$

$$\widehat{C_i} = \hat{\pi} Z_i \quad (3.34)$$

$$\widehat{u_i} = C_i - \widehat{C_i} \quad (3.35)$$

Où $C_i$ représente le nombre de degrés-jour ou les précipitations ; $Z_i$ représente les instruments du climat dans notre cas ce sont : longitude, latitude, l'altitude et le retard spatial du nombre de degrés-jour et de précipitations. $\widehat{C_i}$ représente la variation exogène du climat (nombre de degrés-jour ou des précipitations totales), elle s'obtient par l'estimation MCO. $\widehat{u_i}$ représente la variation endogène du climat.

*2ème Etape de l'estimation du modèle de choix (Inclusion des résidus $\widehat{u_i}$ dans le modèle logit)*

La deuxième étape consiste à inclure la composante endogène du climat estimée par les résidus de la régression de la première étape. Cette inclusion a une double implication : premièrement elle restore l'éxogénéité du climat dans le sens ou l'endogénéité est contrôlée par cette inclusion des résidus dans le modèle, deuxièmement la significativité des résidus incluses pour expliquer le choix des cultures montre que le climat est réellement endogène dans le processus de sélection des cultures par les agriculteurs (Hausman, 1978; Terza et al., 2008).

Le modèle du choix estimé alors est écrit comme suit :

$$P_{ij} = \frac{exp(\beta_{j|b} x_i + \delta_{j|b} u_i)}{\sum_{k=1}^{J} exp(\beta_{k|b} x_i + \delta_{k|b} u_i)} \quad (3.36)$$

Les paramètres $\beta_{j|b}$ et $\delta_{j|b}$ sont estimés par la méthode de Maximum de vraisemblance. Pour l'estimation de ces coefficients nous tenons compte du plan de sondage utilisé pendant l'EICVMB 2019-2020 (INSBU, 2021) et les observations des parcelles sont pondérées par les poids du ménagé auquel appartiennent ces parcelles, cela nous aide non seulement à obtenir les résultats généralisés au niveau du pays mais également d'obtenir les estimateurs des coefficients du modèle qui sont convergents grâce au calcul de l'estimateur robuste de la variance fondé sur le plan d'échantillonnage même au cas où les hypothèses de la variance constante (homoscédasticité) et d'indépendance des résidus sont violées (Abadie et al., 2019; Carrington et

al., 2000; Gregoire, 1998). La procédure d'estimation de Maximum de vraisemblance est la suivante :

Sachant le plan de sondage utilisé par EICVMB 2019-2020 que l'on a évoqué au début de ce chapitre, l'équation (3.36) peut-être écrite comme suit:

$$P\left(y_{hcip} = j | x_{hcip}; \beta\right) = P_{hcip,j}(\beta) = \frac{exp\left(x'_{hcip,j}\beta_j\right)}{\sum_{m=1}^{J} exp\left(x'_{hcip,m}\beta_m\right)} ; j = 1, \ldots\ldots, J. \quad (3.37)$$

Où $P_{hcip,j}$ est la probabilité que l'agriculteur de la parcelle $p$ se trouvant dans le ménage $i$ de la zone de denombrement $c$ appartenant dans la strate $h$ choisisse la culture/combinaison de culture $j$.

Soit une variable indicatrice $d_{hcip,j} = 1_{\{y_{hcip}=j\}}$, on peut écrire la log pseudo-vraisemblance[23] pondérée par les poids de l'EICVMB comme suit :

$$l_w(\beta) = \sum_{h=1}^{H} \sum_{C=1}^{C_h} \sum_{i=1}^{n_{hc}} \sum_p w_{hci} \sum_{j=1}^{J} d_{hcip,j} \log P_{hcip,j}(\beta) \quad (3.38)$$

Où $w_{hci}$ est le poids de chaque ménage que l'on attribue pour toutes ses parcelles. En effet, un ménage burundais peut avoir plusieurs parcelles. En remplaçant (3.36) dans (3.37), nous obtenons :

$$l_w(\beta) = \sum_{h=1}^{H} \sum_{C=1}^{C_h} \sum_{i=1}^{n_{hc}} \sum_{p \in i} w_{hci} \left[x'_{hcip,y_{hcip}}\beta_{y_{hcip}} - \log \sum_{m=1}^{J} exp\left(x'_{hcip,m}\beta_m\right)\right] \quad (3.39)$$

Où $H$ est le nombre de strates dans tout le pays pour l'EICVMB 2019-2020, il est de 34[24] ; $C_h$est le nombre de zone de dénombrement tiré aléatoirement dans chaque strate h ; $n_{hc}$ est égale au nombre de ménages agricoles tirés aléatoirement dans chaque couple $(h, c)$.

Les coefficients du modèle de choix d'une culture retenus ce sont ceux qui maximisent la log pseudo-vraisemblance $l_w$. C'est-à-dire ceux qui rendent nul les dérivées premières partielles de $l_w$ par rapport à $\beta$. En utilisant la règle de chaine qui stipule que si :

$y = f(g(v))$ alors $\frac{dy}{dv} = f'\left(g(v)\right).g'(v)$ et en posant que $g(v) = \sum_{m=1}^{J} exp\left(x'_{hcip,m}\beta_m\right)$ donc $f(g(v)) = \log(\sum_{m=1}^{J} exp\left(x'_{hcip,m}\beta_m\right))$ nous pouvons calculer les dérivées partielles pour une seule parcelle et le vecteur de ces dérivées partielles (le gradient) étant celui qui indique à quel point les coefficients $\beta$ du modèle estiment mieux les choix des agriculteurs, il est également

[23] Il est appelé ainsi du fait que c'est la vraisemblance pondérée par les poids pour corriger le biais dû au plan d'échantillonnage.

[24] Chacune des 18 provinces est subdivisée en 2 strates (Rural et Urbain) sauf Bujumbura qui est totalement urbain, et ce dernier a été retiré dans les données étudiées supposant qu'il n'y a pas assez de données agricoles ce qui justifie les 34 strates.

appelé le score. Alors le score pour une seule parcelle, obtenu après le calcul des dérivées partielles basé sur la règle de chaine est définit comme suit :

$$S_{hcip}(\hat{\beta}) = \frac{\partial l(\beta)}{\partial \beta} = \sum_{j=1}^{J} \left(d_{hcip,j} - P_{hcip,j}(\beta)\right) x_{hcip,j} \quad (3.40)$$

Afin de ne pas biaiser le total du score pour toutes les parcelles contenant dans la base de données EICVMB, toujours l'estimateur du type Horvitz-Thompson (Horvitz & Thompson, 1952) (pondération des scores parcellaires par les poids d'enquêtes de ces parcelles) est utilisé et il est définit comme suit :

$$U(\hat{\beta}) = \sum_{h=1}^{H} \sum_{C=1}^{C_h} \sum_{i=1}^{n_{hc}} \sum_{p \in i} w_{hci}\, S_{hcip}(\hat{\beta}) \quad (3.41)$$

Les coefficients $\beta$ du modèle de choix sont obtenus en égalisant ce score total pondéré à zéro :

L'équation $U(\beta) = 0$ n'admet une solution explicite, car l'expression de la probabilité de choix $p_{hcip,j}(\beta)$ ne peut pas être décomposée ou factorisée d'une façon à isoler les coefficients $\beta$ dans la partie gauche de l'égalité de l'équation. Pour contourner ce défi, une méthode numérique itérative dite de Fisher scoring est utilisée. Elle est définie comme suit :

$$\beta^{(t+1)} = \beta^{(t)} + \left[\sum_{h=1}^{H} \sum_{C=1}^{C_h} \sum_{i=1}^{n_{hc}} \sum_{p \in i} w_{hci}\, I_{hcip}(\beta^{(t)})\right]^{-1} U(\beta^{(t)}) \quad (3.42)$$

Où $t$ indique le numéro de l'itération et $I_{hcip}(\beta^{(t)})$ est la contribution d'information de Fisher par parcelle obtenu par le calcul de l'opposé de l'Esperance mathématique de la matrice hessienne (dérivées secondes partielles du log vraisemblance).

$$I_{hcip}(\beta^{(t)}) = -E\left[\frac{\partial^2 l(\beta)}{\partial \beta \partial \beta'}\right] = \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{J} P_{hcip,j}(\beta^{(t)}) \left(1\{j = k\} - P_{hcip,k}(\beta^{(t)})\right) x_{hcip,j} x'_{hcip,k} \quad (3.43)$$

Cependant pour des raisons d'une part opérationnelles (stabilité numérique, Généralisation pour des distributions complexes, efficacité de programmation) (Powers & Xie, 2008) dans l'application numérique de cette méthode et d'autre part historiques (Nelder & Wedderburn, 1972), le package svyVGAM du logiciel R utilisé dans cette étude estime les coefficients du modèle de choix de cultures/combinaison de cultures par la méthode équivalente à Fisher scoring appelée IRLS (Iterative Reweighted Least Squares) (Lumley, 2025; Yee & Moler, 2025). IRLS est define comme suit:

$$\hat{\beta}^{(t+1)} = \left(X' W^{(t)} X\right)^{-1} X' W^{(t)} z^{(t)} \; ; \quad (3.44)$$

Avec:

$$W^{(t)} = w_{hci}\, P_{hcip,j}\left(\beta^{(t)}\right)\left(1\{j=k\} - P_{hcip,k}\left(\beta^{(t)}\right)\right); \quad (3.45)$$

$$z^{(t)} = x'_{hcip}\beta^{(t)} + \left[P_{hcip,j}\left(\beta^{(t)}\right)\left(1\{j=k\} - P_{hcip,k}\left(\beta^{(t)}\right)\right)\right]^{-1}\left(y_{hcip} - P_{hcip,k}\left(\beta^{(t)}\right)\right) \quad (3.46)$$

En regardant bien l'équation (3.44) nous constatons la forme d'un estimateur linéaire des Moindres Carrées Ordinaires Pondérées mais itératif. Cette forme est obtenue en calculant une nouvelle pondération $W^{(t)}$ qui est une matrice diagonale combinant à la fois les poids d'échantillonnage de chaque parcelle $w_{hci}$ et la variance du choix de culture/combinaison de cultures à cette parcelle conditionnellement a son profil ($x_{hcip}$: climat et d'autres facteurs de choix de cultures que nous avons cités ci-haut dans la spécification du modèle), cette forme de l'IRLS est obtenue également en créant une variable pseudo-réponse qui n'est que la linéarisation de la fonction de lien logit[25] appliquée au choix de culture à cultiver ($y_{hcip}$) autour de la probabilité de ce choix $P_{hcip,k}\left(\beta^{(t)}\right)$ conditionnée par le profil du parcelle.

L'algorithme converge ou s'arrête quand $\hat{\beta}^{(t+1)} - \hat{\beta}^{(t)}$ est négligeable ou la différence log pseudo-vraisemblance à ces coefficients est inférieure à une plus petite valeur proche de zéro[26] ; également on peut fixer le nombre maximal d'itérations[27] (Powers & Xie, 2008).

#### III.4.2.1.3. Evaluation de la précision de l'estimateur de Maximum de Vraisemblance (MLE) par sa variance

Maintenant nous présentons la méthode utilisée pour évaluer la précision de cet estimateur produit par IRLS ; l'outil d'évaluation de la précision est la variance de l'estimateur. Classiquement la variance de l'estimateur est l'inverse de la matrice d'information de Fisher mais cela repose sur l'hypothèse que les observations sont indépendantes et identiquement distribuées ce qui n'est pas vrai dans notre cas. En effet, les décisions observées pour les parcelles se trouvant dans les mêmes zones de dénombrement sont autocorrélées et les probabilités d'inclusion diffèrent du ménage à un autre. L'utilisation de l'inverse de la matrice d'information de Fisher sous-estimerait alors la variance de l'estimateur et on aura tendance à penser que les coefficients sont significatifs alors qu'ils ne le sont pas en réalité. En se basant sur la formulation

[25] $logit(x) = \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)$, la variable pseudo-réponse linéaire par rapport aux variable explicatives est créée en réalisant une approximation linéaire de cette fonction autour de la probabilité de choisir une culture/combinaison de culture mais $x$ est remplacée par la variable aléatoire choix de culture à cultiver dans la parcelle. La formulation est la suivante :

$$z^{(t)} = logit(y_{hcip}) = logit\left(P_{hcip,j}\left(\beta^{(t)}\right)\right) + \left(y_{hcip} - P_{hcip,j}\left(\beta^{(t)}\right)\right)\left[P_{hcip,j}\left(\beta^{(t)}\right)\left(1\{j=k\} - P_{hcip,k}\left(\beta^{(t)}\right)\right)\right]^{-1}$$

[26] Dans notre cas, nous avons gardé la valeur par défaut utilisée par la fonction svy_vglm du package svyVGAM du logiciel R epsilon = $10^{-8}$

[27] La valeur par défaut de svy_vglm : maximum d'itération = 25

de Fisher scoring (linéarisation de Taylor du premier ordre) et en notant $\beta_0$ le vrai vecteur des coefficients que l'on cherche à estimer on peut écrire :

$$\hat{\beta} - \beta_0 \approx -H(\beta_0)^{-1}U(\beta_0) \quad (3.47)$$

En appliquant la variance membre à membre on obtient :

$$Var(\hat{\beta}) \approx Var\big(H(\beta_0)^{-1}U(\beta_0)\big) = H(\beta_0)^{-1}Var[U(\beta_0)]H(\beta_0)^{-1\prime} \quad (3.48)$$

$\beta_0$ étant un vecteur constant, nous pouvons déduire en se basant sur la première égalité de (3.43) que :

$$H(\beta_0) = -I(\beta_0) \quad (3.49)$$

Sachant que les parcelles au sein des ménages et les ménages au sein des zones de dénombrement sont autocorrélées, et que seules les zones de dénombrement sont des unités supposées indépendantes du fait qu'elles sont tirées aléatoirement au premier degré. Nous calculons alors la variance du score $Var[U(\beta_0)]$ basée sur le plan d'échantillonnage en utilisant les scores agrégés des zones de dénombrement (Lumley, 2004).

Soit $U_{hc}$ le score du zone de dénombrement $c$ qui est dans la strate $h$, il est obtenu comme suit :

$$U_{hc}(\beta_0) = \sum_{i=1}^{C_h} \sum_{p \in P_{hi}} w_{hci}\, S_{hci}(\beta_0) \quad (3.50)$$

On calcul la variance de ces scores $U_{hc}$ autour de leur moyenne $\overline{U}_h$ qui est la moyenne du score de la strate $h$.

$$\overline{U}_h = \frac{1}{C_h}\sum_{c=1}^{C_h} U_{hc} \quad (3.51)$$

Alors la variance du score basée sur le plan d'échantillonnage est obtenue comme suit :

$$Var[U(\beta_0)] = \sum_{h=1}^{H} \frac{C_h}{C_h - 1} \sum_{c=1}^{C_h} (U_{hc} - \overline{U}_h)\,(U_{hc} - \overline{U}_h)' \quad (3.52)$$

Où $\frac{C_h}{C_h - 1}$ est la correction de biais de degrés de liberté de l'estimateur de la variance. Maintenant que nous avons $Var[U(\beta_0)]$, nous pouvons calculer l'estimateur de la variance robuste des coefficients du modèle de choix de cultures à cultiver basé sur le plan d'échantillonnage et obtenu grâce à la linéarisation de Taylor du premier degré $Var(\hat{\beta})$.

(3.49) et (3.52) dans (3.49) donne :

$$Var(\hat{\beta}) = I(\beta_0)^{-1} \left[\sum_{h=1}^{H} \frac{C_h}{C_h - 1} \sum_{c=1}^{C_h} (U_{hc} - \overline{U}_h)\,(U_{hc} - \overline{U}_h)'\right] [I(\beta_0)^{-1}]' \quad (3.53)$$

Etant donné qu'en pratique $\beta_0$ est inconnue, nous le remplaçons par la valeur estimée $\hat{\beta}$. Alors en notant que :

$I(\hat{\beta}) = \hat{A}$ et $\left[\sum_{h=1}^{H} \frac{C_h}{C_h - 1} \sum_{c=1}^{C_h} (U_{hc} - \overline{U}_h)\,(U_{hc} - \overline{U}_h)'\right] = \hat{B}$ , alors l'écriture de (3.53) devient:

$$Var(\hat{\beta}) = \hat{A}^{-1}\hat{B}\hat{A}^{-1\prime} \quad (3.54)$$

L'expression de (3.54) montre que le calcul de l'estimateur de la variance qui tient compte du plan de sondage et les poids de l'enquête est robuste en présence à la fois de l'autocorrélation et de l'hétéroscédasticité comme l'est l'estimateur de la variance de Liang-Zeger (Abadie et al., 2023; Cameron & Miller, 2015; Liang & Zeger, 1986). Cependant comme le montre (3.53) pour les strates $h$ qui ont une et une seule observation, la variance intra-strate est impossible à calculer pour corriger cela nous imputons artificiellement une variance obtenue en multipliant la variance inter-strate par le poids de ce strate qui n'admet qu'une seule observation[28].

Pour la modélisation du choix de culture à cultiver au niveau des régions agroclimatiques, nous appliquons la même méthodologie.

#### III.4.2.1.4. Calcul des effets marginaux moyens et leurs écart-types

La littérature méthodologique qui souligne que les coefficients bruts d'un modèle logit multinomial ne sont pas directement interprétables en raison de leur dépendance à la modalité de référence (Elff, 2022; Paolino, 2021). Les effets marginaux moyens constituent donc une mesure plus robuste et interprétable de l'influence des variables explicatives sur les probabilités prédites. A ce niveau, nous presentons la formule utilisee pour calculer les effets marginaux moyens et leurs relatives erreurs standards tout en tenant compte du plan de sondage aléatoire complexe de l'EICVMB 2019-2020

L'effet marginal individuel de la variable explicative $x_k$ sur la probabilité $P_{ij}$ est défini comme la dérivée partielle suivante :

$$ME_{ijk} = \frac{\partial P_{ij}}{x_{ik}} = P_{ij}\left(\beta_{jk} - \sum_{m=1}^{J} P_{im}\beta_{mk}\right) \quad (3.55)$$

L'effet marginal moyen pour la variable $x_k$ sur la probabilité de la culture *j* est obtenu en calculant une moyenne pondérée de ces effets sur l'ensemble des $N$ parcelles :

$$\overline{ME_{jk}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_{hci} P_{ij}\left(\beta_{jk} - \sum_{m=1}^{J} P_{im}\beta_{mk}\right)}{\sum_{i=1}^{N} w_{hci}} \quad (3.56)$$

[28] Avec le package survey de R, nous avons utilisé la commande suivante pour gérer ce problème : *options(survey.lonely.psu = "adjust")*

Sous plan de sondage complexe, les variances et erreurs standards associées à ces effets sont estimées par linéarisation de Taylor (ou approche design-based), qui tient compte des poids, des strates et des unités primaires du plan :

$$SE\left(\overline{ME_{jk}}\right) = \sqrt{\hat{V}\left(\overline{ME_{jk}}\right)} \quad (3.57)$$

Où $\hat{V}()$ est la variance issue du plan d'échantillonnage aléatoire stratifié à deux degrés, estimée via la fonction svymean() du package survey dans R (Lumley, 2004).

### III.4.2.2. Modélisation du revenu net conditionnel à la culture/combinaison de cultures choisie

#### III.4.2.2.1. Spécification du modèle

Pour modéliser le revenu net conditionnel au choix de la culture/combinaison de cultures $j$ nous utilisons un modèle log-linéaire suivant :

$$\log rev_net_ha_{hcip,j} = \vartheta_{0,j} + \vartheta_{1,j} dd_gs_{hc,j} + \vartheta_{2,j} prcp_gs_{hc,j} + \vartheta_{3,j} prcp_gs^2_{hc,j} + \sum_{k=1}^{K} \gamma_{k,j} \log(FP_{hcip,jk}) + \sum_{s=1}^{S} \varphi_{l,j} Socio_Eco_{hci,jl} + \sum_{q=1}^{Q} \tau_{q,j}\, AgroEnviro_parc_{hcip,jq} + \rho_j corect_dm_{hcip,j} + \varepsilon_{hcip,j} \quad (3.58)$$

Où $\log rev_nt_ha_{hcip,j}$ représente le logarithme du revenu net de la culture/combinaison de cultures $j$ cultivée dans la parcelle $p$ du ménage $i$ dans la zone de dénombrement $c$ du strate $h$. $\vartheta_0$ représente la constante du modèle. $dd_gs_{hc,j}$, $prcp_gs_{hc,j}$, $prcp_gs^2_{hc,j}$ représentent respectivement le nombre de degrés-jour, précipitations totales, le carrée des précipitations totales associés à la période de croissance de $j$ dans l'endroit $(h, c)$ ; $\vartheta_1, \vartheta_2\ et\ \vartheta_3$sont leurs coefficients respectifs. Les $\log(FP_{hcip,jk})$ (Superficie du parcelle, la quantité de semences, nombre d'home-jours, quantité d'engrais inorganiques et la quantité de fumure organique) et $\gamma_k$ représentent respectivement les logarithmes des facteurs de production et les coefficients qui leurs sont associés. Les $Socio_Eco_{hci,jl}$ (Taille de ménage, Ratio Femme-Homme, Revenu hors agricole, les informations sur le chef de ménage : Age, Sexe, Statut matrimonial, Niveau d'études, Possession du téléphone) et $\varphi_l$ représentent respectivement les facteurs socioéconomiques des ménages et leurs correspondants coefficients.

Les $AgroEnviro_parc_{hcip,jq}$ (Fertilité de la parcelle, Topographie de la parcelle, Mode de gestion de la parcelle, Type de semence, Temps du trajet ménage-parcelle, exposition à la sécheresse, aux inondations, au taux élevé des maladies des cultures et aux glissements des terrains) et $\tau_q$ représentent respectivement les facteurs agroenvironnementaux des parcelles et les coefficients qui leurs sont associés. Le facteur $corect_dm_{hcip,j}$ représente le terme de Dubin-

McFadden de correction du biais de choix de culture/combinaison de cultures. Il est calculé comme suit : $\sum_{k\neq j}\left(\frac{P_{hcip,k}\log P_{hcip,k}}{1-P_{hcip,k}}+log\left(P_{hcip,j}\right)\right)$, $\rho_j$ est le coefficient de ce terme de correction. Le calcul matriciel étant le plus approprié pour réaliser les opérations de calcul des coefficients nous notons le modèle sous forme matricielle comme suit :

$$R_j = C\vartheta + F\gamma + S\varphi + E\tau + \varepsilon_j \quad (3.59)$$

Où $R_j$ est le vecteur $n_j \times 1$ contenant les logarithmes des revenus nets pour la culture $j$, $C$ est la matrice $n_j \times 3$ des deux variables climatiques endogènes et la colonne des unités, $\vartheta$ le vecteur des coefficients correspondant de dimension $3 \times 1$, $F$ est la matrice $n_j \times 5$ des facteurs de production en logarithme, $\gamma$ le vecteur $5 \times 1$ des coefficients correspondant, $S$ est la matrice $n_j \times 8$ des facteurs socioéconomiques des ménages, $\varphi$ est le vecteur $8 \times 1$ des coefficients correspondant, $E$ est la matrice $n_j \times 10$ des facteurs agro-environnementaux y compris le terme de correction de Dubin-McFadden, $\tau$ est le vecteur $10 \times 1$ et $\varepsilon_j$ est le vecteur $n_j \times 1$ des erreurs autocorrélées et dont la distribution n'est pas identique.

**III.4.2.2.2. Estimation du modèle de revenu conditionnel au choix de la culture 2SLS**

En raison de l'endogénéité des variables climatiques, les coefficients sont estimés par la méthode de Moindres Carrées en Deux Etapes (2SLS : Two Stage Least Squares en anglais). Contrairement à l'approche 2SRI que nous avons évoquée pour la modélisation du choix de culture, 2SLS consiste à remplacer les variables climatiques par leurs composantes exogènes obtenues dans la première étape de 2SLS qui modélise la relation linéaire existant entre le climat et les instruments exogènes. (Chatzopoulos & Lippert, 2015; Terza et al., 2008). Nous gardons les mêmes instruments que nous avons utilisés dans le modèle de choix de culture. Les deux étapes de 2SLS sont présentées comme suit :

*1ere Etape de 2SLS*

Soit X l'ensemble des variables explicatives du revenu net agricole et décomposé en $X_1$ et $X_2$ représentant respectivement variables y compris la colonne des unités et les variables climatiques endogènes. (3.56) peut s'écrire alors comme suit :

$$R = X\delta + \varepsilon \quad (3.60)$$

Considérons également que les instruments constituent une matrice notée $Z$. Avec le principe de Moindres Carrées Ordinaires (Oridinary Least Squres) appliqué à cette première étape de 2SLS On a :

$$\hat{X}_2 = Z(Z'Z)^{-1}Z'X_2\ ; \quad (3.61)$$

$\hat{X}_2$ représente la partie du climat qui est exogène.

2$^{ème}$ *Etape de 2SLS*

Dans la deuxième étape, nous remplaçons les variables climatiques interpolées $X_2$ qui sont endogènes par $\hat{X}_2$ qui sont exogènes et nous obtenons un estimateur sans biais défini comme suit :

$$\hat{\delta}_{2SLS} = [X'Z(Z'Z)^{-1}Z'X]^{-1}X'Z(Z'Z)^{-1}Z'R \quad (3.62)$$

La matrice $P_z = Z(Z'Z)^{-1}Z'$ représente la matrice de projection de R et X sur l'espace engendré par les instruments (longitude, latitude, altitude et les retards spatiaux des variables climatiques). Avant d'appliquer la formule (3.59), le logiciel R commence d'abord à traiter la matrice $X$. En effet, pour les colonnes qui contiennent les variables qualitatives admettant $m$ modalités, le logiciel crée $m-1$ colonnes indicatrices correspondantes à ces modalités et la modalité restante est considérée comme référence, c'est-à-dire que les paramètres d'autres modalités indiquent la différence entre la moyenne du log revenu net associée à la modalité qui est inclue dans le modèle et celle de log revenu net associée à la modalité de référence comme ça le problème de la non identification du modèle est évité. Contrairement à l'estimateur du Maximum de Vraisemblance que nous avons utilisé pour l'estimation du modèle de choix, l'estimateur IV/2SLS que nous utilisons ne tient pas compte du plan de sondage et des poids de l'enquête. La raison est qu'on n'a pas pu trouver à la limite de nos recherches une fonction ou une librairie du logiciel R qui utilise cet estimateur tenant compte du plan de sondage complexe comme le plan d'échantillonnage aléatoire stratifié à deux degrés utilisé par EICVMB 2019-2020.

**III.4.2.2.3. Evaluation de la précision de l'estimateur IV/2SLS par la variance**

L'estimateur $\hat{\delta}_{2SLS}$ est sans biais face à l'endogénéité du fait qu'il permet d'isoler un effet causal valide, il ne converge pas au vrai valeur qu'il estime. Cependant sa variance n'est pas correcte car son calcul par le logiciel repose par défaut sur l'hypothèse d'indépendance et d'homoscedasticité des erreurs, ce qui ne reflète pas la réalité de la structure de données de l'EICVMB 2019-2020. En effet, ce calcule ne tient pas compte du plan de sondage (Fox et al., 2024). L'hypothèse d'homoscedasticité est violée car le plan de sondage divise le pays en strates qui sont hétérogènes. Egalement l'hypothèse d'indépendance est violée car certains caractéristiques des ménages ou parcelles d'une même zone de dénombrement (unité primaire de sondage pour l'EICMB 2019-2020) sont communes (Cameron & Miller, 2015). Nous calculons alors un estimateur de la matrice variance-covariance robuste à l'hétéroscédasticité et à l'autocorrélation (Liang & Zeger, 1986; Zeileis et al., 2020) :

En posant $= [X'Z(Z'Z)^{-1}Z'X]^{-1}X'Z(Z'Z)^{-1}$ , l'estimateur de la variance est défini comme suit :

$$\widehat{Var}_{CL,HC1}(\hat{\delta}_{2SLS}) = B\left(\frac{C}{C-1}\frac{n-1}{n-k}\sum_{c=1}^{C}(Z_c'\hat{\varepsilon}_c)(Z_c'\hat{\varepsilon}_c)'\right)B' \quad (3.63)$$

Le produit $(Z_c'\varepsilon_c)(Z_c'\varepsilon_c)'$ indique que la variance des erreurs $\varepsilon$ n'est pas constante, indexer ce produit par $c$ indique que l'estimateur de la variance tient compte de l'autocorrélation des donnes se trouvant dans la même zone de dénombrement $c$, $\frac{n-1}{n-k}$ est le facteur de correction de type $HC1$ (Long & Ervin, 2000; MacKinnon & White, 1985) qui corrige le biais au niveau de la prise en compte de l' hétéroscédasticité, $\frac{C}{C-1}$ est le facteur de correction du biais au niveau de la prise en compte des clusters, $n$, $k$ et $C$ représentent respectivement le nombre d'observations, le nombre de coefficients du modèle composant le vecteur $\hat{\delta}_{2SLS}$ et le nombre de clusters.

En raison de peu d'observations et de clusters (zone de dénombrement dans le cas présent) pour le riz et pour toutes cultures lorsque nous les modélisons par zone agroclimatique, l'estimateur $\widehat{Var}_{CL,HC1}(\hat{\delta}_{2SLS})$ n'est pas correct et nous utilisons un autre estimateur qui est compatible aux petits échantillons (Bell & McCaffrey, 2002; Imbens & Kolesár, 2016).

$$\widehat{Var}_{CR2}(\hat{\delta}_{2SLS}) = B(\sum_{c=1}^{C}(Z_c'A_c\hat{\varepsilon}_c)(Z_c'A_c\hat{\varepsilon}_c)')B' \quad (3.64)$$

Où $\widehat{Var}_{CR2}(\hat{\delta}_{2SLS})$ est l'estimateur robuste clustérisé de Bell-McCaffrey basé sur le facteur de correction de type CR2, $A_c = (I_{nc} - H_{cc})^{-\frac{1}{2}}$ est un facteur d'inflation des résidus, cluster par cluster, qui corrige le biais de variance dû à la présence de levier[29] intra-cluster. $H_{cc}$ mesure ce levier, il est obtenu avec la formule suivante :

$$H_{cc} = Z_c(Z'Z)^{-1}Z'X(X'P_ZX)^{-1}X'Z(Z'Z)^{-1}Z_c' \quad (3.65)$$

Avec cette formule les clusters qui ont peu d'observations mais dont ces dernières sont fortement autocorrélées, le biais est corrigé non pas par un facteur qui dépend du nombre d'observations mais plutôt par le levier qui mesure l'influence de cette autocorrélation dans l'estimateur de la variance.

### III.4.3. Méthodologie pour le troisième Objectif

Pour simuler les effets possibles du changement climatique de l'avenir proche 2021-2040 et de l'avenir moyen terme 2041-2060, nous commençons premièrement à récupérer (chapitre 3

[29] Le levier intra-cluster mesure l'influence du cluster entier (via ses données regroupées) dans l'ajustement de la régression.

section 3.3.1) les projections du climat pour ces deux périodes, deuxièmement à l'aide des modèles qui estiment les relations climat-choix et climat-revenu nous calculons les choix et revenus net agricole par hectare sous le climat actuel d'une part et sous les projections du climat d'autre part, Troisièmement, nous calculons les différences entre les choix/revenu sous le climat futur (2021-2040 et 2041-2060) et ceux du climat actuel (1991-2019) ; les différences obtenues sont les effets du changement climatique. Les revenus et choix des cultures sous le climat futur sont calculés à la base du principe *ceteris paribus*.

Le calcul de l'impact sur le revenu est également une analyse statique comparative car les modèles de la relation climat-revenu est obtenu sous les conditions d'équilibre du marché en concurrence pure et parfaite des produits agricoles et on évalue comment l'équilibre change si le climat change. Pour chacune des deux périodes (2021-2040 et 2041-2060), nous réalisons des simulations par culture et par région selon les deux scenarios (SSP2-4.5 et SSP5-8.5).

*i) Simulation des effets du changement climatique sur le choix des agriculteurs*

Les choix sont simulés à travers les probabilités de choix de culture/combinaison de cultures. La formule utilisée est la suivante (Etwire et al., 2019) :

$$effet_choix_{rj}|climat_{scenario}^{periode} = E\left(\hat{P}_{rpj}|climat_{scenario}^{periode}\right) - E\left(\hat{P}_{rpj}|climat_{1991-2019}\right) \quad (3.66)$$

Où $effet_choix_{rj}|climat_{scenario}^{periode}$ indique l'effet du changement climatique dans une région $r$ pour une culture/combinaison de cultures $j$ sous le climat de la période future. $periode = \{2021-2040, 2041-2060\}$ correspondant au scenario. $scenario = \{SSP2-4.5, SSP5-8.5\}$. $E\left(\hat{P}_{rpj}|climat_{scenario}^{periode}\right)$ indique l'Esperance mathématique des probabilités de choisir la culture/combinaison de cultures[30] $j$ dans une parcelle $p$ se trouvant dans la région $r$ sous le climat futur et $E\left(\hat{P}_{rpj}|climat_{1991-2019}\right)$ représente l'Esperance mathématique des probabilités de choisir la culture/combinaison de cultures $j$ dans une parcelle $p$ se trouvant dans la région $r$ sous le climat actuel 1991-2019.

*ii) Simulation des effets du changement climatique sur le revenu net agricole conditionnel*[31]

Comme pour le choix, nous simulons l'impact sur le revenu avec la formule suivante (Etwire et al., 2019; Ginbo, 2022):

$$effet_rev_{rj}|climat_{scenario}^{periode} = E\left(\hat{R}_{rpj}|climat_{scenario}^{periode}\right) - E\left(\hat{R}_{rpj}|climat_{1991-2019}\right) \quad (3.67)$$

[30] Elle est estimée par la moyenne arithmétique des probabilités.

[31] Le revenu étant modélisé en log pour le retransformer en niveau nous utilisons une transformation non biaisée : $E(R/X) = e\exp(X'\delta)exp(0.5\sigma^2)$ (Chatzopoulos & Lippert, 2015)

Pour calcul l'effet total du changement climatique sur l'agriculture d'une région agroclimatique afin d'identifier les régions résilientes et vulnérables, on calcule la moyenne arithmétique pondérée des effets de chaque culture cultivée dans cette région, les effets du changement climatique sur les cultures sont pondérés par les probabilités de choisir ces cultures (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008; N. Seo & Mendelsohn, 2008).

$$effet_rev_r|climat_{scenario}^{periode} = \sum_{j=1}^{J} E\left(\hat{P}_{rpj}|climat_{scenario}^{periode}\right) \times effet_rev_{rj}|climat_{scenario}^{periode} \quad (3.68)$$

Pour mesurer l'impact économique sur une culture spécifique afin d'identifier si elle sera résiliente ou vulnérable au changement climatique au niveau du pays et pas régional, nous calculons la moyenne pondérée des effets du changement climatique sur cette culture aux différentes régions.

Pour une région donnée, l'effet du changement climatique sur cette culture est pondéré par la proportion de la superficie régionale associée à la culture par rapport à la superficie nationale occupée par cette culture.

$$effet_rev_j|climat_{scenario}^{periode} = \sum_{r=1}^{N_{rj}} \frac{sup_{rj}}{\sum_{r=1}^{N_r} sup_{rj}} \times effet_rev_{rj}|climat_{scenario}^{periode} \quad (3.69)$$

Pour mesurer l'effet du changement climatique sur l'ensemble du pays à partir des effets régionaux, nous calculons la moyenne pondérée des effets régionaux ; ces effets sont pondérés par la proportion des superficies agricoles régionale par rapport à la superficie agricole nationale.

$$effet_revenu_National = \sum_{r=1}^{5} \left(\frac{sup_r}{sup_{pays}} \times effet_rev_j|climat_{scenario}^{periode}\right) \quad (3.70)$$

Les superficies régionales, et nationales de différentes cultures sont calculées à partir des poids d'enquête de l'EICVMB 2019-2020.Ces superficies servent également pour calculer les pertes ou gains totaux du changement climatique. En effet, les simulations nous donnent seulement les pertes/gains par hectare.

### III.4.4. Définition des variables utilisées dans la modélisation

Les variables utilisées dans la modélisation du choix des agriculteurs et du revenu net conditionnel à ces choix, nous avons utilisé plusieurs variables indépendantes et dépendantes : La culture choisie est la variable dépendante pour la modélisation du choix et le revenu net agricole par hectare est utilisé comme variable dépendante lors de la modélisation du revenu. Les autres variables sont présentées dans le tableau suivant.

**Tableau 4 : Opérationnalisation des variables**

| Etiquette | Nom | Type | Unité | Explication |
|---|---|---|---|---|
| rev_net_ha | Revenu net par ha | | Fbu/ha | Recettes totales diminuées des charges divisées par la superficie récoltée |
| dd_gs | Degré-jour | Quantitative | °C.Jour | Cumul des températures en degrés pendant la période de croissance d'une culture, ici nous considérons la saison culturale |
| prcp_gs | Précipitations totales | Quantitative | mm | Cumul des précipitations en période de croissance |
| I(prcp_gs^2) | Carrée des précipitations totales | Quantitative | $mm^2$ | Le carrée des précipitations totales enregistrées pendant la période de croissance d'une culture |
| sup_parc_rec | Superficie récoltée | Quantitative | ha | La variable est mise en logarithme pour linéariser sa relation avec le revenu net agricole |
| qte_sem_ha | Quantité de semence | Quantitative | Kg/ha | La quantité de semence utilisée par hectare |
| hom_jour_ha | Quantité de main d'œuvre | Quantitative | HJ/ha | La main d'œuvre pour le labour, semi et la récolte ont été mise en ensemble |
| qte_fum_ha | Quantite de fumure | Quantitative | Kg/ha | - |
| qte_engr_ha | Quantite d'engrais inorganiques | Quantitative | Kg/ha | - |
| fertiliteMoyenne | La fertilite moyenne | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la fertilité de la parcelle est déclarée moyenne ; 0 sinon |
| fertiliteFaible | La fertilité faible | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la fertilité de la parcelle est déclarée faible ; 0 sinon |
| topo_parcelPlaine | Topographie de la parcelle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la topographie de la parcelle est plaine ; 0 sinon |
| topo_parcelPente raide | Topographie de la parcelle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la topographie de la parcelle a une pente raide ; 0 sinon |
| topo_parcelColline | Topographie de la parcelle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la topographie de la parcelle est colline ; 0 sinon |
| topo_parcelVallee | Topographie de la parcelle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la parcelle se trouve dans la vallée ; 0 sinon |
| topo_parcelAutre | Topographie de la parcelle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si la topographie se trouve dans une topographie autre que la plaine, pente douce, pente raide, colline et vallée |
| mod_gestionIndividuelle | Mode de gestion | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le mode de gestion de la parcelle est individuel |
| sem_amel | Semence amelioree | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si les semences utilisées sont améliorées |
| temp_men_parcel | Distance ménage-parcelle | Quantitative | minutes | Le temps du trajet ménage vers parcelle |
| hh_size | La taille du ménage | Quantitative | - | Nombre des personnes vivant dans le ménage |
| rev_hors_agriOui | Accès au revenu non agricole | Qualilative binaire | - | La variable est égale à 1 si le ménage a une autre source de revenu non agricole |
| age_head | Age du chef de ménage | Quantitative | Années | - |
| sex_headMasculin | Le sexe du chef de menage | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 le chef de ménage est homme |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| statut_matAutre | Statut matrimonial du chef de ménage | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le chef de ménage est marié |
| nivet_headAucun | Niveau d'études du chef de ménage | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le chef de ménage est n'est pas instruit |
| nivet_headPost fondamental | Niveau d'études du chef de ménage | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le chef de ménage est arrivé jusqu'au Post-Fondamental |
| nivet_headSupérieur | Niveau d'études de chef de ménage | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le chef de ménage à un niveau d'études supérieur |
| phone_headOui | Possession du téléphone mobile | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le chef de ménage possède un portable |
| ratio_fem_hom | Ratio Femme-Homme | Quantitative | - | Le nombre de femmes vivant dans le ménage par rapport à l'effectif des hommes vivant dans le même ménage |
| secheresse | Sécheresse | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le ménage est exposé à la sécheresse pendant les trois dernières années précédant l'enquête |
| inondations | Inondations | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le ménage est exposé aux inondations pendant les trois dernières années |
| grele | La grêle | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si les parcelles du ménage ont été exposé à la grêle au cours de trois dernières années. |
| taux_malad | Taux de maladies | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si les cultures du ménage avaient expérimenté un taux élevé des maladies pendant les trois dernières années |
| ravageurs | Les ravageurs | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si les cultures étaient exposées aux ravageurs au cours de trois dernières décennies précédant l'EICVMB 2019. |
| gliss_terrain | Glissement de terrain | Qualitative binaire | - | La variable est égale à 1 si le ménage avait connu des glissements de terrain pendant les trois dernières années |
| SPEI-3 | Indice de sécheresse pour le cumul de 3 mois | | | |
| SPEI-18 | INDICE DE sècheresse pour le cumul de 18 mois | | | |

**Conclusion du troisième chapitre**

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie de l'étude, depuis le traitement des données jusqu'à la simulation des impacts du changement climatique. Le traitement des données a porté sur la gestion des valeurs manquantes et aberrantes, l'interpolation des variables climatiques au niveau des collines via un modèle hybride combinant un effet linéaire de l'altitude et un modèle IDW, ainsi que le calcul de variables dérivées comme le revenu net agricole, le SPEI et les degrés-jours. Pour analyser le changement climatique passé et futur, nous avons utilisé les projections de huit MCG et appliqué la pente de Theil-Sen, le test de Mann-Kendall et la courbe LOWESS. L'effet du climat sur le choix des cultures a été modélisé par un logit multinomial avec approche 2SRI, tandis que l'effet sur le revenu agricole a été estimé via un modèle semi log-linéaire avec 2SLS et variables instrumentales, en tenant compte de l'endogénéité et en utilisant des estimateurs robustes à l'hétéroscédasticité et l'autocorrélation. Enfin, la méthodologie pour simuler les impacts futurs du changement climatique a été présentée.

# CHAPITRE IV : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Dans le présent chapitre, nous présentons les résultats selon les objectifs du présent travail. Nous commençons par les résultats du premier objectif concernant l'évaluation du changement climatique passé et prévu au Burundi en prenant 1991-2019 comme période de référence. Les résultats du deuxième objectif sont relatifs à la modélisation de la relation existant entre le climat et le choix des cultures ainsi que la modélisation de la relation du climat et le revenu net agricole conditionnement à la culture choisie. Enfin, nous présentons les résultats de simulation illustrant comment et combien sera l'impact économique du changement climatique pour une culture donnée à travers différentes régions agroclimatiques.

## IV.1. Résultats sur le premier objectif

Avant d'évaluer l'impact du changement climatique, nous présentons d'abord les résultats du premier objectif : « Evaluer le changement climatique passé et futur au Burundi selon les données historiques et différentes prévisions du climat par les Modèles de Circulation Générale (MCG) sous différents scénarii pour les horizons 2021-2040 et 2041-2060 ». Nous prenons le climat de 1991-2019 comme le climat de référence.

### IV.1.1. Description du climat de la période ciblée (1991-2019)

Avant d'évaluer le changement climatique passé et future, le tableau 5 décrit le climat correspondant à période de 1991-2019 dont dépend l'agriculture de 2019-2020 l'année agricole étudiée dans cette étude. L'analyse des données met en évidence une variabilité saisonnière marquée et des conditions thermiques et hydriques contrastées, déterminantes pour l'activité agricole. La température moyenne annuelle est d'environ 19,9 °C, avec des minimas autour de 13,4 °C et des maximas approchant 25 °C, reflétant une diversité climatique liée notamment aux variations d'altitude. Les degrés-jours annuels cumulés, indicateurs clés du potentiel thermique pour la croissance des cultures, présentent une moyenne de 5345°C.Jour, ce qui indique une capacité thermique favorable à diverses cultures, bien que la variabilité entre périodes (1389 à 2203° C.Jour) suggère des contraintes thermiques saisonnières.

**Tableau 5 : Description du climat pour la période de référence 1991-2019 du Burundi**

| Variable | Obs | Moyenne | Ecart-type | Min | Max |
|---|---|---|---|---|---|
| Temp.moyA(°C) | 2644 | 20.15 | 1.83 | 13.88 | 24.98 |
| Temp.moyB(°C) | 2644 | 19.83 | 1.87 | 13.48 | 24.92 |
| Temp.moyC(°C) | 2644 | 19.50 | 2.08 | 12.49 | 24.38 |
| Temp.moyAnnuelle(°C) | 2644 | 19.86 | 1.89 | 13.41 | 24.76 |
| ddA(°C.jour) | 2644 | 2203.94 | 226.95 | 1441.46 | 2720.94 |
| ddB(°C.jour) | 2644 | 1715.54 | 184.13 | 1095.68 | 2172.08 |
| ddC(°C.jour) | 2644 | 1389.39 | 140.29 | 921.47 | 1670.99 |
| ddAnnuelle(°C.jour) | 2644 | 5345.47 | 549.51 | 3455.65 | 6546.87 |
| prcpA(mm) | 2644 | 659.50 | 89.19 | 402.94 | 920.09 |
| prcpB(mm) | 2644 | 493.83 | 42.98 | 307.63 | 685.89 |
| prcpC(mm) | 2644 | 54.04 | 16.77 | 24.07 | 121.22 |
| PrcpAnnuelle(mm) | 2644 | 1213.61 | 130.18 | 755.74 | 1663.81 |
| Balance_hydrA(mm) | 2644 | 266.94 | 124.78 | -168.33 | 624 |
| Balance_hydrB(mm) | 2644 | 192.79 | 69.64 | -139.33 | -421.10 |
| Balance_hydrC(mm) | 2644 | -163.10 | 37.90 | -270.60 | -53.27 |
| BalanceAnnuelle(mm) | 2644 | 303.16 | 223.45 | -573.97 | 969.88 |

**Note :** Temp.moyA, Temp.moyB et Temp.moyC indique la température moyenne respectivement pour la saison culturale A (15 Septembre au 14 Février), la saison culturale B (15 Février au 14 Juin) et la saison culturale C (15 Juin au 14 Septembre). ddA, ddB et ddC le nombre de degré-jour moyen respectivement pour la saison A, B et C. prcpA, prcpB et prcpC les précipitations moyennes respectivement pour la saison A, B et C. Balance_hydr est la balance hydrique obtenue comme différence entre les précipitations et l'évapotranspiration calculée grâce à la fonction '*thornthwaite'* du package '*SPEI'* du logiciel R.

**Source :** Auteur (2025) à partir des données de l'IGEBU et CHIRPS pour les précipitations.

Les précipitations totales annuelles moyennes s'élèvent à environ 1214 mm, mais leur distribution selon les saisons agricoles n'est pas uniforme, il y a une forte concentration pendant la saison agricole A (jusqu'à 660 mm) et une période sèche caractérisée par de faibles précipitations (environ 54 mm).

L'hétérogénéité saisonnière se traduit également par un bilan hydrique annuel moyen positif (303 mm), mais avec des déficits hydriques sévères lors de la période sèche, pouvant atteindre jusqu'à -270 mm.

Les résultats soulignent la nécessité d'adapter les pratiques agricoles aux contraintes climatiques saisonnières, en particulier face au changement climatique qui pourrait accentuer les épisodes de sécheresse et modifier les températures moyennes, impactant ainsi la production agricole.

### IV.1.2. Comparaison du climat de différentes périodes 1975-1990 ;1991-2019 ; 2021-2040 et 2041-2060

La figure 2 met en évidence l'évolution attendue du climat au Burundi, en comparant les conditions historiques (1975-1990 et 1991-2019) aux projections futures pour les périodes 2021-2040 et 2041-2060, selon deux scénarios climatiques : SSP2-4.5 (modéré) et SSP5-8.5 (pessimiste). Les variables climatiques considérées : température moyenne, nombre de degré-jour et précipitations ont un lien direct avec les rendements agricoles, les revenus des exploitants, et la stabilité des systèmes de production.

Concernant les températures moyennes, la figure montre une tendance claire au réchauffement sur l'ensemble de l'année. La période 2041-2060, en particulier sous le scénario SSP5-8.5, affiche des températures mensuelles jusqu'à 2,5°C supérieures à celles de la période de référence (1975-1990). Cette élévation thermique aura plusieurs implications pour l'agriculture : d'une part, elle peut accélérer les cycles de croissance des cultures, favoriser certaines espèces thermophiles comme le maïs ou le manioc, et potentiellement permettre des cultures multiples par an. D'autre part, elle accroît aussi le risque de stress thermique, notamment pour les cultures sensibles comme le haricot, et pourrait réduire les rendements si les conditions hydriques ne sont pas suffisantes.

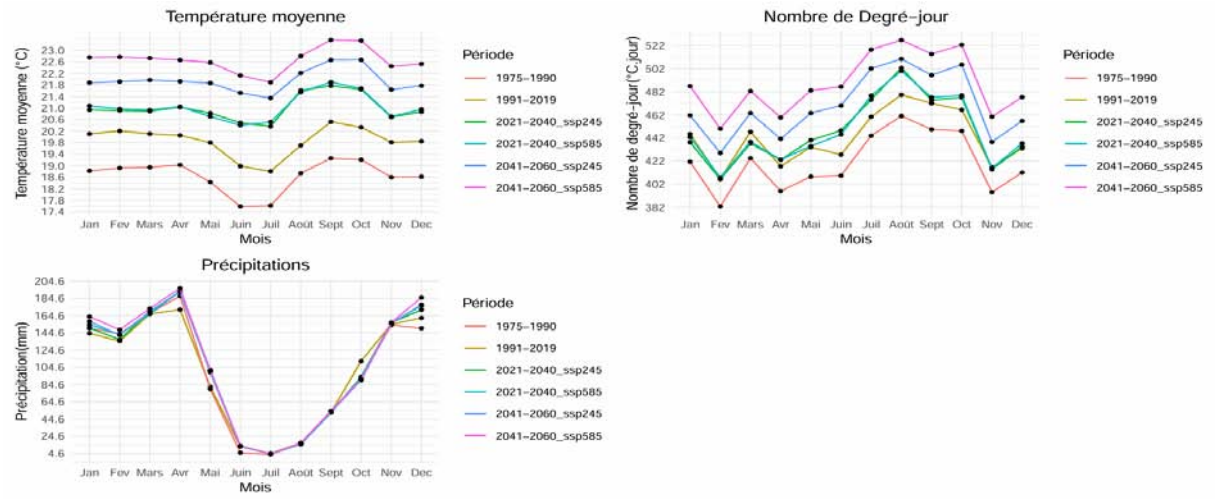



**Figure 3 : Comparaison du climat passé (1975-1990, 1991-2019) et du futur climat (2021-2040 et 2041-2060).**

**Source : IGEBU (1991-2019) + CHIRPS (1975-2019) +WorldClim (2021-2060) ; calcul du nombre de degrés-jour et graphiques : auteur (2025).**

Le nombre de degré-jour l'indicateur du cumul de chaleur utile pour la croissance des plantes augmente nettement dans les projections futures, surtout entre juin et octobre. Cette augmentation signifie que les conditions deviedront plus favorables à la culture de variétés à cycle court ou à l'intensification culturale (par exemple, double culture annuelle). Cependant, ces gains potentiels ne seront réalisables que si les ressources en eau sont disponibles en quantité suffisante. Faute de quoi, le stress hydrique pourrait neutraliser les avantages des températures plus élevées. Une révision des calendriers agricoles et l'introduction de variétés tolérantes à la chaleur s'imposeront alors comme des mesures d'adaptation nécessaires.

Par ailleurs, le troisième graphique décrit l'évolution de la disponibilité en eau sous forme de précipitations. Les données historiques révèlent deux saisons pluvieuses principales : de mars à mai et d'octobre à décembre. Les projections ne montrent pas de variation majeure en volume total annuel, mais la distribution saisonnière pourrait changer. À partir de 2041, une baisse légère des pluies durant la grande saison (mars-mai) est observée, combinée à une plus grande variabilité interannuelle. Ces changements accroissent le risque d'instabilité pour les systèmes agricoles pluviaux, très répandus au Burundi. Un démarrage tardif ou irrégulier de la saison peut entraîner des pertes de récoltes, surtout pour les ménages sans accès à l'irrigation. Les cultures pluviales comme le maïs ou le haricot seront donc particulièrement vulnérables, tandis que les zones irriguées ou marécageuses pourraient offrir un avantage comparatif croissant.

Afin de comparer les périodes sans considération des variabilités inter mensuelles, nous présentons au tableau 6 les valeurs moyennes des variables climatiques (température, degré-jour et précipitation) pour chaque période.

**Tableau 6 : Moyenne des variables climatiques pour chaque période**

| Période | Temperature moyenne (°C) | Precipitations (mm) | Degré-jour (°C.jour) |
|---|---|---|---|
| 1975-1990 | 18.65 (-1.21) | 100.16 (-0.97) | 420.92 (-21.20) |
| 1991-2019 | 19.86 | 101.13 | 442.12 |
| 2021-2040 (SSP2-4.5) | 21 (+1.15) | 104.65 (+3.51) | 447.62 (+5.50) |
| 2021-2040 (SSP5-8.5) | 21.04 (+1.18) | 105.36 (+4.23) | 448.28 (+6.15) |
| 2041-2060 (SSP2-4.5) | 21.95 (+2.09) | 105.92 (+4.79) | 469.87 (+27.75) |
| 2041-2060 (SSP5-8.5) | 22.67 (+2.81) | 108.48 (+7.34) | 489.1 (+46.97) |

**Note :** La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R**.**

**Source :** Auteur (2025) à partir de données de l'IGEBU et les projections de WorldClim

Le tableau 5 montre que dans l'avenir proche 2021-2040 pour les scenarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 il y aura respectivement une augmentation de température moyenne de 1,15°C et 1,18°C tandis que pour l'avenir moyen terme (2041-2060) il y aura une augmentation de 2,09°C et 2,81°C.

Les cartes présentées ci-dessous nous aident à comprendre l'évolution spatiale des différents paramètres climatiques pour différentes saisons agricoles au niveau des collines. Les cartes correspondant au saison agricole A montrent que toutes les collines y compris les collines les plus froides situées dans la région Crête Congo-Nil ont connu une augmentation de la température par conséquent du nombre de degrés-jour, les collines de l'Ouest et du Nord-Est sont les plus chaudes comparativement aux autres régions. Certaines collines qui étaient sous une température de d'environ 24 ont évolué jusqu'à 24,99 °C soit une augmentation d'environ 1 °C. Cette augmentation du nombre de degré-jour devrait être bénéfique pour la croissance rapide des cultures, sauf en cas des déficits hydriques qui annuleront les effets positifs de cette accumulation de la chaleur dont les cultures en ont besoin.

Pour déterminer les zones dans lesquelles l'augmentation du nombre de degré-jour sera bénéfique une carte visualisant la balance de l'eau c'est-à-dire la différence entre l'eau reçue sous forme des précipitations et l'eau perdue sous le phénomène d'évapotranspiration a été présenté ci-dessous. Cette carte montre que bien que l'augmentation du nombre de degré-jour est concentrée dans les régions de l'Ouest et du Nord-Est, le déficit hydrique constaté dans ces régions neutralise ces avantages attendus sur le développement des cultures.

Contrairement à ces régions, les régions de hautes altitude comme celles de Mumirwa et du Crête Congo-Nil bénéficieront de cette croissance de la chaleur grâce à la balance positive hydrique.

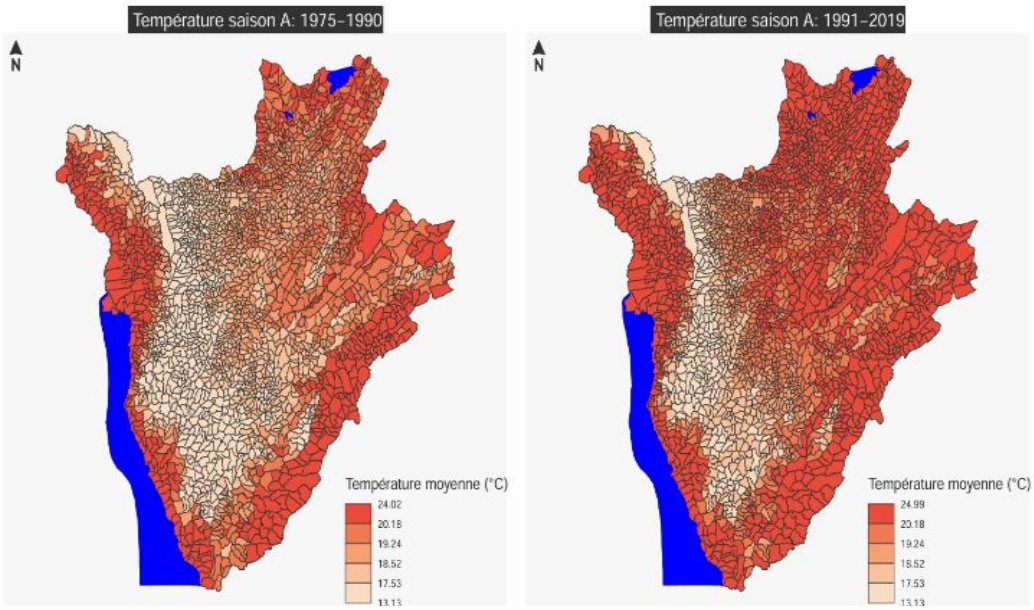



**Figure 4 : Comparaison spatiale de la température de la saison agricole A pour les deux périodes 1975-1990 et 1991-2019.**

Source : Données : IGEBU

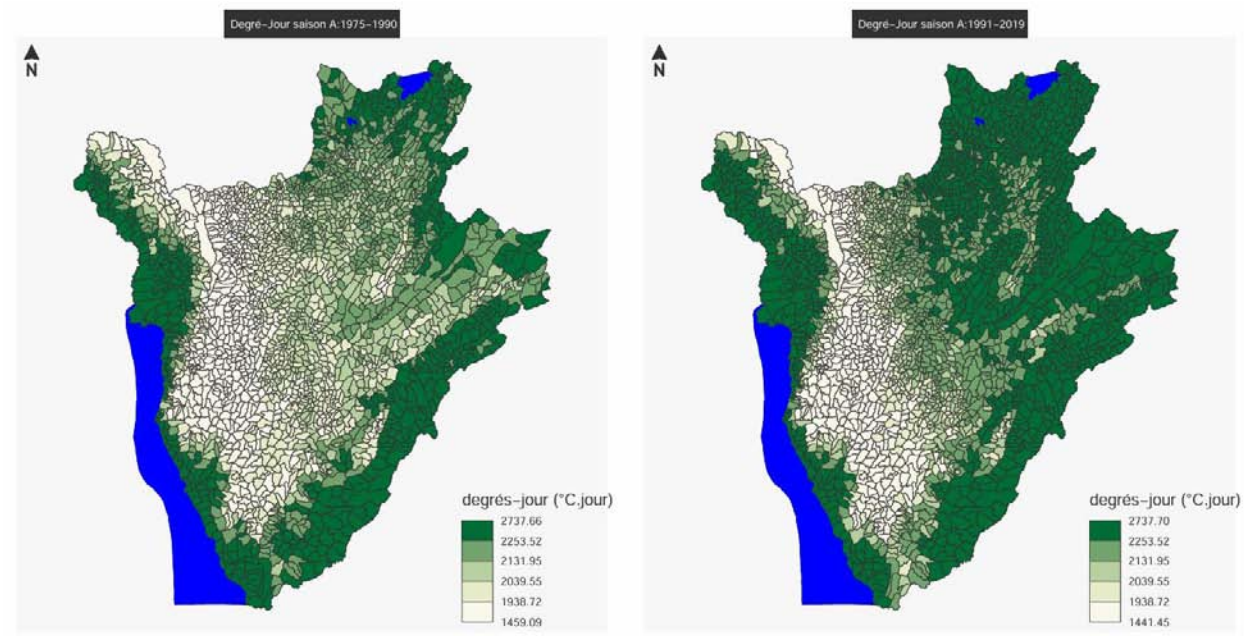



**Figure 5 : Comparaison spatiale du nombre de degré-jour de la saison agricole A pour les deux périodes 1975-1990 et 1991-2019.**

**Source :** IGEBU (1991–2019) ; calcul des degrés-jours et cartographie : auteur (2025).

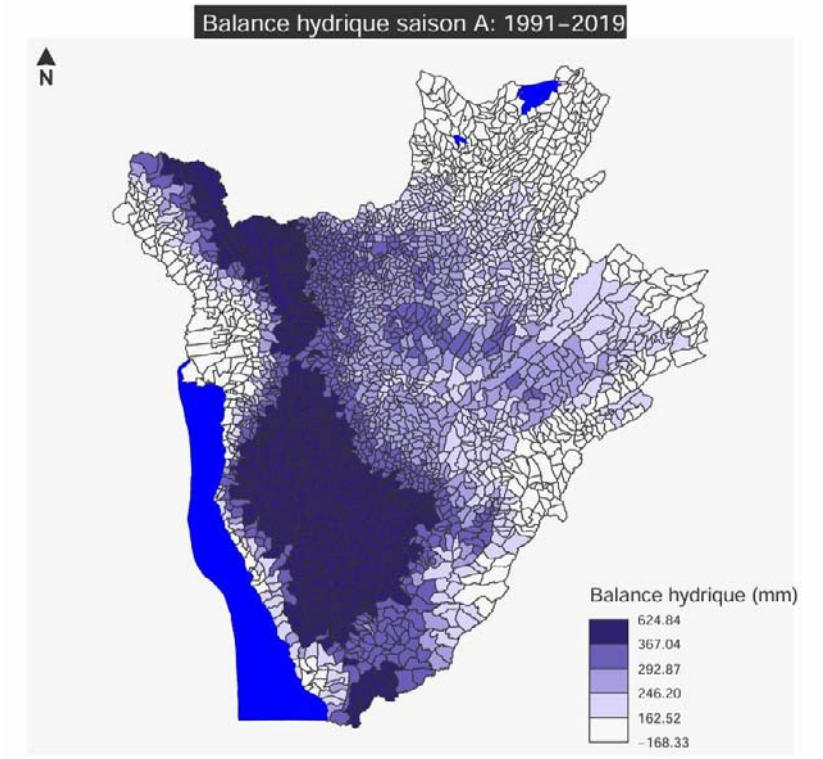



**Figure 6 : Distribution spatiale de la balance hydrique de la saison agricole A pendant la période 1991-2019.**

**Source :** IGEBU (1991–2019) +CHIRPS ; calcul de la balance hydrique et cartographie : auteur (2025).

Les mêmes cartes pour la saison B et C sont présentées dans la section annexe. De ces cartes, il en ressort que la distribution spatiale des paramètres climatiques est similaire à celle observée pendant la saison agricole A. Les cartes visualisant les projections futures du nombre de degrés-jour sous le scenario modéré SSP2-4.5 à la fois pour l'avenir proche (2021-2040) et l'avenir à moyen terme (2041-2060) révèle que toutes les collines du Burundi enregistreront une hausse du nombre de degré-jour, particulièrement pour 2041-2060 où la quasi-totalité des collines burundaises enregistreront un nombre de degré-jour oscillant entre 2253.52 °C.jour et 3117 °C.jour l'intervalle qui s'observe actuellement uniquement dans les régions les plus chaudes comme l'Ouest et le Nord-Est du pays.

Les cartes montrent également que l'hétérogénéité spatiale de l'évolution du climat est similaire pour toutes les saisons agricoles ; ce qui reflète que le climat n'est pas uniforme au Burundi et que l'impact du changement climatique sur l'agriculture devrait par conséquent être hétérogène. Ces résultats justifient alors la prise en compte de régions agro climatiques de cette étude pour évaluer l'effet économique du changement climatique sur l'agriculture au Burundi.

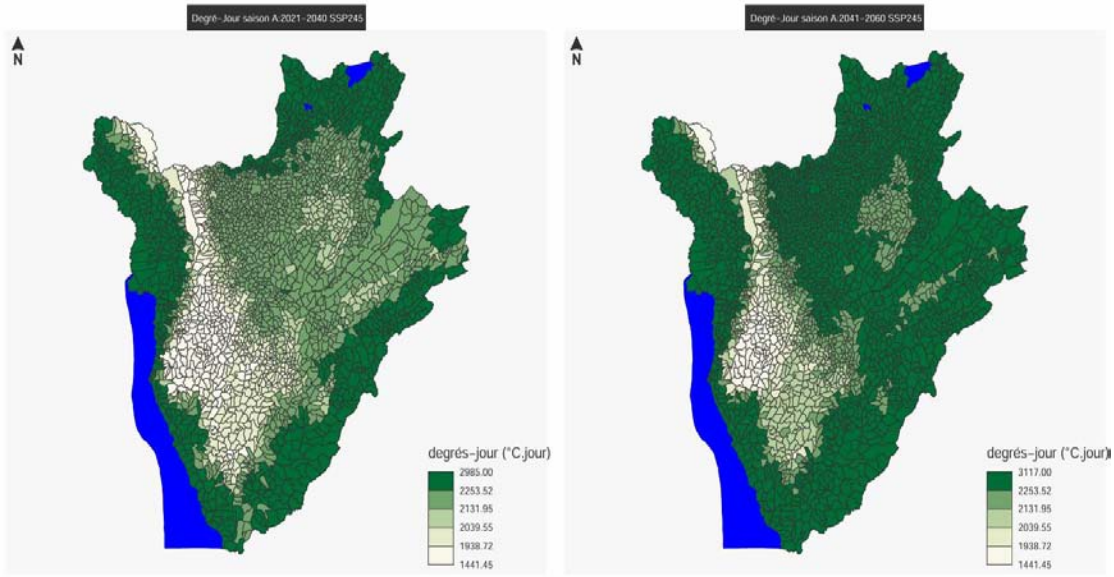



**Figure 7 : Distribution spatiale des projections futures du nombre de degrés-jour au niveau des collines pour l'avenir proche 2021-2040 et l'avenir moyen terme 2041-2060.**

**Source :** WorldClim (2021–2060) ; calcul de degrés-jour et cartographie : auteur (2025).

### IV.1.3. Evolution annuelle des paramètres climatiques de chaque saison agricole de 1991 à 2019

Sur la période 1991–2019, la figure 8 montre que les températures moyennes ont connu une augmentation significative dans toutes les saisons agricoles (A, B et C), avec une pente de +0,04 °C par an. Cette hausse constante de la température traduit un réchauffement climatique généralisé au niveau national. Une telle évolution thermique peut avoir des effets contrastés sur l'agriculture : d'un côté, elle raccourci la période de croissance pour certaines cultures tolérantes à la chaleur ; de l'autre, elle peut accroître l'évapotranspiration, modifier la structure agroécologique de certaines zones. En effet, les cultures moins tolérantes à la chaleur pourraient être déplacées en altitude.

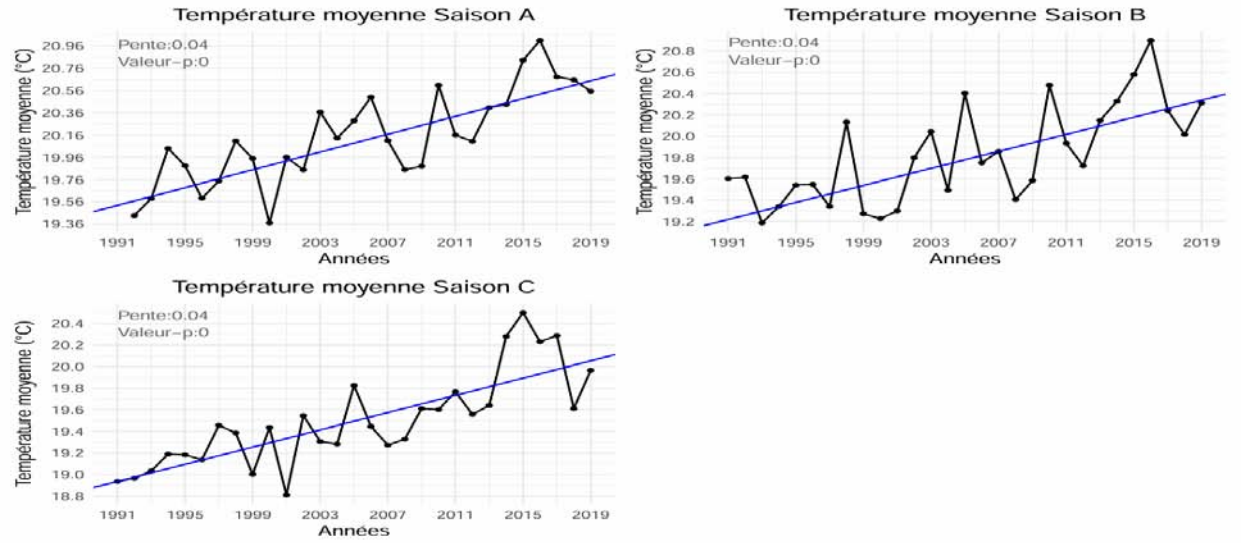



**Figure 8 : Tendances et variabilité à long terme de la température moyenne saisonnière. L'amplitude de la tendance annuelle et la valeur p sont indiquées en haut à droite de chaque graphique.**

**Source :** IGEBU (1991–2019) ; calcul du nombre de degrés-jour et cartographie : auteur (2025).

La figure 9 illustre que les précipitations totales ont affiché des tendances divergentes selon les saisons : une baisse en saison B, une tendance à la hausse non significative en saison A, et une légère hausse en saison C. Cependant, cette hausse ne peut pas être généralisée pour notre période d'étude (1991-2019). En effet, la courbe LOWESS montre qu'il s'agit plutôt d'une tendance locale observée depuis 1991 jusqu'en 2000, après l'an 2000 cette même courbe contrairement à l'évolution captée par la droite montre une évolution stable, tandis qu'elle montre plutôt que la décroissance des précipitations par rapport à la moyenne est remarquée de manière continuelle depuis 2009 jusqu'en 2019.

La baisse des précipitations par rapport à leur moyenne fragilise particulièrement la saison B, qui est essentielle pour la culture du haricot, et d'autre cultures dans plusieurs régions du Burundi. Cette baisse des précipitations, conjuguée à la hausse des températures, contribue à l'assèchement des sols et raccourcit la période utile pour les cultures pluviales. L'agriculture dépendant essentiellement des pluies, ces changements menacent alors directement la stabilité des rendements.

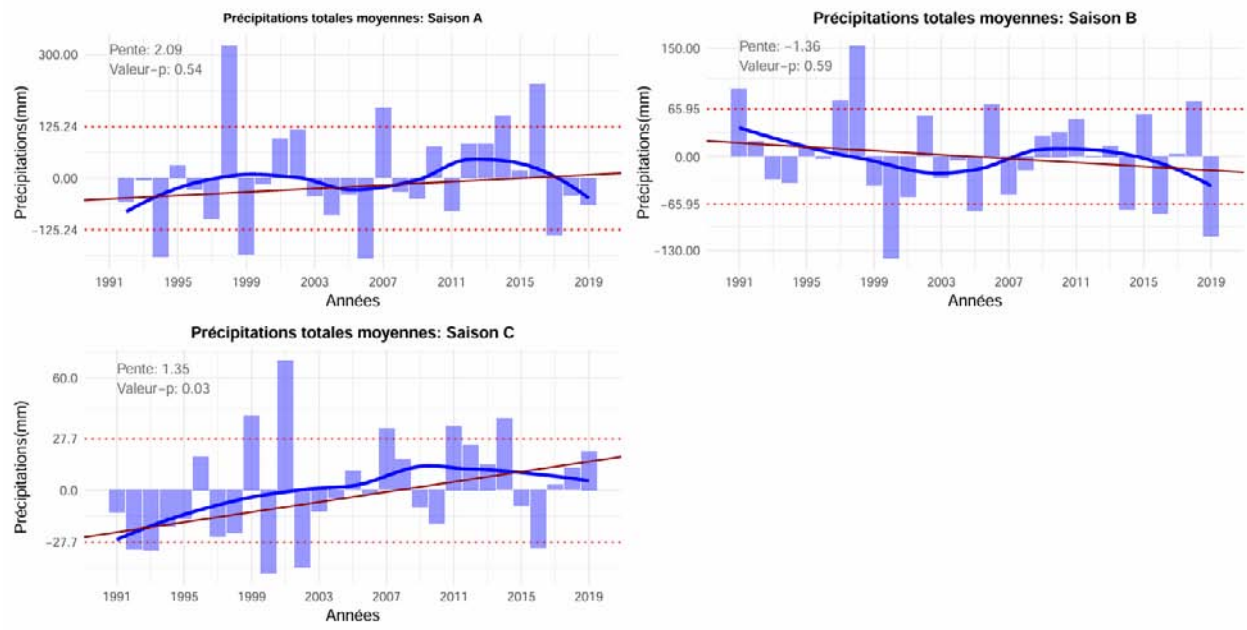



**Figure 9 : Tendances et variabilité à long terme des anomalies totales des précipitations annuelles moyennes. La ligne horizontale en pointillés représente un écart type par rapport à la moyenne. La ligne courbe Représente le lissage Lowess.**

**Source :** IGEBU (1991–2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).

Etant donné que la croissance de nombre de degrés-jour est sensée influencer positivement toutes les stades du développement des cultures (germination, floraison et maturation) mais que cela dépend de la quantité disponible de l'eau pour contrecarrer les effets de l'évapotranspiration entrainée par la hausse de la chaleur, nous avons analysé l'évolution de l'indice de sécheresse appelée Indice Standard de Précipitations et de l'Evapotranspiration (Standard Precipitations and Evapotranspiration Index SPEI en anglais) qui combine à la fois la température et les précipitations. SPEI d'une période de trois mois a été analysée pour déceler l'effet de la sécheresse sur les cultures saisonnières et SPEI de 18 mois pour les cultures pérennes et semi-pérennes pour les deux principales saisons agricoles A et B. L'évolution de cette indice est visualisée dans la figure 14.

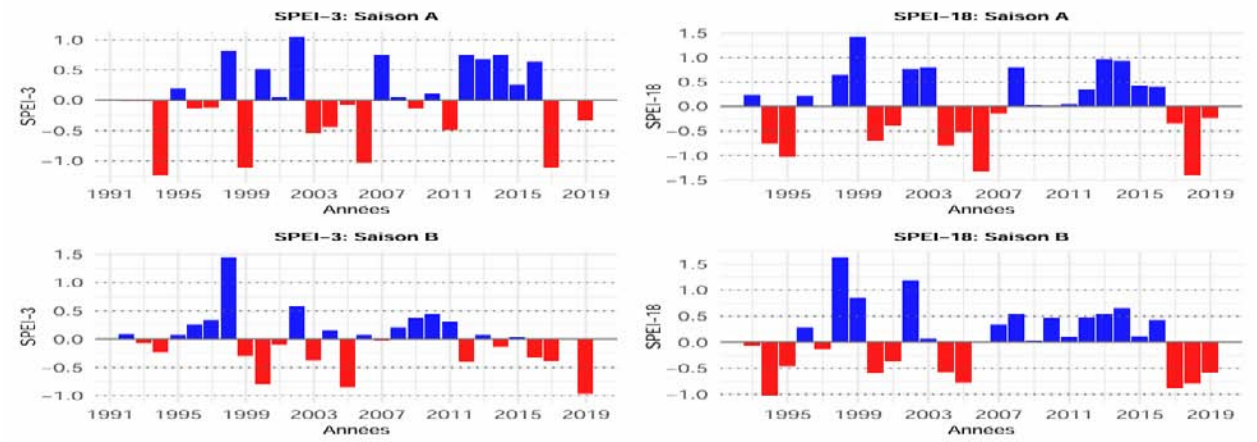



**Figure 10 : Evolution du SPEI-3 et SPEI-18 saisonniers. Conditions sèches (en rouge) et humides (en bleu).**

**Source :** IGEBU (1991–2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).

La figure 10 montre que pour toutes les saisons agricoles depuis l'an de 2003 jusqu'en 2007, le Burundi a connu une sécheresse. Une autre sécheresse continue sans aucune alternance à une période d'abondance en humidité est observée pour toutes les saisons agricoles A et B depuis 2017 (2016 pour la saison agricole B et SPEI-3) jusqu'en 2019, cela coïncide avec les réponses données par les agriculteurs lors de l'Enquête Intégrée sur les Conditions de Vie des Ménages au Burundi (EICVMB, 2019-2020). En effet, 60,66% des agriculteurs enquêtés répondent qu'ils ont connu une sécheresse au cours de trois dernières années (2019,2018, 2017), cela montre que bien que le climat mesuré diffère avec le climat perçu par les agriculteurs, il y a une forte corrélation entre les deux.

L'information fournie par le graphique est que la saison agricole B était trop humide par rapport à la saison A avant l'an 2000 mais que depuis cette année la saison B devient de plus en plus sèche par rapport à la saison agricole A. Dans le tableau 5, nous présentons les résultats du test de Mann-Kendall pour l'évolution de tous les paramètres climatiques dont nous venons d'étudier l'évolution.

**Tableau 7 : Résultats du test de Mann-Kendall**

| Variable climatique | Saison | Pente de Theil-Sen | Statistique du test et p-valeur | I.C à 95% |
|---|---|---|---|---|
| Température Moyenne | A | 0,040 | 4,52 (<0.001) | [0,03 ; 0,05] |
| | B | 0,037 | 3,69 (<0.001) | [ 0,02; 0,05] |
| | C | 0,039 | 4,89 (<0.001) | [ 0,03; 0,05] |
| Anomalies des précipitations | A | 2,087 | 0,612 (0.540) | [-3,047 ; 8,970] |
| | B | -1,357 | -0,544 (0.59) | [ -3,869; 2,390] |
| | C | 1,353 | 2,194 (0.03) | [ 0,158 ; 2,414] |
| Nombre de Degré-Jour | A | 3,92 | 4,52 (<0.001) | [1,496 ; 6,288] |
| | B | 4,04 | 3,69 (<0.001) | [2,358 ; 5,780] |
| | C | 2,49 | 4,89 (<0.001) | [0,487 ; 4,391] |
| SPEI-3 | A | 0,003 | 0,178 (0,859) | [-0,032 ; 0,038] |
| | B | -0,017 | -1,719 (0,086) | [-0,049 ; 0,005] |
| SPEI-18 | A | 0,010 | 0,542 (0.588) | [-0,030 ; 0,052] |
| | B | 0,005 | 0,0167 (0,867) | [-0,037 ; 0,045] |

**Source** : Auteur (2025) à partir des données IGEBU et CHIRPS

Les résultats du test de Mann-Kendall montrent que pour la saison agricole A, les valeurs de tous les paramètres climatiques ont une tendance de croissance malgré que ces tendances ne sont pas toutes statistiquement significatives ; seuls le nombre de degré-jour et la température moyenne le sont avec une croissance qui est entre 0,03 °C et 0,05 °C pour la température moyenne et entre 1,496 °C.Jour et 6,288 °C.Jour pour le nombre de degré-jour ; bien qu'il y a de l'incertitude sur l'humidité de la saison agricole A, les valeurs obtenues pour les écarts des précipitations par rapport à leur moyenne, pour SPEI-3 et SPEI-18 montrent que la saison agricole A continuera de manière modérée à être de plus en plus humide. Cela indique que si la tendance ne change pas, le Burundi connaitra des bons rendements pour les cultures cultivées principalement dans cette saison comme les Maïs.

Contrairement à la saison agricole A, la saison B connait une croissance pour les indicateurs de la chaleur comme la température moyenne dont la croissance moyenne est entre 0,02 et 0,05 °C, celle du nombre de degré-jour se trouve entre 2,358 et 5,780 °C. Jour . Cependant en terme d'humidité, la saison B sera de plus en plus sèche avec une décroissance de 1,357 mm des précipitations par rapport à leur moyenne. Bien que cette valeur estimée montre une décroissance, il y a une incertitude sur le sens de l'évolution des écarts des précipitations par rapport à leur moyenne.

En effet, la valeur de l'évolution moyenne annuelle oscille autour de 0 allant d'une part jusqu'à -3,869 mm et d'autre par a + 2,390 mm par an. Cependant pour le SPEI-3 nous pouvons affirmer avec un seuil de risque de 10% de se tromper que la saison agricole B deviendra de plus en plus sèche. Cela indique que si la tendance négative continuera d'être observée les cultures cultivées dans cette saison agricole comme les haricots connaitront une baisse annuelle progressive de rendements. Néanmoins, ce phénomène peut varier d'une région à une autre.

La saison C affiche une croissance pour la température moyenne et le nombre de degré-jour. Bien que le test de Mann-Kendall montre une croissance statistiquement significative, la courbe LOWES qui détecte les tendances locales ne confirme pas cette tendance. L'agriculture de la saison C nécessitera toujours l'irrigation ou les marais pour être pratiquée.

### IV.1.4. Conclusion sur la première hypothèse

La première hypothèse de cette étude stipule que le Burundi a connu et connaitra un changement climatique, les résultats de l'objectif que nous venons de présenter nous permettent de confirmer cette hypothèse. En effet, la comparaison du climat passé de la période 1975-1990 et celui de la période de référence (1991-2019) montre qu'il y a eu un changement climatique exprimée par un réchauffement climatique d'une augmentation de 1,21°C mais avec une légère hausse de précipitations (+0,97 mm). La comparaison avec le climat futur nous permet également de confirmer la première hypothèse, car une augmentation de 1,15°C et une augmentation de 3,51mm est attendue à l'avenir proche 2021-2040 sous le scenario a émissions modérées (SSP2-4.5), tandis qu'une augmentation de 1,18°C et de 4,23mm est prévu pour le scenario de fortes émissions (SSP5-8.5). Un changement climatique aura lieu également à l'horizon moyen terme 2041-2060, sous SSP2-4.5 le réchauffement climatique est prévu à une hausse 2,09°C et les précipitations à une hausse de 4,79mm, tandis que sous SSP5-8.5 il y aura une augmentation de température moyenne 2,81°C et une augmentation de 7,34 mm de précipitations.

Les cartes thématiques produites pour la comparaison spatio-temporelle de ce changement climatique, a montré que les régions de basses altitudes resteront plus chaudes que celles des altitudes moyennes mais les cartes illustrent également un déplacement du climat chaud des basses altitudes vers les moyennes altitudes et le climat de ces dernières vers les hautes altitudes.

## IV.2. Résultats concernant le deuxième objectif

Le second objectif de cette étude est d'estimer le modèle de la relation du climat et le choix des cultures ainsi que le modèle de la relation du climat et le revenu net conditionnement à la culture/combinaison de cultures choisie. Cependant, avant de modéliser ces relations nous réalisons une statistique descriptive des variables agricoles et socioéconomiques utilisées dans la modélisation.

### IV.2.1. Présentation des résultats d'analyse descriptive de données socioéconomiques et agricoles

#### IV.2.1.1. Caractéristiques démographiques et socio-économiques des ménages agricoles au Burundi

L'analyse de données démographiques et socioéconomiques mettent en évidence que les ménages agricoles au Burundi se caractérise par des unités familiales de taille modérée, comptant en moyenne 5 personnes (Tableau 8). La population agricole est globalement jeune, avec un âge moyen des membres du ménage avoisinant 24 ans, tandis que les chefs de ménage, en majorité des hommes (72,6 %), sont âgés en moyenne de 45 ans. Le niveau d'instruction demeure relativement faible : près de la moitié des chefs de ménage (49,6 %) n'ont jamais été scolarisés, tandis que 47 % disposent d'un niveau fondamental. Moins de 4 % ont accédé à l'enseignement post-fondamental ou supérieur. De manière générale, les membres du ménage ont en moyenne deux années d'études, avec une médiane de trois ans, soulignant une scolarisation limitée dans le milieu agricole. Sur le plan du statut matrimonial, la majorité des chefs de ménage sont engagés dans une union monogame (75 %).

Le rapport femmes/hommes au sein des ménages affiche une grande variabilité, avec une moyenne de 1,98, bien que la médiane soit de 1, suggérant des structures familiales diversifiées. L'accès aux technologies de l'information et aux services financiers reste marginal. Seuls 37,1 % des chefs de ménage possèdent un téléphone mobile, et à peine 3,9 % ont accès à Internet. Par ailleurs, seuls 14,3 % des ménages disposent d'un revenu non agricole, et moins de 3 % ont accès au crédit, ce qui reflète un faible niveau de diversification économique et d'inclusion financière.

**Tableau 8 : Description démographique et socio-économique des ménages agricoles**

| Variable | statistiques |
|---|---|
| **Taille du ménage** | |
| Median (IQR) | 5.00 (3.00, 6.00) |
| Mean (SD) | 4.96 (2.20) |
| Range | 1.00 - 19.00 |
| **Age moyen des membres du ménage** | |
| Median (IQR) | 19.08 (15.25, 28.00) |
| Mean (SD) | 23.89 (13.11) |
| Range | 7.60 - 93.00 |
| **Age du Chef de ménage** | |
| Median (IQR) | 42.00 (32.00, 56.00) |
| Mean (SD) | 44.56 (15.19) |
| Range | 15.00 - 99.00 |
| **Niveau d'études médian des membres du ménage** | |
| Median (IQR) | 3.00 (0.00, 3.00) |
| Mean (SD) | 2.05 (1.40) |
| Range | 0.00 - 6.00 |
| **Niveau d'études du chef de ménage** | |
| Aucun | 49.59% |
| Fondamental | 47.02% |
| Post fondamental | 2.54% |
| Supérieur | 0.85% |
| **Chefs de ménage_Homme** | 72.55% |
| **Ratio Femme/Homme dans le ménage** | |
| Median (IQR) | 1.00 (0.67, 2.00) |
| Mean (SD) | 1.98 (2.36) |
| Range | 0.00 - 9.00 |
| **Statut matrimonial du chef de ménage Marié(e) monogame** | 75.02% |
| **Chef de ménage possédant un téléphone mobile** | 37.10% |
| **Accès à internet** | 3.87% |
| **Revenu non agricole** | 14.27% |
| **Accès au credit** | 2.70% |

**Note :** IQR est l'étendue interquartile (Interquartile Range en anglais) ; différence entre troisième quartile et le premier quartile**.** SD est l'écart-type (Standard Deviation en anglais). La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à 'flextable' et 'officer' deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020.

### IV.2.1.2. Caractéristiques agro-environnementales des parcelles au Burundi

Les données issues de l'EICVMB (2019-2020) à travers le tableau 9 montrent que la majorité des exploitations agricoles au Burundi sont caractérisées par des pratiques traditionnelles, fortement dépendantes des conditions naturelles. En matière de gestion de l'eau, une très forte dépendance à la pluviométrie est observée, avec 89% des parcelles reposant exclusivement sur les précipitations, contre seulement 7,7% utilisant une forme d'irrigation. Les types de sols les plus fréquents sont limoneux (49%-54 %) et sableux (12-16 %), suivis des sols glacis (19%) et argileux (11%).

Quant à la topographie, les parcelles sont majoritairement situées sur des pentes douces (31%-35 %) ou des collines (24%), tandis que les plaines et vallées représentent respectivement 21% et 12%. En termes de fertilité perçue, les terres sont majoritairement jugées de fertilité moyenne (58%-62%), avec seulement un quart des parcelles considérées comme bonnes (23%-27%). La gestion foncière est principalement collective 81%, soulignant l'importance des structures communautaires dans l'agriculture locale. Enfin, l'usage des semences reste largement dominé par les variétés locales (90%-93%), tandis que l'utilisation exclusive de semences améliorées est encore limitée (4,8%-7,2%), les mélanges restant marginaux.

**Tableau 9 : Description des pratiques agricoles et de l'environnement des parcelles**

| Variable | Fréquence | 95% IC[1] |
|---|---|---|
| **Saison agricole** | | |
| Saison A | 38% | 33%, 44% |
| Saison B | 49% | 43%, 55% |
| Saison C | 13% | 9.9%, 16% |
| **Source de l'eau** | | |
| Irrigation | 7.7% | 6.5%, 9.2% |
| Marais | 2.8% | 2.1%, 3.8% |
| Pluviale | 89% | 88%, 91% |
| **Type du sol** | | |
| Argileux | 11% | 9.6%, 12% |
| Autre | 4.8% | 3.9%, 5.9% |
| Glacis | 19% | 17%, 21% |
| Limoneux | 52% | 49%, 54% |
| Sableux | 14% | 12%, 16% |
| **Topographie du parcel** | | |
| Autre | <0.1% | 0.01%, 0.12% |
| Colline | 24% | 23%, 26% |
| Pente douce | 33% | 31%, 35% |
| Pente raide | 9.9% | 8.7%, 11% |
| Plaine | 21% | 18%, 23% |
| Vallee | 12% | 10%, 14% |
| **Fertilite de la parcelle** | | |
| Bonne | 25% | 23%, 27% |
| Faible | 14% | 13%, 16% |
| Moyenne | 60% | 58%, 62% |
| **Mode de gestion de la parcelle** | | |
| Collective | 81% | 79%, 83% |
| **Type de sémence** | | |
| Sémence locale | 92% | 90%, 93% |
| Mélange (33.33% de sémence ameliorée) | <0.1% | 0.01%, 0.17% |
| Mélange (Sémence Ameliorée 50.00%) | 2.5% | 1.9%, 3.2% |
| Mélange (Sémence Ameliorée 66.67%) | <0.1% | 0.01%, 0.26% |
| Sémence Ameliorée | 5.9% | 4.8%, 7.2% |

**Note :** IC = Intervalle de Confiance. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.
**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020

### IV.2.1.3. Structure de l'exploitation agricole au niveau des ménages et des parcelles

Le tableau 10 décrit la répartition du nombre de cultures et de parcelles par ménage. En moyenne, un ménage cultive 6,25 cultures réparties sur environ 3,43 parcelles. Ces statistiques traduisent une grande diversité culturale mais aussi une fragmentation foncière importante. L'écart-type élevé (5,48 pour les cultures, 2,51 pour les parcelles) suggère une forte hétérogénéité entre ménages : certains se limitent à quelques cultures ou parcelles, tandis que d'autres pratiquent une agriculture beaucoup plus étendue ou diversifiée. Le tableau 11 quant à lui, affine l'analyse en examinant le nombre de cultures par parcelle, sur un total pondéré d'environ 6,85 millions de parcelles. On constate que la majorité des parcelles (53,55%) ne portent qu'une seule culture, ce qui peut refléter une organisation spécialisée ou des contraintes agroécologiques.

**Tableau 10 : Statistique descriptive sur le nombre de cultures et de parcelles par ménage**

| Variable | Statistiques |
|---|---|
| **Nombre de cultures par ménage** | |
| Median (IQR) | 5.00 (3.00 8.00) |
| Mean (SD) | 6.25 (5.48) |
| Range | 1.00 - 83.00 |
| **Nombre de parcelles par ménage** | |
| Median (IQR) | 3.00 (2.00 4.00) |
| Mean (SD) | 3.43 (2.51) |
| Range | 1.00 - 32.00 |

**Note :** IQR est l'étendue interquartile (Interquartile Range en anglais) ; différence entre troisième quartile et le premier quartile. SD est l'écart-type (Standard Deviation en anglais). La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020.

Toutefois, près de 46,5% des parcelles sont en culture multiple, dont 31,55% avec deux cultures, ce qui témoigne d'une pratique importante de l'association culturale. Cette diversité au sein même des parcelles permet d'optimiser l'usage du sol, de répartir les risques et d'assurer une meilleure sécurité alimentaire. Pour connaitre les cultures pures ou combinaisons de cultures que les agriculteurs cultivent plus dans leurs parcelles, nous avons analysé les fréquences de chaque culture ou combinaison de cultures, les résultats sont présentés dans le tableau 12.

**Tableau 11 : Répartition des parcelles selon le nombre de cultures occupant la parcelle**

| Variable | Fréquence |
|---|---|
| **Nombre de cultures dans une parcelle** | |
| 5 et plus | 2.07% |
| Deux | 31.55% |
| Trois | 12.84% |
| Un | 53.55% |

**Note :** La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R**. Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020

Les résultats présentés dans le tableau 12 montrent une forte dominance du haricot, cultivé seul sur 35,1% des parcelles couvertes par ce tableau, suivi des associations haricots-manioc (17,8%) et haricots-maïs (11,3%). Le maïs seul représente 10,9%, tandis que des cultures comme banane (6,8%), riz (5,6%) ou patate douce (9,8%) occupent des parts plus modestes. Ces résultats reflètent non seulement les préférences alimentaires et économiques des ménages, mais aussi les combinaisons culturales stratégiques (comme haricot-maïs ou haricot-manioc), qui tirent parti de la complémentarité des espèces en termes de besoins agronomiques et de calendriers culturaux.

**Tableau 12 : Répartition des parcelles selon les cultures/combinaison des cultures**

| Variable | Fréquence | 95% IC[1] |
|---|---|---|
| Occupation de la parcelle | | |
| Banane | 6.83% | 5.7%, 8.2% |
| Haricots | 35.08% | 32%, 39% |
| Haricots , Maïs | 11.33% | 9.7%, 13% |
| Haricots , Manioc | 17.83% | 16%, 20% |
| Maïs | 10.88% | 8.7%, 14% |
| Manioc | 2.62% | 2.1%, 3.2% |
| Patates douces | 9.85% | 8.7%, 11% |
| Riz | 5.59% | 4.4%, 7.0% |

**Note :** [1]IC = Intervalle de Confiance. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020

L'ensemble de ces résultats montre que les ménages burundais pratiquent une agriculture très diversifiée, à la fois entre les parcelles (diversité interparcellaire) et au sein des parcelles (diversité intraparcellaire).

Le haricot y joue un rôle central, souvent cultivé seul ou en association. Malgré une fragmentation des exploitations, cette diversité culturale apparaît comme une stratégie adaptative face aux contraintes foncières, climatiques ou économiques, contribuant à la résilience des systèmes agricoles burundais.

#### IV.2.1.4. Informations sur les intrants, productions et revenus

L'analyse des données agricoles révèle une forte hétérogénéité des performances agricoles. Le revenu net par hectare (rev_net_ha) s'établit en moyenne à environ 2,13 millions de Fbu, mais avec une très forte dispersion (écart-type : 5,45 millions). Cette dispersion démontre qu'il y a des cultures de faible rentabilité économique et d'autres de grande rentabilité comme les cultures pérennes ou semi-pérennes (Manioc et Banane). La médiane (1,1 million Fbu), témoigne de la concentration des revenus dans des niveaux modestes pour la majorité des agriculteurs. Le revenu brut moyen estimé à 88 449 Fbu (en prenant le nombre moyen de parcelles par ménage qui est de 3.43. Le revenu moyen brut est estimé à 303 380,1 Fbu), avec une médiane de 57 666 Fbu. Cela reflète une activité agricole à faible rendement économique brut, probablement liée à la petite taille des exploitations.

Les dépenses en intrants agricoles (semences, engrais, etc.) s'élèvent en moyenne à 28 813 Fbu, avec une large variation (jusqu'à 385 300 Fbu), ce qui souligne une hétérogénéité d'investissement parmi les producteurs. La production agricole (en kilogrammes) reste très variable : une moyenne de 84,7 kg par parcelle, mais une médiane de seulement 30 kg. La surface totale cultivée est très limitée, avec une moyenne de 0,07 hectare, ce qui confirme la prédominance de petites exploitations agricoles. Le travail (exprimé en journées-homme) s'élève en moyenne à 13,25 home-jours par parcelle, ce qui traduit une intensité modérée de main-d'œuvre. Concernant les intrants agricoles spécifiques, la quantité moyenne de fumure organique utilisée est de 329 kg, mais la médiane est de 200 kg, suggérant une utilisation forte fumure aidant les agriculteurs à résilier aux effets négatifs du changement climatique sur leur récolte. En revanche, les engrais chimiques sont peu utilisés, avec une moyenne de 12,7 kg (médiane : 4 kg), et les produits phytosanitaires sont quasiment absents (moyenne : 0,05 kg), utilisés seulement par une minorité d'exploitants.

**Tableau 13 : Statistique descriptive des données des intrants, productions et revenus pour les parcelles occupées par 8 premières cultures ou combinaison des cultures**

| Variable | Obs | mean | sd | min | Q1 | median | Q3 | max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| rev_net_ha (Fbu/ha) | 7757 | 2,131,764.54 | 5,452,218.91 | 243.67 | 410,020.64 | 1,100,097.21 | 2,503,587.51 | 229,713,628.9 |
| revbrut(Fbu) | 7757 | 88,449.12 | 183,647.56 | 2,910.55 | 36,927.58 | 57,666.17 | 88,855.17 | 9,341,584.5 |
| dep_intr(Fbu) | 7757 | 28,812.51 | 22,408.80 | 0.00 | 14,379.79 | 22,902.35 | 36,878.75 | 385,300.0 |
| prod_(Kg) | 7757 | 84.72 | 287.90 | 0.52 | 10.00 | 30.00 | 63.00 | 9,800.0 |
| suptot(ha) | 7757 | 0.07 | 0.14 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 2.4 |
| sup_rec(ha) | 7757 | 0.07 | 0.14 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 2.4 |
| homjour_tot | 7757 | 13.25 | 8.75 | 0.00 | 7.00 | 11.00 | 18.00 | 57.0 |
| qte_fum(Kg) | 7757 | 329.46 | 380.13 | 0.00 | 0.00 | 200.00 | 500.00 | 1,920.0 |
| qte_engr(Kg) | 7757 | 12.72 | 28.19 | 0.00 | 0.00 | 4.00 | 15.00 | 378.5 |
| qtephyto(Kg) | 7757 | 0.05 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.5 |

**Note :** rev_net_ha est la différence entre le revenu brut (revbrut) et le coût total des intrants (dep_intr) divisée par la superficie de la parcelle. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.
**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020

Le tableau 14 présente les résultats sur l'exposition du ménage au choc climatiques et agricoles pendant les trois dernières années à partir de 2020 sur les chocs climatiques déclarés par les enquêtés. Les résultats mettent en lumière la forte exposition des ménages agricoles burundais aux aléas climatiques et agronomiques, éléments centraux dans notre analyse des impacts du changement climatique sur l'agriculture. Parmi l'ensemble des chocs rapportés, la sécheresse ressort comme le plus fréquent, touchant environ 63 % des ménages, avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre 60 % et 66 % et cela coïncide avec les résultats d'analyse de l'Indice Standard de Précipitations et d'Evapotranspiration. Ce chiffre est particulièrement préoccupant compte tenu de la dépendance quasi exclusive de l'agriculture burundaise à la pluviométrie. Les maladies des cultures, affectant (44%-50%) des ménages, constituent le deuxième choc le plus rapporté. Cette fréquence élevée peut être liée à l'évolution des conditions agro-climatiques (températures plus élevées, humidité excessive ou irrégulière), qui favorisent la prolifération de pathogènes fongiques, bactériens ou viraux. Le changement climatique pourrait ainsi introduire de nouveaux agents pathogènes dans des zones jusque-là épargnées. Ceci représente un facteur indirect mais critique de perte de productivité.

**Tableau 14 : Statistiques descriptives des chocs climatiques**

| Variable | Fréquence | 95% CI[1] |
|---|---|---|
| secheresse | 63% | 60%, 66% |
| Inondations | 37% | 34%, 40% |
| grele | 32% | 29%, 35% |
| taux_malad | 47% | 44%, 50% |
| ravageurs | 11% | 9.0%, 13% |
| gliss_terrain | 10% | 8.7%, 12% |

**Note :** [1]CI = Intervalle de Confiance. Chaque variable est une variable binaire le pourcentage indique l'ensemble des ménages exposés au choc correspondant. C'est pourquoi la somme des pourcentages de ces chocs excède 100% car un ménage peut être exposé à plusieurs chocs. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020

Les inondations viennent ensuite, touchant 37 % des ménages. Ces événements sont souvent liés à l'augmentation de l'intensité des pluies extrêmes, un phénomène que les modèles climatiques attribuent au réchauffement global. Les inondations ne détruisent pas seulement les cultures, mais affectent aussi l'infrastructure rurale (routes, bassins, stockage), retardent les semis ou empêchent la récolte, aggravant les pertes agricoles. La grêle (32 %) constitue un autre choc important. Elle est destructrice pour les cultures en phase de floraison ou de fructification. Son apparition relativement fréquente peut signaler une instabilité accrue de l'atmosphère locale, potentiellement amplifiée par les changements de température et d'humidité. En revanche, les ravageurs (11 %) et les glissements de terrain (10 %) apparaissent moins fréquents, mais ils ne sont pas pour autant négligeables. Les ravageurs peuvent être favorisés par le réchauffement, qui accélère leur cycle de reproduction ou élargit leur aire de répartition. Les glissements de terrain, quant à eux, sont souvent la conséquence d'épisodes pluviométriques intenses et localisés, exacerbés par la déforestation et l'érosion des sols.

### IV.2.2. Présentation des résultats de la modélisation de la relation climat-agriculture

Avant de recourir à l'approche 2SRI (Two Stage Residual Included) pour corriger l'endogénéité des variables climatiques dans le modèle logit multinomial, nous avons testé la pertinence des instruments proposés. Les résultats de la première étape (Tableau 15) montrent que les instruments (longitude, latitude, altitude et retard spatial) sont significativement corrélés aux variables climatiques (degré-jour et précipitations), comme l'indiquent les F-statistics globales élevées (45.54 pour le degré-jour et 14.52 pour la précipitation, toutes significatives au seuil de 1%). Ces résultats soutiennent la validité de l'hypothèse de pertinence des instruments, justifiant ainsi l'utilisation de l'approche 2SRI.

**Tableau 15 : Première étape de 2SRI : Modélisation des variables endogènes en fonction des instruments**

| Variable potentiellement endogène | instruments | p_ind | F_ind | F_global | p_global |
|---|---|---|---|---|---|
| degré-jour | Longitude | 0.032 | 4.598 | 45.538 | <0.001 |
| | Latitude | 0.006 | 7.578 | | |
| | Altitude | 0.000 | 138.329 | | |
| | Retard spatial degré-jour | 0.000 | 13.540 | | |
| Précipitation | Longitude | 0.000 | 30.639 | 14.515 | <0.001 |
| | Latitude | 0.000 | 20.494 | | |
| | Altitude | 0.000 | 21.529 | | |
| | Retard spatial Précipitation | 0.004 | 8.583 | | |

**Note:** Les retards spatiaux sont calculés à l'aide du logiciel R par les fonctions du package '*spdep'*. ddf (design degrees of freedom) = 595 est le nombre degrés de liberté associés au plan d'échantillonnage, il est obtenu en diminuant le nombre total de zone de dénombrement par le nombre de strate (province*Milieu), le milieu peut-être Rural ou Urbain.

**Source :** Auteur (2025) à partir des données interpolées (IGEBU+CHIRPS)

*i) Effets marginaux moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir une culture sans considération de l'hétérogénéité régionale*

Etant donné que les paramètres du modèle logistique multinomiale sont interprétés en fonction de la modalité de référence et que le modèle logit est le logarithme du rapport de probabilité ; ils ne peuvent pas alors être interprétés comme les effets des variables explicatives sur la probabilité. Pour ces raisons, la littérature suggère qu'il faut interpréter les effets marginaux moyens des variables explicatives sur les probabilités estimées au lieu des coefficients (Elff, 2022; Paolino, 2021).

Le tableau 16 présente les effets marginaux moyens des variables climatiques et d'autres variables de contrôle sur les probabilités de choisir une culture/combinaison de cultures. Cependant, les tableaux des coefficients de différents modèles logit sont présentés en Annexe.

Concernant le climat, une augmentation d'un degré-jour de croissance (dd_gs) accroît légèrement la probabilité de cultiver la banane, le maïs, le manioc et le riz, mais réduit celle des haricots et des associations haricots-manioc. Les précipitations saisonnières (prcp_gs) ont un effet positif sur les haricots (+0,2%) et les associations haricots-manioc (+0,1%), mais diminuent la probabilité de choisir la banane (-0,1%). L'effet quadratique des précipitations ($I(prcp_gs^2)$) montre une relation non linéaire : un excès de pluie réduit légèrement le choix des haricots tandis qu'il augmente celui de la banane.

Le revenu hors-agricole influence également le choix des cultures. Passant de ménages ne disposant pas de revenus non agricoles aux ménages qui les disposent la probabilité augmente pour la banane (+2,0%), le maïs (+3,0%) et les haricots (+4,3%), mais une probabilité réduite pour les associations haricots-manioc (-6,0%) et le manioc (-0,8%), les patates douces (-1,9%) et le riz (-1,1%).

Pour la topographie (référence : pente douce) les parcelles en colline diminuent la probabilité de cultiver la banane (-0,1%), le maïs (-1,3%), et le riz (-6,9%) mais augmentent celle de cultiver les autres cultures. Les pentes raides présentent des effets similaires, tandis que les plaines et vallées favorisent davantage le riz (+7,9% à 15,3%) et d'autres cultures mais réduisent la probabilité de cultiver la banane, le manioc et la patate douce. En ce qui concerne la fertilité du sol (référence : fertilité élevée), une fertilité faible augmente la probabilité de cultiver les haricots (+9,0%) mais réduit celle de la banane (-4,4%) et du riz (-2,6%). La fertilité moyenne a des effets positifs sur les haricots (3,3%) et négatifs sur le riz (-2,3%). Cela montre que les haricots par sa capacité de fixer l'azote atmosphérique s'adapte bien aux sols moins fertiles, tandis que le riz est trop exigeant en besoins nutritifs.

L'augmentation d'1 ha (sup_parc_rec) accroît la probabilité de choisir toutes les cultures, mais réduit fortement celle de patates douces (-135,6%), indiquant que les patates douces sont souvent cultivées sur de petites parcelles spécialisées. Enfin, les résidus climatiques du nombre de degrés-jour et de précipitations influencent marginalement mais de manière significative certaines cultures, justifiant l'utilisation de l'approche 2SRI.

**Tableau 16 : Effets marginaux moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir une culture/combinaison de cultures pour tout le pays**

| Variable | Banane | Haricots | Haricots-Maïs | Haricots-Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| dd_gs | 0.000021*** | -0.00025*** | 0.00012*** | -0.000017*** | -0.000017*** | 0.000057*** | -0.000015*** | 0.000097*** |
| | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) |
| prcp_gs | -0.00069*** | 0.0021*** | -0.00099*** | 0.00073*** | -0.00014*** | -0.00040*** | -0.00072*** | 0.000086*** |
| | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) |
| I(prcp_gs^2) | 0.00000042*** | -0.0000017*** | 0.00000097*** | -0.0000012*** | 0.000001*** | 0.00000037*** | 0.00000064*** | -0.0000005*** |
| | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) |
| rev_hors_agriOui | 0.020** | 0.043*** | 0.0056*** | -0.060*** | 0.030*** | -0.0083*** | -0.019*** | -0.011*** |
| | (0.001) | (0.002) | (0.000) | (0.001) | (0.002) | (0.001) | (0.001) | (0.001) |
| topo_parcelPlaine | -0.726*** | 2.029*** | 0.389*** | -1.971*** | 0.498*** | -0.270*** | 0.458*** | -0.408*** |
| | (0.021) | (0.069) | (0.022) | (0.048) | (0.033) | (0.012) | (0.012) | (0.022) |
| topo_parcelPente raide | -0.001*** | 0.015*** | 0.002** | 0.048*** | -0.013*** | 0.007*** | 0.010*** | -0.069*** |
| | (0.000) | (0.002) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.000) | (0.001) | (0.004) |
| topo_parcelColline | 0.015*** | 0.145*** | 0.089*** | 0.122*** | -0.0005 | 0.018*** | 0.112*** | -0.500*** |
| | (0.001) | (0.013) | (0.008) | (0.005) | (0.003) | (0.001) | (0.006) | (0.026) |
| topo_parcelVallee | -0.069*** | 0.011*** | 0.032*** | -0.052*** | -0.013*** | -0.012*** | 0.024*** | 0.079*** |
| | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.001) | (0.001) | (0.000) | (0.001) | (0.004) |
| topo_parcelAutre | -0.211*** | 0.093*** | 0.097*** | -0.164*** | 0.034*** | -0.089*** | 0.087*** | 0.153*** |
| | (0.006) | (0.007) | (0.006) | (0.004) | (0.003) | (0.004) | (0.003) | (0.008) |
| fertiliteMoyenne | -0.044*** | 0.090*** | 0.007*** | -0.027*** | 0.0166*** | -0.005*** | -0.012*** | -0.026*** |
| | (0.001) | (0.002) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.000) | (0.000) | (0.001) |
| fertiliteFaible | 0.004*** | 0.033*** | -0.009*** | 0.007*** | 0.003*** | -0.012*** | -0.003*** | -0.023*** |
| | (0.000) | (0.001) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.001) | (0.000) | (0.001) |
| sup_parc_rec | 0.139*** | 0.467*** | 0.296*** | 0.189*** | 0.184*** | 0.021*** | -1.356*** | 0.058*** |
| | (0.007) | (0.011) | (0.022) | (0.005) | (0.016) | (0.003) | (0.030) | (0.005) |
| resiv_dd | 0.000007*** | -0.0001*** | 0.0002*** | -0.00007*** | 0.0003*** | -0.00006*** | -0.0001*** | -0.0001*** |
| | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) |
| resiv_prcp | 0.00009*** | -0.0004*** | -0.0003*** | 0.0006*** | -0.0006*** | 0.00005*** | 0.0003*** | 0.0003*** |
| | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) | (0.000) |

**Note:** Le calcul des EMM et les erreurs standards est basé sur le plan de sondage de l'EICVMB. Les symboles *, ** et *** indiquent respectivement une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01.
**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020 et les données météorologiques de l'IGEBU.

*ii) Modélisation du revenu net par hectare sans prise en compte de l'hétérogénéité régionale*

Nous modélisons maintenant le revenu net agricole conditionnement à la culture/combinaison de cultures choisies avec correction du biais de sélection par l'intégration du terme de correction de Dubin-McFadden dans le modèle de revenu, ce terme de correction est obtenu grâce aux probabilités estimées à partir du modèle de sélection des cultures. Les résultats sont obtenus par la méthode d'estimation IV/2SLS, afin de corriger l'endogénéité potentielle des variables climatiques.

Les résultats sont présentés dans le tableau 17 et ils montrent que le nombre de degrés-jours pendant la saison de croissance (dd_gs) n'ont qu'un effet limité sur le revenu agricole. Seules les cultures Haricots-Manioc et Riz bénéficient d'un effet significatif positif, indiquant qu'une accumulation thermique modérée pendant la période végétative peut favoriser leur productivité. En revanche, pour les autres cultures, l'effet est statistiquement non significatif. Les précipitations pendant la saison de croissance (prcp_gs) ont un impact positif uniquement sur la banane, mais l'effet décroît au-delà d'un certain seuil, comme le montre le terme quadratique significatif et négatif pour cette culture. Cela suggère une sensibilité de la banane à l'excès d'eau, traduisant un rendement optimal à des niveaux de précipitations modérés.

Concernant les intrants agricoles, le modèle révèle que la superficie cultivée par parcelle (log(sup_parc_rec)) est systématiquement associée à un revenu net par hectare plus faible, toutes cultures confondues. Ce résultat peut être attribué à des rendements décroissants sur les grandes parcelles ou à une gestion moins intensive des grandes superficies. L'impact de la densité de semis (log(qte_sem_ha)) varie selon les cultures. Elle améliore significativement les revenus pour le maïs et le manioc, alors qu'elle est sans effet ailleurs.

Le travail agricole (log(hom_jour_ha)), mesuré en jours-hommes par hectare, a globalement un effet positif et significatif, en particulier pour les cultures haricots, haricots-maïs, haricots-manioc et maïs, confirmant l'importance du facteur travail dans l'intensification agricole. Néanmoins, l'effet est négatif pour le manioc, suggérant une possible sur-utilisation inefficace du travail pour cette culture. Les intrants organiques et chimiques montrent également des effets différenciés. Le fumier (log(qte_fum_ha)) a un effet positif sur les haricots et haricots-maïs, tandis que l'engrais minéral (log(qte_engr_ha)) est bénéfique pour les haricots et haricots-manioc. Cela suggère une complémentarité des intrants avec ces cultures vivrières.

Les parcelles de fertilité moyenne enregistrent en moyenne un revenu net agricole inférieur à celui des parcelles de fertilité élevée pour certaines cultures comme la banane et les haricots. Pour les parcelles de fertilité faible le revenu moyen est inferieur celui des parcelles de fertilité élevée pour les cultures comme le riz et les haricots-maïs, montrant la vulnérabilité de ces

cultures aux sols dégradés. La topographie de référence étant les parcelles avec pente douce, les parcelles situées en plaine ou en vallée sont particulièrement favorables à la culture de la banane, avec des effets très positifs. En revanche, les pentes raides ont un effet négatif sur la banane mais positif pour les haricots-maïs, indiquant une adaptation de certaines cultures à des terrains accidentés.

**Tableau 17: Estimation du modèle Ricardien conditionnel IV/2SLS du Revenu Net agricole pour tout le pays**

| Variable | Modèles conditionnels | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| | Banane | Haricots | Haricots-Maïs | Haricots-Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
| corect_dm | 0.232 | 0.020 | 0.039 | 0.006 | 0.019 | -0.029 | -0.003 | 0.021 |
| | (0.155) | (0.049) | (0.037) | (0.042) | (0.018) | (0.103) | (0.042) | (0.049) |
| dd_gs | -0.001 | 3.60e-04 | -6.37e-04 | 4.65e-04*** | -4.01e-04 | 0.002 | 8.92e-05 | 0.001** |
| | (0.001) | (3.85e-04) | (7.32e-04) | (1.79e-04) | (5.80e-04) | (0.002) | (7.84e-04) | (5.42e-04) |
| prcp_gs | 0.016 | -8.33e-04 | 0.007 | -0.001 | 0.009 | -0.003 | 0.001 | -0.002 |
| | (0.010) | (0.004) | (0.005) | (0.005) | (0.007) | (0.010) | (0.009) | (0.007) |
| I(prcp_gs^2) | -1.16e-05 | 6.59e-07 | -6.47e-06 | 8.06e-07 | -8.50e-06 | 1.50e-06 | -8.91e-07 | -2.22e-07 |
| | (7.05e-06) | (4.46e-06) | (4.92e-06) | (4.97e-06) | (5.65e-06) | (9.28e-06) | (1.02e-05) | (8.93e-06) |
| log(sup_parc_rec) | -0.789*** | -0.713*** | -0.633*** | -0.770*** | -0.629*** | -0.583*** | -0.703*** | -0.570*** |
| | (0.136) | (0.028) | (0.056) | (0.033) | (0.049) | (0.066) | (0.118) | (0.079) |
| log(qte_sem_ha) | -0.051 | 0.007 | 0.035 | -0.059 | 0.168*** | 0.516*** | 0.044 | 0.143 |
| | (0.085) | (0.026) | (0.082) | (0.043) | (0.042) | (0.142) | (0.063) | (0.089) |
| log(hom_jour_ha) | 0.086 | 0.176*** | 0.127* | 0.207*** | 0.120*** | -0.212* | 0.071 | -0.072 |
| | (0.069) | (0.025) | (0.069) | (0.040) | (0.041) | (0.118) | (0.110) | (0.077) |
| log(qte_fum_ha) | -0.024 | 0.035*** | 0.037*** | 0.004 | -0.002 | 0.001 | 0.013 | -7.14e-05 |
| | (0.020) | (0.007) | (0.014) | (0.010) | (0.016) | (0.036) | (0.015) | (0.025) |
| log(qte_engr_ha) | 0.018 | 0.028** | 0.027 | 0.036* | -0.010 | 0.046 | -0.029 | 0.009 |
| | (0.050) | (0.011) | (0.028) | (0.019) | (0.024) | (0.064) | (0.058) | (0.041) |
| fertiliteMoyenne | 0.847 | -0.130 | -0.359*** | -0.205* | -0.354 | -0.190 | -0.132 | -0.973*** |
| | (0.846) | (0.118) | (0.132) | (0.110) | (0.218) | (0.352) | (0.137) | (0.368) |
| fertiliteFaible | -0.384** | -0.178*** | -0.143 | -0.101 | -0.077 | -0.238 | -0.338*** | -0.035 |
| | (0.179) | (0.064) | (0.088) | (0.067) | (0.104) | (0.383) | (0.124) | (0.191) |
| topo_parcelPlaine | | 0.766*** | -0.074 | | 1.040 | | 0.512 | |
| | | (0.220) | (0.394) | | (1.145) | | (0.601) | |
| topo_parcelPente raide | 0.105 | -0.003 | 0.103 | -0.068 | -0.032 | -0.189 | 0.039 | -0.254 |
| | (0.167) | (0.057) | (0.139) | (0.101) | (0.085) | (0.253) | (0.164) | (1.189) |
| topo_parcelColline | -0.318* | 0.021 | 0.272* | 0.019 | 0.013 | -0.111 | -0.135 | |
| | (0.168) | (0.092) | (0.160) | (0.139) | (0.200) | (0.471) | (0.184) | |
| topo_parcelVallee | 2.178 | 0.034 | 0.161 | -0.151 | 0.079 | -0.535 | 0.115 | -0.589 |
| | (1.407) | (0.058) | (0.131) | (0.158) | (0.177) | (0.562) | (0.273) | (0.702) |
| topo_parcelAutre | 7.631 | 0.040 | 0.263 | -0.406 | 0.389 | -0.250 | 0.079 | -0.896 |
| | (4.814) | (0.132) | (0.168) | (0.560) | (0.239) | (3.597) | (0.317) | (1.208) |

| Variable | Modèles conditionnels | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| | Banane | Haricots | Haricots-Maïs | Haricots-Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
| mod_gestionIndividuelle | -0.286 | 0.079 | -0.289** | 0.094 | -0.034 | -0.426* | | 0.315* |
| | (0.230) | (0.054) | (0.113) | (0.079) | (0.118) | (0.240) | | (0.175) |
| sem_amel | -0.146 | 0.077 | 0.021 | -0.095 | 0.171 | -0.251 | | 0.273 |
| | (0.328) | (0.096) | (0.200) | (0.189) | (0.130) | (0.282) | | (0.203) |
| temp_men_parcel | -0.008** | 2.00e-04 | 0.002 | 0.002* | 0.002 | 0.004 | | -0.002 |
| | (0.004) | (8.12e-04) | (0.002) | (0.001) | (0.002) | (0.002) | | (0.002) |
| hh_size | 0.050 | -0.002 | 0.007 | 0.007 | -0.006 | 0.028 | 0.023 | 0.004 |
| | (0.035) | (0.011) | (0.021) | (0.015) | (0.021) | (0.034) | (0.020) | (0.030) |
| rev_hors_agriOui | -0.400 | 0.058 | -0.011 | 0.117 | -0.145 | 0.102 | 0.010 | 0.373* |
| | (0.432) | (0.071) | (0.113) | (0.137) | (0.133) | (0.483) | (0.184) | (0.196) |
| age_head | 0.010** | 0.003 | 0.002 | 0.009*** | 0.006** | 0.011* | 0.001 | 0.006 |
| | (0.005) | (0.002) | (0.003) | (0.002) | (0.003) | (0.006) | (0.003) | (0.007) |
| sex_headMasculin | 0.128 | 0.037 | 0.075 | -0.112 | -0.058 | 0.209 | 0.128 | 0.440** |
| | (0.241) | (0.071) | (0.146) | (0.099) | (0.076) | (0.270) | (0.131) | (0.224) |
| statut_matAutre | 0.083 | -0.041 | -0.102 | 0.111 | 0.148 | 0.074 | 0.039 | 0.187 |
| | (0.243) | (0.063) | (0.141) | (0.107) | (0.100) | (0.260) | (0.176) | (0.205) |
| nivet_headAucun | -0.136 | 0.091* | -0.015 | 0.024 | -0.086 | -0.038 | 0.101 | 0.231 |
| | (0.131) | (0.053) | (0.095) | (0.065) | (0.087) | (0.193) | (0.109) | (0.156) |
| nivet_headPost fondamental | -0.198 | 0.222* | 0.498* | 0.145 | -0.886*** | 0.188 | 0.244 | 0.087 |
| | (0.387) | (0.117) | (0.299) | (0.156) | (0.253) | (0.432) | (0.530) | (0.433) |
| nivet_headSupérieur | 0.346 | -0.074 | 0.950 | -0.359 | -0.011 | 0.760 | 0.293 | 0.362 |
| | (0.509) | (0.232) | (0.602) | (0.357) | (0.356) | (0.532) | (0.274) | (0.346) |
| phone_headOui | 0.244* | -0.039 | 0.041 | -0.067 | 0.325*** | -0.005 | -0.085 | 0.098 |
| | (0.136) | (0.052) | (0.087) | (0.070) | (0.086) | (0.194) | (0.121) | (0.186) |
| ratio_fem_hom | -0.015 | -0.015 | -5.39e-04 | -0.047*** | 6.35e-04 | 0.021 | | 0.019 |
| | (0.032) | (0.010) | (0.022) | (0.016) | (0.013) | (0.040) | | (0.051) |
| secheresse | -0.028 | -0.051 | 0.024 | 0.030 | -0.127 | -0.084 | -0.024 | -0.069 |
| | (0.139) | (0.043) | (0.104) | (0.065) | (0.118) | (0.191) | (0.103) | (0.182) |
| Inondations | 0.150 | 0.004 | -0.108 | -0.116* | 0.069 | 0.373* | 0.020 | -0.260 |
| | (0.131) | (0.045) | (0.089) | (0.060) | (0.082) | (0.199) | (0.105) | (0.175) |
| taux_malad | -0.185 | 0.042 | 0.052 | -0.012 | 0.157** | 0.234 | -0.070 | 0.119 |
| | (0.123) | (0.047) | (0.087) | (0.057) | (0.069) | (0.177) | (0.124) | (0.150) |
| gliss_terrain | -0.059 | 0.017 | -0.072 | 0.007 | -0.023 | 0.118 | -0.001 | 0.037 |
| | (0.177) | (0.070) | (0.142) | (0.084) | (0.114) | (0.244) | (0.180) | (0.211) |

| **Variable** | **Modèles conditionnels** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| | Banane | Haricots | Haricots-Maïs | Haricots-Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
| *Tests des instruments* | | | | | | | | |
| Weak instruments | 159.588 | 1537.776 | 741.427 | 503.254 | 2166.545 | 128.805 | 291.352 | 96.752 |
| (dd_gs) | *1.60e-97* | *0.00e+00* | *6.26e-321* | *1.53e-300* | *0.00e+00* | *6.40e-63* | *1.73e-191* | *4.78e-64* |
| Weak instruments | 36.105 | 571.372 | 153.435 | 115.574 | 69.164 | 219.714 | 13.15 | 33.718 |
| (prcp_gs) | *4.06e-31* | *0.00e+00* | *9.60e-119* | *3.66e-101* | *4.75e-61* | *7.99e-83* | *3.51e-14* | *3.83e-28* |
| Wu-Hausman | 2.27 | 1.585 | 3.538 | 1.385 | 3.751 | 1.934 | 0.372 | 1.085 |
| | *0.104* | *0.205* | *0.029* | *0.251* | *0.024* | *0.147* | *0.690* | *0.339* |
| Sargan | 4.185 | 4.09 | 0.418 | 4.028 | 4.215 | 7.522 | 7.489 | 7.574 |
| | *0.242* | *0.252* | *0.937* | *0.259* | *0.239* | *0.057* | *0.112* | *0.056* |
| R2 | 0.245 | 0.467 | 0.351 | 0.445 | 0.36 | 0.452 | 0.293 | 0.296 |
| n(parcelles) | 489 | 2633 | 964 | 1332 | 918 | 253 | 778 | 389 |

**Notes:** Les résultats sont obtenues grâce à la fonction '*ivreg'* du package '*AER'* de R. La variable dépendante est le revenu net agricole au niveau de la parcelle (Fbu/ha, en logarithme) pour chaque culture. L'instrumentation des variables climatiques a lieu au premier stade de tous les modèles. Tous les modèles incluent une constante. Les erreurs standards robustes clustérisées au niveau des ZD sont indiquées entre parenthèses. Les symboles *, ** et *** indiquent une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01, respectivement. Les p-valeurs des tests d'instruments sont en italiques. Les erreurs standards robustes sont obtenues grâce à la fonction '*vcovCL'* package '*sandwich*' de R. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS

Le mode de gestion individuelle a un effet négatif sur le revenu net du manioc et de la combinaison haricots-maïs, ce qui pourrait signaler une efficacité accrue de la gestion collective dans de tels cas. L'usage de semences améliorées ne montre pas d'effet significatif dans ce modèle, ce qui peut refléter soit une adoption limitée ou inadaptée des semences disponibles, soit une inefficacité liée au manque de complémentarité avec d'autres intrants.

Le temps moyen du trajet de ménage à la parcelle a des effets limités, mais significatifs pour certaines cultures comme la banane (effet négatif) et le manioc (effet positif), confirmant que l'éloignement de la parcelle par rapport au ménage affecte négativement le revenu à travers la réduction de l'efficacité de la gestion de la culture. La taille du ménage (hh_size) n'influence pas significativement le revenu net, cependant, son effet peut-être masque dans le main d'œuvre agricole (log(hom_jour_ha)). Avoir un revenu non agricole est négativement associé au revenu net de la banane, mais positivement au revenu du riz, suggérant que les ménages diversifiant leurs sources de revenu peuvent allouer plus de ressources aux cultures à forte intensité capitalistique. L'âge du chef de ménage est positivement associé au revenu pour plusieurs cultures (banane, haricots-manioc, maïs), révélant l'effet possible de l'expérience dans les pratiques agricoles.

Le sexe féminin du chef de ménage est associé à un revenu significativement plus faible pour le riz, mettant en lumière des désavantages structurels des femmes pour certaines cultures. Les niveaux d'éducation influencent peu les résultats, bien que l'enseignement post-fondamental par rapport au fondamental améliore le revenu des haricots-maïs, et que le niveau supérieur n'ait pas d'effet significatif. Posséder un téléphone mobile est positivement associé au revenu pour banane et maïs, ce qui pourrait refléter un meilleur accès à l'information sur les marchés ou les intrants. Le ratio femmes/hommes dans le ménage est négatif pour les haricots-manioc, ce qui pourrait suggérer que les désavantages structurels ne se limitent pas seulement aux chefs de ménages mais aussi au niveau de la collectivité qui gère les parcelles agricoles. Plus il y a beaucoup de femmes dans la collectivité gérante de la parcelle, le revenu net agricole diminue.

Les inondations ont un effet positif pour la banane et le manioc, mais négatif pour haricots-manioc, suggérant une tolérance différenciée des cultures aux excès d'eau. Le taux de maladie a un effet positif sur le maïs, possiblement lié à une réallocation du travail ou des efforts accrus sur cette culture en cas de choc sanitaire.

Les tests statistiques montrent que les instruments utilisés pour les variables climatiques (dd_gs, prcp_gs) sont solides (valeurs F très élevées), ce qui renforce la validité des estimations. Le test de Wu-Hausman indique une endogénéité significative pour certaines cultures (haricots-maïs, maïs), justifiant l'approche en deux étapes.

Enfin, les $R^2$ montrent que la capacité explicative du modèle varie entre les cultures : les modèles sont les plus performants pour les haricots ($R^2$ = 0.467), manioc (0.452) et haricots-manioc (0.445).

### IV.2.3. Analyse de l'hétérogénéité régionale de l'effet du climat sur le choix des cultures

En raison de son relief trop varié et montagneux, le climat du Burundi n'est pas uniforme et varie selon les régions naturelles, il est alors supposé que l'effet des variables climatiques sur la sélection et sur le revenu d'une culture/combinaison de cultures varie selon les régions. Nous avons estimé les modèles de sélection de cultures/combinaison de cultures dans chacune des 5 régions agroclimatiques. Les cultures dont les observations sont inférieures à 30 ne sont pas modélisées, car l'effectif est jugé trop petit pour détecter les propriétés statistiques des estimateurs.

i) *Hétérogénéité régionale de l'effet marginal moyen du climat sur la probabilité de choisir : la banane, haricots et haricots-maïs*

Le tableau 18 présente les effets marginaux moyens des variables climatiques et d'autres variables explicatives sur la probabilité de choisir la banane, le haricot et celle de choisir la combinaison haricots-maïs.

Les résultats montrent qu'une hausse d'un degré-jour réduit légèrement la probabilité de cultiver les haricots dans toutes les régions, tandis qu'elle augmente faiblement celle du système haricots-maïs dans toutes les régions sauf dans le Plateau central ; elle augmente également la probabilité de cultiver la banane dans le Plateau central et dans les Dépressions Nord/Est à l'exception de Mumirwa. Contrairement à l'effet de température, les précipitations réduisent généralement la probabilité de cultiver les bananes (-0,1%) et la combinaison haricot-maïs dans toutes les régions (de -0,0% à -0,2%) sauf dans les Dépressions du Nord/Est qui est initialement chaude où 1 mm supplémentaire de pluie augmente la probabilité de cultiver la banane ; les résultats mettent en évidence l'effet positif de précipitations sur le haricot dans toutes les régions (de +0,2% à +0,5%) sauf dans le Plateau central (-0,1%). Le terme quadratique de précipitations montre qu'au-delà d'un certain seuil les précipitations diminuent la probabilité de cultiver les haricots dans toutes les régions et augmentent la probabilité de cultiver la banane et haricot-maïs.

Concernant la fertilité du sol (référence : fertilité élevée), la fertilité moyenne augmente la probabilité de cultiver la banane dans toutes les régions (+0,06% à +2,3%) et le haricot dans toutes les régions sauf à la Crête Congo-Nil. Contrairement à la fertilité moyenne, la fertilité faible réduit la probabilité de cultiver la banane (-2,2% à -5,6%) sauf dans le Mumirwa (+2,0%).

Elle réduit également la probabilité de cultiver la combinaison haricot-maïs (-0,7% à -3,2%) sauf dans les dépressions Nord/Est où la fertilité faible augmente la probabilité de la cultiver (+7,4%); pour les haricots, la fertilité faible augmente la probabilité de les choisir allant même jusqu'à une hausse de 16,9% dans la Plaine de l'Imbo. Cela met en évidence deux choses : (i) l'adaptation des haricots aux sols moins fertiles grâce à leur capacité de fixer l'azote atmosphérique et (ii) la richesse en éléments nutritifs du sol de la Plaine de l'Imbo et celui des Dépressions Nord/Est tandis que ces résultats indiquent la pauvreté nutritive du sol de la région Crête Congo-Nil.

La superficie a un effet positif fort et significatif sur le choix de toutes les cultures et régions notamment pour les haricots dans les Dépressions Nord/Est (+163,6%), pour haricot-maïs dans la même région (+76,3%). Ces résultats confirment que le haricot est la culture la plus dominante.

En général, le tableau 18 montre que les effets des variables climatiques varient selon les cultures (banane, haricots et la combinaison haricot-maïs) mais que ces effets semblent ne pas varier beaucoup avec les régions agroclimatiques.

**Tableau 18 : Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir les bananes, haricots et haricots-manioc**

| Variables | Banane | | | Haricots | | | | | Haricots-Maïs | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |
| | Mumirwa | Plateau central | DépressioNord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépressio Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépressio Nord/Est |
| dd_gs | -0.00001** (0.000) | 0.0001** (0.000) | 0.00005*** (0.000) | -0.001** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.0003** (0.000) | -0.0001** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | 0.0002*** (0.000) | 0.0004** (0.000) | 0.0001*** (0.000) | -0.00006*** (0.000) | 0.0004*** (0.000) |
| prcp_g | -0.001** (0.000) | -0.001** (0.000) | 0.0001** (0.000) | 0.002** (0.000) | 0.002*** (0.000) | 0.002** (0.000) | -0.0005** (0.000) | 0.005*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.001** (0.000) | -0.0004*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.002*** (0.000) |
| I(prcp_gs^2) | 0.0000004*** (0.000) | 0.0000001* (0.000) | -0.00000004 (0.000) | -0.000001*** (0.000) | -0.000002*** (0.000) | -0.000002*** (0.000) | 0.0000001** (0.000) | -0.000004*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | 0.0000007*** (0.000) | 0.0000001* (0.000) | 0.000002*** (0.000) | 0.0000003*** (0.000) |
| fertiliteMoyenne | 0.016*** (0.002) | 0.023*** (0.001) | 0.006*** (0.001) | 0.088*** (0.004) | 0.025*** (0.001) | -0.007*** (0.001) | 0.032*** (0.001) | 0.028*** (0.004) | -0.028*** (0.002) | -0.024*** (0.001) | -0.013*** (0.002) | -0.032*** (0.002) | 0.022*** (0.003) |
| fertiliteFaible | 0.020*** (0.003) | -0.056*** (0.002) | -0.022*** (0.002) | 0.167*** (0.009) | 0.130*** (0.005) | -0.002 (0.003) | 0.098*** (0.004) | 0.042*** (0.004) | -0.151*** | -0.032*** (0.002) | -0.018*** (0.003) | -0.007*** | 0.074*** (0.008) |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sup_parc_rec | 0.006 (0.019) | 0.383*** (0.023) | 0.306*** (0.058) | 0.737*** (0.060) | 0.405*** (0.034) | 0.162*** (0.021) | 0.695*** (0.018) | 1.636*** (0.115) | (0.010) 0.115*** (0.042) | 0.054** (0.025) | 0.069*** (0.016) | (0.001) 0.435*** (0.042) | 0.763*** (0.119) |
| resiv_dd | 0.0001*** (0.000) | -0.00002*** (0.000) | | | 0.0004*** (0.000) | -0.0001*** (0.000) | -0.0004*** (0.000) | | | -0.0001*** (0.000) | 0.00002*** (0.000) | 0.0003*** (0.000) | |
| resiv_prcp | | 0.00003*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | | | | 0.0005*** (0.000) | -0.002*** (0.000) | | | | -0.0003*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) |
| n (Parcelles) | 70 | 365 | 47 | 97 | 423 | 402 | 1280 | 431 | 74 | 176 | 54 | 490 | 170 |

**Note :** Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD est indiquée entre parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1.
**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

*ii) Hétérogénéité régionale de l'effet marginal moyen du climat sur la probabilité de choisir : haricots-manioc et le maïs*

Le tableau 19 présente les effets marginaux moyens et montre que le nombre de degrés-jour pendant la période de croissance (dd_gs) influence différemment le choix des cultures selon les régions : Il diminue légèrement la probabilité de cultiver haricot-manioc dans la plupart des régions sauf dans le Mumirwa et la Crête Congo-Nil ; pendant qu'il augmente la probabilité de cultiver le maïs dans toutes les régions. Les précipitations (prcp_gs) influencent également le choix ; 1 mm supplémentaire de pluie réduit légèrement la probabilité de la cultiver dans la Plaine de l'Imbo (-0,0%) et les Dépressions Nord/Est (+0,1%), tandis qu'elle l'augmente dans Mumirwa (+0,1%), Crête Congo-Nil (+0,0%) et le Plateau central (+0,5 %). Pour le maïs, une unité supplémentaire de pluie réduit la probabilité de le cultiver dans toutes les régions. Le terme quadratique des précipitations indique que l'effet de ces dernières est non linéaire.

La fertilité du sol (référence : fertilité élevée) joue un rôle différencié selon les régions et les cultures. La fertilité moyenne augmente la probabilité de cultiver le haricot-manioc (+1,2% à +10,2%) mais diminue celle du maïs (-0,1% à -1,5%) sauf dans la Crête Congo-Nil et le Plateau centrale (+0,7% à +1,0%). Egalement pour la fertilité faible, elle augmente la probabilité de cultiver le haricot-manioc (+0,3% à +3,2%) et le maïs (+0,3% à 4,7%), sauf dans le Mumirwa pour la combinaison haricots-manioc (-7,9%), et dans la Plaine de l'Imbo pour le maïs (-8,9%).

La superficie de parcelle (sup_parc_rec), augmente significativement la probabilité de cultiver haricots-manioc et le maïs, notamment dans les Dépressions Nord/Est pour la combinaison haricot-manioc (+62,6%) probablement pour deux raisons : (i) La combinaison de cultures nécessite des superficies plus ou moins grandes et (ii) vu que la région est initialement chaude, les grandes superficies poussent les agriculteurs à sélectionner la combinaison qui est résilie face au réchauffement que la monoculture. Cependant, elle diminue la probabilité de choisir cette combinaison dans la Plaine de l'Imbo (-25,0%) probablement pour des raisons de l'agriculture commerciale de cette région. En effet, bien que la combinaison de cultures est robuste face aux températures extrêmes elle n'est pas performante en terme de rentabilité que la monoculture. 1ha supplémentaire diminue également la probabilité de choisir haricot-manioc dans la Crête Congo-Nil (-3,8%) probablement pour son climat initialement froid qui n'influence pas l'adoption de l'association de cultures pour résilier au réchauffement.

La significativité des résidus des variables climatiques de la première étape illustre que ces variables sont endogènes et que l'utilisation de l'approche 2SRI pour l'estimation du modèle logit multinomial est justifiée.

**Tableau 19: Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir la combinaison Haricots-Manioc et le Maïs**

| Variables | Haricots-Manioc | | | | | Maïs | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| dd_gs | -0.00001 (0.000) | 0.0003*** (0.000) | 0.0002*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | 0.0003*** (0.000) | 0.00005*** (0.000) | 0.0002*** (0.000) | 0.00003*** (0.000) | 0.0001*** (0.000) |
| prcp_gs | -0.0004*** (0.000) | 0.001*** (0.000) | 0.0002** (0.000) | 0.005*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.002*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.0004*** (0.000) |
| I(prcp_gs^2) | 0.0000004*** (0.000) | -0.000001*** (0.000) | -0.0000005*** (0.000) | -0.000004*** (0.000) | -0.0000003*** (0.000) | 0.0000008*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | 0.000002*** (0.000) | 0.000002*** (0.000) | 0.0000004*** (0.000) |
| fertiliteMoyenne | 0.075*** (0.004) | 0.035*** (0.001) | 0.012*** (0.002) | 0.014*** (0.001) | 0.102*** (0.008) | -0.006** (0.003) | -0.015*** (0.002) | 0.007*** (0.001) | 0.010*** (0.001) | -0.001 (0.001) |
| fertiliteFaible | 0.021*** (0.008) | -0.072*** (0.003) | 0.003*** (0.001) | 0.032*** (0.002) | 0.023*** (0.003) | -0.089*** (0.020) | 0.009*** (0.001) | 0.047*** (0.008) | 0.027*** (0.003) | 0.003** (0.001) |
| sup_parc_rec | -0.250*** (0.034) | 0.454*** (0.012) | -0.038*** (0.005) | 0.421*** (0.016) | 0.626*** (0.083) | 0.027 (0.024) | 0.116*** (0.016) | 0.092*** (0.020) | 0.281*** (0.035) | 0.296*** (0.051) |
| resiv_dd | | -0.0004*** (0.000) | 0.0001*** (0.000) | 0.0004*** (0.000) | | | 0.0002*** (0.000) | 0.00002*** (0.000) | -0.000006*** (0.000) | |
| resiv_prcp | | | | -0.001*** (0.000) | 0.002*** (0.000) | | | | -0.0002*** (0.000) | 0.0001*** (0.000) |
| n(Parcelles) | 35 | 293 | 43 | 827 | 134 | 31 | 79 | 362 | 376 | 70 |

**Note :** Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.
**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

*iii)Hétérogénéité régionale de l'effet marginal moyen du climat sur la probabilité de choisir : le manioc, patates douces et le riz*

Les effets marginaux moyens des variables climatiques et d'autres variables de contrôle pour la sélection du manioc, de patates douces et du riz sont présentés dans le tableau 20.

Les résultats révèlent que l'augmentation d'une unité de degré-jour augmente légèrement la probabilité de choisir le manioc et le riz dans la majorité des régions sauf la Plaine de l'Imbo pour le manioc et les Dépressions Nord/Est pour le riz. Pour les patates douces, la hausse thermique exerce un effet globalement négatif pour toutes les régions sauf au Plateau central. L'augmentation d'une unité de pluie augmente la probabilité de choisir le manioc, les patates douces et le riz dans toutes les régions (-0,0% à -0,1%) à l'exception de la Plaine de l'Imbo pour le riz (+0,1%), mais l'effet quadratique positif indique qu'un niveau intermédiaire de pluie devient favorable.

La fertilité du sol (référence : Fertilité élevée) influence fortement les choix culturaux. La fertilité moyenne par rapport à la fertilité élevée réduit la probabilité de cultiver toutes les cultures dans toutes les régions (-0,0% à -9,9%) sauf le manioc dans les Dépressions (+1,0%). Les résultats sont presque similaires pour la fertilité faible sauf qu'elle augmente la probabilité de cultiver le manioc dans le Plateau central (+0,7%) et dans les Dépressions Nord/Est (+1,6%) ainsi que pour le riz dans la Plaine de l'Imbo (+10,6%).

Les résultats montrent que l'augmentation d'1 ha réduit largement la probabilité de cultiver les patates douces dans toutes les régions (-28,5% à -357,9%) et celle de cultiver le riz sauf dans la Plaine de l'Imbo (+35,1%). Pour le manioc, l'augmentation d'1 ha augmente la probabilité de le cultiver dans toutes les régions (+6,7% à +15,8%) sauf le manioc dans la Plaine de l'Imbo (-98,0%).

La significativité des résidus de la première étape de 2SRI confirme le caractère endogène du nombre de degrés-jour pendant la période de croissance et les précipitations. Justifiant ainsi l'utilisation de l'approche 2SRI pour obtenir un estimateur sans biais d'endogénéité.

## Tableau 20 : Effets Marginaux Moyens des variables explicatives sur la probabilité de choisir le manioc, patates douces et le riz

| Variables | Manioc | | | | Patates Douces | | | | Riz | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Plateau central | Dépression Nord/Est | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| dd_gs | -0.0001*** (0.000) | 0.0001*** (0.000) | 0.00005*** (0.000) | 0.00001*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | -0.0003*** (0.000) | 0.0000007 (0.000) | -0.00001 (0.000) | 0.0001*** (0.000) | 0.0002*** (0.000) | -0.0001*** (0.000) |
| prcp_gs | -0.001*** (0.000) | -0.0004*** (0.000) | -0.0003*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | -0.001*** (0.000) | 0.001*** (0.000) | -0.0002*** (0.000) | -0.001*** (0.000) |
| I(prcp_gs^2) | 0.000001*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | 0.0000002*** (0.000) | 0.0000003*** (0.000) | 0.0000003*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) | -0.000002*** (0.000) | -0.0000005*** (0.000) | 0.000001*** (0.000) |
| fertiliteMoyenne | -0.030*** (0.004) | -0.009*** (0.000) | -0.010*** (0.001) | 0.010*** (0.001) | -0.023*** (0.001) | -0.0002 (0.001) | 0.008*** (0.001) | -0.059*** (0.004) | -0.099*** (0.008) | -0.046*** (0.002) | -0.107*** (0.005) |
| fertiliteFaible | -0.055*** (0.005) | -0.012*** (0.001) | 0.007*** (0.001) | 0.016*** (0.001) | -0.051*** (0.003) | -0.031*** (0.003) | 0.009*** (0.001) | -0.090*** (0.007) | 0.106*** (0.021) | -0.110*** (0.005) | -0.046*** (0.002) |
| sup_parc_rec | -0.980*** (0.125) | 0.067*** (0.017) | 0.071*** (0.007) | 0.158*** (0.022) | -1.120*** (0.062) | -0.285*** (0.020) | -2.174*** (0.075) | -3.579*** (0.268) | 0.351*** (0.041) | -0.112*** (0.008) | -0.206*** (0.058) |
| resiv_dd | | -0.0003*** (0.000) | -0.00004*** (0.000) | | 0.00003*** (0.000) | -0.00003*** (0.000) | -0.0001*** (0.000) | | | -0.0001*** (0.000) | |
| resiv_prcp | | | 0.00007*** (0.000) | -0.00002** (0.000) | | | 0.0003*** (0.000) | 0.0001*** (0.000) | | 0.0004*** (0.000) | 0.001*** (0.000) |
| n (Parcelles) | 30 | 93 | 91 | 33 | 134 | 90 | 404 | 125 | 48 | 221 | 98 |

**Note :** Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD basé sur le plan d'échantillonnage (design-based) est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

### IV.2.4. Analyse de l'hétérogénéité régionale et culturale de l'effet du climat sur le revenu net

*i. Effet hétérogène régionale du climat sur le revenu de : Banane et le haricot*

Après la modélisation du choix de la banane et du haricot selon le climat régional, nous estimons la relation entre le climat et le revenu conditionnement à ces cultures ; le biais de sélection est corrigé en intégrant dans la régression du revenu net le terme de correction de Dubin-McFadden calculé à partir des probabilités fournies par les modèles de sélection de ces cultures.

Les résultats présentés dans le tableau 21 montrent une forte influence de la taille de la parcelle sur le revenu agricole net, aussi bien pour les bananes que pour les haricots. L'effet de la superficie est négatif, hautement significatif et homogène dans toutes les régions, ce qui suggère des rendements décroissants ou une possible mauvaise allocation des facteurs de production sur de grandes parcelles.

Concernant les intrants, la main-d'œuvre (log(hom_jour_ha)) a un effet positif et significatif sur le revenu tiré des haricots, particulièrement au Crête Congo Nil, Plateau central et Dépression Nord/Est, ce qui indique que l'intensification du travail humain est rentable dans ces régions.

L'effet de la fumure organique est également positif et significatif pour les haricots dans toutes les zones sauf Crête Congo-Nil, confirmant son rôle clé dans l'amélioration de la productivité. En revanche, les effets des semences (log(qte_sem_ha)) et des engrais minéraux (log(qte_engr_ha)) sont moins systématiques. Les engrais montrent un impact positif et significatif uniquement dans certaines zones (Mumirwa et Dépression Nord/Est pour les haricots), ce qui pourrait refléter des conditions agro-pédologiques différenciées. Pour les bananes, aucune variable climatique (chaleur ou pluie) n'est significative. En revanche, pour les haricots, le carré des précipitations a un effet légèrement négatif dans la plaine de l'Imbo, signalant une limite au-delà de laquelle l'excès d'eau nuit au rendement. Le modèle montre des $R^2$ assez élevés pour les haricots, notamment en Plateau central (0,468) et en Dépression Nord/Est (0,503), témoignant d'une bonne capacité explicative, tandis que les modèles sur les bananes présentent des $R^2$ plus modestes.

**Tableau 21 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO) du Revenu Net agricole pour les bananes et les haricots**

| Variables | Banane | | | Haricots | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| | Mumirwa | Plateau central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| corect_dm | 0.012 | -0.042 | -0.072 | -0.087 | 0.015 | 0.061 | -0.043 | -0.014 |
| | (0.038) | (0.038) | (0.053) | (0.074) | (0.034) | (0.071) | (0.030) | (0.022) |
| dd_gs | 6.69e-04 | 5.67e-04 | 0.002 | -9.46e-04 | -4.92e-05 | 3.46e-04 | -1.54e-04 | -2.98e-04 |
| | (8.27e-04) | (9.51e-04) | (0.001) | (9.42e-04) | (3.38e-04) | (7.26e-04) | (2.93e-04) | (3.32e-04) |
| prcp_gs | -0.001 | -2.33e-04 | -0.004 | 0.006 | -3.82e-04 | -0.007 | 0.004 | 0.001 |
| | (0.004) | (0.002) | (0.006) | (0.004) | (0.002) | (0.007) | (0.002) | (0.002) |
| I(prcp_gs^2) | 2.70e-06 | -1.34e-06 | 6.22e-07 | -5.01e-06* | 5.75e-07 | 7.22e-06 | -3.71e-06 | -7.26e-07 |
| | (4.64e-06) | (3.62e-06) | (8.82e-06) | (2.72e-06) | (2.21e-06) | (7.29e-06) | (2.50e-06) | (2.28e-06) |
| log(sup_parc_rec) | -0.652*** | -0.509*** | -0.636*** | -0.714*** | -0.674*** | -0.623*** | -0.720*** | -0.729*** |
| | (0.171) | (0.092) | (0.208) | (0.098) | (0.054) | (0.068) | (0.041) | (0.046) |
| log(qte_sem_ha) | 0.063 | -0.145 | -0.208 | 0.024 | 0.031 | 0.054 | -0.012 | 0.003 |
| | (0.163) | (0.095) | (0.200) | (0.093) | (0.084) | (0.059) | (0.036) | (0.056) |
| log(hom_jour_ha) | 0.017 | 0.105 | 0.099 | 0.111 | 0.129* | 0.178** | 0.187*** | 0.162*** |
| | (0.162) | (0.072) | (0.215) | (0.088) | (0.072) | (0.080) | (0.036) | (0.049) |
| log(qte_fum_ha) | -0.023 | 7.87e-04 | -0.050 | 0.038** | 0.039** | 0.043 | 0.046*** | 0.020* |
| | (0.047) | (0.023) | (0.055) | (0.019) | (0.020) | (0.037) | (0.010) | (0.011) |
| log(qte_engr_ha) | -0.104 | 0.062 | 0.162 | 0.052 | 0.063** | 0.030 | 0.012 | 0.058*** |
| | (0.082) | (0.060) | (0.124) | (0.047) | (0.026) | (0.028) | (0.018) | (0.021) |
| R2 | 0.262 | 0.241 | 0.401 | 0.655 | 0.451 | 0.38 | 0.468 | 0.503 |
| n(parcelles) | 70 | 365 | 47 | 97 | 423 | 402 | 1280 | 431 |

**Notes :** La variable dépendante est le revenu net agricole au niveau de la parcelle (Fbu/ha, en logarithme) pour chaque culture. Tous les modèles incluent une constante. Les erreurs standards robustes clustérisées au niveau des ZD sont indiquées entre parenthèses. Les symboles *, ** et *** indiquent une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01, respectivement. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS

*ii) Effet hétérogène régionale du climat sur le revenu de : Haricot-Maïs et Haricot-Manioc*

L'analyse des résultats du modèle structurel Ricardien conditionnel (IV/2SLS) pour les combinaisons haricots-maïs et haricots-manioc présenté dans le tableau 22 montre que la superficie cultivée par parcelle présente une relation fortement négative avec le revenu net à l'hectare dans toutes les régions, indiquant des rendements décroissants à l'échelle ou une intensité culturale moindre sur les grandes surfaces. Cet effet est particulièrement prononcé pour les haricots-manioc dans la Plaine de l'Imbo et la Dépression Nord/Est.

La main-d'œuvre, mesurée en jours-hommes par hectare, exerce globalement un effet positif sur le revenu net, surtout pour les haricots-manioc, ce qui suggère une meilleure rentabilité du travail dans cette association culturale ; dans la Crête Congo Nil, l'élasticité du revenu au travail dépasse 0,8. En revanche, l'effet est plus mitigé pour les haricots-maïs.

L'utilisation des engrais minéraux affiche des effets généralement positifs mais significatifs uniquement dans certaines régions, comme la Plaine de l'Imbo et les Dépressions Nord/Est pour les haricots-maïs, le Mumirwa et le Plateau central pour les haricots-manioc. Cela est probablement liée aux pratiques de gestion des sols ou à leur fertilité de départ. À l'inverse, les semences montrent des coefficients majoritairement négatifs ou non significatifs, notamment une baisse marquée du revenu net dans la Crête Congo-Nil pour les haricots-manioc. Cela pourrait s'expliquer d'une part par les résultats descriptifs présenté dans la section des statistiques descriptives qui ont montré qu'il y a un problème de qualité insuffisante des semences ou d'autre part par une densité de semis excessive. La fumure organique, quant à elle, donne des résultats incohérents : tantôt positifs, tantôt négatifs ou insignifiants.

Du côté climatique, les précipitations et leur carré n'ont que peu d'effet significatif. Cependant, deux cas ressortent : un effet non linéaire négatif dans le Plateau Central pour les haricots-manioc, et une combinaison d'effets contradictoires dans la Dépression Nord/Est où le nombre de degrés-jour semble nuire au revenu, contrairement à une hauteur de pluie modérée. L'introduction des résidus du premier stade (corect_dm), censés corriger l'endogénéité du choix de culture, révèle peu de coefficients significatifs Cela peut indiquer une correction efficace du biais. Concernant l'endogeneité du nombre de degrés-jour, les tests de Hausman sont significatifs dans les régions de Plateau central et Dépressions Nord/Est. Ils confirment la présence d'endogénéité du climat dans ces cas.

**Tableau 22 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Haricots-Maïs et Haricots-Manioc**

| Variables | Haricots-Maïs | | | | | Haricots-Manioc | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau central | Dépressio Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépressio Nord/Est |
| corect_dm | -0.056 | -0.021 | 0.029 | 0.010 | 0.138 | -0.013 | 0.003 | 0.199 | 0.024 | 0.008 |
| | (0.090) | (0.079) | (0.103) | (0.035) | (0.149) | (0.037) | (0.033) | (0.185) | (0.032) | (0.023) |
| dd_gs | 6.31e-04 | 7.59e-04 | -9.30e-04 | -3.66e-04 | -0.003 | 2.53e-05 | 8.03e-05 | -0.007 | 5.75e-04* | -0.002* |
| | (9.89e-04) | (0.001) | (0.002) | (5.34e-04) | (0.004) | (4.31e-04) | (2.13e-04) | (0.006) | (2.97e-04) | (0.001) |
| prcp_gs | 1.98e-04 | -0.004 | -1.61e-04 | 0.004 | 0.010 | 0.002 | 4.97e-04 | -0.100 | -0.007 | 0.006 |
| | (0.005) | (0.003) | (0.006) | (0.003) | (0.012) | (0.003) | (0.002) | (0.065) | (0.007) | (0.004) |
| I(prcp_gs^2) | -1.70e-06 | 2.99e-06 | 2.05e-06 | -3.79e-06 | -1.15e-05 | -3.67e-06 | -5.21e-07 | 8.46e-05 | 6.40e-06 | -2.78e-06 |
| | (4.57e-06) | (2.16e-06) | (4.87e-06) | (3.75e-06) | (1.28e-05) | (3.68e-06) | (2.13e-06) | (5.69e-05) | (6.90e-06) | (3.32e-06) |
| log(sup_parc_rec) | -0.516* | -0.796*** | -0.543*** | -0.624*** | -0.592*** | -0.897*** | -0.726*** | -0.741*** | -0.779*** | -0.927*** |
| | (0.293) | (0.104) | (0.118) | (0.086) | (0.117) | (0.209) | (0.070) | (0.141) | (0.049) | (0.106) |
| log(qte_sem_ha) | 0.317 | 0.038 | -0.029 | -0.005 | -0.045 | -0.322 | 0.047 | -0.547** | -0.079 | -0.262 |
| | (0.250) | (0.258) | (0.279) | (0.111) | (0.116) | (0.198) | (0.059) | (0.267) | (0.058) | (0.182) |
| log(hom_jour_ha) | -0.175 | -0.035 | 0.240 | 0.197*** | 0.147 | 0.407* | 0.202*** | 0.885** | 0.138** | 0.283** |
| | (0.159) | (0.242) | (0.181) | (0.075) | (0.112) | (0.227) | (0.052) | (0.383) | (0.058) | (0.123) |
| log(qte_fum_ha) | 0.042 | 0.003 | 0.025 | 0.024 | 0.113*** | -0.029 | 0.021 | -0.116*** | 0.008 | -0.013 |
| | (0.050) | (0.023) | (0.042) | (0.020) | (0.033) | (0.044) | (0.020) | (0.041) | (0.014) | (0.056) |
| log(qte_engr_ha) | 0.128** | 0.047 | 0.024 | 0.025 | 0.172** | -0.067 | 0.067** | 0.034 | 0.042* | 0.006 |
| | (0.062) | (0.045) | (0.078) | (0.036) | (0.087) | (0.152) | (0.031) | (0.152) | (0.025) | (0.100) |
| *Tests pour IV/2SLS* | | | | | | | | | | |
| Weak instruments | | | | 509.683 | 14.345 | | | | | 17.861 |
| | | | | *2.40e-119* | *1.87e-06* | | | | | *1.55e-07* |
| Wu-Hausman | | | | 4.318 | 4.343 | | | | | 4.819 |
| | | | | *0.038* | *0.039* | | | | | *0.030* |
| Sargan | | | | 0.423 | 0.144 | | | | | 3.441 |
| | | | | *0.516* | *0.704* | | | | | *0.064* |
| R2 | 0.253 | 0.438 | 0.426 | 0.332 | 0.281 | 0.618 | 0.571 | 0.516 | 0.38 | 0.345 |
| n(parcelles) | 74 | 176 | 54 | 490 | 170 | 35 | 293 | 43 | 827 | 134 |

**Notes :** La variable dépendante est le revenu net agricole au niveau de la parcelle (Fbu/ha, en logarithme) pour chaque culture. L'instrumentation du nombre de degrés-jour par la latitude et l'altitude a lieu au premier stade pour les modèles (4), (5) et (10), le reste est estimé par MCO. Tous les modèles incluent une constante. Les erreurs standards robustes clustérisées au niveau des ZD sont indiquées entre parenthèses. Les symboles *, ** et *** indiquent une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01, respectivement. Les p-valeurs des tests instruments sont en italiques. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

Les tests d'instruments montrent des valeurs F largement supérieures à 10, garantissant la robustesse des instruments utilisés, tandis que les tests de suridentification (Sargan) soutiennent globalement leur validité, sauf pour le riz dans la région de Dépressions Nord/Est qui est le cas à surveiller. Ces résultats confirment la pertinence du recours à une approche IV/2SLS pour estimer les déterminants du revenu net agricole conditionnel pour ces cultures et dans ces régions.

*iii) Effet hétérogène régionale du climat sur le revenu de : Maïs et Manioc*

Les résultats présentés dans le tableau 23 de la régression de revenu net conditionnement au Maïs ou au Manioc révèlent qu'un effet positif et significatif du nombre degrés-jour est observé pour le maïs en Plaine de l'Imbo, ce qui indique qu'un réchauffement favorise les rendements du maïs dans cette région. Ailleurs, notamment pour le manioc, l'effet de cette variable reste globalement faible et non significatif. Pour la précipitation totale pendant la saison de croissance (prcp_gs), l'effet est particulièrement négatif et significatif pour le maïs dans les Dépressions Nord/Est, suggérant que l'excès de pluie nuit à cette culture dans les zones basses. L'effet quadratique de cette même variable est significatif uniquement dans cette région, révélant une relation en U : des précipitations modérées sont pénalisantes, mais au-delà d'un certain seuil, elles deviennent bénéfiques. Le terme de correction de Dubin-McFadden (corect_dm) influence négativement le revenu du maïs en Plaine de l'Imbo, ce qui confirme la présence des facteurs non observables qui influencent d'une manière contrastée la sélection du maïs et le revenu net correspondant ; ainsi l'ajout de ce terme nous a permis d'obtenir les estimations sans biais. Egalement, une légère significativité positive de ce terme de correction est observée pour le manioc dans cette même région.

La taille de la parcelle (log(sup_parc_rec)) est associée à une baisse significative du revenu net, tant pour le maïs que le manioc dans presque toutes les régions, ce qui pourrait indiquer des rendements décroissants. La quantité de semences par hectare (log(qte_sem_ha)) a un effet positif et significatif pour le manioc dans la Plaine de l'Imbo, ce qui souligne l'importance d'un bon peuplement pour cette culture.

**Tableau 23 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Maïs et les Manioc**

| Variables | Maïs | | | | | Manioc | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau central | Dépressio Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Plateau Central | Dépressio Nord/Est |
| corect_dm | -0.191* | -0.093 | -0.053 | 0.029 | 0.069 | 0.096* | -0.006 | 0.052 | -0.007 |
| | (0.109) | (0.076) | (0.201) | (0.035) | (0.160) | (0.046) | (0.118) | (0.064) | (0.116) |
| dd_gs | 0.005** | 0.001 | -0.002 | 2.39e-04 | 9.14e-04 | -2.12e-04 | 8.78e-04 | 0.001 | 0.002 |
| | (0.002) | (0.001) | (0.002) | (4.08e-04) | (0.002) | (5.27e-04) | (0.001) | (0.002) | (0.001) |
| prcp_gs | -0.012 | -7.99e-04 | 0.006 | -8.14e-04 | -0.009*** | 5.10e-05 | -0.002 | 0.005 | -0.003 |
| | (0.019) | (0.008) | (0.005) | (0.002) | (0.003) | (0.003) | (0.007) | (0.008) | (0.008) |
| I(prcp_gs^2) | 6.06e-06 | 4.95e-06 | -4.44e-06 | -1.27e-06 | 7.18e-06** | 1.90e-06 | 4.06e-07 | -7.06e-06 | 1.67e-06 |
| | (1.57e-05) | (8.35e-06) | (7.14e-06) | (4.33e-06) | (2.96e-06) | (4.32e-06) | (8.51e-06) | (7.95e-06) | (1.15e-05) |
| log(sup_parc_rec) | -0.630 | -0.803*** | -0.571*** | -0.661*** | -1.234*** | 0.050 | -0.716*** | -0.545*** | -0.542** |
| | (0.518) | (0.179) | (0.100) | (0.045) | (0.390) | (0.373) | (0.128) | (0.124) | (0.198) |
| log(qte_sem_ha) | 0.056 | 0.083 | 0.192 | 0.030 | 0.061 | 0.252* | 0.326 | 0.231 | 0.671 |
| | (0.351) | (0.209) | (0.150) | (0.062) | (0.121) | (0.125) | (0.450) | (0.204) | (0.406) |
| log(hom_jour_ha) | -0.125 | 0.033 | 0.023 | 0.102 | -0.036 | 0.125 | -0.155 | -0.062 | -0.255 |
| | (0.332) | (0.138) | (0.135) | (0.067) | (0.088) | (0.145) | (0.330) | (0.141) | (0.376) |
| log(qte_fum_ha) | -0.147 | -0.042 | 0.043 | 0.008 | 0.021 | 0.045 | 0.043 | -0.013 | 0.094 |
| | (0.108) | (0.033) | (0.035) | (0.029) | (0.046) | (0.117) | (0.076) | (0.054) | (0.099) |
| log(qte_engr_ha) | 0.182* | 0.089 | -0.021 | 0.109*** | -0.024 | | -0.077 | 0.149* | 0.073 |
| | (0.095) | (0.069) | (0.045) | (0.041) | (0.086) | | (0.180) | (0.087) | (0.199) |
| *Tests pour IV/2SLS* | | | | | | | | | |
| Weak instruments | | | 1048.911 | | | | | | |
| | | | *8.70e-149* | | | | | | |
| Wu-Hausman | | | 4.26 | | | | | | |
| | | | *0.040* | | | | | | |
| Sargan | | | 1.409 | | | | | | |
| | | | *0.235* | | | | | | |
| R2 | 0.385 | 0.52 | 0.296 | 0.413 | 0.65 | 0.561 | 0.52 | 0.392 | 0.401 |
| n(parcelles) | 31 | 79 | 362 | 376 | 70 | 30 | 93 | 91 | 33 |

**Notes:** La variable dépendante est le revenu net agricole au niveau de la parcelle (Fbu/ha, en logarithme) pour chaque culture. L'instrumentation du nombre de degrés-jour par son retard spatial et l'altitude a lieu au premier stade pour le modèle (3), le reste est estimé par MCO. Tous les modèles incluent une constante. Les erreurs standards robustes clustérisées au niveau des ZD sont indiquées entre parenthèses. Les symboles *, ** et *** indiquent une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01, respectivement. Les p-valeurs des tests instruments sont en italiques. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R. **Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS

.

Les quantités de travail familial (log(hom_jour_ha)) ou de fumier (log(qte_fum_ha)) n'ont globalement pas d'effets significatifs, sauf quelques effets mineurs sans cohérence régionale. En revanche, l'usage d'engrais chimiques (log(qte_engr_ha)) montre un effet positif significatif sur le revenu du maïs au Plateau central et à la Plaine de l'Imbo, ainsi que pour le manioc au Plateau central. Cela confirme le rôle structurant des intrants modernes dans l'amélioration des revenus agricoles, notamment en zones de moyenne altitude. Les statistiques des tests (Wu-Hausman, Sargan, etc.) confirment que l'endogénéité des degrés-jours est correctement traitée dans le modèle IV/2SLS appliqué à la Crête Congo-Nil pour le maïs, renforçant la validité des résultats dans cette zone.

*iv) Effet hétérogène régionale du climat sur le revenu de : Patates douces et Riz*

Pour les patates douces, le terme de correction est positif et significatif dans la région de Mumirwa, indiquant que les ménages qui optent pour cette culture y obtiennent des revenus supérieurs à ceux prédits par les seules variables observées. Cela traduit un choix potentiellement éclairé ou adapté à des avantages non mesurés comme le savoir-faire, qualité des terres, etc. En revanche, dans la Crête Congo-Nil, le coefficient est négatif et significatif, suggérant que les ménages cultivant la patate douce y sont désavantagés, peut-être en raison de contraintes ou d'une inadéquation climatique. Pour le riz, un biais de sélection négatif similaire est observé en Plaine de l'Imbo, où les revenus sont plus faibles que prévu, cela est probablement les contraintes agroécologiques comme la présence des terres inondées qui exige de cultiver le riz mais qui en même temps favorise les maladies qui en leur tour diminue la productivité.

S'agissant des variables climatiques, les degrés-jours de croissance (dd_gs) ont un effet positif dans Mumirwa (patates douces) et au Plateau Central (riz). Les précipitations (prcp_gs) influencent positivement les revenus des patates douces à Mumirwa, mais leur excès semble nuisible ailleurs : effets négatifs dans la Crête Congo-Nil pour les patates et en Plaine de l'Imbo pour le riz. Le carré des précipitations révèle des effets non linéaires, souvent décroissants, comme à Mumirwa (patates douces) indiquant une baisse de rendement au-delà d'un certain seuil de pluie.

À l'inverse, en Plaine de l'Imbo, le riz montre une relation en U, ce qui pourrait refléter l'adaptabilité de cette culture à l'irrigation ou à des conditions extrêmes. Les variables de production révèlent également des tendances intéressantes. La taille de la parcelle (log(sup_parc_rec)) a un effet négatif marqué dans presque toutes les régions, suggérant des rendements marginaux décroissants, notamment pour les patates douces dans les Dépressions du Nord/Est. La quantité de semences par hectare n'affiche aucun effet significatif, tandis que la main-d'œuvre (log(hom_jour_ha)) est associée à une baisse de revenu dans la culture du riz en Plaine de l'Imbo, potentiellement liée à une utilisation inefficiente.

**Tableau 24 : Estimation du Modèle Structurel Ricardien (MCO ou IV/2SLS) du Revenu Net agricole pour les Patates Douces et le Riz**

| Variables | Patates Douces | | | | Riz | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (6) | (7) | (8) |
| | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| corect_dm | 0.129* | -0.229* | -4.97e-04 | -0.003 | -0.210* | 0.004 | -0.008 |
| | (0.070) | (0.125) | (0.006) | (0.022) | (0.114) | (0.020) | (0.016) |
| dd_gs | 0.001* | -0.001 | 1.83e-05 | 4.42e-04 | 0.003 | 0.002* | 0.001 |
| | (8.41e-04) | (0.002) | (4.57e-04) | (4.54e-04) | (0.002) | (0.001) | (9.71e-04) |
| prcp_gs | 0.005*** | -0.010* | 0.002* | -8.64e-04 | -0.052* | 4.03e-04 | 0.002 |
| | (0.002) | (0.006) | (0.001) | (0.002) | (0.026) | (0.004) | (0.003) |
| I(prcp_gs^2) | -6.55e-06*** | 1.20e-05* | -2.83e-06* | 7.11e-08 | 3.68e-05* | -5.55e-06 | -4.59e-06 |
| | (1.96e-06) | (6.72e-06) | (1.65e-06) | (2.81e-06) | (2.11e-05) | (6.39e-06) | (4.93e-06) |
| log(sup_parc_rec) | -0.476*** | -0.594*** | -0.660*** | -0.770*** | -0.310 | -0.584*** | -0.342*** |
| | (0.168) | (0.174) | (0.084) | (0.131) | (0.222) | (0.109) | (0.110) |
| log(qte_sem_ha) | 0.023 | -0.056 | 0.018 | -0.009 | -0.137 | 0.184 | 0.228 |
| | (0.081) | (0.206) | (0.068) | (0.181) | (0.288) | (0.116) | (0.151) |
| log(hom_jour_ha) | 0.044 | 0.142 | 0.102 | -0.036 | -0.382* | -0.171 | -0.034 |
| | (0.115) | (0.262) | (0.065) | (0.169) | (0.213) | (0.121) | (0.105) |
| log(qte_fum_ha) | 0.013 | 0.024 | 0.025 | 0.001 | -0.043 | -0.008 | 0.003 |
| | (0.022) | (0.059) | (0.020) | (0.037) | (0.097) | (0.031) | (0.048) |
| log(qte_engr_ha) | 0.044 | 0.172 | -0.067* | 0.109 | 0.061 | 0.062 | 0.122** |
| | (0.047) | (0.104) | (0.039) | (0.073) | (0.129) | (0.061) | (0.052) |
| *Tests pour IV/2SLS* | | | | | | | |
| Weak instruments | | | | - | | 50.287 | - |
| | | | | | | *1.43e-18* | |
| Wu-Hausman | | | | - | | 4.323 | - |
| | | | | | | *0.039* | |
| Sargan | | | | - | | 0.274 | - |
| | | | | | | *0.601* | |
| R2 | 0.532 | 0.312 | 0.233 | 0.3 | 0.455 | 0.159 | 0.25 |
| n(parcelles) | 134 | 90 | 404 | 125 | 48 | 221 | 98 |

**Notes:** La variable dépendante est le revenu net agricole au niveau de la parcelle (Fbu/ha, en logarithme) pour chaque culture. L'instrumentation du nombre de degrés-jour par son latitude et altitude a lieu au premier stade pour le modèle (7), le reste est estimé par MCO. Tous les modèles incluent une constante. Les erreurs standards robustes clustérisées au niveau des ZD sont indiquées entre parenthèses. Les symboles *, ** et *** indiquent une signification statistique aux niveaux de 0,1, 0,05 et 0,01, respectivement. Les p-valeurs des tests instruments sont en italiques.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

L'usage de fumure reste sans effet concluant, alors que les engrais montrent un effet contrasté : négatif pour les patates douces en Plateau Central, mais positif pour le riz en Dépression Nord/Est, soulignant une meilleure réponse de cette culture à l'intensification chimique. Les tests d'instrumentation IV/2SLS réalisés pour le riz confirment la robustesse du modèle : les instruments sont forts (F = 50.3), le test de Hausman révèle une endogénéité significative (p = 0.039), et le test de Sargan valide la pertinence des instruments utilisés sans sur identification des instruments (p = 0.601).

### IV.2.5. Conclusion sur la deuxième hypothèse

Les résultats que nous venons de présenter et interpréter dans les points précédents nous amènent à confirmer la seconde hypothèse de cette étude qui stipule que l'effet du climat sur l'agriculture varie selon les cultures et les régions agroclimatiques. En effet, les résultats nous montrent qu'en générale l'augmentation d'une une unité de degré-jour diminue la probabilité de choisir les cultures comme les haricots, haricot-manioc (augmentation dans le Mumirwa et la Crête Congo-Nil) et les patates douces tandis qu'elle augmente celle de banane (diminution dans le Mumirwa), manioc (diminution dans la Plaine de l'Imbo), haricot-maïs (diminution dans le plateau centrale), maïs et le riz (diminution dans les Dépressions Nord/Est). Le choix d'une culture est également influencé différemment par les précipitations selon les régions.

L'hypothèse de l'hétérogénéité de l'effet de température se confirme également sur le revenu net agricole par hectare. En effet, les résultats montrent que l'augmentation d'une unité du nombre de degré-jour entraine une augmentation d'un certain point de pourcentage du revenu net agricole par hectare des cultures comme la banane, et haricot-manioc (sauf dans la Crête Congo-Nil), maïs (sauf la Crête Congo-Nil), manioc (sauf dans la Plaine de l'Imbo), patates douces (sauf dans la Crête Congo-Nil) et le riz. Tandis qu'elle diminue celui de haricots (sauf dans la région Crête Congo-Nil), haricot-maïs (sauf dans la Plaine de l'Imbo et le Mumirwa).

Les résultats concernant l'effet des précipitations sur le revenu net agricole par hectare confirment également l'hétérogénéité. En effet, les résultats montrent que l'augmentation de 1mm de pluie augmente un certain point de pourcentage de revenu de certaines cultures comme le haricot (sauf dans le Mumirwa et dans la Crête Congo-Nil), haricot-maïs (sauf dans le Mumirwa et la Crête Congo-Nil), haricot-manioc (sauf dans la Crête Congo-Nil et le Plateau centrale), les patates douces (sauf dans la Crête Congo-Nil et les Dépressions Nord/Est) et le riz (sauf dans la Plaine de l'Imbo), L'effet du terme quadratique est négatif.

En revanche, l'augmentation de 1 mm diminue un certain point de pourcentage du revenu de certaines cultures telles que la banane, le maïs (sauf dans la Crête Congo-Nil), le manioc (sauf dans la Plaine de l'Imbo et le Plateau centrale).

### IV.3. Résultats concernant le troisième objectif

Le troisième objectif consiste à estimer à travers les simulations, les impacts des futurs changements climatiques.

En se basant sur les résultats des modèles de sélection et les modèles climat-revenu que nous venons de présenter dans les résultats du second objectif, il est possible que nous évaluons les impacts possibles des projections du climat futur sur à la fois le choix des cultures par les agriculteurs et le revenu conditionnement aux cultures choisies. Les projections sont estimées par les 8 Modèles de Circulation General (CMCC-ESM2, EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, UKESM1-0-LL) du CMIP6 et mises à l'échelle réduite d'une résolution de 2,5 minutes (~4,5 km) par la plateforme WorldClim. Les motifs du choix de ces modèles et la manière dont nous calculons les indicateurs multi-modèles sont développés dans le chapitre 3 parlant sur la méthodologie. Nos simulations sont basées sur le scenario aux émissions modérées SSP2-4.5 et à fortes émissions SSP5-8.5 de deux périodes 2021-2040 et 2041-2060.

#### IV.3.1. Simulations de l'impact du changement climatique sur le choix de cultures

Les résultats sur les simulations des choix des cultures selon les projections futures du climat sont présentés dans le tableau 25 pour la période 2021-2041 et le tableau 26 pour la période 2041-2060.

Pour l'avenir proche 2021-2040, les simulations montrent que par rapport à la période de référence de 1991-2019, les agriculteurs de toutes les régions renonceront aux haricots pour tous les scenarios SSP2-4.5 (+1,15 °C ; +3,51mm de précipitations et 5,50 °C.jour) et SSP5-8.5 (+1,18°C, +4,23mm de précipitations et 6,15 °C.jour) à l'exception des Dépressions Nord/Est avec une hausse de probabilité de cultiver le haricot de 12,6% et de 11,95% respectivement pour SSP2-4.5 et SSP5-8.5. L'impact est similaire sur le choix de cultiver le riz, la banane et les patates douces. Toutes ces cultures sont cultivées beaucoup plus pendant la saison culturale B[32], cela est expliquée probablement par le fait que cette saison selon l'évolution de l'indice de sécheresse SPEI-3 et SPEI-18 est la saison qui souffre plus de la sécheresse que d'autres et les agriculteurs pour s'adapter renonceront aux cultures de cette saison.

[32] Le pourcentage des agriculteurs qui cultivent ces cultures en saison B est définie comme suit : Haricot : 73,19% ; Riz : 65,3% ; Banane : 36%. A l'exception de patates douces qui sont plus cultivées en saison A mais l'écart est trop petit : 36,12% pour la saison A contre 34,32% pour la saison B.

Contrairement à ces cultures, l'impact du changement climatique est positif sur le choix de haricot-maïs et le maïs dans toutes les régions et pour tous les scenarios (+1,05% à +24,0% pour SSP2-4.5 et +1,99% à +18,44% pour SSP5-8.5) sauf dans les Dépressions Nord/Est (SPP2-4.5 : -6,90% ; SSP5-8.5 : -3,11% pour haricot-maïs). L'impact est positif également sur le choix de la combinaison haricot-manioc mais négatif dans les régions initialement chaudes : Plaine de l'Imbo (-10,0% SSP2-4.5 et -10,42% pour SSP5-8.5) et Dépressions Nord/Est (-14,94% pour SSP2-4.5 et -17,02% pour SSP5-8.5). Le choix du manioc est aussi impacté positivement par le changement climatique dans toutes les régions pour tous les scenarios à l'exception de la Plaine de l'Imbo (-25,19% et -24,28%) et du scenario SSP2-4.5 dans le Plateau central (-13,97%). Ces résultats montrent que les agriculteurs choisiront plus l'association des cultures et le maïs pour s'adapter au changement climatique.

**Tableau 25 : Impacts du future changement climatique (2021-2040) sur le choix d'une culture ou combinaison de cultures**

| Culture | Plaine de l'Imbo | | Mumirwa | | Crête Congo-Nil | | Plateau Central | | Dépressions Nord/Est | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| Haricots | -15.09 | -15.56 | -14.60 | -16.46 | -9.64 | -10.90 | +0.61 | -1.00 | +12.62 | +11.95 |
| Haricots-Maïs | +8.15 | +7.97 | +17.37 | +18.33 | +24.00 | +18.44 | +1.05 | +1.99 | -6.90 | -3.11 |
| Haricots-Manioc | -10.00 | -10.42 | +6.36 | +4.98 | +54.79 | +30.81 | +4.46 | +1.72 | -14.94 | -17.02 |
| Maïs | +68.18 | +74.55 | +2.49 | +9.26 | +5.33 | +10.05 | +8.64 | +24.02 | -8.80 | -7.45 |
| Manioc | -25.19 | -24.28 | +39.93 | +48.49 | | | -13.97 | +0.16 | +6.31 | +8.80 |
| Riz | -1.88 | -5.40 | | | | | -68.35 | -25.96 | -10.54 | -11.58 |
| Banane | | | -6.34 | -7.41 | | | -7.59 | -9.12 | -1.27 | -1.15 |
| Patates douces | | | -11.68 | -12.51 | -9.35 | -12.79 | +0.43 | -0.48 | -3.27 | -3.50 |

**Notes :** Les nombres dans les colonnes (1) -(10) sont des pourcentages. SSP2-4.5 et SSP5-8.5 représentent respectivement les scenarios aux émissions modérées et à fortes émissions. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU, et les projections de la base de données WorldClim.

Le haricot-maïs et le maïs restent les cultures qui seront préférées par les agriculteurs en 2041-2060 comparativement à la période de référence (1991-2019) sauf dans le Plateau central pour le haricot-maïs dont le choix sera impacté négativement par le changement climatique comme c'est le cas pour les Dépressions Nord/Est en 2021-2040 (Tableau 31) ainsi pour le maïs, les résultats montrent que même la région Dépressions Nord/Est qui connaitra un impact négatif sur la probabilité de le cultiver dans l'avenir proche enregistrera un impact positif pour l'avenir moyen terme pour tous les scenarios (+ 8,20% : SSP2-4.5 et +20,45% : SSP5-8.5) . L'impact sur le choix de l'association haricot-manioc devient trop hétérogène par rapport à celui de 2021-2040. En effet, les résultats montrent que les agriculteurs de régions initialement froides (Mumirwa et Crête Congo-Nil) adopteront cette combinaison tandis que ceux des régions initialement chaudes (Plaine de l'Imbo et Dépressions Nord/Est) renonceront à cette culture.

Le choix du manioc est impacté négativement toujours par le changement climatique prévu en 2041-2060 pour tous les scenarios dans la Plaine de l'Imbo (-34,40% : SSP2-4.5 et -40,78% pour SSP5-8.5) et positivement ailleurs, notamment dans la région de Mumirwa où la probabilité de le cultiver augmentera jusqu'à +79.0% et +128.28% respectivement pour le scenario aux émissions modérées et a fortes émissions. Cela montre que les agriculteurs perçoivent le manioc comme la culture résiliente au réchauffement climatique.

Pour l'avenir moyen terme (2041-2060), les résultats montrent que l'impact du changement climatique sur le choix du riz et des patates douces comme cultures à cultiver est négatif dans toutes les régions comme pour la période 2021-2040. Contrairement à la période 2021-2040, les agriculteurs adopteront la banane dans toutes les régions sauf dans la région de Mumirwa (-12,48% pour SSP2-4.5 et -20,62% pour SSP5-8.5).

**Tableau 26 : Impacts du future changement climatique (2041-2060) sur les probabilités de choix d'une culture**

| Culture | Plaine de l'Imbo | | Mumirwa | | Crête Congo-Nil | | Plateau Central | | Dépressions Nord/Est | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| Haricots | -30.74 | -41.02 | -34.94 | -50.80 | -17.99 | -26.97 | -3.89 | -9.18 | +6.26 | +0.56 |
| Haricots-Maïs | +10.92 | +9.23 | +50.95 | +78.04 | +42.24 | +52.53 | -1.69 | -4.42 | +25.09 | +57.72 |
| Haricots-Manioc | -18.64 | -26.64 | +13.15 | +13.41 | +117.16 | +150.22 | -6.91 | -17.99 | -32.97 | -48.35 |
| Maïs | +129.79 | +187.68 | +9.53 | +16.46 | +12.50 | +21.04 | +32.15 | +70.63 | +8.20 | +20.45 |
| Manioc | -34.40 | -40.78 | +79.08 | +128.28 | | | +20.55 | +38.38 | +13.15 | +18.91 |
| Riz | -1.39 | -7.98 | | | | | -11.40 | -6.74 | -19.39 | -29.09 |
| Banane | | | -12.48 | -20.62 | | | +1.67 | +6.42 | +10.25 | +18.80 |
| Patates douces | | | -29.08 | -42.59 | -32.42 | -44.24 | -0.08 | -2.43 | -5.37 | -9.34 |

**Notes :** Les nombres dans les colonnes (1) -(10) sont des pourcentages. SSP2-4.5 et SSP5-8.5 représentent respectivement les scenarios à faibles émissions et à fortes émissions. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et les projections de la base de données WorldClim

### IV.3.2. Simulations de l'impact du changement climatique sur le revenu net agricole

Maintenant, nous présentons les simulations d'impacts du changement climatique sur les revenus nets agricoles, les résultats sont présentés dans les tableaux 27 et 28 respectivement pour le premier horizon (2021-2040) et le second horizon (2041-2060). Pour la période 2021-2040, les effets du changement climatique sur le revenu net agricole varient fortement selon les cultures, les régions agroclimatiques et les scénarios d'émissions.

Les simulations de la période 2021-2040 montrent que les haricots seront vulnérables du changement climatique dans la Plaine de l'Imbo (-7,72% pour SSP2-4.5 et -8,03% pour SSP5-8.5) et légèrement en baisse dans le Plateau centrale (-0,79% équivalent d'une baisse de 12947,77Fbu/ha selon le scenario aux émissions modérées SSP2-4.5 et -1,1% selon SSP5-8.5). En revanche l'impact est positif dans les autres régions, notamment dans la Crête Congo-Nil (+8,54% équivalent à 159875.35 Fbu/ha selon SSP2-4.5 et + 8,89% pour le scenario a fortes émissions SSP5-8.5). Cela est expliquée plausiblement par le fait que la région Crête Congo-Nil est initialement froide.

Les combinaisons haricot-maïs et haricot-manioc seront résilientes au changement climatique avec un impact positif dans toutes les régions agroclimatiques notamment la combinaison haricot-manioc dans la Crete Congo-Nil ouu l'impact sera positif avec une hausse de revenu agricole de 386,86% soit 9044142.03 Fbu/ha. En revanche, il y aura une baisse dans le Plateau centrale (-1,23% et -1,86%) pour le haricot-maïs respectivement pour le scenario SSP2-4-5 et SSP5-8.5 ce qui équivaut à une perte économique de 29363,34 Fbu/ha et de 44245,89 Fbu/ha. Cela montre majoritairement que la pratique agro-écologique de l'association de cultures est résiliente face au réchauffement climatique. Le maïs et les patates douces bénéficieront généralement du changement climatique sauf dans les régions Crête Congo-Nil et Dépressions Nord/Est pour le maïs et le Plateau centrale pour les patates douces.

Le revenu du riz est impacté négativement dans toutes les régions agroclimatiques notamment dans la plaine de l'Imbo où les pertes atteignent 2 499 811,56 Fbu/ha pour le scenario aux émissions modérées soit 32,36% du revenu associé au climat de référence (1991-2019). Les cultures semi-pérennes : le manioc notamment dans la Plaine de l'Imbo (-7,45% soit une perte de 341 656,64 Fbu/ha selon le scenario SSP2-4.5) et la banane dans le Plateau centrale connaitront également un impact négatif du changement climatique dans toutes les régions sauf dans la région de Mumirwa probablement dû à ses conditions froides initiales.

**Tableau 27 : Impact du future changement climatique (2021-2040) sur le revenu net agricole (Fbu/ha)**

| Culture | Plaine de l'Imbo | | Mumirwa | | Crête Congo-Nil | | Plateau Central | | Dépressions Nord/Est | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| Haricots | -86604.15 (-7.72) | -90019.63 (-8.03) | 12347.84 (+0.80) | 14468.25 (+0.94) | 159875.35 (+8.54) | 166363.64 (+8.89) | -12947.77 (-0.79) | -18122.8 (-1.1) | +41783.21 (+3.48) | +42086.48 (+3.51) |
| Haricots-Maïs | +108632.98 (+7.08) | +103974.68 (+6.77) | +63745.58 (+2.98) | +82705.39 (+3.87) | +91923.45 (+4.73) | +142319.3 (+7.32) | -29363.34 (-1.23) | -44245.89 (-1.86) | +246223.96 (+12.17) | +147374.25 (+7.28) |
| Haricots-Manioc | +48463.94 (+3.49) | +25321.4 (+1.82) | +164905.16 (+8.95) | +163284.85 (+8.86) | +3702465.01 (+158.17) | +9044142.03 (+386.36) | -22112.58 (-1.3) | -9042.25 (-0.53) | +242898.55 (+13.33) | +249067.5 (+13.66) |
| Maïs | +202972.17 (+14.51) | +175732.88 (+12.56) | +31350.25 (+1.36) | +212355.2 (+9.21) | -456247.03 (-15.43) | -553063.91 (-18.71) | +38211.49 (+1.92) | -7462.06 (-0.37) | -173941.87 (-8.03) | -150144.31 (-6.93) |
| Manioc | -341656.64 (-7.45) | -320376.12 (-6.98) | +513540.15 (+6.42) | +509083.36 (+6.37) | | | -31905.16 (-0.8) | -74016.16 (-1.86) | -195022.78 (-2.93) | -185128.16 (-2.78) |
| Riz | - 2499811.56 (-32.36) | - 2761935.44 (-35.75) | | | | | -763309.23 (-17.81) | -795588.66 (-18.56) | -770844.73 (-14.08) | -805007.29 (-14.71) |
| Banane | | | +8237.21 (+0.18) | +80772.69 (+1.75) | | | -1269128.57 (-21.73) | -1283076.36 (-21.96) | -802855.86 (-14.07) | -835731.88 (-14.64) |
| Patates douces | | | +112753.1 (+2.96) | +78233.99 (+2.05) | +1289.82 (+0.03) | +223528.84 (+5.66) | -37097.58 (-0.92) | -56021.87 (-1.39) | +735194.1 (+18.08) | +732533.07 (+18.01) |

**Notes :** Les valeurs dans les colonnes (1) à (10) sont les baisses (-) ou hausses (+) des revenus nets agricoles (Fbu/ha) dû au changement climatique. Les revenus sont obtenus à la base d'une retransformation logarithmique non biaisée $(y/X) = e\exp(X'\beta)exp(0.5\sigma^2)$ , avec $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ après la prédiction du modèle log-linéaire. Estimation au niveau des parcelles. Les variations en pourcentage sont indiquées entre parenthèses. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R et word.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU projections de la base de données de WorldClim.

Les simulations des impacts du changement climatique pour le futur moyen terme (2041-2060) sont présentées dans le tableau 28. Bien que la quasi-totalité des régions conservent le sens de l'impact du changement climatique sur le haricot pour le futur moyen terme (2041-2060), les simulations montrent une baisse de revenu comparativement à l'avenir proche. En effet, l'impact sera négatif (-1,0%) pour le scenario SSP5-8.5 dans les Dépressions Nord/Est alors qu'il est positif pour l'avenir proche. Il sera trop négatif dans la Plaine de l'Imbo de -7,72% à -17,0% (soit une perte de 190 598,9 Fbu/ha) pour le scenario aux émissions modérées SSP2-4.5. En revanche la Crête Congo-Nil bénéficie de plus en plus du changement climatique (+18,62% environ un bénéfice de 348 659,79 Fbu/ha). Pour le haricot-maïs, les bénéfices qui sont enregistrés en 2021-2040 dans la Crête Congo-Nil et dans le Plateau centrale disparaitront en 2041-2060, alors que l'impact deviendra de plus en plus positif dans la Plaine de l'Imbo (passant de 7,08% à 14,17% pour le scenario SSP2-4.5) et dans le Mumirwa (de 3,87% à 19,84% selon SSP5-8.5). Pour Haricots-Manioc, l'impact sera négatif alors qu'il était positif dans les Dépressions Nord/Est pour tous les scenarios (-7,06% selon SSP2-4.5 et -20,04% selon SSP5-8.5) et dans la Plaine de l'Imbo pour SSP5-8.5 (-0,95%). En revanche les performances du haricot-manioc s'améliorent énormément dans le Mumirwa pour SSP5-8.5 (de +8,86% à 39,06%), l'amélioration sera observée également dans la région de la Crête Congo-Nil (de +386,36% à 442% pour le scenario a fortes émissions SSP5-8.5). Le maïs restera positif par rapport à la période de référence mais s'améliorera fortement par rapport à 2021-2040 dans la Plaine de l'imbo (de +14,51% à 30,51% pour SSP2-4.5 et +12,56% à 155,08% pour SSP5-8.5) et dans le Mumirwa (+1,36% à +23,64% pour SSP2-4.5 et +9,21% à +56,53% pour SSP5-8.5), il sera positif dans les Dépressions Nord/Est pour tous les scenarios et restera négatif dans la Crête Congo-Nil et dans le Plateau central pour le scenario SSP5-8.5. Le manioc sera résilient en 2041-2060 dans toutes les régions sauf dans la Plaine de l'Imbo. En effet, pendant que l'impact sera négatif en 2021-2040 dans le Plateau centrale et Dépressions Nord/Est, il deviendra positif pour l'avenir moyen terme (de -0,8% à 6,24% et de -1,86% à +11,22% dans le Plateau centrale respectivement pour SSP2-4.5 et SSP5-8.5). La même situation sera constatée dans les Dépressions Nord/Est : l'impact passera de -2,93% à +2,91% pour le scenario SSP2-4.5 et de -2,78% à +13,64% pour SSP5-8.5. L'impact sur le revenu du riz reste négatif dans toutes les régions pour le scenario SSP2-4.5 mais deviendra positif dans toutes les régions selon le scenario SSP5-8.5. La performance de la banane restera positive mais s'améliore énormément dans le Mumirwa et les pertes s'atténueront dans le Plateau centrale et dans les Dépressions Nord/Est, il deviendra même positif pour le scenario SSP5-8.5 dans cette région. L'impact sur les patates douces deviendra négatif dans la Crête Congo-Nil mais s'améliorera ailleurs et restera négatif dans le Plateau centrale.

**Tableau 28 : Impact du future changement climatique (2041-2060) sur le revenu net agricole (Fbu/ha)**

| Culture | Plaine de l'Imbo | | Mumirwa | | Crête Congo-Nil | | Plateau Central | | Dépressions Nord/Est | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | SSP2-4.5 | SSP2-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP2-8.5 | SSP2-4.5 | SSP2-8.5 |
| Haricots | -190598.9 (-17.0) | -264769.88 (-23.61) | +7434.54 (+0.48) | +9110.49 (+0.59) | +235641.48 (+12.59) | +348659.79 (+18.62) | -43726 (-2.66) | -78847.61 (-4.8) | +9614.56 (+0.8) | -11952.36 (-1.0) |
| Haricots-Maïs | +217477.62 (+14.17) | 296691.86 (+19.33) | +246028.66 (+11.51) | +424279.43 (+19.84) | -34011.59 (-1.75) | -74060.23 (-3.81) | -111273.39 (-4.67) | -185501.14 (-7.78) | -445448.75 (-22.01) | -881071.45 (-43.54) |
| Haricots-Manioc | +26390.45 (+1.9) | -13178.35 (-0.95) | +179881.2 (+9.76) | +719666.63 (+39.06) | +2887151.29 (+123.34) | +10346562.04 (+442) | +90335.55 (+5.32) | +211343.16 (+12.45) | -128729.49 (-7.06) | -365246.08 (-20.04) |
| Maïs | +426901.86 (+30.51) | +2169824.05 (+24.7) | +544990.31 (+23.64) | +1303268.48 (+56.53) | -1033883.49 (-34.97) | -1455699.16 (-49.24) | +32776.15 (+1.65) | -15539.31 (-0.78) | +62909.23 (+2.91) | +295277.12 (+13.64) |
| Manioc | -408621.23 (-8.91) | -393410.48 (-8.57) | +1247455.77 (+15.6) | +1834075.49 (+22.94) | | | +248428.53 (+6.24) | +446544.96 (+11.22) | +990744.79 (+14.89) | +2114940.63 (+31.79) |
| Riz | -723253.89 (-9.36) | +368812.77 (+4.77) | | | | | -81584.79 (-1.9) | +443869.63 (+10.36) | -0.04 (0.0) | +233909.06 (+4.27) |
| Banane | | | +373325.63 (+8.08) | +796058.75 (+17.22) | | | -1081377.45 (-18.51) | -954407.04 (-16.34) | -136514.14 (-2.39) | 364979.63 (+6.39) |
| Patates douces | | | +630025.09 (+16.52) | +997968.43 (+26.17) | -225818.54 (-5.72) | -111897.08 (-2.83) | -54212.36 (-1.34) | -89961.88 (-2.23) | +911926.61 (+22.43) | +1050896.18 (+25.84) |

**Notes :** Les valeurs dans les colonnes (1) à (10) sont les baisses (-) ou hausses (+) des revenus nets agricoles (Fbu/ha) dû au changement climatique. Les revenus sont obtenus à la base d'une retransformation logarithmique non biaisée $(y/X) = e\exp(X'\beta)exp(0.5\sigma^2)$ , avec $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ après la prédiction du modèle log-linéaire. Estimation au niveau des parcelles. Les variations en pourcentage sont indiquées entre les parenthèses. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU, CHIRPS et projections multi-modèles de la base de données WorldClim.

### IV.3.3. Impact moyen national par région du changement climatique sur le revenu net agricole

Pour analyser la vulnérabilité au changement climatique à une échelle plus globale, nous dépassons l'examen culture par culture et nous considérons plutôt l'impact agrégé sur une région entière. Cette approche nous permet de répondre à des questions stratégiques comme « quelle est la région la plus vulnérable ? » ou « quel est l'impact global au niveau national ? » en tenant compte des réalités locales de choix culturaux et des superficies cultivées. En pondérant les résultats par les probabilités qu'une culture soit choisie dans une région, puis par la part de superficie cultivée à l'échelle nationale, on obtient une image plus représentative de la vulnérabilité réelle des régions face aux scénarios climatiques futurs. Les résultats de comparaison régionale des simulations des impacts du changement climatique sur les revenus nets agricoles sont présentés dans le tableau 29.

Ces résultats montrent que pour la période 2021-2040, la Plaine de l'Imbo apparaît comme la région la plus touchée, avec des pertes importantes estimées entre -14,08 % et -15,84 % selon respectivement SSP2-4.5 et SSP5-8.5, traduisant une forte sensibilité de ses systèmes agricoles. En revanche, l'impact du changement climatique fera bénéficier Mumirwa (+4,46% et +5,09 ; respectivement pour SSP2-4.5 et SSP5-8.5) et Crête Congo-Nil (+2,45% pour SSP2-4.5 et +8,28% pour SSP5-8.5), la région Dépressions Nord/Est affiche des gains modérés. Ces résultats montrent que les régions initialement chaudes sont vulnérables que les régions froides. Cependant, au niveau national, les simulations prédisent un impact négatif : -3,31% (soit une perte de 85 097,31 Fbu/ha) selon le scenario SSP2-4.5 et -2,95% (perte de 75 671,55 Fbu/ha). En ramenant ces pertes à la superficie estimée grâce aux poids de l'EICVMB 2019-2020, les pertes économiques dues au changement climatique au niveau national pour les 8 cultures étudiées sont évaluées à 16 449 724 771, 87 Fbu pour la période 2021-2040 selon le scenario a émissions modérées SSP2-4.5. Bien que les régions chaudes initialement restent vulnérables surtout pour SSP2-4.5 pendant la période 2041-2060, les pertes semblent s'atténuer relativement à la période 2021-2040. La région de Mumirwa reste la région qui profitera du changement climatique pour n'importe quel scenario (+13,21% et +29,68%), tandis que le Plateau centrale sera vulnérable pour tous les scenario (-4,07% et -2,96%). Pour les régions restantes, on constate une alternance d'impact négatif a un impact positif pour les deux scénarii, ce qui se transmet également à l'impact moyen national qui est négatif (-0,87% soit une perte de 22 470,31 Fbu/ha) pour SSP2-4.5 et fortement positif pour SSP5-8.5 (+3,37%). Ces résultats souligne la présence d'une forte incertitude dans les simulations de 2041-2060. En effet, l'erreur standard des prévisions augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du climat de référence (1991-2019), ce qui est le cas pour la période 2041-2060.

**Tableau 29 : Impact moyen national par région du changement climatique sur le revenu net agricole**

| Période | Plaine de l'Imbo | | Mumirwa | | Crête Congo-Nil | | Plateau Central | | Dépressions Nord/Est | | Moyenne Nationale | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) |
| | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| **Référence (1991-2019)** | 2571824.44 | 2571824.44 | 2555189.54 | 2555189.54 | 2513543.74 | 2513543.74 | 2583037.14 | 2583037.14 | 2562401.3 | 2562401.3 | 2569396.04 | 2569396.04 |
| **2021-2040** | -362168.25 | -407442.04 | +113979.23 | +130011.93 | +61469.48 | +208057.21 | -157518.67 | -154847.4 | +33819.6 | +19714.58 | -85097.31 | -75671.55 |
| | (-14.08) | (-15.84) | (+4.46) | (+5.09) | (+2.45) | (+8.28) | (-6.1) | (-5.99) | (+1.32) | (+0.77) | (-3.31) | (-2.95) |
| **2041-2060** | -25959.83 | +139751.36 | +337546.75 | +758398.93 | -196602.39 | +226294.83 | -105213.5 | -76562.51 | +40523.8 | -848.19 | -22470.31 | +86640.9 |
| | (-1.01) | (+5.43) | (+13.21) | (+29.68) | (-7.82) | (+9.0) | (-4.07) | (-2.96) | (+1.58) | (-0.03) | (-0.87) | (+3.37) |

**Notes :** Les valeurs dans les colonnes (1) à (10) sont les baisses (-) ou hausses (+) des revenus nets agricoles (Fbu/ha) dû au changement climatique. Les revenus sont obtenus à la base d'une retransformation logarithmique non biaisée $(y/X) = e\exp(X'\beta)exp(0.5\sigma^2)$ , avec $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ après la prédiction du modèle log-linéaire. Estimation au niveau des parcelles. Les variations en pourcentage sont indiquées entre les parenthèses. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et les projections multi-modèles de WorldClim.

### IV.3.4. Impact moyen national par culture du changement climatique sur le revenu net agricole

Afin d'évaluer la vulnérabilité ou la résilience d'une culture à l'échelle nationale, nous avons calculé pour chacune des cultures étudiées, la moyenne pondérée des impacts observés dans les différentes régions agroclimatiques, les poids correspondant à la part de la superficie de la culture dans la zone par rapport à sa superficie totale au pays. Cette approche permet de dégager un indicateur global tenant compte de l'importance spatiale et économique des cultures.

Les résultats présentés dans le tableau 30 montrent qu'en moyenne au Burundi sans distinction des régions : Le riz (-25,79% selon SSP5-8.5 en 2021-2040), la banane (-12,55% SSP5-8.5 en 2041-2060 à -20,28% SSP5-8.5 en 2021-2040) et le maïs (-7,13% pour SSP2-4.5 et -7,99 pour SSP5-8.5 à l'horizon 2041-2060) seront les cultures les plus vulnérables du changement climatique et que le haricot-manioc (+4,78% : SSP2-4.5 et +7,66% à l'horizon 2021-2040), manioc et les patates douces sont les cultures les plus résilientes au changement climatique, tandis que le haricot, haricot-maïs seront résilientes uniquement pour l'avenir proche (2021-2040) et enregistreront des pertes économiques à l'avenir moyen terme (2041-2060) pour n'importe quel scenario.

**Tableau 30 : Impact moyen national par culture du changement climatique sur le revenu net agricole**

| Culture | 2021-2040 | | 2041-2060 | |
|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) |
| | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| Haricots | +14721.6 (+0.97) | +12941.36 (+0.85) | -7221.29 (-0.47) | -21987.44 (-1.44) |
| Haricots-Maïs | +67214.7 (+3.1) | +39205.07 (+1.81) | -114735.5 (-5.29) | -230480.96 (-10.63) |
| Haricots-Manioc | +83285.9 (+4.78) | +133592.29 (+7.66) | +103249.63 (+5.92) | +325970.89 (+18.7) |
| Maïs | -112186.79 (-4.95) | -135797.65 (-5.99) | -161631.28 (-7.13) | -181064.69 (-7.99) |
| Manioc | +48656.8 (+0.85) | +35300.12 (+0.62) | +624755.18 (+10.93) | +1122445.31 (+19.64) |
| Riz | -1272744.69 (-23.85) | -1376652.82 (-25.79) | -266843.85 (-5.0) | +357076.21 (+6.69) |
| Banane | -1155877.39 (-20.07) | -1168098.39 (-20.28) | -905806.44 (-15.73) | -723009.78 (-12.55) |
| Patates douces | +114102.63 (+3.28) | +127982.22 (+3.68) | +180737.77 (+5.19) | +254078.73 (+7.3) |

**Notes :** Les colonnes (1) a (4) sont les revenus (Fbu/ha) sont obtenus à la base d'une retransformation logarithmique non biaisée $E(y/X) = e\exp(X'\beta)exp(0.5\sigma^2)$, avec $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$. Estimation est au niveau des parcelles. Les variations en pourcentage sont indiquées entre parenthèses. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU, CHIRPS et projections multi-modèles de WorldClim.

### IV.3.5. Conclusion sur la troisième hypothèse

La troisième hypothèse de cette étude stipule que le changement climatique quel que soit l'horizon (2021-2040 ou 2041-2060) aura un impact hétérogène dépendamment d'une culture et/ou d'une région. Les simulations de l'impact présentées et commentées précédemment nous permettent confirmer cette hypothèse. En effet, les simulations montrent que l'impact du changement climatique est négatif pour une culture donnée comme le haricot dans la Plaine de l'Imbo et le Plateau centrale mais positif dans les autres régions ou dans une même région comme Plaine de l'Imbo le changement climatique en 2021-2040 affectera positivement le haricot-maïs et haricot-manioc mais négativement les autres cultures.

### IV.4. Résultats concernant le quatrième objectif

Le quatrième objectif de cette étude est de produire un outil numérique présenté dans une forme d'une application web interactive permettant à l'utilisateur de cet outil (décideur politique, agriculteur, assureur, ONG, organisation internationale œuvrant dans les domaines agricoles et climatiques, etc) de visualiser les impacts du changement climatique pour une région, culture, scenario et horizon choisi par l'utilisateur.

A travers cet objectif, le présent travail contribue à l'opérationnalisation de la deuxième action à mener « Information, Education et Communication sur le changement climatique » au niveau du 9ième sous axe (développement de la résilience au changement climatique) du premier axe stratégique (Accroissement durable de la production agricole, animale et halieutique) de la Stratégie Agricole Nationale (2018-2027).

Pour concevoir, développer et déployer le site internet de cette application, nous avons utilisé le langage de programmation R version R-4.3.3 les principales librairies de ce langage utilisées sont shiny et shinydashboard surtout pour créer l'interface graphique (User Interface : UI en anglais) la partie visible par l'utilisateur et le serveur la partie charger à produire et à mettre à jour les résultats commandés par l'utilisateurs. Le schéma suivant illustre le fonctionnement général de notre application web (Cura & Vaudor, 2018):

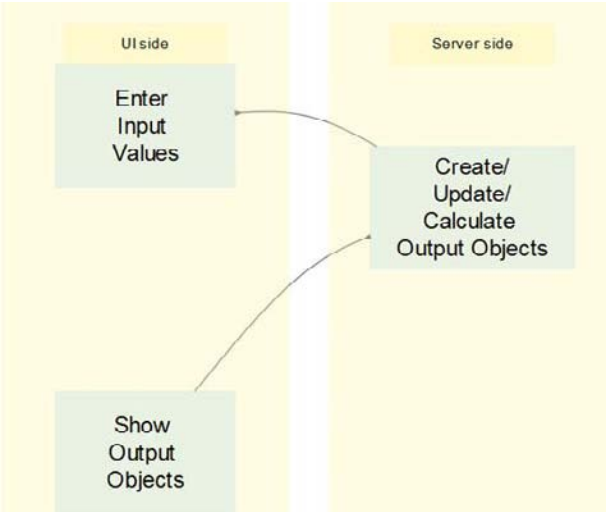



**Figure 11: Schéma du fonctionnement d'une application web shiny interactive.**

**Source : (Cura & Vaudor, 2018)**

Notre application à l'utilisateur, à travers un diagramme en barre interactif, de connaître les cultures vulnérables et résilientes dans une région donnée. Pour ce faire, l'utilisateur sélectionne la région, l'horizon (2021-2040 et 2041-2060), le scénario (SSP2-4.5 : scénario à émissions modérées de Gaz à Effets de Serre, équivalent à un forçage radiatif de 4,5 W/m² ~ 2-3°C en 2100 ; et SSP5-8.5 : scénario à fortes émissions de GES, équivalent à un forçage radiatif de 8,5 W/m²~

4-5°C). Une option « toutes les régions » est disponible pour visualiser l'impact moyen sur la culture au niveau de toutes les régions. Afin de visualiser facilement les régions dans lesquelles une culture donnée est vulnérable ou résiliente suite au changement climatique, une carte interactive est disponible permettant à l'utilisateur de choisir la culture, le scénario et l'horizon. L'option « toutes les cultures » est disponible pour connaître l'impact moyen sur toutes les cultures dans une région donnée.

L'application est hébergée sur shinyapps.io à l'adresse : https://elysee-ds.shinyapps.io/CcImpact_App/.

## IV.5. Discussion des résultats

### IV.5.1. Discussion des résultats du premier objectif

Nos résultats indiquent qu'il y a un changement climatique au Burundi avec une hausse continuelle des températures moyennes au Burundi, de l'ordre de 0,03 à 0,05 °C par an pour les trois saisons agricoles et les projections du proche avenir (2021-2040) révèlent une hausse de 1,14 à 1,18°C respectivement pour le scenario modéré et pessimiste ; pour l'avenir à moyen terme (2041-2060) une hausse de 2,09 à 2,81°C. Cette tendance est cohérente avec celle trouvée par d'autres études faites au Burundi (Tall et al., 2022) et au niveau régionale en Afrique de l'Est (Engdaw et al., 2022).

L'augmentation du nombre de degrés-jours confirme un potentiel thermique accru pour les cultures, ce qui peut favoriser les espèces à cycle court. Cependant, cette opportunité est conditionnée par la disponibilité en eau, conformément aux conclusions de Thornton sur l'importance des interactions chaleur-humidité (Thornton et al., 2011). Les précipitations présentent une variabilité saisonnière marquée, avec une tendance à la baisse significative pendant la saison B, essentielle pour le haricot, ce résultat est également constaté en Ethiopie (Mohammed & Feleke, 2022) ; et d'autres études encore prévoient un assèchement accru des saisons intermédiaires en Afrique orientale réduisant ainsi la production agricole (Rowhani et al., 2011).

Les résultats sur la comparaison spatiale montrent que le déficit hydrique projeté dans certaines zones comme la Plaine de l'Imbo et les Dépressions du Nord et de l'Est pourrait annuler les effets positifs de l'accumulation thermique, cela est cohérent avec le rapport du Fonds Vert pour le Climat (GCF) sur le projet SAP017 (Climate proofing food production investments in Imbo and Moso basins) exécuté par le Fonds international de développement agricole (IFAD) (Fund, 2020). La combinaison d'une hausse des températures et d'une baisse des pluies en saison B implique une réduction progressive des rendements des cultures sensibles, notamment celles cultivées pendant cette saison comme le haricot et les combinaisons Haricot-Maïs ou Haricot-Manioc, les mêmes résultats ont été obtenus en Éthiopie (Tesfaye, 2024).

En comparant avec les tendances mondiales, nos résultats montrent que le Burundi connait une évolution annuelle de la température supérieure (0,03 à 0,05 °C) à la moyenne mondiale (0.019 à 0,024 °C) (Copernicus Climate Change Service, 2025). De même, les projections mondiales pour 2021-2040, indiquent une hausse moyenne de 0,3 à 1,1 °C sous le scénario SSP2-4.5 et de 0,5 à 1,3 °C pour le scénario le plus extrême SSP5-8.5 en 2021-2040 (J.-Y. Lee et al., 2021).

En comparaison, nos résultats pour le Burundi prévoient déjà une hausse de 1,14 à 1,18°C en 2021-2040 sous SSP2-4.5, ce qui confirme une vulnérabilité accrue du pays par rapport à la moyenne mondiale (University of Notre Dame, 2022).

Ces résultats mettent en évidence la nécessite d'une implication particulière des décideurs politiques pour la mise en place des stratégies d'atténuation qui peuvent ralentir la vitesse de ce changement climatique. Afin de garantir l'efficacité des mesures d'atténuations, la considération des origines de ce changement climatique passé et prévu est d'importance capitale. En effet, il y a généralement trois origines du changement climatique :

Les causes naturelles du changement climatique (variations solaires, volcaniques, ou internes au système climatique) agissent à l'échelle planétaire, mais leurs effets diffèrent selon la position géographique. Ainsi, la latitude, l'altitude et le relief du Burundi modulent la manière dont le pays subit les variations climatiques naturelles (IPCC, 2021; MINATE, 2007), (ii) le changement climatique dû aux émissions de GES issues des activités anthropiques réalisées à l'intérieur du Burundi (TheGlobalEconomy.com, 2025) et enfin (iii) le changement climatique dû aux activités anthropiques étrangères (Tall & Dampha, 2023). A notre connaissance, pour le changement climatique dû aux phénomènes naturels, on ne peut pas agir directement sur les causes naturelles (soleil, volcanisme, cycles océaniques, etc.), ni modifier la position géographique qui module leurs effets, mais on peut s'adapter, en combinant surveillance, préparation et mesures locales de résilience (IPCC, 2001).

Pour la seconde origine, le gouvernement devrait multiplier les efforts dans les activités de reboisement, de l'agroforesterie, de la protection des forêts qui sont importants pour la réduction des émissions de GES à travers la séquestration de $CO_2$ qui est le principal GES ; les efforts devraient aussi être mis dans l'urbanisation durable, la transition bois-énergie vers les énergies renouvelables (solaires, hydro, biogaz) et il devrait intégrer le marché crédit carbone afin de transformer le statut de faible émetteur du Burundi en avantage financier.

Le gouvernement burundais devrait concentrer beaucoup d'efforts sur la troisième origine. En effet, le sixième rapport d'évaluation (AR6) du GIEC confirme que le changement climatique est presque à 100% attribué aux émissions de GES (IPCC, 2023) dont le Burundi ne contribue qu'une part inférieure à 0,02% (Tall & Dampha, 2023; TheGlobalEconomy.com, 2025), mettant en évidence que le Burundi est victime du changement climatique causé en grande partie par les pays à fortes émissions. Cela suggère que le Burundi devrait recourir aux efforts diplomatiques qui vont au-delà des accords internationaux classiques tels que la CCNUCC (Nations Unies, 1992), protocole de Kyoto (Nations Unies, 1998) et les accords de Paris (Nations Unies, 2015) qui se sont montrées jusqu'à présent inefficaces en terme d'atteindre les objectifs fixés par les

Etats signataires de ces accords. Cette inefficacité est expliquée par le phénomène économique et social *Free-Riding* (passager clandestin) généralement observé dans la gestion des biens publics et particulièrement dans la gestion du climat où les pays à fortes émissions profitent les faibles émissions des autres pays sans en payer le coût.

Le Burundi peut alors d'une part baser ses efforts diplomatiques sur la solution proposée par (Nordhaus, 2015) qui consiste à la création ou l'intégration des clubs climatiques où les pays membres imposent des tarifs douaniers sur les importations en provenance de pays non-membres pour compenser l'absence de politique climatique dans ces pays. Avec ces sanctions, les pays non membres seront contraints de respecter les accords internationaux ou convenus par les pays membres. D'autre part le Burundi peut se baser sur l'avis consultatif récemment rendu par la Cour Internationale de la Justice (CIJ) pour faire des pressions diplomatiques ou envisager des actions juridiques contre les Etats responsables des dommages environnementaux qu'il subit. En effet, la CIJ a noté que les effets néfastes du changement climatique compromettent la jouissance de certains droits humains y compris le droit à la vie et que le non-respect des obligations des Etats pour la protection du climat contre les émissions polluantes peut constituer une violation du droit international (Cour internationale de Justice, 2025).

Le recours à ces deux possibilités : Clubs Climatiques et Avis consultatif de la CIJ nécessite certaines conditions pour qu'elles puissent être efficaces. Pour la création ou l'intégration des clubs climatiques, le Burundi doit éviter l'exclusion de ses produits aux marchés internationaux. En effet, la chaine de production des produits respectueux des normes climatiques internationales nécessite des fortes capacités financières, technologiques et institutionnelles que les pays en voie de développement ne possèdent pas. Ainsi l'atténuation du changement climatique devient nuisible au commerce international pour ces pays (Haddad et al., 2024; UNCTAD, 2006). Pour l'Avis consultatif de la CIJ, le Burundi doit investir dans la recherche liée aux méthodes quantitatives pouvant quantifier les liens de cause à effet entre le non-respect des obligations des Etats pollueurs et les dommages (pertes agricoles, d'infrastructures, etc.) qu'il subit, sinon, il sera impossible de formuler des arguments fondés sur l'avis consultatif de la CIJ pour faire des pressions diplomatiques aux Etats pollueurs.

### IV.5.2. Discussion des résultats du second objectif

Le deuxième objectif de cette étude était d'estimer la relation statistique entre le climat et l'agriculture des huit cultures principales, nous avons modélisé à la fois l'effet du climat sur le choix d'une culture à cultiver parmi les huit et ensuite la relation de ce climat et le revenu de la culture choisie. Dans cette sous-section, nous présentons la discussion des résultats trouvés pour ces deux relations.

*i. Discussion sur les résultats de la modélisation de la relation Climat-choix culture*

Concernant la manière dont le climat influence le choix d'culture à cultiver par les agriculteurs afin de s'adapter au climat, les résultats montrent qu'en général le nombre de degré-jour augmente significativement la probabilité de cultiver toutes les cultures étudiées au moins dans une région sauf pour le haricot. Pour le maïs et le manioc cela s'aligne avec les résultats trouvés au Ghana montrant que l'accumulation de la chaleur augmente leurs probabilités d'être choisis (Etwire et al., 2019), cela s'aligne également aux connaissances agronomiques que le maïs et le manioc supporte des températures élevées que le haricot (FAO, 2025) prouvant également le fait que le manioc possède un système racinaire étendu qui le protège de la sécheresse (Dziedzoave et al., 2006).

Cependant, nos résultats sur le riz divergent avec ceux de (Etwire et al., 2019) qui montrent que le choix du riz est invariant avec la température. En revanche, les résultats de (N. Seo & Mendelsohn, 2007) s'alignent avec les nôtres concernant l'effet positif de la température sur le choix du riz dans les régions Plaine de l'Imbo et Plateau centrale. Pour la combinaison haricot-maïs, l'effet négatif obtenu dans le Plateau centrale converge avec les résultats d'une étude réalisée dans les 11 pays d'Afrique (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008) mais diverge avec l'effet positif de la chaleur sur haricot-maïs qu'on a trouvé dans les autres régions.

Les résultats montrent également que les sols de fertilité moyenne par rapport à ceux de fertilité élevée réduisent les probabilités de choisir les cultures étudiées (haricot-maïs, maïs, manioc, patates douces, riz), cela a été constaté dans d'autres études utilisant l'approche ricardienne au Nigeria et au Ghana (Coster & Adeoti, 2015; Etwire et al., 2019). Tandis que la fertilité moyenne augmente la probabilité de cultiver le haricot-manioc et le haricot. Pour le haricot, cela s'explique par la capacité des haricots à s'adapter dans des sols moyennement et faiblement fertile grâce à ses feuilles qui ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique ce qui n'est pas le cas pour les autres cultures qui nous intéressent dans la présente étude (Coster & Adeoti, 2015). Pour le haricot-manioc, les recherches ont mis en évidence que l'association du manioc avec des légumineuses est généralement bénéfique pour les rendements (Dettweiler et al., 2023).

Ces résultats suggèrent que pour la plupart des cultures, les interventions visant à faciliter l'accès aux engrais inorganiques sont nécessaires pour la diversification culturale et la résilience de l'agriculture burundaise.

*ii. Discussion des résultats de la modélisation de la relation climat-revenu*

Notre deuxième discussion porte sur les résultats sur la relation du climat actuel et le revenu net agricole par hectare qui tient compte d'autres facteurs explicatif de ce revenu. Ces résultats montrent que le nombre de degré-jour influence linéairement et positivement la combinaison haricot-manioc et le riz, cet effet linéaire du nombre de degrés-jour pendant la saison de croissance est également obtenu dans une étude réalisée en Chine (Yu et al., 2022), ce qui montre que l'augmentation progressive de la chaleur disponible peut constituer un facteur déterminant de la productivité agricole lorsque les conditions hydriques sont réunies.

Les résultats montrent un effet négatif significatif de la superficie récoltée pour toutes les cultures, ce résultat n'est pas surprenant car il a été trouvé au Burundi dans un cadre du modèle ricardien classique (Ntagahoraho & Kamgnia, 2023) et au Nigeria (Coster & Adeoti, 2015) et dans une étude réalisée dans les 11 pays d'Afrique (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008). Cela montre que la stratégie d'augmenter la superficie à cultiver n'est pas suffisante bien qu'il peut être nécessaire pour atteindre un certain niveau de la productivité. En effet, l'augmentation de superficie doit-être accompagnée avec une intensification d'intrants agricoles ce qui est facile à réaliser pour les petites exploitations où l'intensification du travail familial et autres intrants accroit la productivité.

L'effet positif de la quantité de semence se manifeste uniquement pour le maïs et le manioc, tandis que pour les autres cultures, l'effet, bien que positif, n'est pas statistiquement significatif. Ce résultat rejoint les observations de la littérature empirique, qui soulignent que l'impact de la quantité de semence dépend étroitement de sa qualité (Devi et al., 2022; Ngendakumana et al., 2025). Dans notre contexte, cette explication se confirme : l'analyse descriptive montre que seules 5,9 % des parcelles reçoivent des semences améliorées, limitant ainsi la capacité de la quantité de semence à influencer significativement le revenu net des autres cultures. En revanche, pour le maïs, l'effet apparaît positif et significatif, probablement en raison de l'adoption plus élevée de semences hybrides (11,34 %), soit près du double du taux moyen observé pour l'ensemble des cultures étudiées.

Pour le manioc, nos résultats sont cohérents avec ceux obtenus par l'étude de (Nishemezwe, 2024) qui montrent que les semences locales du manioc sont légèrement plus productifs que les semences améliorées expliquant ainsi pourquoi dans notre étude l'augmentation de la quantité de semences pour le manioc influence positivement le revenu net agricole par hectare. Nos résultats suggèrent que pour les cultures autres que le manioc, l'intensification de la production pourrait nécessiter non seulement une augmentation de la quantité de semence, mais aussi un accès plus large aux semences améliorées qui sont souvent de bonne qualité.

Nos résultats indiquent des effets positifs et significatifs supposés a priori du travail sur les haricots, les systèmes associant haricot et maïs/manioc, ainsi que sur le maïs, sont cohérents avec les résultats obtenus par (Cobbinah et al., 2023) au Ghana qui montre que les cultures saisonnières sensibles au calendrier cultural tirent un avantage direct d'un apport de travail additionnel, une étude également réalisée au Malawi confirme l'effet positif du travail sur les maïs (Komarek et al., 2018). À l'inverse, l'effet négatif et significatif observé pour le manioc peut s'expliquer par la longue durée et la moindre intensité opérationnelle du manioc qui réduit l'impact immédiat du travail additionnel.

Les résultats montrent aussi que la fumure organique impacte positivement et significativement le revenu net agricole, cela est cohérent avec les résultats d'une étude réalisée au Burundi (Ntagahoraho & Kamgnia, 2023) et au Myanmar (Oo et al., 2020), cela suggère qu'il faut comme moyen d'adaptation au changement climatique, faciliter les ménages agricoles burundais à accéder au fumure surtout en leur facilitant de pratiquer l'élevage des animaux domestiques qui sont à l'origine de cette fumure.

Nos résultats concernant les engrais chimiques, montrent qu'ils ont un effet positif sur les haricots et haricots-manioc, ces résultats s'alignent avec ceux trouvés par d'autres auteurs (Kaizzi et al., 2018), cependant nos résultats montrent aussi que pour la plupart des cultures le revenu net agricole reste insensible aux engrais inorganiques et cela est en accord avec d'autres études (Ragasa et al., 2025; Ricker-Gilbert et al., 2024), les auteurs justifient cette non sensibilité du revenu net par le fait que la rentabilité des engrais chimiques est faible relativement à leur coût. Les résultats montrent que toutes les cultures sont sensibles à la fertilité des sols sauf pour le maïs et le manioc, cela suggère que les pratiques agricoles de conservation de fertilité du sol et les techniques de correction du sol en cas de faible fertilité constituent les méthodes de résilience des terres agricole.

Comme on l'anticipait, les résultats montrent que l'âge du chef de ménage impacte positivement le revenu net agricole, en réalité l'âge capte une grande part de l'expérience de l'agriculteur (Tshikororo, Baloyi, et al., 2024) et une étude utilisant l'approche structurelle ricardien réalisée au Ghana confirme cet effet de l'âge sur le revenu net agricole (Etwire et al., 2019), cet impact est structurel car n'influence pas directement le revenu mais plutôt la prise de décisions stratégiques comme l'allocation des intrants optimal et d'autres pratiques agricoles qui maximisent le revenu. Ce qui suggèrent l'importance de partager les expériences agricoles entre les agriculteurs expérimentés et non expérimentés ou à travers des formations (Tshikororo, Tshikororo, et al., 2024) dans l'objectif de bâtir un système agricole robuste aux effets négatifs du changement climatique.

Les revenus hors agricoles ont un effet sur la productivité du riz, cela montre que pour cette culture les transferts monétaires pourraient la rendre plus résiliente au changement climatique (Harmini et al., 2022). Pour le riz encore, concernant les désavantages structurels liées au genre, nos résultats montrent qu'il y a un écart de 55,2% *ceteris paribus* en faveur des ménages dont les chefs sont des hommes par rapport à ceux dirigés par les femmes, cela est cohérent avec une étude réalisée au Nigeria utilisant l'approche de décomposition d' Oaxaca-blinder qui est une méthode plus adéquate à détecter ce type d'écart trouve un écart de 29% en faveur des hommes (Ojo & Baiyegunhi, 2023), un écart de 20.18% a été estimé au Mali (Singbo et al., 2021).

Vu que nos résultats descriptifs montrent que la mode de gestion des parcelles est plus collective qu'individuelle, nous avons évalué si les désavantages structurels liés au genre se prononce toujours au sein de la collectivité gestionnaire de la parcelle et nos résultats révèlent qu'une unité ratio femme-homme additionnelle (c'est à dire plus de femmes que les hommes) dans le ménage entraine une baisse de 4,7% du revenu net par hectare. La littérature empirique montre que cet écart est expliqué par le fait que les femmes ont souvent moins accès à la terre, au crédit, aux semences améliorées et aux engrais, aux informations que les hommes, et par les contraintes sociales et domestiques qui limitent l'efficacité économique des contributions féminines.

Concernant l'effet de la possession du téléphone mobile par le chef de ménage, les résultats montrent que pour le maïs les chefs des ménages possédant un téléphone ont en moyenne un revenu net par hectare supérieur d'environ de 38% à ceux qui n'en possède pas. Pour les bananes, l'écart est presque 28%. Ces résultats s'alignent avec d'autres études (Aker, 2010; Houghton, 2009; Muto, 2009). Le mécanisme de l'impact de la possession du téléphone mobile est expliqué par ces auteurs par le fait que le téléphone mobile permet les agriculteurs d'accéder à l'information sur les prix des marchés, améliorant ainsi l'efficience des échanges, l'étude de (Quandt et al., 2020) en Tanzanie montre l'effet positif sur la productivité des maïs, montre également que le téléphone est perçu par les agriculteurs comme un outil qui augmente les profits, réduit les coûts et le temps consacrés aux tâches agricoles. Nos résultats suggèrent donc qu'il existe des opportunités pour orienter les interventions politiques vers une utilisation accrue du téléphone pour les activités agricoles, de manière à faciliter l'accès à des informations opportunes et exploitables afin de soutenir la prise de décision des agriculteurs.

### IV.5.3. Discussion des résultats du troisième objectif

Le troisième objectif est de simuler les impacts du changement climatique à la fois sur le choix des agriculteurs et sur le revenu net par hectare de la culture choisie par les agriculteurs.

*i. Discussion des simulations de l'impact du changement climatique sur le choix d'une culture à cultiver*

Comme les simulations l'ont illustré, les impacts du changement climatique sur le choix d'une culture par les agriculteurs sont hétérogènes. En effet, le changement climatique prévu à l'avenir proche en général fera que les agriculteurs renoncent aux haricots, banane, patates douces et le riz au profit du haricot-manioc, haricot-maïs, manioc et le maïs. L'impact négatif sur le choix de manioc dans la Plaine de l'Imbo, sur le maïs et haricot-maïs dans les Dépressions Nord/Est et sur le riz dans ces deux régions s'alignent avec les résultats obtenus par une étude réalisée au Ghana (Etwire et al., 2019) et une autre étude réalisée dans les 11 pays d'Afrique et au Taiwan (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008; Luh & Chang, 2021). L'effet positif sur le choix de maïs trouvé dans toutes les régions sauf dans les Dépressions Nord/Est est cohérent avec le résultat obtenu en Amérique Latine (N. Seo & Mendelsohn, 2007).

*ii. Discussion sur les simulations de l'impact du changement climatique sur le revenu de la culture choisie*

Nos résultats sur les simulations de l'impact du changement climatique sur le revenu net du haricot montrent qu'à l'avenir proche (2021-2040), cet impact sera positif dans la région de la Crête Congo-Nil et des Dépressions Nord/Est, faiblement positif dans le Mumirwa et négatif dans la Plaine de l'Imbo et le Plateau centrale.

A l'avenir moyen terme (2041-2060), cette distribution régionale de l'impact ne changera pas à l'exception de la région Dépressions Nord/Est qui deviendra négatif selon le scenario à fortes émissions SSP5-8.5. Cependant, pour les régions résilientes, la résilience se détériore significativement sauf la Crête Congo-Nil dont la résilience s'améliore de plus en plus et la vulnérabilité augmente pour les régions déjà vulnérables. Au niveau national, l'impact est faiblement positif en 2021-2040 et deviendra négatif à l'horizon 2041-2060. Cet impact négatif au niveau national est justifié surtout par la grande vulnérabilité du Plateau centrale qui est la plus grande région en terme de superficie et que cette dernière est la variable de pondération utilisée pour calculer l'impact moyen national. Cette hétérogénéité régionale de l'impact du changement climatique sur le haricot est cohérente avec les résultats trouvés en Tanzanie et au Rwanda (Hunter et al., 2020; Sanga et al., 2014).

En se basant sur les coefficients des modèles utilisés pour estimer les impacts, nous pouvons identifier la variable climatique qui fait que l'impact du changement climatique sur le haricot soit positif ou négatif dans une région donnée et cela est utile pour la planification des interventions adaptation au changement climatique.

L'impact négatif estimé dans la Plaine de l'Imbo et le Plateau centrale est expliqué par un effet négatif de la température que l'effet positif du terme linéaire des précipitations n'arrive pas à compenser, le coefficient négatif du terme quadratique des précipitations contribue également à la vulnérabilité de ces régions. La région Dépressions Nord/Est étant dans la même situation que ces régions, l'impact est positif grâce à l'effet positif du terme linéaire des précipitations qui compense les effets négatifs du réchauffement et du terme quadratique des précipitations. Bien que le réchauffement a un effet négatif dans la région de Mumirwa, l'impact global est positif parce que ce réchauffement n'atteigne pas le seuil de réchauffement nuisible probablement grâce aux bonnes conditions initiales d'humidité ou une hausse des précipitations prévue dans cette région. Enfin, l'effet du réchauffement est positif et le réchauffement prévu rend l'impact global positif dans la région de la Crête Congo-Nil.

Pour le haricot-maïs, à l'avenir proche (2021-2040) l'impact du changement climatique est positif dans toutes les régions sauf dans le Plateau centrale, tandis qu'à l'horizon 2041-2060 il ne sera positif qu'à la Plaine de l'Imbo et au Mumirwa avec une résilience qui s'améliore de plus en plus. Les autres régions deviendront de plus en plus vulnérable. Au niveau national comme aux régions, l'impact est positif mais deviendra négatif pour 2041-2060.

L'impact négatif sur le haricot-maïs dû à l'effet négatif du réchauffement est également trouvé et justifié dans l'étude réalisée en Europe qui montre que le stress hydrique renforce la compétition entre le maïs et le haricot dans le sens où le premier devient compétitif grâce à ses racines profondes et sa croissance rapide et le haricot dans ces conditions devient vulnérable à cause de ses racines superficielles et sa croissance lente (Jasinskas, 2024; Vazeux-blumental et al., 2025). Ces études suggèrent qu'il faut un changement des pratiques agricoles pour garder la performance de ce système notamment la date de semis de chacune de ces deux cultures, le choix de la saison adéquate à ce système suite au changement climatique, l'adoption d'une variété de maïs tolérante à la sécheresse.

Les simulations de l'impact du changement climatique sur le système haricot-manioc montre qu'à l'avenir proche 2021-2040 la combinaison haricot-manioc sera résiliente dans toutes les régions sauf dans le Plateau centrale, à l'horizon 2041-2060 les Dépressions Nord/Est pour tous les scenarii et Plaine de l'Imbo pour le scenario a fortes émissions (SSP5-8.5), l'impact deviendra négatif, tandis que la résilience se renforcera dans les autres régions et deviendra positif dans le Plateau centrale. L'impact moyen national sera positif pour tous les horizons et scenarii, et la résilience s'améliorera avec le réchauffement. Bien qu'à la limite de nos recherches on n'a pas trouvé une étude qui évalue l'impact du changement climatique sur le système haricot-manioc, nos résultats s'alignent avec les résultats d'une étude réalisée dans la région Jinka en Ethiopie qui

montre que la combinaison haricot-manioc résiste à la sécheresse et performe mieux que les autres combinaisons de manioc et d'autres légumineuses (Gezahegn et al., 2022).

En se basant sur les coefficients, nous identifions l'excès de pluie source d'inondations comme la cause principale de l'impact négatif dans la Plaine de l'Imbo et le réchauffement comme cause dans les Dépressions Nord/Est. L'impact positif estimé dans les autres régions vient de l'effet positif de l'accumulation de la chaleur par cette combinaison, sauf dans la Crête Congo-Nil où l'effet positif vient de l'effet du terme quadratique des précipitations. Ces résultats suggèrent qu'il faut promouvoir le système haricot-manioc dans les régions où il est résilient. Pour les régions vulnérables, nous suggérons la gestion du problème d'inondations dans la Plaine de l'Imbo, tandis que pour les Dépressions Nord/Est le recours à l'irrigation et aux variétés tolérantes à la sécheresse seraient les bonnes stratégies d'adaptation.

Nos résultats relatifs aux simulations de l'impact du changement climatique sur le maïs montrent qu'à l'avenir proche (2021-2040) certaines régions comme la Crête Congo-Nil, les Dépressions Nord/Est et Plateau central pour le scenario à fortes émissions SSP5-8.5 seront vulnérables, tandis que la Plaine de l'Imbo, Mumirwa et le Plateau centrale uniquement pour le scenario à émissions modérées seront résilientes. A l'horizon 2041-2060, la résilience se renforcera dans les régions qui le seront en 2021-2040, mais également dans les Dépressions Nord/Est l'impact deviendra positif à cette période. En revanche, la Crête Congo-Nil deviendra de plus en plus vulnérable et le Plateau centrale connaitra une légère détérioration de sa résilience. Au niveau national, de l'avenir proche à moyen terme la culture deviendra de plus en plus vulnérable. Cette hétérogénéité régionale de l'impact du changement climatique et l'impact national négatif s'alignent avec plusieurs études réalisées au Rwanda (Hunter et al., 2020), Ghana (Etwire et al., 2019), dans les 11 pays africains (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008).

L'analyse des coefficients des modèles utilisés pour la simulation de l'impact du changement climatique montre que l'impact global est positif dans la Plaine de l'Imbo et Mumirwa grâce à l'effet positif du réchauffement qui domine l'effet combiné (linéaire et quadratique) de précipitations tandis que l'effet positif de l'accumulation de la chaleur par le maïs est dominé par l'effet combiné des précipitations dans les Dépressions Nord/Est, cela explique pourquoi ces régions en 2041-2060 deviendront de plus en plus résilientes suite à une hausse de la température et le maïs est à promouvoir dans ces régions. Dans le Plateau centrale, le drainage et la gestion de l'excès de l'eau sont nécessaires pour rendre résilient le maïs. Dans la Crête Congo-Nil, le signe négatif de la chaleur s'explique probablement par la faible fertilité des sols de cette région, variable omise du modèle, alors que le maïs est connu pour nécessiter des sols particulièrement fertiles (Coster & Adeoti, 2015; Etwire et al., 2019). Ce résultat suggère qu'il faut utiliser les

techniques d'amélioration et de conservation du sol comme l'application de dolomie (Kaboneka et al., 2024), le paillage, l'agroforesterie, etc.

Pour le manioc, les simulations montrent qu'en 2021-2040, l'impact du changement climatique sera négatif dans toutes les régions sauf dans le Mumirwa. En revanche, à l'horizon 2041-2060 on observera un basculement de l'impact. En effet, l'impact deviendra positif dans toutes les régions sauf dans la Plaine de l'Imbo. Au niveau national, l'impact sera neutre mais à tendance positif pour l'avenir proche (2021-2040) mais deviendra nettement positif à l'horizon 2041-2060.

Ces résultats s'alignent avec ceux de l'étude réalisée sur les pays africains montrant que le manioc sera compatible avec le changement climatique prévu en Afrique (Jarvis et al., 2012), s'alignent également avec les résultats trouvés au Rwanda (Hunter et al., 2020) et en Ouganda (Babyenda & Kabubo-mariara, 2023). L'impact négatif simulé dans la Plaine de l'Imbo s'aligne avec le résultat obtenu au Nigeria (Ajala & Ajetomobi, 2013). La résilience du manioc face au changement climatique constatée dans la plupart d'études est expliqué par ses caractéristiques biologiques et physiologiques (El-sharkawy, 2004).

L'examen des coefficients des modèles estimés dans les régions montre que l'irrigation, le paillage, l'agroforesterie et d'autres stratégies permettant de garder l'humidité sont à mettre en œuvre dans la Plaine de l'Imbo et Dépressions Nord/Est. En effet, pour la Plaine de l'Imbo l'impact négatif global sur le manioc vient de l'effet négatif de la chaleur, tandis que pour les Dépressions Nord/Est la chaleur a un effet positif sur le manioc mais cet effet n'arrive pas à compenser l'effet négatif du stress hydrique. Cependant, la hausse de précipitations prévue dans cette région fait que l'impact global deviendra positif à l'horizon 2041-2060. Pour le Plateau centrale en période 2021-2040, nous suggérons, le drainage, l'évacuation des excès d'eau ou la gestion de l'infiltration pour rendre positif l'impact global qui est négatif à cause de l'effet quadratique négatif des précipitations, néanmoins, cet effet négatif est compensé par l'effet positif de la chaleur en 2041-2060. A cet horizon, le manioc est la culture à promouvoir face au changement climatique.

Les simulations de l'impact du changement climatique sur le riz révèlent que cette culture sera vulnérable dans toutes les régions à l'avenir proche (2021-2040) et à l'horizon 2041-2060 pour le scenario SSP2-4.5. En revanche, l'impact deviendra positif pour toutes les régions à cet horizon pour le scenario à fortes émissions SSP5-8.5. Au niveau national, l'impact moyen sera négatif sauf pour le scenario SSP5-8.5 de 2041-2060. Cette vulnérabilité du riz constatée dans nos simulations est cohérente avec les résultats obtenus dans une étude couvrant quatre pays de l'Afrique de l'Ouest (Benin, Togo, Cote d'Ivoire et Ghana) (Arouna et al., 2015) et en Taiwan (Luh & Chang, 2021).

En comparant les coefficients des modèles régionaux utilisés pour simuler l'impact du changement climatique sur le riz, nous constatons que dans toutes régions l'accumulation de la chaleur a un effet positif sur le riz. Cependant, l'excès ou la mauvaise répartition des précipitations (effet combiné linéaire et quadratique) anéanti l'effet positif de la chaleur. Les mesures d'adaptation doivent donc réduire l'effet négatif de la pluie par drainage, stockage temporaire et sélection de variétés adaptées, pour que l'effet positif de la chaleur puisse se concrétiser.

Concernant la banane, les simulations révèlent qu'en générale pour l'avenir proche et moyen terme, l'impact du changement climatique sur cette culture est négatif dans toutes les régions sauf dans le Mumirwa, nous constatons également qu'à l'horizon 2041-2060, la résilience s'améliorera au Mumirwa et la vulnérabilité s'atténuera de plus en plus dans les régions vulnérables, il deviendra par exemple positif dans les Dépressions Nord/Est pour le scenario à fortes émissions. Cette baisse de vulnérabilité restera inchangée au niveau national malgré qu'en moyenne l'impact du changement climatique sera négatif sur la banane quel que soit la période et le scenario. Cette baisse de vulnérabilité avec le réchauffement climatique s'aligne avec celui trouvé dans une étude réalisée en Ouganda (Sabiti et al., 2018) mais également avec l'étude réalisée pour les pays tropicales (FAO, 2015). Cependant, dans ces études, l'impact du changement climatique est positif sur la banane, l'impact négatif trouvé dans le présent travail peut être dû aux ravageurs et maladies qui influencent négativement la productivité (Okonya et al., 2019).

En se basant sur les coefficients des modèles structurels ricardiens estimés dans chaque région, nous constatons que pour le Mumirwa, l'effet positif de l'accumulation de chaleur domine l'effet combiné (linéaire et quadratique) des précipitations ce qui rend positif l'impact global du changement climatique dans cette région pour la banane. En revanche, l'effet positif de la chaleur est dominé par l'effet combiné (linéaire et quadratique) négatif des précipitations, ce qui explique l'impact négatif du changement climatique sur la banane dans le Plateau centrale et les Dépressions Nord/Est. Dans ces deux régions, l'effet linéaire des précipitations est négatif mais l'effet quadratique est négatif dans le Plateau centrale et positif dans les Dépressions Nord/Est.

Ces résultats suggèrent que pour le Plateau centrale, la gestion de l'excès de l'eau et le drainage sont des solutions adéquates pour rendre positif l'impact du changement climatique sur la banane, en effet, la variabilité hydrique (déficit ou excès) pénalise systématiquement la rentabilité de la Banane à cause de l'effet négatif à la fois du terme linéaire et quadratique. Pour les Dépressions Nord/Est, l'effet positif du terme quadratique suggère que l'irrigation jusqu'à un certain point peut rendre positif l'impact du changement climatique sur la banane, une autre stratégie

d'adaptation est de déterminer une date de semis qui favorise une grande accumulation de la chaleur.

Pour les patates douces, nos simulations montrent que les régions résilientes en 2021-2040 le seront de plus en plus à l'horizon 2041-2060 et celles qui sont vulnérables le seront de plus en plus. Mumirwa et Dépressions Nord/Est sont les régions dans lesquelles les patates douces restent résilientes face au changement climatique et bien que l'impact Crête Congo-Nil sera neutre à tendance positif, il devindra négatif comme dans le Plateau centrale. A l'échelle national, les résultats du calcul de l'impact moyen montrent que les patates douces sont résilientes pour toutes les périodes et scenarii. Ce résultat est cohérent avec les résultats trouvés au Rwanda (Hunter et al., 2020).

L'analyse des coefficients des modèles utilisés pour simuler l'impact du changement climatique sur les patates douces indiquent que le réchauffement a un effet positif sur les patates douces dans toutes les régions à l'exception de la Crête Congo-Nil. Cependant, l'effet combiné des précipitations annule le petit effet positif de la chaleur dans le Plateau centrale. A l'avenir proche 2021-2040, à la Crête Congo-Nil l'effet positif combiné (linéaire et quadratique) des précipitations compense l'effet négatif du réchauffement d'où l'impact global sur les patates douces est positif dans cette région. Cependant, à l'horizon 2041-2060 les précipitations ne compensent pas l'effet négatif de la chaleur. Cet effet négatif de la chaleur dans une région initialement froide est contre-intuitif, il est dû probablement par d'autres facteurs non observés dans le modèle comme la faible capacité des sols de la Crête Congo-Nil à retenir l'eau, la fertilité du sol, et la situation du marché qui attire les agriculteurs à renoncer aux patates douces.

Pour le Mumirwa et les Dépressions Nord/Est, l'effet positif de la chaleur croisé avec l'effet combine des précipitations donne un impact global nettement positif sur les patates douces. Ce résultat suggère que cette culture est à promouvoir dans ces régions. Pour rendre le Plateau centrale résilient, les résultats suggèrent le drainage ou une autre stratégie de gestion de l'excès d'eau. Pour la Crête Congo-Nil, l'application de dolomie, les méthodes améliorant la rétention d'eau et la valorisation economique à travers la transformation peuvent rendre cette région résiliente.

En agrégeant les simulations par région, nos résultats montrent que les régions initialement chaudes comme la Plaine de l'Imbo ou plus ou moins chaudes comme le Plateau centrale sont celles qui seront vulnérables alors que celles initialement froides comme Mumirwa et Crête Congo-Nil seront résilientes.

# CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE, RECOMMANDATIONS ET LIMITES

## V.1. Conclusion générale

Sachant que le changement climatique n'affecte pas de même manière les cultures et les régions dont les conditions climatiques initiales diffèrent, le présent travail avait pour objectif d'évaluer l'impact économique du changement climatique sur les 8 principales cultures/combinaison de cultures (Haricot, Haricot-Maïs, Haricot-Manioc, Maïs, Manioc, Riz, Banane, Patates douces) à travers toutes les régions agroclimatiques du Burundi (Plaine de l'Imbo, Mumirwa, Crête Congo-Nil, Plateau centrale, Dépressions Nord/Est). Les résultats de cette étude confirment globalement les trois hypothèses sous-jacentes.

Premièrement, l'analyse historique et les projections climatiques démontrent qu'il y a déjà eu un changement climatique significatif au Burundi et qu'il se poursuivra dans les décennies à venir. En effet, les températures ont augmenté d'environ +1,2 °C entre 1975-1990 et la période de référence 1991–2019, et elles continueront d'augmenter de +1,15 à +2,81 °C en 2041-2060 selon les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Cette hausse s'accompagne d'une légère augmentation moyenne des précipitations, mais avec une accentuation des sécheresses saisonnières, notamment pendant la saison agricole B. Ces résultats confirment donc la validité de l'hypothèse 1, à savoir l'existence d'un changement climatique passé et futur au Burundi.

Deuxièmement, les modèles économétriques montrent que l'effet du climat sur l'agriculture burundaise est hétérogène selon les cultures et les régions agroclimatiques, validant ainsi l'hypothèse 2. Les degrés-jours exercent un effet positif sur la probabilité de choix des principales cultures, sauf pour le haricot, tandis que les précipitations présentent des effets non linéaires avec des seuils optimaux différents selon les cultures. L'effet des intrants, du travail, de la fertilité du sol et des caractéristiques socio-économiques met également en évidence des disparités structurelles selon les cultures.

Enfin, les simulations de choix futurs des agriculteurs sous différents scénarios climatiques montrent que les producteurs adapteront progressivement leurs stratégies culturales face au réchauffement. À l'horizon 2041-2060, on observe une réorientation vers les cultures plus résilientes au changement climatique prévu, comme le manioc et haricot-manioc, au détriment des cultures plus sensibles telles que le haricot, la patate douce ou le riz. Ces changements montrent que les agriculteurs burundais adaptent le choix de cultures en fonction du climat à l'exception du système haricot-maïs qui sera choisie à tort et aux patates douces qui ne seront pas choisies alors qu'elles seront résilientes probablement par sa faible rentabilité économique.

Les simulations des impacts sur le revenu net confirment également que les impacts projetés demeurent hétérogènes selon les cultures et les zones. Le haricot sera résilient dans la Crête Congo-Nil, mais vulnérable dans les autres régions. Le système haricot-maïs en 2021-2040 sera plus résilient dans toutes les régions sauf au Plateau centrale, mais en 2041-2060 deviendra vulnérable sauf dans la Plaine de l'Imbo et le Mumirwa. En revanche, le haricot-manioc montre une bonne résilience dans la Crête Congo-Nil, le Mumirwa et le Plateau central, confirmant sa capacité d'adaptation à la chaleur et à la variabilité pluviométrique. Le maïs reste plus stable dans les Dépressions Nord/Est et la Plaine de l'Imbo, mais devient vulnérable dans la Crête Congo-Nil, tandis que le manioc conserve une large résilience sur l'ensemble du territoire, notamment dans le Mumirwa, la Crête Congo-Nil et le Plateau central, avec une fragilité limitée à la Plaine de l'Imbo.

Le riz, initialement vulnérable sur la période 2021-2040, tend à devenir résilient dans toutes les régions à l'horizon 2041-2060 sous le scénario SSP5-8.5, traduisant une meilleure adaptation aux régimes pluviométriques futurs. La banane maintient sa résilience dans le Mumirwa, mais se fragilise dans le Plateau central et les Dépressions Nord/Est, tandis que les patates douces apparaissent résilientes dans le Mumirwa et les Dépressions Nord/Est, mais vulnérables dans la Crête Congo-Nil et le Plateau central.

De manière générale, les zones de haute altitude (Crête Congo-Nil, Mumirwa) conservent une meilleure capacité d'adaptation grâce à des températures plus modérées, alors que les zones basses (Plaine de l'Imbo et Dépressions Nord/Est) subiront davantage les effets négatifs de la chaleur, sauf pour les cultures thermophiles comme le maïs et la patate douce.

Ces résultats traduisent la complexité des interactions climat-agriculture et confirment la nécessité d'adopter des politiques d'adaptation différenciées selon les zones et les cultures.

### V.2. Recommandations

Sur la base des résultats obtenus dans chacun des objectifs de cette étude, nous formulons les recommandations suivantes.

- **Recommandations pour le premier objectif :**

- Remplacer les fours à charbon et des fours domestiques traditionnels par des fours améliorés qui émettent moins des GES ;
- Mobiliser les fonds climats au niveau national et régionale pour financer la recherche, les activités et les programmes d'atténuation du changement climatique ;
- Intégrer le marché crédit carbone afin de transformer le statut de faible émetteur du Burundi en avantage financier.

- **Recommandations pour le second objectif :**

- Renforcer la capacité de production locale de semences, faciliter l'importation de semences lorsque nécessaire, et mettre en place un système pour enregistrer, former et accréditer les agro-commerçants afin de garantir une distribution efficace et de qualité aux exploitants agricoles ;
- Renforcer la formation et la transmission intergénérationnelle des connaissances agricoles ;
- Mettre en place les politiques qui facilitent l'utilisation accrue du téléphone mobile par les agriculteurs afin de faciliter l'accès à l'information opportune et exploitables.

- **Recommandations pour le troisième objectif :**

- Mettre en place une carte biogéographique des cultures guidant les agriculteurs à bien mener leur choix de culture à cultiver ;
- Mener des recherches relatives à conception des variétés résilientes au changement climatique ;
- Mobiliser les fonds pour financer la recherche et les programmes visant à développer la résilience de l'agriculture burundaise.

### V.3. Limites et perspectives

Cette étude présente des limites méthodologiques qui ouvrent la voie à des recherches futures.

Premièrement, l'étude couvre seulement les 8 principales cultures, d'autres études pourraient étendre à d'autres cultures qui ne sont pas prise en compte ici. Par ailleurs, une étude sur l'élevage l'arboriculture serait nécessaire pour approfondir la compréhension de l'impact du changement climatique sur les conditions de vie des ménages ruraux. Deuxièmement, l'interpolation climatique s'est limitée aux variables géographiques de base (altitude, latitude), sans intégrer d'autres facteurs tels que l'orientation du relief, la végétation ou les types de sols, ce qui a pu réduire la précision spatiale des estimations. Troisièmement, l'utilisation de projections multi-modèles agrégées a conduit à des simulations centrées sur une tendance moyenne de hausse des précipitations, masquant la variabilité inter-modèle. De futures recherches devraient donc distinguer les modèles prévoyant une hausse et ceux anticipant une baisse des précipitations.

Sur le plan économétrique, les modèles de choix de culture et de revenu n'ont pas pris en compte les interactions entre variables climatiques, ni les stratégies multiples d'adaptation des agriculteurs (comme les associations culturales, la migration saisonnière, etc.). L'usage de données de panel permettrait d'améliorer la robustesse des estimations en contrôlant les effets fixes temporels et spatiaux. De plus, les effets du $CO_2$, des ravageurs, des maladies et des politiques agroclimatiques n'ont pas été intégrés, alors qu'ils peuvent influencer significativement la productivité. Enfin, les simulations menées à une échelle régionale pourraient être affinées à l'avenir par des analyses au niveau des collines, afin de concevoir des politiques d'adaptation localisées et d'appui technique spécifique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abadie, A., Athey, S., Imbens, G. W., & Wooldridge, J. M. (2019). *Sampling-based vs . Design-based Uncertainty in Regression Analysis ∗ arXiv : 1706 . 01778v2 [ math . ST ] 21 Jun 2019*.

Abadie, A., Athey, S., Imbens, G. W., & Wooldridge, J. M. (2023). When Should You Adjust Standard Errors for Clustering? *Quarterly Journal of Economics*, *138*(1), 1–35. https://doi.org/10.1093/qje/qjac038

Abidoye, B. O., Kurukulasuriya, P., Reed, B., & Mendelsohn, R. (2017). Structural ricardian analysis of south-east asian agriculture. *Climate Change Economics*, *8*(3), 1–17. https://doi.org/10.1142/S201000781740005X

Adams, R. M., Rosenzweig, C., Peart, R. M., Ritchie, J. T., McCarl, B. A., Glyer, J. D., Curry, R. B., Jones, J. W., Boote, K. J., & Allen, L. H. (1990). Global climate change and US agriculture. *Nature*, *345*(6272), 219–224. https://doi.org/10.1201/9781420077544.ch16

Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C. R. J. (2001). Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*, *88*(5), 869–877. https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1524

Adil, I. H., & Irshad, A. U. R. (2015). A modified approach for detection of outliers. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, *11*(1), 91–102. https://doi.org/10.18187/pjsor.v11i1.500

African Development Bank. (2013). *Watershed Management and Climate Resilience Improvement Project (PABVARC) – Project Appraisal Report*. https://www.afdb.org/sites/default/files/documents/projects-and-operations/burundi_-_watershed_management_and_climate_resilience_improvement_project_pabvarc_-_project_appraisal_report.pdf

African Development Bank. (2018). *National Climate Change Profile: Burundi* (Issue October). https://www.afdb.org/en/documents/document/national-climate-change-profile-burundi-108311

Aguinis, H., Gottfredson, R. K., & Joo, H. (2013). Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers. *Organizational Research Methods*, *16*(2), 270–301. https://doi.org/10.1177/1094428112470848

Ajala, A. K., & Ajetomobi, J. O. (2013). Climate Change Impact on Cassava Agriculture in Nigeria. *Journal of Xi'an Shiyou University, Natural Science Edition*, *17*(05), 22–31. https://doi.org/10.1007/s12042-012-9096-7

Aker, J. C. (2010). Information from Markets Near and Far : Mobile Phones and Agricultural Markets in Niger. *American Economic Journal: Applied Economics*, *2*(3), 46–59. https://doi.org/10.1257/app.2.3.46

Ali, U., Wang, J., Ullah, A., Ishtiaque, A., Javed, T., & Nurgazina, Z. (2021). The impact of climate change on the economic perspectives of crop farming in Pakistan: Using the ricardian model. *Journal of Cleaner Production*, *308*(May). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127219

Annie, M., Gawai, A. S., & Sharma, A. (2023). Assessing the impact of Climate Change on Agricultural Production Using Crop Simulation Model. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(7), 538–550. https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i71906

Anselin, L., & Lozano-Gracia, N. (2008). Errors in variables and spatial effects in hedonic house price models of ambient air quality. *Empirical Economics*, *34*(1), 5–34. https://doi.org/10.1007/s00181-007-0152-3

Antle, J. M., & Capalbo, S. M. (2010). Featured Article Adaptation of Agricultural and Food Systems to Climate Change : An Economic and Policy Perspective. *Applied Economic Perspectives and Policy*, *32*(3), 386–416. https://doi.org/10.1093/aepp/ppq015

Arouna, A., Kouton, B., & Diagne, A. (2015). *Impact of climate change on rice income: case study of four West African Countries*. https://doi.org/10.22004/ag.econ.210958

Asseng, S., Zhu, Y., Wang, E., & Zhang, W. (2015). Crop modeling for climate change impact and adaptation. In *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy: Second Edition* (Second Edi). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00020-0

Babyenda, P., & Kabubo-mariara, J. (2023). Climate variability and agricultural productivity in Uganda. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, *18*(1), 14–38. https://doi.org/https://doi.org/10.53936/afjare.2023.18(1).2

Bareille, F., & Chakir, R. (2023). Estimating Ricardian Models with Repeat-Sales of Farmlands. *Journal of Environmental Economics and Management*, *119*(C), 102822. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102822

Becker, G. S. (1991). *A Treatise on the Family: Enlarged Edition* (Enlarged E). Harvard University Press. https://books.google.com/books/about/A_Treatise_on_the_Family.html?id=NLB1Ty75DOIC

Bell, R. M., & McCaffrey, D. F. (2002). Bias Reduction in Standard Errors for Linear Regression with Multi-Stage Samples. *Survey Methodology*, *28*(2), 169–181. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pan.a004888

Blanc, E., & Reilly, J. (2017). Approaches to assessing climate change impacts on agriculture: An overview of the debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, *11*(2), 247–257. https://doi.org/10.1093/reep/rex011

Blaylock, J., Salathe, L., & Green, R. (1980). A Note on the Box-Cox Transformation Under Heteroskedasticity. *AgEcon Search*, 18. file:///F:/Spec 2/Traffic Delay Model.pdf

Borges, Pablo de Amorim; Franke, Johannes; da Anunciação, Yumiko Marina Tanaka; Weiss, Holger; Bernhofer, C. (2016). *Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of precipitation distribution in Distrito Federal, Brazil*. https://doi.org/10.4236/acs.2013.32022

Box, & Cox. (1964). *An analysis of Transformations*. http://www.econ.uiuc.edu/~econ508/Papers/boxcox64.pdf

Bryan, E., Ringler, C., Okoba, B., Roncoli, C., Silvestri, S., & Herrero, M. (2013). Adapting agriculture to climate change in Kenya : Household strategies and determinants. *Journal of Environmental Management*, *114*, 26–35. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.036

Cameron, A. C., & Miller, D. L. (2015). A Practitioner ' s Guide to Cluster- Robust Inference. *Journal of Human Resources*, *50*(2), 317–372. https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317

Carleton, T., Jina, A., Delgado, M., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Hultgren, A., Kopp, R., McCusker, K. E., Nath, I., Rising, J., Rode, A., Seo, H. K., Viaene, A., Yuan, J., & Zhang, A. T. (2022). Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits. *The Quarterly Journal of Economics*, *137*(4), 2037-2105. https://doi.org/10.1093/qje/qjac020

Carrington, W. J., Eltinge, J. L., & McCue, K. (2000). *An economist's primer on survey samples* (No. 00–15; CES Working Paper). https://www.census.gov/ces/wp/2000/CES-WP-00-15.pdf

Charan, D., Kaur, M., & Singh, P. (2016). Indigenous Fijian Women's Role in Disaster Risk Management and Climate Change Adaptation. *Pacific Asia Inquiry*, *7*(1), 106–122. https://www.uog.edu/schools-and-colleges/college-of-liberal-arts-and-social-sciences/pacific-asia-inquiry/V7.php

Chatzopoulos, T., & Lippert, C. (2015). Adaptation and Climate Change Impacts: A Structural Ricardian Analysis of Farm Types in Germany. *Journal of Agricultural Economics*, *66*(2), 537–554. https://doi.org/10.1111/1477-9552.12098

Chatzopoulos, T., & Lippert, C. (2016). Endogenous farm-type selection, endogenous irrigation, and spatial effects in Ricardian models of climate change. *European Review of Agricultural Economics*, *43*(2), 217–235. https://doi.org/10.1093/erae/jbv014

Cobbinah, M. T., Danso-Abbeam, G., & Ogundeji, A. A. (2023). Access to mutual labour support in agriculture: Implications for maize productivity and efficiency of farmers in northern Ghana. *Agrekon*, *62*(1), 61–79. https://doi.org/10.1080/03031853.2022.2156898

Coster, A. S., & Adeoti, A. I. (2015). Economic Effects of Climate Change on Maize Production and Farmers' Adaptation Strategies in Nigeria: A Ricardian Approach. *Journal of Agricultural Science*, *7*(5). https://doi.org/10.5539/jas.v7n5p67

Cour internationale de Justice. (2025). *Obligations des États en matière de changement climatique*. https://www.icj-cij.org/sites/default/files/case-related/187/187-20250723-adv-01-00-fr.pdf

Crane-Droesch, A. (2018). Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. *Environmental Research Letters*, *13*(11). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae159

Cura, R., & Vaudor, L. (2018). *Interfaces graphiques avec R et Shiny : Les concepts de base de Shiny*. https://geoviz.sciencesconf.org/data/pages/GeoViz2018_R_shiny.pdf

Da Cunha, D. A., Coelho, A. B., & Féres, J. G. (2015). Irrigation as an adaptive strategy to climate change: An economic perspective on Brazilian agriculture. *Environment and Development Economics*, *20*(1), 57–79. https://doi.org/10.1017/S1355770X14000102

De Janvry, A., Fafchamps, M., & Sadoulet, E. (1991). PEASANT HOUSEHOLD BEHAVIOR WITH MISSING MARKETS: SOME PARADOXES EXPLAINED. *AgEcon Search*, 18. file:///F:/Spec 2/Traffic Delay Model.pdf

Deryng, D., Sacks, W. J., Barford, C. C., & Ramankutty, N. (2011). Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. *Global Biogeochemical Cycles*, *25*(2), n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2009gb003765

Deschênes, O., & Greenstone, M. (2007). The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather: Reply. *American Economic Review*, *102*(7), 3761–3773. https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3761

Dettweiler, M., Wilson, C., Maltais-Landry, G., & MacDonald, G. (2023). Cassava-legume intercropping is more beneficial in low-input systems: A meta-analysis. *Field Crops Research*, *300*, 109005. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109005

Devi, A. S. S., Praveen, K. V, Singh, A., & Panghal, P. (2022). Does the seed system determine the crop yield and farmers' income? An economic analysis. *Agricultural Economics Research Review*, *35*(conf), 39–48. https://doi.org/10.5958/0974-0279.2022.00017.9

Di Falco, S., Veronesi, M., & Yesuf, M. (2011). Does adaptation to climate change provide food security? A micro-perspective from Ethiopia. *American Journal of Agricultural Economics*, *93*(3), 825–842. https://doi.org/10.1093/ajae/aar006

Diniz, F. de A., Ramos, A. M., & Rebello, E. R. G. (2018). Brazilian climate normals for 1981-2010. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, *53*(2), 131–143. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000200001

Dinku, T., Hailemariam, K., Maidment, R., Tarnavsky, E., & Connor, S. (2014). Combined use of satellite estimates and rain gauge observations to generate high-quality historical rainfall time series over Ethiopia. *International Journal of Climatology*, *34*(7), 2489–2504. https://doi.org/10.1002/joc.3855

Doss, C. R., & Quisumbing, A. R. (2020). Understanding rural household behavior: Beyond Boserup and Becker. *Agricultural Economics (United Kingdom)*, *51*(1), 47–58. https://doi.org/10.1111/agec.12540

Dziedzoave, N. T., Abass, A. B., Amoa-Awua, W. K., & Sablah, M. (2006). *Quality management manual for production of high quality cassava flour*. International Institute of Tropical Agriculture (IITA). https://hdl.handle.net/10568/91815

Easterling, W. E., Crosson, P. R., Rosenberg, N. J., McKenney, M. S., Katz, L. A., & Lemon, K. M. (1993). Paper 2. agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region. *Climatic Change*, *24*(1–2), 23–61. https://doi.org/10.1007/BF01091476

El-sharkawy, M. A. (2004). Cassava biology and physiology. *Plant Molecular Biology*, *56*(4), 481–501. https://doi.org/10.1007/s11103-005-2270-7

Elff, M. (2022). *Much Ado About Not Very Much ? Clarifying the Confusion about Models for Categorical Dependent Variables*.

Engdaw, M. M., Ballinger, A. P., Hegerl, G. C., & Steiner, A. K. (2022). Changes in temperature and heat waves over Africa using observational and reanalysis data sets. *International Journal of Climatology*, *42*(2), 1165–1180. https://doi.org/10.1002/joc.7295

Etwire, P. M., Fielding, D., & Kahui, V. (2019). The impact of climate change on crop production in Ghana : A Structural Ricardian analysis. *Journal of Agricultural Economics*, *70*(2), 488–506. https://doi.org/10.1111/1477-9552.12307

FAO. (2015). Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.

FAO. (2022). Shiny RIMA – Guidelines. In *Shiny RIMA*. Rome. https://doi.org/10.4060/cc3353en

FAO. (2024). *Impact evaluation of agricultural interventions – A technical guide*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cd1828en

FAO. (2025). *Crop Information – Land & Water – FAO*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/

Feenstra, J. F., Burton, I., Smith, J. B., & Tol, R. S. J. (1998). *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies. {V}ersion 2.0*.

Feng, X., Tian, H., Cong, J., & Zhao, C. (2023). A method review of the climate change impact on crop yield. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*(July), 1–7. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1198186

Fezzi, C., & Bateman, I. (2013). The impact of climate change on agriculture: Nonlinear effects and aggregation bias in ricardian models of farmland values. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, *2*(1), 57–92. https://doi.org/10.1086/680257

Fisher, A., & Hanemann, M. (1998). *THE IMPACT OF GLOBAL WARMING ON AGRICULTURE: RETHINKING THE RICARDIAN APPROACH*. *15*(4), 250–260. https://escholarship.org/content/qt4bx3m5dj/qt4bx3m5dj.pdf

Fox, J., Kleiber, C., & Zeileis, A. (2024). *ivreg: Two-Stage Least-Squares Regression with Diagnostics*. CRAN. https://cran.r-project.org/web/packages/ivreg/vignettes/ivreg.html

Frazier, A. G., Giambelluca, T. W., Diaz, F., & Needham, H. L. (2016). *Comparison of geostatistical approaches to spatially interpolate month-year rainfall for the Hawaiian Islands*. *1470*(August 2015), 1459–1470. https://doi.org/10.1002/joc.4437

Fund, G. C. (2020). *Climate proofing food production investments in Imbo and Moso basins (Project SAP017)*. https://www.greenclimate.fund/project/sap017

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes*. 1–21. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gezahegn, B., Awoke, T., Anteneh, T., & Zeynu, K. (2022). Effect of cassava legumes intercropping on yield and yield components of compound crops in Jinka on station, Southern Ethiopia. *Int. J. Agril. Res. Innov. Tech.*, *12*(1), 30–33. https://doi.org/10.3329/ijarit.v12i1.61028

Ginbo, T. (2022). Heterogeneous impacts of climate change on crop yields across altitudes in Ethiopia. *Climatic Change*, *170*(1–2). https://doi.org/10.1007/s10584-022-03306-1

Giraud, T. (2025). *Cartographie avec R*.

Gregoire, T. G. (1998). Design-based and model-based inference in survey sampling: appreciating the difference. *Canadian Journal of Forest Research*, *1447*(10), 1429–1447. https://doi.org/10.1139/x98-166

Grohs, M., Simões, S., Vendruscolo, E. P., Rodrigues, A. H. A., de Oliveira, P. R., Leitão, R. A., Campos, L. F. C., Seleguini, A., de Lima, S. F., Reis, A. F. de B., Nascente, A. S., de Almeida, R. E. M., Júnior, A. C. da S. A. C. S. F. C., Arroz, N. O., No, I., Do, S. U. L., Aguiar, G. A., Streck, E. A., Facchinello, P. H. K., … Federativa, R. (2020). Correlation between morphological and physiological traits and path analysis of grain yield in rice genotypes under Khuzestan conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, *19*(1), 98–108. https://www.conab.gov.br/info-agro/safras

Haddad, M., Hansl, B., & Pechevy, A. (2024). *Trading in a new climate: How mitigation policies are reshaping global trade dynamics*. World Bank – Let's Talk Development. https://blogs.worldbank.org/en/developmenttalk/trading-new-climate-how-mitigation-policies-are-reshaping-global-trade-dynamics

Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Comparison of Spatial Interpolation Methods of Precipitation and Temperature Using Multiple Integration Periods. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *46*(7), 1187–1199. https://doi.org/10.1007/s12524-018-0783-1

Harmini, Harianto, Feryanto, Tinaprilla, N., & Maryono. (2022). Impacts of Off-Farm Income on Technical Efficiency of Rice Farming : Correction to Bias. *Jurnal Ekonomi Dan Studi Pembangunan*, *14*(2), 198–213. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17977/um002v14i22022p198

Hausman, J. A. (1978). SPECIFICATION TESTS IN ECONOMETRICS. *Econometrica*, *46*(6), 1251–1271. https://doi.org/10.2307/1913827

Hirpha, H. H., Mpandeli, S., & Bantider, A. (2020). Determinants of adaptation strategies to climate change among the smallholder farmers in. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-01-2019-0002

Hitchin, E. R. (1983). *Estimating monthly degree-days*. https://doi.org/10.1177/014362448300400404

Horvitz, D. G., & Thompson, D. J. (1952). A Generalization of Sampling Without Replacement From a Finite Universe. *Journal of the American Statistical Association*, *47*(260), 663–685. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483446

Houghton, D. (2009). *Cell Phones and Cattle : The Impact of Mobile Telephony on Agricultural Productivity in Developing Nations* [Duke University]. https://hdl.handle.net/10161/1388

Hubert, M., & Vandervieren, E. (2008). An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational Statistics and Data Analysis*, *52*(12), 5186–5201. https://doi.org/10.1016/j.csda.2007.11.008

Hunter, R., Crespo, O., Coldrey, K., Cronin, K., & New, M. (2020). *Research Highlights – Climate Change and Future Crop Suitability in Rwanda*. https://www.ifad.org/documents/38714170/42164624/climate_analysis_rwanda.pdf/02c48795-df0d-bba9-9d6b-d7a247c64ca6?t=1606831140000

Husnain, M. I. U., Subramanian, A., & Haider, A. (2018). Robustness of geography as an instrument to assess impact of climate change on agriculture. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *10*(5), 654–669. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-03-2017-0049

Imbens, G. W., & Kolesár, M. (2016). Robust standard errors in small samples: Some practical advice. *Review of Economics and Statistics*, *98*(4), 701–712. https://doi.org/10.1162/REST_a_00552

INSBU. (2021). *Profil et déterminants de la pauvreté au Burundi*.

IPCC. (2001). *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg2

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

IPCC. (2021). Chapter 2: Observed Climate Changes and their Causes. In B. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J.B.R.; Maycock, T.K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; Zhou (Ed.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 287–422). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

IPCC. (2023). Sections. In H. Lee, J. Romero, & C. W. Team (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–115). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J., Herrera Campo, B. V., & Navarro-Racines, C. (2012). Is cassava the answer to African climate change adaptation? *Tropical Plant Biology*, *5*(1), 9–29. https://doi.org/10.1007/s12042-012-9096-7

Jasinskas, A. (2024). *The Impact of Maize Legume Intercropping on Energy Indices and GHG Emissions as a Result of Climate Change*.

Johnstone, I. A. I. N., & Velleman, P. (1983). *The resistant line and related regression methods*. *June*.

Kaboneka, S., Ndayishimiye, D., Nibasumba, A., & Bizimana, S. (2024). *Comparative Liming Power of Chicken Manure and Selected Dolomitic Sources on an Acidic High Altitude Burundi Surface Soil*. *10*(6), 38–52. https://doi.org/10.31695/IJASRE.2024.6.5

Kaiser, H. M., Riha, S. J., Wilks, D. S., Rossiter, D. G., & Sampath, R. (1993). A Farm-Level Analysis of Economic and Agronomic Impacts of Gradual Climate Warming. *American Journal of Agricultural Economics*, *75*(2), 387–398. https://doi.org/10.2307/1242923

Kaizzi, K. C., Cyamweshi, A. R., Kibunja, C. N., Senkoro, C., Nkonde, D., Maria, R., & Wortmann, C. S. (2018). Bean yield and economic response to fertilizer in eastern and southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *111*(1), 47–60. https://doi.org/10.1007/s10705-018-9915-9

Kapsambelis, D. (2022). *Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050 : Application à la gestion économique du risque* [Agrocampus Ouest]. https://theses.hal.science/tel-03953483v1/file/fix_bwbnmRCl-kapsambelis.pdf

Kim, J. B., Habimana, J. de D., Kim, S. H., & Bae, D. H. (2021). Assessment of climate change impacts on the hydroclimatic response in burundi based on cmip6 esms. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(21), 1–21. https://doi.org/10.3390/su132112037

Komarek, A. M., Koo, J., Haile, B., Msangi, S., & Azzarri, C. (2018). Trade-offs and synergies between yield, labor, profit, and risk in Malawian maize-based cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *38*(3). https://doi.org/10.1007/s13593-018-0506-6

Kurukulasuriya, P., & Ajwad, M. I. (2007). Application of the Ricardian technique to estimate the impact of climate change on smallholder farming in Sri Lanka. *Climatic Change*, *81*(1), 39–59. https://doi.org/10.1007/s10584-005-9021-2

Kurukulasuriya, P., Kala, N., & Mendelsohn, R. (2011). Adaptation and Climate Change Impacts: A Structural Ricardian Model of Irrigation and Farm Income in Africa. *Climate Change Economics*, *2*(2), 149–174. https://doi.org/10.1142/S2010007811000255

Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R. (2008). Crop switching as a strategy for adapting to climate change. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, *2*(1), 105–125. https://doi.org/10.22004/ag.econ.56970

Laborde, D.; Murphy, S.; Parent, M.; Porciello, J.; Smaller, C. (2020). *Ceres 2030 : Solutions durables pour éradiquer la faim – Rapport de synthèse*. https://ceres2030.iisd.org/wp-content/uploads/2021/03/ceres2030_fr-summary-report.pdf

Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., & Zhou, T. (2021). *Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.)). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.006.553

Liang, B. Y. K., & Zeger, S. L. (1986). Longitudinal data analysis using generalized linear models. *Biometrica*, *73*(1), 13–22. https://doi.org/10.1093/biomet/73.1.13

Long, J. S., & Ervin, L. H. (2000). Using Heteroscedasticity Consistent Standard Errors in the Linear Regression Model. *The American Statistician*, *54*(3), 217–224. https://doi.org/10.1080/00031305.2000.10474549

Luh, Y.-H., & Chang, Y.-C. (2021). *Effect of Climate Change on Staple Food Production : Empirical Evidence from a Structural Ricardian Analysis*.

Lumley, T. (2004). Analysis of complex survey samples. *Journal of Statistical Software*, *9*, 1–19. https://doi.org/10.18637/jss.v009.i08

Lumley, T. (2025). *svyVGAM: Design-Based Inference in Vector Generalised Linear Models* (Version 1.2). Comprehensive R Archive Network (CRAN). https://cran.r-project.org/package=svyVGAM

MacKinnon, J. G., & White, H. (1985). Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, *29*(3), 305–325. https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90158-7

Mahdi, S. S., & Singh, R. (2022). Innovative Approaches for Sustainable Development: Theories and Practices in Agriculture. In *Innovative Approaches for Sustainable Development: Theories and Practices in Agriculture*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90549-1

Maniriho, A. (2024). Examining the relationships between ICT- facilitated input market and crop productivity among small-scale farmers in Southern Rwanda. *Cogent Social Sciences*, *10*(1). https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2423859

Maslow, A. H. (1943). A Theory of Human Motivation. *Psychological Review*, *50*(4), 370–396. https://doi.org/10.1037/h0054346

Massetti, E., & Mendelsohn, R. (2011). Estimating Ricardian Models with Panel Data. In *NBER Working Paper Series: Vol. NBER Worki*. https://doi.org/10.3386/w17101

Massetti, E., Mendelsohn, R., & Chonabayashi, S. (2016). How Well Do Degree Days over the Growing Season Capture the Effect of Climate on Farmland Values? *Energy Economics*. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.09.004

Mendelsohn, R., & Dinar, A. (1999). Climate change, agriculture, and developing countries: Does adaptation matter? *World Bank Research Observer*, *14*(2), 277–293. https://doi.org/10.1093/wbro/14.2.277

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., Shaw, D., Mendelsohn, B. R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture : A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, *84*(4), 753–771. http://www.jstor.org/stable/2118029

MINATE. (2007). National Adaptation Plan of Action (NAPA). In *République du Burundi, Ministry for Land Management, Tourism and Environment – NAPA*. https://unfccc.int/resource/docs/napa/bdi01e.pdf

MINEAGRIE. (2018). *STRATEGIE AGRICOLE NATIONALE 2018-2027*. https://faolex.fao.org/docs/pdf/Bur190783.pdf

Mkondiwa, M., Kumar, V., Craufurd, P., McDonald, A., & Ram, M. (2024). *Empowering Sustainability Transitions in Agri-food Systems Using Big Data and Causal Artificial Intelligence (Causal AI). December 2023*. https://www.researchgate.net/profile/Maxwell-Mkondiwa/publication/380290487_Empowering_Sustainability_Transitions_in_Agri-food_Systems_Using_Big_Data_and_Causal_Artificial_Intelligence_Causal_AI/links/6633c73a06ea3d0b74237814/Empowering-Sustainability-Tra

Mohammed, A., & Feleke, E. (2022). Future climate change impacts on common bean (Phaseolus vulgaris L.) phenology and yield with crop management options in Amhara Region, Ethiopia. *CABI Agriculture and Bioscience*, *3*(29), 1–14. https://doi.org/10.1186/s43170-022-00103-9

Moll, H. A. J. (2005). *Costs and benefits of livestock systems and the role of market and nonmarket relationships*. *32*, 181–193.

Mugisha, E. (2020). *Analyse des impacts du changement climatique sur la production agricole à Gihanga : Cas des principaux systèmes de cultures*. https://repository.ub.edu.bi/server/api/core/bitstreams/0f8c8566-5b18-4713-b231-9eb96b28f824/content

Mundy, S. (2024). *Esther Duflo: Rich world owes $500bn in 'moral debt' to poor countries*. Financial Times. https://www.ft.com/content/2fa5787c-7139-405d-aecc-b07a493cb304

Muto, M. (2009). Impacts of mobile phone coverage expansion on market participation : panel data evidence from Uganda. *World Development*, *37*(12), 1887–1896. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.05.004

Nalder, I. A., & Wein, R. W. (1998). Spatial interpolation of climatic Normals: Test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, *92*(4), 211–225. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00102-6

Nations Unies. (1992). *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* (Vol. 62221). http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf

Nations Unies. (1998). Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. In *Rapport officiel des Nations Unies*. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf

Nations Unies. (2015). *Accord de Paris sur les changements climatiques*. https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf

Ndayiragije, J. M., & Li, F. (2022). Monitoring and Analysis of Drought Characteristics Based on Climate Change in Burundi Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Water*, *14*(16), 2511. https://doi.org/10.3390/w14162511

Nelder, J. A., & Wedderburn, R. W. M. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, *135*(3), 370–384. https://doi.org/10.2307/2344614

Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., & Lee, D. (2010). The Costs of Agricultural Adaptation to Climate Change. *Environment*, *9*(august), 355–369.

Newton, P. C. D. (1990). Direct effects of increasing carbon dioxide on pasture plants and communities. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, *34*(1), 1–24. https://doi.org/10.1080/00288233.1991.10417789

Ngendakumana, S., Nahimana, A., Bararyenya, A., & Gahiro, L. (2025). Economic Impact of Hybrid Maize Seed on Agricultural Production and Income in Burundi. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, *10*(1), 1212–1223. https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.14759731

Nishemezwe, C. (2024). *Rendement et contraintes à l'adoption des variétés résistantes à la mosaïque africaine et autres maladies du manioc en commune Kabezi de la province Bujumbura* [Université du Burundi]. https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1954%0A

Nordhaus, W. (2015). Climate Clubs : Overcoming Free-riding in International Climate Policy. *American Economic Review*, *105*(4), 1339–1370. https://doi.org/10.1257/aer.15000001

Notre Dame Global Adaptation Initiative. (2025). *ND-GAIN Country Index: Burundi*. University of Notre Dame. https://gain-new.crc.nd.edu/country/burundi

Ntagahoraho, T., & Kamgnia, B. D. (2023). *Economic impact of climate change on agriculture in Burundi: An application of the ricardian model*. *04*(10), 152. http://www.scienceijsar.com

OCHA. (2024). *BURUNDI Plan de réponse inondations et montée du lac Tanganyika ( effets El-Niño ) Table des matières*. https://www.unocha.org/attachments/cbc19321-5260-4d34-9ac9-eb4856d6d3f0/Burundi_HRP_07052024 vf.pdf

Ochou, F. E. (2018). *IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L ' AGRICULTURE : APPORTS ET LIMITES DES ETUDES RICARDIENNES* [Université Felix Houphouet-Boigny de Cocody-Abidjan; Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) - CNRS]. https://www.researchgate.net/profile/Maxwell-Mkondiwa/publication/380290487_Empowering_Sustainability_Transitions_in_Agri-food_Systems_Using_Big_Data_and_Causal_Artificial_Intelligence_Causal_AI/links/6633c73a06ea3d0b74237814/Empowering-Sustainability-Tra

Ojo, T. O., & Baiyegunhi, L. J. S. (2023). Gender differentials on productivity of rice farmers in south western Nigeria : An Oaxaca-Blinder decomposition approach. *Heliyon*, *9*(12), e22724. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22724

Okonya, J. S., Ocimati, W., Nduwayezu, A., Kantungeko, D., Niko, N., Blomme, G., Legg, J. P., & Kroschel, J. (2019). Farmer Reported Pest and Disease Impacts on Root, Tuber, and Banana Crops and Livelihoods in Rwanda and Burundi. *Sustainability*, *11*(6), 1–20. https://doi.org/10.3390/su11061592

Omay, P. O., Muthama, N. J., Oludhe, C., Kinama, J. M., Artan, G., & Atheru, Z. (2023). Evaluation of CMIP6 historical simulations over IGAD region of Eastern Africa. *Discover Environment*. https://doi.org/10.1007/s44274-023-00012-2

Omoyo, N. N., Wakhungu, J., & Oteng'i, S. (2015). Effects of climate variability on maize yield in the arid and semi arid lands of lower eastern Kenya. *Agriculture and Food Security*, *4*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s40066-015-0028-2

Oo, A. T., Van Huylenbroeck, G., & Speelman, S. (2020). Measuring the economic impact of climate change on crop production in the dry zone of Myanmar: A ricardian approach. *Climate*, *8*(1). https://doi.org/10.3390/cli8010009

Osborne, J. W., & Overbay, A. (2004). The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them). *Practical Assessment, Research and Evaluation*, *9*(6).

Özdağlar, M. (2015). *Economic development and Maslow's hierarchy of needs*. Foreign Policy News. https://foreignpolicynews.org/2015/07/26/economic-development-and-maslows-hierarchy-of-needs/

Pan, J., Zhu, Y., Jiang, D., Dai, T., Li, Y., & Cao, W. (2006). Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, *97*(2–3), 322–336. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.11.006

Paolino, P. (2021). Predicted Probabilities and Inference with Multinomial Logit. *Political Analysis*, *29*(3), 416–421. https://doi.org/10.1017/pan.2020.35

Perry, M., & Hollis, D. (2005). The development of a new set of long-term climate averages for the UK. *International Journal of Climatology*, *25*(8), 1023–1039. https://doi.org/10.1002/joc.1160

Planchon, V. (2005). *Traitement des valeurs aberrantes : concepts actuels et tendances générales*. *9*(1), 19–34.

Powers, D. A., & Xie, Y. (2008). *Statistical Methods for Categorical Data Analysis*. Academic Press.

*PROPOSITION DU BURUNDI POUR L'AGRICULTURE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE LORS DE LA 39ème SESSION DE SBSTA*. (2012). 1–3. https://unfccc.int/files/land_use_and_climate_change/redd/submissions/application/pdf/20130902_subm_burundi_agriculture_sbsta39.pdf

Quandt, A., Salerno, J. D., Neff, J. C., Baird, T. D., Herrick, J. E., McCabe, J. T., Xu, E., & Hartter, J. (2020). Mobile phone use is associated with higher smallholder agricultural productivity in Tanzania, East Africa. *PLOS ONE*, *15*(8), 1–16. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237337

Quiggin, J., & Horowitz, J. K. (1999). The Impact of Global Warming on Agriculture : A Ricardian Analysis : Comment. *American Economic Review*, *89*(4), 1044–1045. https://doi.org/10.1257/aer.89.4.1044

Ragasa, C., Takeshima, H., Asante, S., Amare, M., Ma, N., Olanrewaju, O., & Duchoslav, J. (2025). Maize yield responsiveness and profitability of fertilizer: New survey evidence from six African countries. *Food Policy*, *133*, 102815. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2025.102815

République du Burundi; Ministère de l'Environnement; de l'Agriculture et de l'Élevage. (2022). *Premier rapport biennal actualisé sur les changements climatiques au Burundi*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Burundi BUR 1 Report _Francais.pdf

Ricker-Gilbert, J., Mallory, M., Ogunbayo, I., Akano, O., Goeb, J., Burke, W., Jayne, T., Obinefo, I. M., Peng, R., Mulenga, B., Agyei-Holmes, A., Olwande, J., Mpenda, Z., & Pangapanga-Phiri, I. (2024). *Causes and Consequences of the 2021/22 Fertilizer Price Spike on sub-Saharan Africa. Lessons Learned and Implications for Future Actions*. https://www.coebs.sua.ac.tz/news/report-causes-and-consequences-of-the-2021-22-fertilizer-price-spike-on-sub-saharan-africa

Ritchie, J., & NeSmith, D. S. (1991). Temperature and Crop Development. In J. T. Hanks, John; Ritchie (Ed.), *Modeling Plant and Soil Systems* (10.2134/ag). American Society of Agronomy (ASA), Crop Science Society of America (CSSA), Soil Science Society of America (SSSA). https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2

Rowhani, P., Lobell, D. B., Linderman, M., & Ramankutty, N. (2011). Agricultural and Forest Meteorology Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(4), 449–460. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.002

Sabiti, G., Ininda, J. M., Ogallo, L. A., Artan, G., Basalirwa, C., Opijah, F., Nimusiima, A., Ddumba, S. D., Mwesigwa, J. B., Otieno, G., & Nanteza, J. (2018). Adapting Agriculture to Climate Change: Suitability of Banana Crop Production to Future Climate Change Over Uganda. In W. Leal Filho & J. Nalau (Eds.), *Limits to Climate Change Adaptation* (pp. 141–154). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5_10

Salvo, D. (2013). Measuring the effect of climate change on agriculture: A literature review of analytical models. *Journal of Development and Agricultural Economics*, *5*(12), 499–509. https://doi.org/10.5897/jdae2013.0519

Sanga, G. J., Hella, J. P., Mzirai, N. c., & Senga, H. d. (2014). Impacts of Climate Change on Maize and Beans Production and Compatibility of Adaptation Strategies in Pangani River Basin , Tanzania. *Journal of Basic and Applied Research International*, *2*(3), 248–257. https://doi.org/10.9734/JOBARI/2014/5484

Sawadogo, B. (2021). *Perspective genre de l'impact économique du changement climatique au Burkina Faso*. *July*. www.pep-net.org,

Schlenker, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2004). The impact of global warming on U.S. agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions. *Review of Economics and Statistics*, *88*(1), 113–125. https://doi.org/10.1162/003465306775565684

Schlenker, W., & Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, *5*(1). https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014010

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Seo, N. (2015). Micro-Behavioral Economics of Global Warming Modeling Adaptation Strategies in Agricultural and Natural Resource Enterprises. In *Advances in Global Change Research* (Vol. 60). http://www.springer.com/series/5588

Seo, N., & Mendelsohn, R. (2007). *An Analysis of Crop Choice: Adapting to Climate Change in Latin American Farms*. https://documents1.worldbank.org/curated/en/959701468300692300/pdf/wps4162.pdf

Seo, N., & Mendelsohn, R. (2008). A Structural Ricardian Analysis of Climate Change Impacts and Adaptations in African Agriculture. In *Policy Research Working Paper Series* (Vol. 38). https://documents1.worldbank.org/curated/en/467731468203352332/pdf/WPS4603.pdf

Seo, S. N., & Mendelsohn, R. (2008). Measuring impacts and adaptations to climate change: a structural Ricardian analysis of climate change impacts and adaptations in African agriculture. *Agricultural Economics*, *38*(2), 151–165. https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00261.x

Serfati, C. (2006). Economies de guerre et ressources naturelles : les visages de la mondialisation. *Annuaire Suisse de Politique de Développement*, *25–2*, 107–126. https://doi.org/10.4000/aspd.258

Service}, {Copernicus Climate Change. (2025). *Global climate highlights 2024*. https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM 1968*, 517–524. https://doi.org/10.1145/800186.810616

Sinarinzi, E., & Nayisi, C. (2016). *Rapport phase 1 d'évaluation des besoins technologiques d'adaptation aux changements climatiques*. https://unfccc.int/ttclear/TNA/BDI-TNAs-TNA_Adaptation_2016.pdf

Singbo, A., Njuguna-Mungai, E., Yila, J. O., Sissoko, K., & Tabo, R. (2021). Examining the Gender Productivity Gap among Farm Households in Mali. *Journal of African Economies*, *30*(3), 251–284. https://doi.org/10.1093/jae/ejaa008

Singh, I., Squire, L., & Strauss, J. (1986). A survey of agricultural household models: Recent findings and policy implications. *World Bank Economic Review*, *1*(1), 149–179. https://doi.org/10.1093/wber/1.1.149

Tall, A., & Dampha, N. K. (2023). *Burundi: Scaling up Climate Resilience in the Land of 3,000 Hills*. Africa Can End Poverty (World Bank Blog). https://blogs.worldbank.org/en/africacan/burundi-scaling-climate-resilience-land-3000-hills

Tall, A., Dampha, N. K., Ndayiragije, N., Von Berg, M., Raina, L., & Manirambona, A. (2022). *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*. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099930006302237433/p17682007885e00780b1cc093a09277df1a

Terza, J., Basu, A., & Rathouz, P. (2008). Two-Stage Residual Inclusion Estimation: Addressing Endogeneity in Health Econometric Modeling. *Journal of Health Economics*, *27*(3), 531–543. https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2007.09.009

Tesfaye, A. (2024). The effect of deficit irrigation on water productivity and yield of common bean in semiarid areas in Ethiopia. *Journal of Agriculture & Education Research*, *2*(1), 1–11.

TheGlobalEconomy.com. (2025). *Burundi: Greenhouse Gas Emissions*. TheGlobalEconomy.Com. https://www.theglobaleconomy.com/Burundi/greenhouse_gas_emissions/

Thom, H. C. S. (1966). *NORMAL DEGREE DAYS ABOVE ANY BASE BY THE UNIVERSAL TRUNCATION COEFFICIENT*. *July*, 461–465.

Thornton, P. K., Jones, P. G., Ericksen, P. J., & Challinor, A. J. (2011). Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4 °C+ world. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *369*(1934), 117–136. https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0246

Tshikororo, M., Baloyi, S., & Gwebu, M. P. (2024). Influence of Farming Experience and Knowledge on Selection of Climate Change Resilient Strategies among Female Agripreneurs in the Mopani of Limpopo Province, South Africa. *Journal of Agricultural Extension*, *28*(1), 103–109. https://doi.org/10.4314/jae.v28i1.11

Tshikororo, M., Tshikororo, M., & Chavalala, Z. (2024). Determinants of the Quality of Delivery of Agricultural Training Programs among Farmers in Greater Giyani Municipality, South Africa. *Journal of Agricultural Extension*, *28*(3), 14–21. https://doi.org/10.4314/jae.v28i3.2

Tsoumas, I., Giannarakis, G., Sitokonstantinou, V., Koukos, A., Loka, D., Bartsotas, N. S., Kontoes, C., & Athanasiadis, I. (2023). Evaluating Digital Agriculture Recommendations with Causal Inference. *Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2023*, *37*, 14514–14522. https://doi.org/10.1609/aaai.v37i12.26697

Tukey, J. W. (1997). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.

Udry, C. (1996). Gender , Agricultural Production , and the Theory of the Household. *Journal of Political Economy*, *104*(5).

UNCTAD. (2006). *Trade and Environment Review 2006*. https://unctad.org/system/files/official-document/ditcted20051_en.pdf

University of Notre Dame Notre Dame Global Adaptation Initiative. (2022). *ND-GAIN Country Index*. https://gain.nd.edu/our-work/country-index/rankings/

Valantin, J.-M. (2017). *Géopolitique d'une planète déréglée : Le choc de l'Anthropocène* (Seuil, Vol. 16, Issue 1).

Varma, V., & Bebber, D. P. (2019). Climate change impacts on banana yields around the world. *Nature Climate Change*, *9*(10), 752–757. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0559-9

Vazeux-blumental, N., Mathieu, L., Trabac, T., Palaffre, C., Lagardère, B., Carraretto, M., Bauland, C., Caïus, J., Le, M., Christine, G., Le, P., Marmagne, A., Enjalbert, J., Parnaudeau, V., Muller, D., Manicacci, D., & Tenaillon, M. I. (2025). *Revival of traditional agricultural systems – A multidisciplinary on-farm survey of maize-bean intercropping reveals unexpected competition effects on beans*. *August 2024*, 1755–1770. https://doi.org/10.1002/ppp3.70049

Velleman, P. F., and D. C. H. 1981. (2004). Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis. In *Computing*. Duxbury Press.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Yee, T., & Moler, C. (2025). *VGAM: Vector Generalized Linear and Additive Models* (Version 1.1-13). Comprehensive R Archive Network (CRAN). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2818-7

Yu, Y., Clark, J. S., Tian, Q., & Yan, F. (2022). Rice yield response to climate and price policy in high - latitude regions of China. *Food Security*, *14*, 1143–1157. https://doi.org/10.1007/s12571-021-01253-w

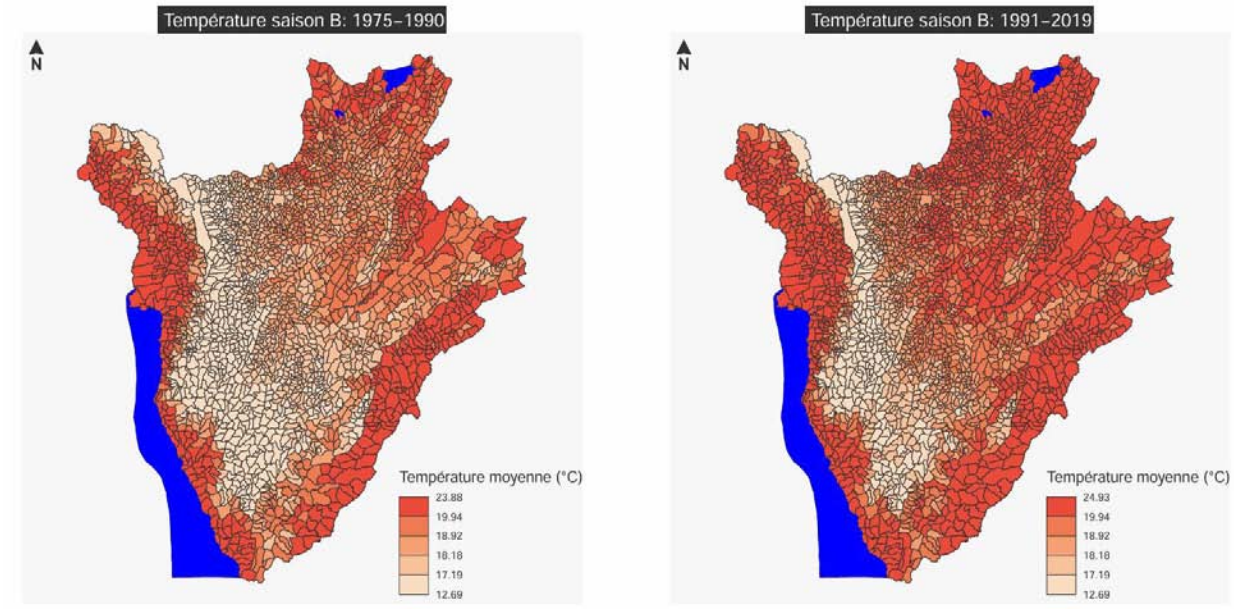
Zeileis, A., Köll, S., & Graham, N. (2020). Various Versatile Variances : An Object-Oriented. *Journal of Statistical Software*, *95*(1). https://doi.org/10.18637/jss.v095.i01

Zucman, G. (2024). *A blueprint for a coordinated minimum effective taxation standard for ultra-high-net-worth individuals*. https://www.taxobservatory.eu//www-site/uploads/2024/06/report-g20.pdf

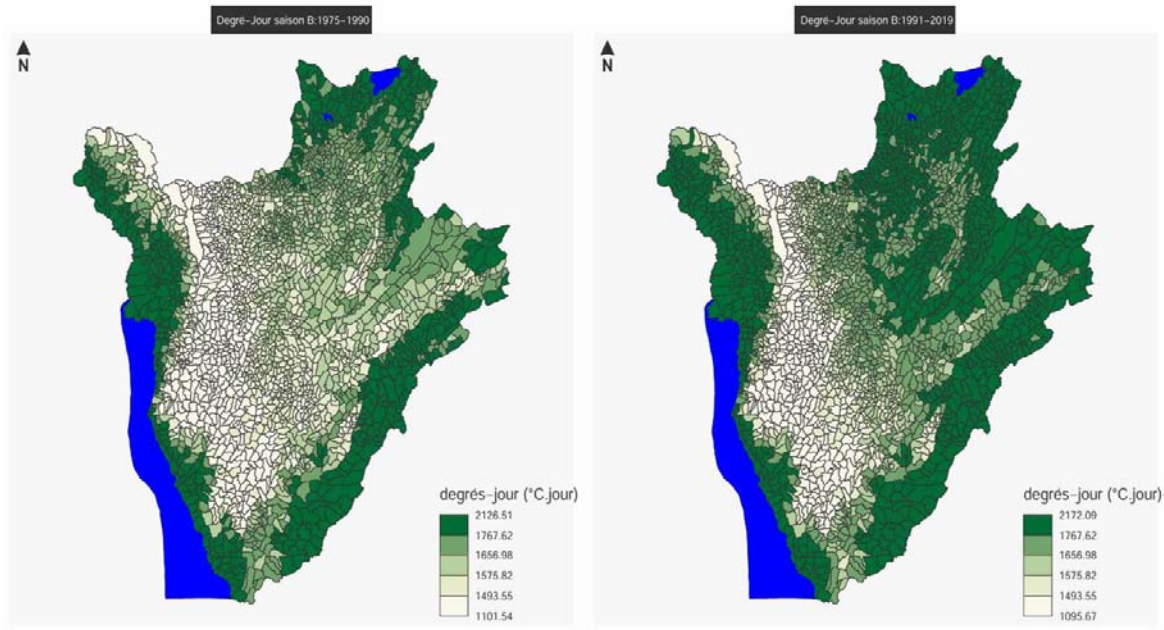
# ANNEXES

**Annexe 1 : Comparaison spatio-temporelle de la température de saison agricole B. Source:**

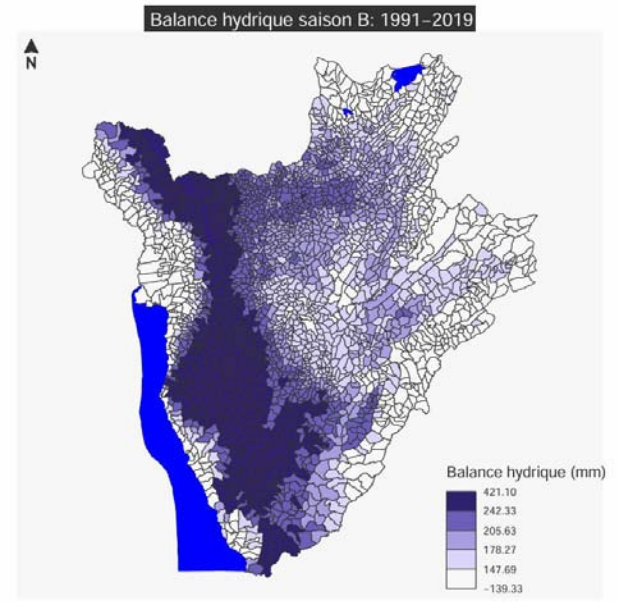
**IGEBU (1975–2019) ; cartographie : auteur (2025).**



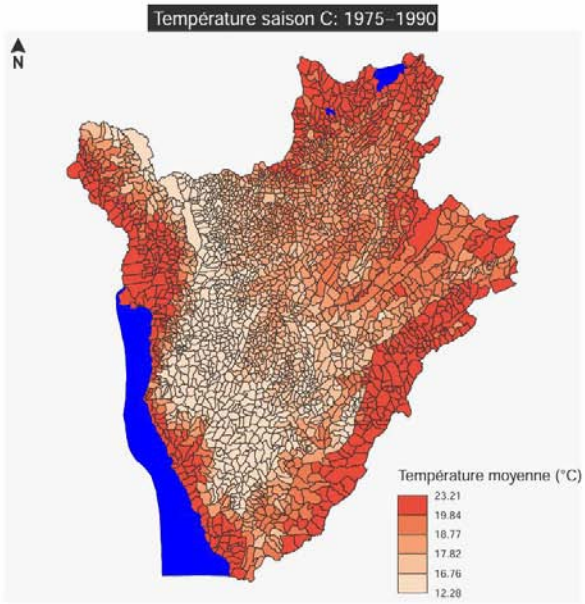

**Annexe 2 : Comparaison spatio-temporelle du nombre de degré-jour de la saison B. Source : IGEBU (1975-2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).**

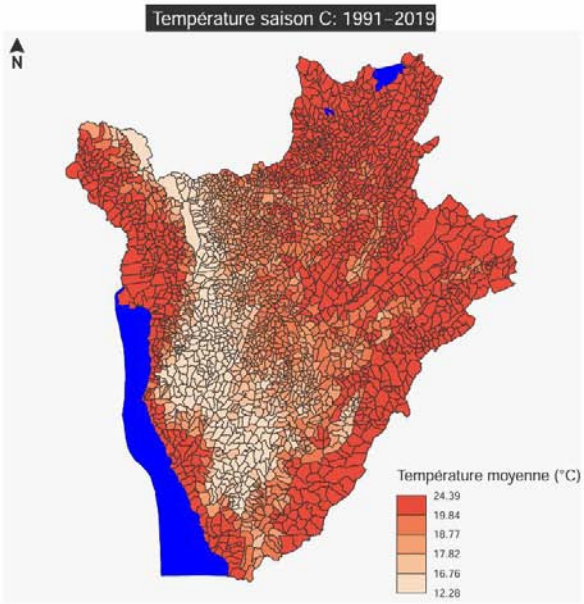


**Annexe 3 : Distribution spatiale de la balance hydrique de la saison agricole B. Source : IGEBU (1991–2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).**



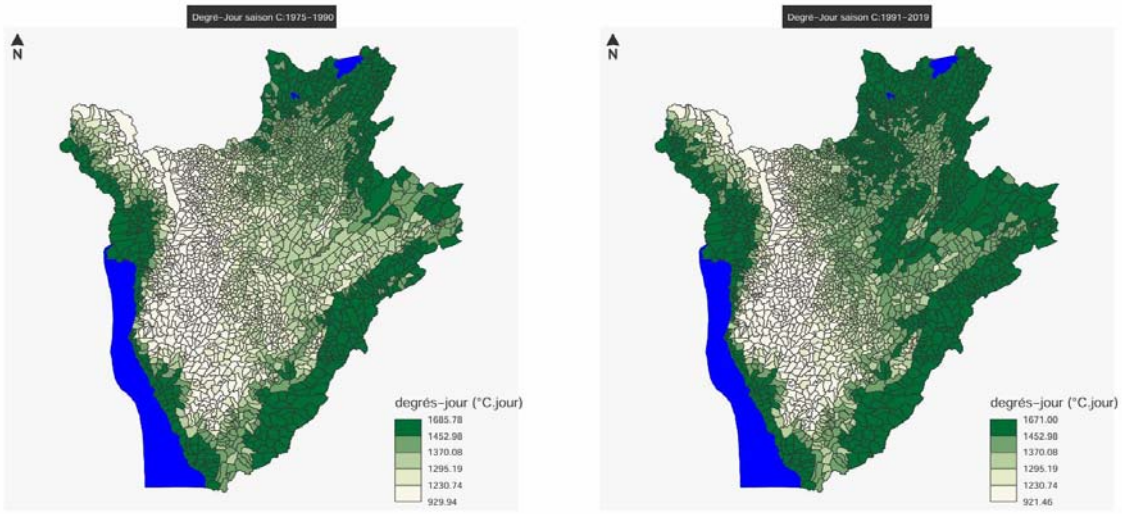

**Annexe 4 : Comparaison spatio-temporelle de la température de la saison agricole C.**



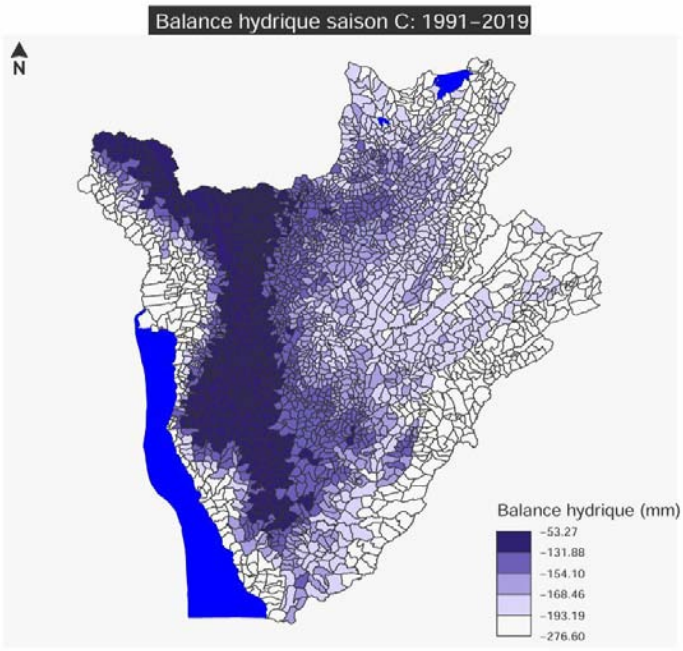

**Source : IGEBU (1975-2019) ; cartographie : auteur (2025).**

**Annexe 5: Comparaison spatio-temporelle du nombre de degrés-jour de la saison agricole C.**



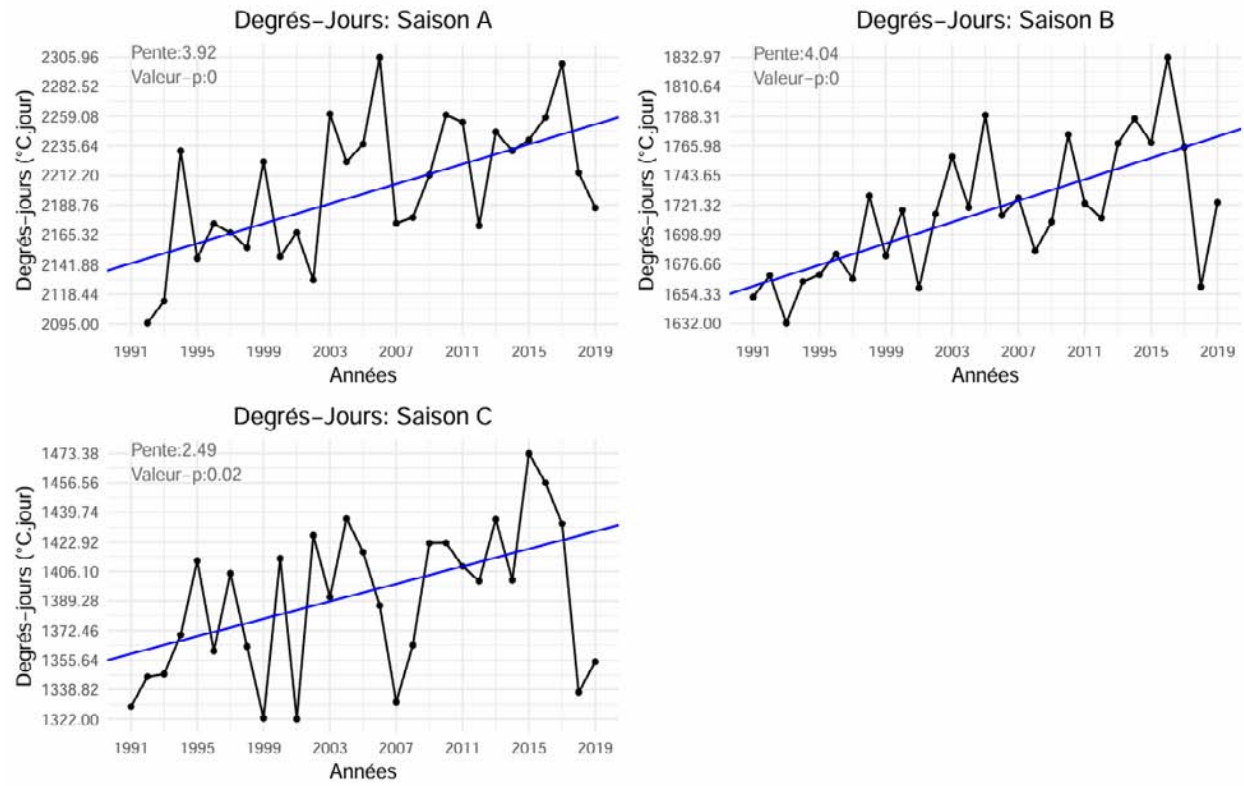

**Source : IGEBU (1975-2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).**

**Annexe 6 : Distribution spatiale de la balance hydrique de la saison agricole C.**




**Source : IGEBU (1991-2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).**

**Annexe 7 : Tendances et variabilité à long terme du nombre de degrés-jour. L'amplitude de la tendance annuelle et la valeur p sont indiquées en haut à droite de chaque graphique.**




**Source : IGEBU (1991-2019) ; calculs et cartographie : auteur (2025).**

**Annexe 8 : Estimation du modèle logit multinomial pour les cultures ou combinaison des cultures les plus fréquentes au niveau des parcelles**

| | Type de culture ou combinaison de cultures | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| variable | Banane | Haricots , Maïs | Haricots , Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
| dd_gs | 0.002*** | 0.004*** | 0.001*** | 0.002*** | 0.003*** | 0.002*** | 0.003*** |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| prcp_gs | -0.019*** | -0.023*** | 0.003* | -0.017*** | -0.025*** | -0.014*** | 0.007** |
| | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.003) |
| I(prcp_gs^2) | 1.53e-05*** | 2.25e-05*** | -4.27e-06** | 2.58e-05*** | 2.39e-05*** | 1.44e-05*** | -1.32e-05*** |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| rev_hors_agriOui | 0.237 | -0.020 | -0.424** | 0.271 | -0.383 | -0.293 | -0.415* |
| | (0.239) | (0.229) | (0.203) | (0.187) | (0.31) | (0.2) | (0.242) |
| topo_parcelPlaine | -1.318*** | 0.387** | -0.455** | -0.184 | -0.646** | 0.316* | 2.111*** |
| | (0.28) | (0.176) | (0.191) | (0.226) | (0.31) | (0.168) | (0.487) |
| topo_parcelPente raide | 0.235 | 0.094 | 0.509*** | -0.309 | 0.639*** | 0.436** | -13.947*** |
| | (0.217) | (0.226) | (0.172) | (0.207) | (0.249) | (0.204) | (0.452) |
| topo_parcelColline | -0.038 | -0.111 | 0.247* | -0.249 | 0.204 | -0.026 | -2.001*** |
| | (0.156) | (0.148) | (0.137) | (0.158) | (0.22) | (0.166) | (0.7) |
| topo_parcelVallee | -4.115*** | 1.054*** | -1.313*** | 0.363 | -4.382*** | 0.960*** | 4.388*** |
| | (0.692) | (0.247) | (0.293) | (0.361) | (1.11) | (0.26) | (0.517) |
| topo_parcelAutre | -18.582*** | -1.406 | -17.555*** | 1.368 | -17.757*** | -0.262 | -15.103*** |
| | (0.568) | (1.349) | (1.052) | (1.923) | (0.603) | (0.595) | (1.192) |
| fertiliteMoyenne | -0.081 | -0.292** | -0.049 | -0.074 | -0.576*** | -0.195 | -0.667*** |
| | (0.165) | (0.13) | (0.114) | (0.15) | (0.223) | (0.129) | (0.181) |
| fertiliteFaible | -1.080*** | -0.286 | -0.435*** | -0.016 | -0.552* | -0.462** | -0.801** |
| | (0.263) | (0.237) | (0.159) | (0.184) | (0.305) | (0.182) | (0.385) |
| MulieuRural | 0.743 | 0.057 | 0.573 | 0.107 | -0.235 | 1.078* | 1.048** |
| | (0.504) | (0.339) | (0.747) | (0.469) | (0.472) | (0.637) | (0.522) |
| sup_parc_rec | 0.631 | -0.033 | -0.117 | 0.118 | -0.746 | -15.823*** | -0.942 |
| | (0.391) | (0.403) | (0.311) | (0.477) | (0.62) | (3.893) | (0.941) |
| n(parcelles) | 489 | 964 | 1332 | 918 | 253 | 778 | 389 |

Note : la référence est Haricot. Les erreurs standards obtenues par la linéarisation de Taylor sont entre les parenthèses (elles sont robustes car les corrections ont été effectuées par la formule est du type Sandwich basée sur le plan de sondage aléatoire stratifiée a deux degrés). ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1. Tous les modèles incluent la constante.

**Annexe 9: Estimation du modèle logit multinomial par 2SRI sans tenir compte de l'hétérogénéité régionale**

| | Type de culture ou combinaison de cultures | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Banane | Haricots -Maïs | Haricots - Manioc | Maïs | Manioc | Patates douces | Riz |
| dd_gs | 0.001* | 0.002*** | 6.26e-04 | 8.42e-04 | 0.003*** | 9.92e-04* | 0.004*** |
| | (0.001) | (0) | (0) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) |
| prcp_gs | -0.021*** | -0.021*** | -0.002 | -0.012*** | -0.027*** | -0.018*** | -0.007 |
| | (0.002) | (0.003) | (0.003) | (0.004) | (0.003) | (0.002) | (0.004) |
| I(prcp_gs^2) | 1.57e-05*** | 2.00e-05*** | -1.74e-06 | 2.30e-05*** | 2.54e-05*** | 1.61e-05*** | -5.56e-06 |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| rev_hors_agriOui | 0.207 | -0.056 | -0.471** | 0.277 | -0.400 | -0.312* | -0.424* |
| | (0.238) | (0.209) | (0.197) | (0.184) | (0.311) | (0.186) | (0.245) |
| topo_parcelAutre | -18.747*** | -1.751 | -17.686*** | 1.270 | -17.685*** | -0.507 | -14.988*** |
| | (0.6) | (1.434) | (0.942) | (1.809) | (0.693) | (0.602) | (1.076) |
| topo_parcelColline | -0.021 | -0.120 | 0.254* | -0.223 | 0.249 | -0.025 | -1.949*** |
| | (0.156) | (0.149) | (0.137) | (0.154) | (0.221) | (0.166) | (0.695) |
| topo_parcelPente raide | 0.220 | 0.052 | 0.463*** | -0.222 | 0.615** | 0.398** | -13.958*** |
| | (0.218) | (0.229) | (0.172) | (0.201) | (0.248) | (0.204) | (0.443) |
| topo_parcelPlaine | -1.262*** | 0.403** | -0.389** | -0.174 | -0.635** | 0.355** | 2.258*** |
| | (0.296) | (0.167) | (0.177) | (0.204) | (0.305) | (0.162) | (0.495) |
| topo_parcelVallee | -4.105*** | 0.956*** | -1.360*** | 0.257 | -4.256*** | 0.959*** | 4.336*** |
| | (0.696) | (0.237) | (0.295) | (0.381) | (1.112) | (0.251) | (0.506) |
| fertiliteFaible | -1.053*** | -0.294 | -0.424*** | -0.092 | -0.578* | -0.455** | -0.961*** |
| | (0.264) | (0.232) | (0.159) | (0.18) | (0.308) | (0.18) | (0.375) |
| fertiliteMoyenne | -0.058 | -0.274** | -0.057 | -0.102 | -0.620*** | -0.200 | -0.762*** |
| | (0.165) | (0.123) | (0.111) | (0.143) | (0.217) | (0.125) | (0.184) |
| sup_parc_rec | 0.624* | 0.094 | -0.194 | 0.168 | -0.918 | -16.549*** | -1.230 |
| | (0.372) | (0.388) | (0.306) | (0.463) | (0.67) | (4.002) | (0.96) |
| resiv_dd | 7.87e-04 | 0.003*** | 1.10e-04 | 0.005*** | -0.001 | -2.44e-04 | -0.002* |
| | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) |
| resiv_prcp | 0.002 | -0.002 | 0.004*** | -0.008*** | 0.003 | 0.004*** | 0.010*** |
| | (0.002) | (0.002) | (0.002) | (0.003) | (0.002) | (0.001) | (0.002) |
| n(parcelles) | 489 | 964 | 1332 | 918 | 253 | 778 | 389 |

**Note :** Les résultats sont obtenus par la fonction svy_vglm du package svyVGAM de R. La culture de référence est Haricot (avec 2633 parcelles). Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1. Tous les modèles incluent la constante. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS

**Annexe 10 : Estimation du modèle logit multinomial (Avec ou Sans 2SRI) du choix de Banane et Haricots-Maïs pour toutes les régions**

| Variables | Banane | | | Haricots-Maïs | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| | Mumirwa | Plateau central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| dd_gs | 0.002* | 0.002 | 0.002* | 0.004** | 0.006*** | 0.006 | 2.07e-04 | 0.004*** |
| | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.002) | (0.004) | (0.001) | (0.001) |
| prcp_gs | -0.021*** | -0.010*** | -0.015* | -0.017** | -0.016*** | -0.036*** | -0.023*** | -0.032*** |
| | (0.005) | (0.004) | (0.008) | (0.008) | (0.003) | (0.006) | (0.004) | (0.007) |
| I(prcp_gs^2) | 1.65e-05*** | 5.93e-06 | 1.26e-05** | 1.11e-05 | 1.40e-05*** | 3.09e-05*** | 2.51e-05*** | 2.94e-05*** |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| fertiliteMoyenne | 0.171 | 0.090 | 0.009 | -0.604* | -0.352 | -0.281 | -0.463** | 0.047 |
| | (0.313) | (0.189) | (0.455) | (0.366) | (0.226) | (0.395) | (0.19) | (0.293) |
| fertiliteFaible | -0.090 | -0.987*** | -0.660 | -1.693* | -0.654*** | -0.358 | -0.452 | 0.445 |
| | (0.48) | (0.327) | (0.857) | (0.894) | (0.24) | (0.651) | (0.354) | (0.531) |
| sup_parc_rec | -2.416 | 1.258** | 0.524 | -1.095 | -0.825 | 0.587 | 0.054 | -0.562 |
| | (1.581) | (0.529) | (0.633) | (1.519) | (0.9) | (1.189) | (0.856) | (0.721) |
| resiv_dd | 0.002 | 0.002 | | | -0.003 | 0.001 | 0.005*** | |
| | (0.002) | (0.002) | | | (0.002) | (0.004) | (0.002) | |
| resiv_prcp | | -0.001 | 1.86e-04 | | | | -0.005 | 0.006* |
| | | (0.003) | (0.005) | | | | (0.003) | (0.004) |
| n (Parcelles) | 70 | 365 | 47 | 74 | 176 | 54 | 490 | 170 |

**Note :** la référence est Haricot pour toutes les régions agro-climatiques. Les haricots occupent 97, 423, 402, 1280, 431 parcelles respectivement pour les régions de Plaine de l'Imbo, Mumirwa, Plateau central et Dépression du Nord et de l'Est. Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à 'flextable' et 'officer' deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

**Annexe 11 : Estimation du modèle logit multinomial (Avec ou Sans 2SRI) du choix de la combinaison Haricots-Manioc et du Maïs**

| Variables | Haricots-Manioc | | | | | Maïs | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau central | Dépressio Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| dd_gs | 0.002 | 0.004*** | 0.009*** | -6.06e-04 | -8.86e-04 | 0.007*** | 0.003*** | 0.004 | 9.35e-04 | 0.003*** |
| | (0.001) | (0.001) | (0.003) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.001) | (0.003) | (0.001) | (0.001) |
| prcp_gs | -0.011** | -0.002 | -0.010 | 0.025*** | -0.023*** | -0.018** | -0.019*** | -0.037*** | -0.014** | -0.028*** |
| | (0.006) | (0.004) | (0.007) | (0.005) | (0.007) | (0.009) | (0.006) | (0.008) | (0.006) | (0.01) |
| I(prcp_gs ^2) | 8.30e-06 | 2.34e-06 | 4.18e-07 | -2.42e-05*** | 9.98e-06* | 1.27e-05 | 2.10e-05*** | 4.12e-05*** | 2.89e-05*** | 2.33e-05*** |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| fertiliteMoyenne | 0.493 | 0.074 | 0.517 | -0.033 | 0.688* | -0.598* | -0.315 | 0.086 | 0.026 | -0.105 |
| | (0.561) | (0.207) | (0.659) | (0.148) | (0.411) | (0.362) | (0.481) | (0.38) | (0.22) | (0.36) |
| fertiliteFaible | -0.356 | -0.734** | 0.254 | -0.165 | 0.057 | -1.843 | -0.283 | 0.380 | 0.084 | -0.003 |
| | (0.854) | (0.32) | (0.766) | (0.239) | (0.481) | (1.31) | (0.612) | (0.572) | (0.235) | (0.594) |
| sup_parc_rec | -4.830** | 1.103* | -1.979 | 0.032 | -0.412 | -1.265 | 0.634 | -0.490 | 0.102 | 0.892 |
| | (2.21) | (0.593) | (1.749) | (0.478) | (0.754) | (2.643) | (0.961) | (1.187) | (0.804) | (0.578) |
| resiv_dd | | -0.003* | 0.003 | 0.003*** | | | 0.001 | 8.84e-04 | 0.002 | |
| | | (0.002) | (0.004) | (0.001) | | | (0.001) | (0.004) | (0.002) | |
| resiv_prcpn | | | | -0.006** | 0.020*** | | | | -0.004 | 0.010 |
| | | | | (0.002) | (0.006) | | | | (0.004) | (0.006) |
| (Parcelles) | 35 | 293 | 43 | 827 | 134 | 31 | 79 | 362 | 376 | 70 |

**Note :** la référence est Haricot pour toutes les régions agro-climatiques et occupent 97, 423, 402, 1280, 431 parcelles respectivement pour les régions de Plaine de l'Imbo, Mumirwa, Plateau central et Dépression du Nord et de l'Est. Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1. La construction et l'exportation du tableau est réalisé grâce à '*flextable'* et *'officer'* deux packages de R.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS.

## Annexe 12 : Résultats du modèle logit multinomial pour le Manioc, Patates douces et le Riz pour toutes les régions

| Variables | Manioc | | | | Patates Douces | | | | Riz | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) |
| | Plaine de l'Imbo | Mumirwa | Plateau central | Dépression Nord/Est | Mumirwa | Crête Congo-Nil | Plateau Central | Dépression Nord/Est | Plaine de l'Imbo | Plateau Central | Dépression Nord/Est |
| dd_gs | 9.62e-04 (0.002) | 0.005*** (0.002) | 0.004** (0.002) | 0.002* (0.001) | 2.38e-04 (0.002) | -7.19e-04 (0.002) | 6.12e-04 (0.001) | 8.39e-04 (0.001) | 0.004*** (0.001) | 0.003* (0.002) | 1.01e-04 (0.001) |
| prcp_gs | -0.017** (0.007) | -0.016*** (0.005) | -0.024*** (0.005) | -0.030*** (0.008) | -0.010*** (0.004) | -0.029*** (0.005) | -0.017*** (0.004) | -0.032*** (0.005) | 0.003 (0.009) | -0.003 (0.006) | -0.030*** (0.008) |
| I(prcp_gs^2) | 1.85e-05** (0) | 2.03e-05*** (0) | 1.84e-05*** (0) | 2.83e-05*** (0) | 1.05e-05** (0) | 3.13e-05*** (0) | 1.77e-05*** (0) | 2.51e-05*** (0) | -1.66e-05 (0) | -1.01e-05* (0) | 1.99e-05*** (0) |
| fertilite Moyenne | -0.610 (0.786) | -0.255 (0.36) | -0.708** (0.334) | 0.303 (0.564) | -0.330 (0.239) | 0.013 (0.425) | -0.060 (0.172) | -0.841*** (0.243) | -1.325*** (0.447) | -1.001*** (0.228) | -1.257*** (0.402) |
| fertilite Faible | -1.307 (1.072) | -0.644 (0.425) | -0.073 (0.488) | 0.529 (0.749) | -0.922*** (0.333) | -0.295 (0.688) | -0.249 (0.26) | -1.128*** (0.405) | 0.242 (1.467) | -2.452*** (0.467) | -0.683 (0.472) |
| sup_parc_rec | -14.877* (7.843) | -0.482 (1.314) | -0.142 (0.75) | 0.288 (0.615) | -13.182* (6.745) | -3.985 (4.959) | -26.915*** (7.404) | -44.115*** (8.902) | 2.042 (1.475) | -4.503* (2.703) | -11.235*** (3.835) |
| resiv_dd | | -0.006*** (0.002) | -1.15e-05 (0.002) | | -9.04e-04 (0.002) | 1.44e-04 (0.002) | 3.21e-04 (0.002) | | | -2.94e-04 (0.002) | |
| resiv_prcp | | | 0.002 (0.003) | 0.006 (0.004) | | | 0.002 (0.002) | 0.009*** (0.003) | | 0.006 (0.004) | 0.013*** (0.005) |
| n (Parcelles) | 30 | 93 | 91 | 33 | 134 | 90 | 404 | 125 | 48 | 221 | 98 |

**Note :** la référence est Haricot pour toutes les régions agro-climatiques et occupent 97, 423, 402, 1280, 431 parcelles respectivement pour les régions de Plaine de l'Imbo, Mumirwa, Plateau central et Dépression du Nord et de l'Est. Erreur standard robuste clustérisée au niveau des ZD basé sur le plan d'échantillonnage (design-based) est indiquée entre les parenthèses. ***, **, * indiquent une significativité respectivement aux seuils de 0,01; 0,05 et 0,1.

**Source :** Auteur (2025) à partir de l'EICVMB 2019-2020, IGEBU et CHIRPS