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

Analyse socio-économique de ladoption du biochar dans la commune Gashikanwa

Ndayizeye, Méthode; Sous la direction de : Pr. Diomède Manirakiza

2024
UB, FSEA
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1864

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 ENVIRONNEMENT

ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE DE L'ADOPTION DU BIOCHAR DANS LA COMMUNE GASHIKANWA

Par :

NDAYIZEYE Méthode

Mémoire

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

Spécialité : Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles

Sous la direction de :

Pr. Diomède MANIRAKIZA

Bujumbura, Octobre 2024

==========

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Président : Dr. Ir. Serge NGENDAKUMANA

Directeur : Pr. Diomède MANIRAKIZA

Secrétaire : Dr. Ir. Patrice NDIMANYA

DEDICACES

A mes parents ;

A mes frères et sœurs ;

A mes amis et connaissances ;

Je dédie ce mémoire.

Méthode NDAYIZEYE

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit de plusieurs efforts ; raison pour laquelle, je voudrais exprimer mes sentiments de gratitude à toute personne qui a soutenu sa réalisation.

Nos sincères remerciements s'adressent en premier lieu au Professeur MANIRAKIZA Diomède, qui a spontanément accepté d'encadrer ce travail. Son soutien, son temps, ses efforts fournis, sa disponibilité nous ont été d'une grande importance. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du Jury de ce mémoire qui ont accepté de le lire et de l'évaluer.

Nous remercions également le corps professoral de l'Université du Burundi, en particulier ceux de la Faculté des Sciences Economiques et de Gestion, spécialement ceux de l'Economie Rurale, Sociale et Environnement pour la formation académique et humaine ainsi que le personnel administratif de ladite faculté pour les bons services qu'ils nous ont rendus.

Nous remercions ensuite nos collègues de classe et nos amis pour leurs encouragements pendant le cursus de formation et la rédaction de ce mémoire. Qu'ils trouvent ici, notre gratitude pour leurs contributions dans notre formation académique et humaine.

Enfin, que toute personne qui, de près ou de loin a contribué à l'accomplissement de ce travail trouve nos sincères remerciements.

RESUME

Le biochar, introduit par la société STARTER S.R.L., est étudié comme un amendement destiné à améliorer la fertilité du sol et à stocker le carbone, contribuant ainsi à la lutte contre la dégradation de l'environnement.

Nous avons mené une étude sur le biochar dans l'objectif d'analyser les facteurs socio-économiques et institutionnels qui influencent son adoption et le taux de son adoption. Cette étude nous a permis d'analyser aussi l'effet de l'adoption du biochar sur la production dans la commune de Gashikanwa à l'aide de la méthode d'appariement par score de propension.

Une enquête a été faite auprès de 384 ménages dont 161 adoptants du biochar 223 non-adoptants. Les déterminants ont été également analysé à l'aide du modèle logit et le taux d'adoption du biochar par la méthode Average Treatment Effect (effet moyen de traitement). Le Coefficient de concordance de Kendall a été utilisé pour déterminer les contraintes liées à l'adoption.

Les résultats de l'étude montrent que, la cherté des foyers pyrolytiques améliorés ; les techniques de production du biochar; manque des résidus agricoles tout au long de l'année ainsi que manque d'informations sur le biochar constituent les principales contraintes à l'adoption du biochar. Le taux d'adoption du biochar est estimé à 42,19%. L'adoption du biochar a été influencée positivement et significativement par le niveau d'instruction du chef de ménage à la probabilité de 27,93%, la superficie à 0,48%, la possession du téléphone à 7,9%, l'accès aux services de vulgarisations à 14,72% ainsi que l'appartenance aux organisations de producteurs à 10,72%. Les résultats d'appariement par score de propension(PSM) montrent que l'adoption du biochar a eu un effet positif mais statistiquement non significatif sur leur production. Les résultats de l'ATT ont révélé que l'adoption du biochar a augmenté la production par ménage des adoptants d'environ 294.79kg en moyenne bien que la différence n'est pas statistiquement significative.

Nos suggestions sont adressées au gouvernement, aux organismes de développement et aux agriculteurs afin de coaliser les forces pour mener les recherches approfondies sur l'utilisation et la production et l'utilisation du biochar.

Mots clés : Biochar, adoption ; effet ; score de propension ; Gashikanwa

ABSTRACT

Biochar, introduced by the company STARTER S.R.L., is studied as an amendment intended to improve soil fertility and store carbon, thus contributing to the fight against environmental degradation.

We conducted a study on biochar with the objective of analyzing the socio-economic and institutional factors that influence its adoption and the rate of its adoption. This study also allowed us to analyze the effect of biochar adoption on production in Gashikanwa commune using the propensity score matching method.

A survey was carried out among 384 households, including 161 biochar adopters and 223 non-adopters. The determinants were also analyzed using the logit model and the biochar adoption rate by the Average Treatment Effect method.The Kendall Coefficient of Agreement was used to determine the constraints related to adoption.

The results of the study show that, the high cost of improved pyrolysis fires; biochar production techniques; Lack of year-round agricultural residues and lack of information on biochar are the main constraints to the adoption of biochar. The adoption rate of biochar is estimated at 42.19%. The adoption of biochar was positively and significantly influenced by the level of education of the head of household at the probability of 27.93%, the area at 0.48%, the ownership of the telephone at 7.9%, the access to extension services at 14.72% and the membership of producer organizations at 10.72%. Propensity score matching (PSM) results show that biochar adoption had a positive but statistically insignificant effect on their production. The ATT results revealed that the adoption of biochar increased the production per household of adopters by about 294.79kg on average, although the difference is not statistically significant.

Our recommendations are addressed to the government, development agencies and farmers to join forces for the adoption of biochar.

Keywords: Biochar, adoption; effect; propensity score; Gashikanwa

==========

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i
DEDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES ix
SIGLES ET ABRÉVIATIONS x
AVANT-PROPOS xii
CHAPITRE I. INTRODUCTION 1
I.1. Contexte et justification 1
I.2. Problématique 3
I.3. Objectifs de recherche 5
I.3.1. Objectif global 5
I.3.2. Objectifs spécifiques 5
I.4. Hypothèses de recherche 5
I.5. Intérêt et justification de l'étude 6
I.5.1. Intérêt de l'étude 6
I.5.2. Justification de l'étude 6
I.6. Délimitation de l'étude 7
I.7. Organisation de l'étude 7
CHAP. II. REVUE DE LA LITTERATURE 8
II.1. Introduction 8
II.2. Revue théorique 8
II.2.1. Les approches théoriques utilisées dans la littérature sur l'analyse de l'adoption 8
II.2.1.1. Approches psychosociales 8
II.2.1.1.1. Théorie d'adoption d'innovation technologique 8
II.2.1.1.2. Théorie de l'acceptation de technologie 9
II.2.1.2. Approches économétriques de l'analyse de l'adoption 11
II.2.1.2.1. Théorie d'utilité de McFadden : Fondement économique de l'adoption 11
II.2.1.2.2. Modélisation économétrique 11
II.2.2. Théorie sur l'évaluation de l'effet d'intervention et principales méthodes proposées dans la littérature 12

II.2.2.1. Théorie du changement 12
II.2.2.2. Principales méthodes proposées dans la littérature 14
II.3. Revue empirique 17
II.3.1. Définition et caractéristiques physico-chimiques du biochar 17
II.3.2. Le potentiel du biochar/charbon à augmenter le stockage de Carbone dans les sols 21
II.3.3. Impact du biochar/charbon sur les propriétés du sol 24
II.3.4. Impact du biochar/charbon sur la croissance des plantes 26
II.3.5. Revue empirique de l'Utilisation du Biochar en Europe, en Amérique et en Afrique 27
Conclusion du deuxième chapitre 30
CHAP III. METHODOLOGIE DE RECHERCHE 31
III.1. Aperçue de l'étude 31
III.2. Description de la commune Gashikanwa 31
III.3. Conception de l'étude 33
III.4. Méthodes et outils d'analyse 34
III.4.1. Mesures des Contraintes de l'adoption du biochar 35
III.4.2. Cadre économétrique et technique d'estimation des déterminants de l'adoption. 36
III.4.3. Impacts/Effets d'adoption du biochar sur la productivité du sol 38
III.4.4. Méthode d'appariement ou Matching 42
III.5. Procédure d'échantillonnage 42
III.5.1. Population cible 42
III.5.2. Détermination de la taille de l'échantillon 43
III.6. Méthodes de collecte et source des données 43
III.6.1. Pré-enquête 44
III.6.2. Enquête 44
III.7. Saisie et traitement des données 44
III.8. Description des données et des variables 45
III.8.1. Variables dépendantes 45
III.8.1.1. Adoption (Y) 45
III.9. Cadre conceptuel de l'étude 49
Conclusion du troisième chapitre 50

CHAPITRE IV. PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 51
IV.1. Présentation et interprétation des résultats 51
IV.1.1. Analyse descriptive sur les caractéristiques des exploitants agricoles selon le statut d'adoption 51
IV.1.1.1. Production et rendement des agriculteurs 52
IV.1.1.2. Caractéristiques sociodémographiques des répondants 53
IV.1.1.3. Caractéristiques socioéconomiques des répondants 55
IV.1.1.4. Caractéristiques institutionnelles des répondants 57
IV.1.2. Les contraintes à l'adoption du biochar 58
IV.1.3. Evaluation du taux d'adoption du biochar 58
IV.1.4. Les déterminants d'adoption du biochar 59
IV.1.4.1. Test de multicolinéarité 59
IV.1.4.2. Test de Hosmer-Lemeshow 60
IV.1.4.3. Test de ROC 60
IV.1.4.4. Estimation des facteurs influençant les agriculteurs à l'adoption 61
IV.1.5. Effet de l'adoption du biochar sur le rendement des agriculteurs 63
IV.1.5.1. Evaluation de la qualité d'appariement et réduction des biais 63
IV.1.5.2. Résultats de l'effet de l'adoption du biochar sur le rendement des agriculteurs 67
IV.2. Discussion des résultats 69
IV.2.1. Contraintes liées à l'adoption du biochar 69
IV.2.2. Taux de l'adoption du biochar 70
IV.2.3. Les facteurs de l'adoption du biochar 70
IV.2.4. Effet de l'adoption du biochar sur la productivité du sol (utilisé dans le champ de haricot) 73
Conclusion du quatrième chapitre 74
CHAPITRE V. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 75
V.1. Conclusion générale 75
V.2. Suggestions 76
V.3. Domaines et limites de l'étude 77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 79
ANNEXES 83

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux

Tableau 1 : Forces et faiblesses de la méthode d'appariement par score de propension 17
Tableau 2: Techniques de pyrolyse et gazéification et leurs produits typiques (Bridgwater, 2007) 18
Tableau 3 : Les variables du modèle et les signes attendus des paramètres 48
Tableau 5: Sexe et statut matrimonial des répondants 54
Tableau 6: Age, taille de ménage et main d'œuvre familiale des répondants 55
Tableau 7 : Caractéristiques institutionnelles des répondants 57
Tableau 8 : Classement des contraintes de l'adoption du biochar 58
Tableau 9 : Résume des résultats des tests de spécification du modèle 61
Tableau 10 : Les déterminants de l'adoption du biochar 62
Tableau 11: Test de réduction des biais 64
Tableau 12 : Contrôle de biais standardisés des variables indépendantes 66
Tableau 13 : Résultats d'estimation d'effet de l'adoption du biochar 68

Figures

Figure 1 : Modèle de l'acceptation des technologies (TAM) 10
Figure 2 : Four pyrolytique qu'on utilise pour la production de biochar (photo prise sur le terrain) 19
Figure 3 : Facteurs qui influencent la stabilité et la décomposition ou transport du biochar dans les sols dans le temps. L'épaisseur des barres représente l'importance de chaque facteur dans le temps. 24
Figure 4 : Aperçu de l'environnement de l'étude 33
Figure 5 : Cadre conceptuel de l'étude 49
Figure 6 : Illustration de la production en are des agriculteurs qui ont utilisé le biochar dans les champs de haricot 52
Figure 7 : Rendement en Kilogramme par are des agriculteurs pour les champs de haricots 52
Figure 8 : Niveau d'instruction des répondants 54
Figure 9: Possession du téléphone des répondants 56
Figure 10 : Superficie des répondants 56
Figure 11: Illustration du niveau d'adoption du biochar 59
Figure 12: Courbe de ROC 60
Figure 13 : Biais standardisé avant et après appariement 65
Figure 14 : Distribution des scores de propension et support commun 67

==========

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

%	: pourcentage
ATE	: Average Treatment Effect
ATT	: Average Treatment on Treated
°C	: Degré Celsius
C	: Carbone
C/kg	: Carbone par kilogramme
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CEA	: Capacité d'Echange Anionique
CH4	: Méthane
CO2	: Dioxyde de carbone
CCNUCC	: Convention-cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique
DPAE	: Direction de la Promotion de l'Agriculture et de l'Élevage
EMT	: Effet Moyen de Traitement
EMTNT	: Effet Moyen de Traitement sur les Non Traités
FAO	: Food and Agriculture Organisation
FUP	: Facilité d'Utilité Perçue
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
$GtCO_2$	: Gigatonne de dioxyde de carbone
IFAD	: International Found Agriculture Development
H	: Hydrogène
H2	: Dihydrogène
K	: Potassium
Km2	: Kilomètre carré
Mg	: Magnésium
N_2O	: protoxyde d'azote
O_2	: Oxygène
ONU	: Organisation des Nations Unies
ROC	: Receiver Operating Characteristics
P	: Phosphore

PH : Potential d'Hydrogène

PSM : Propensity Score Matching

S.R.L : Société à Responsabilité Limitée

t/ha : Tonnes par hectar

TAM : Technology Acceptance Model

TIC : Technologies de l'information et de communication

UP : utilité perçue

VIF : Variance Inflation Factor

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'obtention d'un diplôme de Master en Economie Rurale, Sociale et de l'Environnement. Spécialité : Economie de l'Environnement et des ressources Naturelles.

Le thème de l'étude « **Analyse socio-économique de l'adoption du Biochar dans la commune Gashikanwa »** a été choisi afin de mieux examiner les facteurs socioéconomiques qui influencent les agriculteurs à adopter du biochar mais aussi par cette étude, nous avons analysé l'effet du biochar sur la productivité du sol.

Pour bien réaliser cette étude une enquête a été menée auprès des agriculteurs mais aussi des ouvrages généraux, des rapports ainsi que des revues documentaires ont été consultés.

En fin, les résultats de ce travail montrent que l'adoption du biochar a une importance capitale dans l'accroissement du rendement agricole et dans la valorisation des résidus agricoles.

CHAPITRE I. INTRODUCTION

I.1. Contexte et justification

La notion d'environnement naturel, souvent désignée par le seul mot « environnement », a beaucoup évolué au cours des derniers siècles et tout particulièrement des dernières décennies. Dans l'encyclopédie Larousse ou dans d'autres sources académiques sur l'environnement, on y trouve la définition de l'Environnement telle que « l'environnement est compris comme l'ensemble des composants naturels de la planète Terre, comme l'air, l'eau, l'atmosphère, les roches, les végétaux, les animaux et l'ensemble des phénomènes et interactions qui s'y déploient, c'est-à-dire tout ce qui entoure l'Homme et ses activités ; bien que cette position centrale de l'être humain soit précisément un objet de controverse dans le champ de l'écologie ».

La CCNUCC définit l'environnement comme "l'ensemble des systèmes naturels et artificiels qui permettent la vie sur Terre, y compris l'air, l'eau, la terre, la faune et la flore".

Au XXI^{e} siècle, la protection de l'environnement est devenue un enjeu majeur, en même temps que s'imposait l'idée de sa dégradation à la fois globale et locale, à cause des activités humaines polluantes. La préservation de l'environnement est un des trois piliers du développement durable. C'est aussi le 7^{e} des huit objectifs du millénaire pour le développement, considéré par l'ONU comme *« crucial pour la réussite des autres objectifs énoncés dans la Déclaration du Sommet du Millénaire»*.

En effet, le sol et ses produits sont les composants les plus importants de l'environnement qui méritent la protection et la valorisation. Les sols de la planète (sols naturels relictuels + sols cultivés) contiendraient aujourd'hui 3,3 fois plus de carbone que l'atmosphère, Soit 4,5 fois plus que la biomasse des plantes et des animaux terrestres n'en renferme hors-sol, ce qui fait du sol un bon levier pour le stockage du carbone. (**Source : les rapports du GIEC**)

Lorsque des écosystèmes naturels sont labourés et mis en culture, la plus grande partie du carbone piégé dans ces sols est libérée dans l'atmosphère sous la forme de CO_2 ou de méthane, deux gaz à effet de serre, ou dans l'eau sous forme d'acide carbonique. Des millions d'hectares de sols naturels, forestiers notamment, sont mis en culture tous les ans, notamment pour la production de biocarburants (*Hurot, 2009*).

Le biochar[1] et la *terra preta*[2] *(*terre noire*)* qu'il peut former peuvent contribuer à la séquestration du carbone dans les sols végétalisés (cultivés ou forestiers) durant des centaines voire des milliers d'années.

Le biochar est le sous-produit de la pyrolyse, une décomposition thermochimique de la matière organique qui se réalise quand de la biomasse est exposée à des températures supérieures à 350°C en l'absence ou très basse concentration d'oxygène (O_2) (*Lehmann et Joseph, 2009*). Ces conditions sont similaires à celles de la production du charbon de bois lors d'un feu de forêt ou de champs (*Schmidt et Noack*, 2000) ou lors de la carbonisation dans les charbonnières traditionnelles.

Historiquement, le charbon a été principalement une source énergétique domestique (cuisson, chauffage) ou industrielle (fonte de minerais, production d'acier) même si d'autres applications possibles étaient la médecine, les peintures rupestres et l'agronomie (*Brown, 2009*). Le biochar est le charbon produit spécifiquement pour être appliqué au sol pour en améliorer la productivité, les qualités physicochimiques et les stocks de carbone (*Lehmann et al., 2006a*).

Le GIEC évalue le stockage de carbone grâce au biochar entre 0,2 et 3 $GtCO_2$/an soit beaucoup moins que les estimations précédentes datant de 2010.

Non seulement le biochar peut enrichir les sols en y augmentant fortement et durablement le taux de carbone (150 g C/kg de sol par rapport à 20-30 g C/kg dans les sols environnants), mais les sols enrichis par du biochar se développent naturellement plus en profondeur; ils sont, en moyenne, plus de deux fois plus profonds que les sols environnants. Par conséquent, le carbone total stocké dans ces sols peut être d'un ordre de grandeur plus élevé que les sols adjacents.

Le biochar diminue les émissions du sol en CO_2 et méthane, mais aussi en protoxyde d'azote (N_2O ou oxyde nitreux), trois gaz à effet de serre préoccupants pour le climat. **Yanai** et **al**. 2007 ont constaté en conditions de laboratoire une suppression partielle, sous certaines conditions très dépendantes de l'humidité, des émissions de N_2O quand du biochar a été ajouté au sol.

[1] Le **biochar** est une forme de charbon produit à partir de la pyrolyse (chauffage en l'absence d'oxygène) de matières organiques telles que les résidus agricoles, le bois ou les déchets biologiques.
[2] La **terra preta** est un type de sol anthropique (créé par l'homme) découvert en Amazonie, connu pour sa fertilité exceptionnelle.

Le piégeage et le stockage à long terme du carbone par le biochar ne nécessitent ni progrès technique ni recherche fondamentale car ses outils de production sont robustes et simples, ce qui le rend approprié pour de nombreuses régions du monde **(***Yann Arthus-Bertrand, 1999***)**.

C'est dans ce contexte qu'il est nécessaire aujourd'hui d'améliorer la productivité et la restauration du sol en adoptant la technologie de biochar qui présente des qualités environnementales et d'importants avantages dans le but de limiter en définitif les dégradations du sol et la baisse de productivité. L'agriculture invite à promouvoir et à pratiquer une agriculture économiquement viable, saine pour l'environnement et socialement équitable.

I.2. Problématique

Au Burundi comme dans les pays de la sous-région, l'introduction de nouvelles technologies de production des amendements à partir des résidus agricoles est l'une de bonnes options pour améliorer la productivité du sol et accroître la protection de l'environnement. C'est dans cette optique que STARTER S.R.L.[3] Branche du Burundi est fermement engagée à faire en sorte que la production de biochar soit accélérée jusqu'à atteindre le niveau suffisant pour amender et restaurer les sols Burundais.

Les changements climatiques observés récemment sont liés à un réchauffement de la planète. L'augmentation de la température moyenne globale est causée très probablement par une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont les émissions sont liées principalement aux activités anthropiques. La mise en œuvre de modes de gestion des terrains agricoles et pâturages aptes à augmenter les stocks de carbone dans les sols a été évoquée parmi les stratégies possibles de mitigation des changements climatiques (*Pachauri et Meyer (eds.), 2014*) (Criscuoli : Stabilité du charbon végétal (biochar) dans le sol et impact sur la productivité et les cycles des nutriments des prairies alpines, Thèse de doctorat de : Sciences du sol et de l'environnement).

Le 21ème siècle est également caractérisé par une augmentation de la population mondiale, qui passera de 7.4 milliards en 2015 à 11.2 milliards en 2100 (United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Population Division, 2015), ce qui nécessite de doubler les productions agricoles avant 2050 (*Tilman et al., 2011*).

[3] STARTER S.R.L: c'est une entreprise qui a travaillé sur la production de biochar et la cuisson propre dans les zones rurales du Burundi de 2018 à 2022

L'objectif parait très ambitieux pour de multiples raisons parmi lesquelles on peut citer l'impact des changements climatiques sur les productivités agricoles elles-mêmes (*Ray et al., 2013; Rosenzweig et al., 2014*). Pour répondre à ces deux problématiques, depuis une décennie, l'enfouissement du charbon végétal (biochar) dans les sols est proposé comme une stratégie durable pour à la fois (1) mitiger les changements climatiques et (2) augmenter les productions agricoles (win-win) (*Biederman et Harpole, 2012; D. A. Laird, 2008*).

En effet, le temps de résidence du biochar dans les sols est probablement de l'ordre de plusieurs centaines d'années (*Wang et al., 2015*). Ainsi, l'amendement par le biochar modifie les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols à long terme.

Les gains de production enregistrés ces dernières décennies ont été obtenus sans qu'aucun nouveau moyen de production d'origine industrielle ou artisanale ne viennent enrichir la panoplie, pourtant extrêmement pauvre, des agriculteurs. Aujourd'hui, outils, moyens de transport, produits chimiques et matériel biologique font cruellement défaut à la totalité des exploitations agricoles burundaises.

Si de nombreuses exploitations sont frappées de plein fouet par l'érosion et la baisse de fertilité des sols, c'est que les moyens de production et parfois aussi la force de travail font défaut pour enrayer cette évolution régressive.

La faible productivité du travail qui en résulte (pendant les pointes de travail) et la décapitalisation des exploitations agricoles sont donc responsables des dégâts causés par l'érosion et des difficultés rencontrées par les agriculteurs pour maintenir et accroître la fertilité de leurs sols.

La majorité des thèmes techniques vulgarisés sont donc impossibles à mettre en œuvre chez les paysans faute de moyens (outillage, force de travail, matière organique, capital circulant) ou parce que leur application n'est pas conforme à l'intérêt des agriculteurs. Alors que les paysans burundais sont abreuvés de conseils techniques le plus souvent inadaptés, l'administration agricole n'a pas su mettre à leur disposition les moyens de production qui leur font défaut.

La politique de "protection de l'environnement" -assise sur une conception particulière de l'écologie pour laquelle les agriculteurs sont désignés comme les principaux coupables de la détérioration de l'environnement- a également conduit à des résultats contraires aux objectifs escomptés.

En principe l'adoption de la technologie de production et d'utilisation d'un amendement du sol devrait augmenter sa productivité. Notre travail se propose de répondre à la question suivante : **Comment les populations de la commune Gashikanwa adoptent le charbon à usage agricole(biochar)?**

Les questions spécifiques sont :

1. Quelles sont les contraintes liées à l'adoption du biochar?
2. Quels sont les facteurs de l'adoption du biochar ?
3. Quel est le taux d'adoption du biochar ?
4. Quels sont les effets de l'adoption du biochar sur la productivité du sol ?

I.3. Objectifs de recherche

I.3.1. Objectif global

L'objectif principal de l'étude est de contribuer à l'analyse socioéconomique de l'adoption du Biochar introduit par STARTER S.R.L et évaluer son effet sur la productivité du sol afin de servir de base pour la vulgarisation de cet amendement.

I.3.2. Objectifs spécifiques

Pour aboutir aux résultats attendus de notre étude, il s'agit spécifiquement de :

1. Identifier les contraintes liées à l'adoption du Biochar;
2. Déterminer les facteurs influençant l'adoption du biochar pour les ménages ;
3. Déterminer le taux d'adoption du biochar ;
4. Evaluer les effets de l'adoption du biochar sur la productivité du sol.

I.4. Hypothèses de recherche

A ces différents objectifs spécifiques ci-hauts correspondent les hypothèses suivantes :

H1 : L'adoption du biochar n'a pas rencontré de contraintes.

H2 : Le taux d'adoption du biochar est faible.

H3 : L'adoption du biochar est influencée par les facteurs socioéconomiques et institutionnels des ménages agricoles.

H4 : L'adoption du biochar n'a pas d'effets sur la production.

I.5. Intérêt et justification de l'étude

I.5.1. Intérêt de l'étude

Notre recherche nous intéresse dans le sens qu'elle cadre avec la formation acquise en économie rurale. Elle apportera une contribution sur des différentes institutions de recherche et des organisations ayant des programmes de développement, plus particulièrement au niveau de la compréhension des méthodes d'analyse d'impact des programmes et leurs effets réels sur les bénéficiaires. Elle offre une compréhension plus fine de l'impact de l'adoption du biochar sur la productivité du sol et la protection de l'environnement. D'autre part, peu de recherches ont tenté d'expliquer de façon processuelle et interactive la relation entre l'adoption des amendements biologiques sur la productivité et les projets qui en découlent au Burundi. Les résultats de cette recherche contribueront à la revue empirique des autres auteurs qui seront intéressés de mener leurs études sur ce genre de thématique. L'étude présente également un intérêt particulier dans la mesure où il va permettre de connaitre l'importance du poids d'amender les sols par le biochar sur l'ensemble de l'économie du pays. Du fait de son importance, il peut servir d'outil d'aide à la prise de décision pour les décideurs dans l'orientation de leurs futures interventions.

I.5.2. Justification de l'étude

Le sol burundais est le premier facteur pour la production agricole. De nos jours, il devient de plus en plus acide et peu productif sur le long terme. L'usage des engrais chimiques s'accroit exponentiellement pour essayer de répondre à la demander du marché sans tenir compte de la dégradation du sol. L'usage d'amendement qui tient compte de la sauvegarde de la fertilité du sol comme le biochar apparait comme une solution équilibrée qui permet d'augmenter la productivité et de mitiger de changement climatique par la séquestration du carbone dans le sol. Suite à ces tristes réalités incontestables, nous nous sommes intéressés sur ce sujet pour montrer l'impact de l'adoption de la technologie de production et d'usage de biochar pouvant améliorer les conditions de vie des ménages qui ont adopté cette technologie à travers l'augmentation de productivité du sol et la valorisation des résidus agricoles dans la cuisson propre sans nécessairement utiliser les bois de chauffage.

I.6. Délimitation de l'étude

Notre travail d'analyse d'impact de l'adoption d'une technologie de production de biochar sur la productivité du sol et la protection de l'environnement sera exécuté par une enquête socioéconomique conduite auprès des agriculteurs bénéficiaires et non bénéficiaires des poêles de STARTER S.R.L au Burundi en commune Gashikanwa. Le travail sera conduit sur une durée de 6 mois en raison des contraintes temporelles et financières. Cette période correspond à celle dédiée au travail marquant la fin du programme de master selon le règlement académique en vigueur au Burundi. Il sera exécuté à partir des données collectées au cours des descentes sur le terrain. L'échantillon prévu sera de 384 ménages dans la commune Gashikanwa.

I.7. Organisation de l'étude

La présente étude sera subdivisée en cinq chapitres. Premier chapitre présente le contexte général, la problématique et les questions de recherche, les objectifs, les hypothèses, l'importance de l'étude ainsi que l'organisation de l'étude. C'est dans le chapitre deux où nous éclairons la conception de la recherche. Le troisième chapitre esquisse la revue de la littérature. Dans le quatrième chapitre, il est question de faire l'interprétation et la discussion des résultats. Le dernier chapitre est la conclusion générale et les recommandations.

CHAP. II. REVUE DE LA LITTERATURE

II.1. Introduction

Ce chapitre contient une revue de la littérature existante en relation avec l'adoption d'une technologie agricole et son effet sur la productivité du sol. Il est composé de la revue théorique et empirique. Il met en exergue les théories nécessaires nous permettant de comprendre la logique de l'étude et la contribution des différents auteurs sur les cas similaires étudiés.

II.2. Revue théorique

Cette étude a pris en considération les approches suivantes comme pilier : il s'agit de deux approches psychosociales à savoir la théorie de l'adoption d'innovation technologique qui a été beaucoup utilisée pour identifier les facteurs influençant la décision d'un individu d'adopter ou de rejeter une innovation et la théorie d'acceptation d'une technologie qui a permis de comprendre le comportement des agriculteurs de choisir une nouvelle technologie dans leur vie quotidienne. Il s'agit également des approches économétriques à savoir la théorie d'utilité qui montre la décision rationnelle d'adoption ou non d'une nouvelle technologie et la modélisation économétrique qui distingue les modèles les plus utilisés dans l'analyse des déterminants de l'adoption. De plus, la théorie du changement et les méthodes couramment utilisées pour l'évaluation d'impact des projets sont présentées.

II.2.1. Les approches théoriques utilisées dans la littérature sur l'analyse de l'adoption

Deux approches (approches psychosociales et économétriques) ont été développées pour analyser l'origine et l'incitation de la décision d'adopter ou de ne pas adopter les variétés améliorées pour un agriculteur. L'analyse empirique a été mise en place pour critiquer les modèles les plus utilisés en identifiant les déterminants de l'adoption.

II.2.1.1. Approches psychosociales

Plusieurs théories psychosociales ont été développées pour analyser l'adoption au niveau des individus mais nous avons préféré d'utiliser deux. La synthèse est présentée ci-dessous.

II.2.1.1.1. Théorie d'adoption d'innovation technologique

Un des précurseurs des études sur l'adoption des innovations technologiques est Rogers (1963), qui définit une innovation comme « une idée, une pratique ou un objet perçu comme nouveau par une personne ou une unité d'adoption ».

En effet, plusieurs études ont essayé de définir le concept d'adoption d'innovation des technologies. Selon Zomboudre (2017) l'adoption d'innovation est le processus centré sur le cheminement mental de l'individu depuis la première information jusqu'à l'adoption.

Le concept d'adoption d'innovation étant utilisé pour décrire le comportement individuel vis à-vis d'une innovation. Elle est donc un choix microéconomique dont les multiples variables explicatives ont été identifiées par des séries d'études théoriques et empiriques liées au choix des agriculteurs.

Toutefois, Rogers (2003) définit que l'adoption est une décision d'utiliser de façon complète une innovation reconnue comme étant la meilleure voie d'actions disponible et le rejet est la décision de ne pas l'adopter (Rhaiem, 2014). Elle n'est pas un événement ponctuel, elle est le fruit d'un long processus. Par ailleurs Rogers (1983) considère que le choix d'adopter une technologie n'est pas simple mais plutôt une série d'événements qui mènent à l'utilisation perpétuelle de ladite technologie.

Dans le domaine agricole, elle représente à la fois par la décision de l'agriculteur de mettre en place un système cultural innovant Roussy et al. (2015). Selon Van Den Ban, et al. (1994), l'adoption d'une innovation se réfère à la décision de mise en œuvre de propositions techniques nouvelles dans un système de réduction et d'améliorer leur utilisation de manière croissante.

De plus, elle résulte de la structure et de la nature des échanges qu'ils ont avec leurs réseaux sociaux et de leurs interactions avec les institutions qui accompagnent les transferts d'innovations notamment la vulgarisation agricole (Rogers, 2003 ; Young, 2007 ; Monge et al., 2008 ; Ali-Olubandwa et al., 2010). Par ailleurs, elle résulte des caractéristiques socio-économiques des potentiels adoptants, des informations qu'ils reçoivent et de comment ils les utilisent (Feder et Umali, 1993 ; Rogers, 2003) ainsi que des conditions d'accès aux ressources nécessaires.

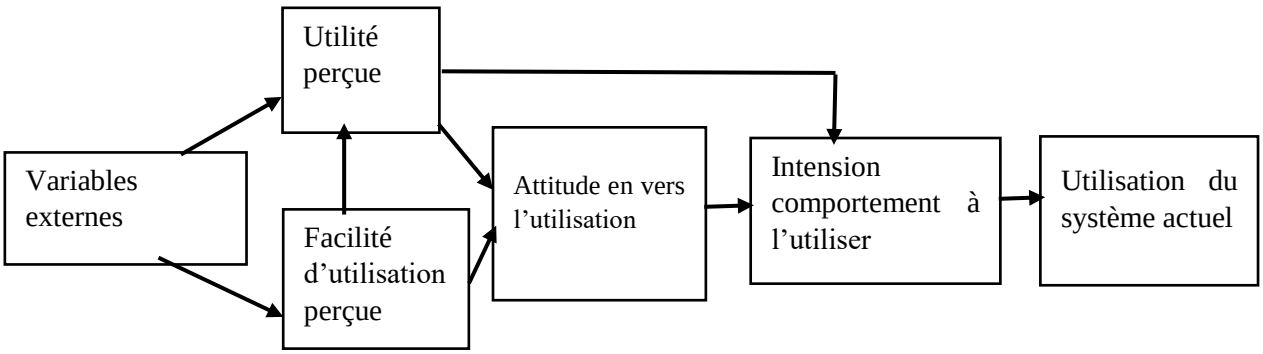
II.2.1.1.2. Théorie de l'acceptation de technologie

Le modèle d'acceptation des technologies (TAM) a été introduit par Fred Davis en (1986) pour sa proposition de doctorat. Le TAM est spécifiquement conçu pour modéliser l'acceptation des systèmes d'information ou des technologies par les utilisateurs. En 1989, Davis a utilisé le TAM pour expliquer le comportement d'utilisation des ordinateurs.

L'objectif du TAM de Davis (1989) est d'expliquer les déterminants généraux de l'acceptation de l'ordinateur qui permettent d'expliquer le comportement des utilisateurs dans un large éventail de technologies informatiques et de populations d'utilisateurs finaux.

Le modèle TAM de base incluait et testait deux croyances spécifiques : L'utilité perçue (UP) et la facilité d'utilisation perçue (FUP). L'utilité perçue est définie comme la probabilité subjective de l'utilisateur potentiel que l'utilisation d'un certain système (par exemple, un système de paiement électronique à plate-forme unique) améliora sa condition de vie et la facilité d'utilisation perçue fait référence au degré auquel l'utilisateur potentiel s'attend à ce que le système cible ne soit pas compliquée (Davis, 1989). Venkatesh et Davis (1996), ont constaté que l'utilisation perçue avaient une influence directe sur l'intention de comportement, éliminant ainsi la nécessité du concept d'attitude.

Figure 1 : Modèle de l'acceptation des technologies (TAM)



Source : Davis, (1989)[4]

Selon cette théorie, les producteurs agricoles prennent décision d'accepter l'utilisation d'une nouvelle technologie dans le but d'acquérir des compétences spécialisées en agriculture. En outre, les agriculteurs sont incités à l'utilisation d'une nouvelle technologie par ce que cette nouvelle n'est pas compliquée du fait de sa production potentielle par rapport à l'ancienne.

[4] Davis, F.D. (1989).Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13(3),319-340.

II.2.1.2. Approches économétriques de l'analyse de l'adoption

Les approches économétriques de l'analyse de l'adoption sont présentées dans les paragraphes ci-dessous.

II.2.1.2.1. Théorie d'utilité de McFadden : Fondement économique de l'adoption

Selon la théorie économique de McFadden (1975) ; Gourieroux (1989), il est prédit que, face à un problème de choix, l'agent économique rationnel opte pour l'option qui maximise son utilité. L'utilité est une mesure du bien-être ou de la satisfaction obtenue par l'obtention d'un bien, d'un service ou d'argent (Mosnier, 2009). Bien qu'elle soit couramment économique, (Rasmussen et Reenberg, 2012) montrent que cette rationalité peut être socioculturelle ou écologique.

Dans cette approche, l'hypothèse de base est celle de maximisation de l'utilité du consommateur selon laquelle il prend la décision en choisissant l'alternative qui lui procure la plus forte utilité. Ainsi, les probabilités de choix sont construites à partir de la maximisation d'utilités stochastiques.

Selon cette théorie, les producteurs agricoles sont supposés prendre des décisions rationnelles d'adoption ou non des innovations basées sur une maximisation de leur utilité (Nkamleu et Coulibaly, 2000). La théorie de maximisation de l'utilité est utilisée pour expliquer le comportement d'adoption des innovations agricoles par les agriculteurs. Dans la littérature, toutes les études sur les facteurs influençant les décisions d'adoption ou rejet sont souvent analysés à travers différentes approches économétriques.

II.2.1.2.2. Modélisation économétrique

De nombreuses études sur les facteurs d'adoption des technologies agricoles ont utilisées des modèles économétriques. Parmi ceux –ci, les modèles Tobit, Logit, Probit et Heckman sont les plus couramment proposés dans la littérature.

L'utilisation du modèle Tobit est recommandée pour déterminer les facteurs explicatifs de l'intensité (taux) d'adoption des innovations agricoles. En effet, ce modèle a permis de déterminer les facteurs explicatifs de l'intensité d'adoption des techniques de conservation des sols en Sierra-Léone (Adesina et Zinnah, 1993), au Burkina Faso (Kazianga et Masters, 2002), au Malawi (Ngwira *et al.,* 2014), au Niger (Baidu-Forson, 1999), au Zimbabwe (Mazvimavi et Twomlow, 2009), en Éthiopie (Anley *et al.*, 2007).

Ils sont également employés pour analyser les déterminants de l'intensité de l'adoption des variétés améliorées de riz et sorgho au Burkina Faso et en Guinée (Adesina et Baidu-Forson, 1995), de maïs et niébé au Niger (Oladele, 2005).

Les modèles probit ou logit sont utilisés lors qu'il s'agit d'analyser les facteurs d'adoption des innovations ou de rejet par les ménagers. Ils considèrent que la variable adoption est dichotomique c'est-à-dire la variable qui prend la valeur 1 si l'agriculteur adopte et 0 si non. Certains auteurs ont utilisé le modèle logit pour analyser les déterminants d'adoption des innovations en techniques de conservation des eaux et des sols(Ouédraogo *et al.,* 2010), des semences améliorées de maïs en zambie (Khonje *et al.,* 2015), de l'irrigation goute à goute en algerie (Salhi *et al.,* 2012. La différence entre les modèles binaires Logit et Probit réside dans la spécification de la fonction de répartition. Le modèle Probit est régi par la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite de moyenne 0 et variance 1. Quant au modèle Logit, il dérive de la fonction de répartition de la loi logistique de moyenne 0 et variance 1.

Le modèle de sélection d'Heckman permet d'identifier non seulement les facteurs d'adoption des innovations agricoles, mais aussi d'expliquer l'intensité d'utilisation (taux d'adoption) de celles-ci. De nombreux auteurs l'ont utilisé dans leurs études. Par exemple Mcbride et Daberkow (2003) ont analysé les facteurs d'adoption des innovations agricoles et l'évolution des superficies allouées à celles-ci aux États-Unis. *Ngwira et al. (2014)* ont analysé les déterminants de l'adoption et de l'extension des superficies sur lesquelles les agriculteurs appliquent les techniques de conservation des eaux et des sols au Malawi.

II.2.2. Théorie sur l'évaluation de l'effet d'intervention et principales méthodes proposées dans la littérature

Cette partie présente la théorie sur l'évaluation d'effet de l'intervention d'un programme et les critiques des différentes méthodes les plus couramment utilisées dans les littératures.

II.2.2.1. Théorie du changement

Selon l'ONU (2008), une théorie du changement est une méthode qui explique comment une intervention donnée ou un ensemble d'interventions sont censés conduire à un changement précis sur le plan du développement, grâce à une analyse des liens de cause à effet fondée sur les éléments de preuve existants. En effet, toute organisation vit une transformation dans ses activités et toute transformation représente un changement.

Raynal (2000) définit le changement comme étant « un phénomène interactif entre un acteur, un système et un environnement ». Les dirigeants le considèrent comme une des solutions d'évolution des marchés et de la technologie. Définir le changement comme étant un phénomène interactif implique que c'est une dynamique nécessaire à toute organisation. Autissier et Moutot (2007) définit le changement comme étant « une rupture entre un existant obsolète et un futur synonyme de progrès ». La rupture, c'est une transformation d ' un état à un autre pour stimuler la force motrice de l'évolution, c'est un passage d ' un état de déséquilibre à un autre plus progressif. Ainsi, le changement est un passage d'une situation actuelle à une nouvelle situation.

Selon IFAD (2019)[5], la théorie du changement est un moyen visuel, structuré d'énumérer les étapes nécessaires pour obtenir les résultats d'une intervention. Il décrit les étapes de la théorie du changement qui sont reliées à travers la chaine causale dans un projet.

Etape 1. Les intrants : ressources nécessaires à la mise en œuvre des activités du projet. Exemples : fonds, fournitures, le personnel agricole.

Etape 2. Activités : actions entreprises par les responsables de la mise en œuvre du projet, nécessaires pour obtenir les résultats. Exemples : développer et donner un programme de formation pour les agriculteurs, fourniture de subventions pour l'achat des foyers pyrolytiques améliorés aux agriculteurs.

Etape 3. Extrants : produits ou services issus directement d'activités de projet. Exemples : agriculteurs formés, quantités de biochar achetée par l'agriculteur.

Etape 4. Résultats : changements qui se produisent lorsque les bénéficiaires utilisent de nouvelles compétences pratiques et/ou ressources du projet. Exemples : nouvelles compétences des agriculteurs, changements dans les décisions de production.

Etape 5. Buts : amélioration des moyens de subsistance à plus long terme. Exemples : augmentation des rendements, des revenus des ménages et la réduction de la pauvreté rurale.

Enfin, différentes méthodes ont été développées et utilisées dans la littérature pour évaluer l'effet des programmes, des politiques et de l'adoption de technologies agricoles sur le rendement, la réduction de la pauvreté ou le bien-être, etc.

[5]Formation sur l'évaluation d'impact

II.2.2.2. Principales méthodes proposées dans la littérature

Des méthodes techniques empiriques sont utilisées dans l'évaluation d'impact pour identifier ou modéliser un scénario contrefactuel (sans le programme d'intervention ou la politique) pour la comparer aux résultats trouvés avec la situation réelle (avec l'intervention du programme ou la politique). Identifier et mesurer des estimations de résultats contrefactuels valides est le principal défi de l'évaluation d'impact. Le cadre des résultats contrefactuels de Rubin (1974) est considéré comme la référence à partir de laquelle plusieurs méthodes d'évaluations d'impacts se réfèrent pour relever ce défi. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes : les méthodes expérimentales et les méthodes non expérimentales ou quasi expérimentales.

La méthode expérimentale constitue de manière aléatoire deux groupes de la population étudiée dans les deux situations différentes : l'un avant l'intervention et l'autre après l'intervention du programme. De ce fait, on mesure l'impact en comparant les résultats de deux groupes. Utilisée pour la première fois par Fisher (1926) et Neyman (1923, 1935), la méthode expérimentale est considérée comme la plus puissante de toutes les méthodes d'évaluations d'impact (Imbens et Wooldridg, 2009) mais sa réalisation est très compliqué et difficile puis qu'elle nécessite d'énormes ressources financières.

Des travaux de Heckman (Heckman 1992, Heckman et Smith 1995) présentent des principales critiques. Ces critiques sont centrées sur la composition des participants, sur le comportement des non participants et sur l'effet de l'expérimentation. L'une des leçons des critiques de Heckman montre que l'identification de l'effet causal moyen par les méthodes expérimentales repose sur des hypothèses d'identification dont certaines ne peuvent pas être testées et dont l'apparence doit être discutée à priori sur le plan de la possibilité des phénomènes économiques qui les justifient.

Les recherches d'Imbens et Wooldrige (2009) soulignent que les méthodes expérimentales aléatoires sont difficiles à appliquer dans la pratique puis qu'elles posent des problèmes d'éthique dans le cas des programmes sociaux (*Imbens et Wooldridge, 2009*).

Pourtant, l'on a généralement recours aux méthodes non expérimentales ou quasi expérimentales.

Cette méthode fait référence à une « expérimentation avec une intervention donnée et aux deux unités expérimentales : groupe recevant l'intervention et groupe de contrôle) mais sans recours à la randomisation pour créer les conditions d'inférence causale » (Cook, Campbell *et al*. 1979).

Les méthodes non expérimentales ou quasi expérimentales ont été introduites dans les conditions ou l'assignation aléatoire au traitement n'est pas facile, voire même impossible à faire.

En général, elles s'appliquent lors que les unités d'observation sont des agents actifs (les ménages, les individus, les entreprises etc.) qui peuvent influencer leur statut de traitement. Elles traitent le biais de sélection induit par les caractéristiques observées qu'on appelle méthodes de sélection induit par les caractéristiques observables, et d'autre part les méthodes de sélection qui traitent à la fois le biais de sélection induit par les caractéristiques observées et inobservées, appelées méthodes de sélection basées sur les caractéristiques inobservables. Cette méthode utilise quatre (4) techniques différentes pour la construction du groupe de contrôle : l'appariement (matching) ou le « Propensity Score Matching » (PSM), l'exploitation des données longitudinales (differences in differences), le modèle de sélection et la méthode à variables instrumentales. Parmi ces méthodes, l'appariement par score de propension (PSM) fondée sur l'hypothèse que l'adoption est fonction des caractéristiques observables de l'individu, est la plus présente dans la littérature empirique.

C'est une méthode qui a subi une évolution avant qu'elle soit utilisée par les chercheurs. Rubin (1974) ; Rosenbaum et Rubin (1983) ont proposé la méthode d'appariement ou matching method pour identifier et estimer sans biais l'effet causal du traitement dans le cas où le traitement n'est pas distribué de manière aléatoire dans la population. Elle repose sur l'hypothèse selon laquelle les seules différences entre le groupe témoin (les individus traités) et le groupe de contrôle (les individus non traités) proviennent de leurs caractéristiques individuelles et de l'exposition au traitement.

Appelée « matching aux caractéristiques », elle qui consiste à associer pour chaque individu i dans la sous-population d'un groupe traité, un individu j dans la sous-population d'un groupe non traité ayant les mêmes caractéristiques que l'individu. Dans ce cas, l'on suppose que l'individu i traité, ayant les mêmes caractéristiques que l'individu j non traité aurait eu le même score s'il n'avait pas été traité.

Néanmoins, il est important de noter que, le recours à ce type de matching direct dépend du nombre de caractéristiques observées que l'on prend en compte pour effectuer le matching. Plus elles sont nombreuses et plus il devient difficile de trouver, dans la sous-population des non-traités, des individus qui ont exactement les mêmes caractéristiques que chacun des individus dans la sous population des traités. Ce qui pose un problème de dimensionnalité des critères de matching.

En effet, la méthode de matching qui était devenue plutard l'appariement par les scores de propension, a été proposée par Rosenbaum et Rubin (1983) pour surmonter le problème de dimensionnalité rencontrée dans la méthode de matching par les caractéristiques. Ils l'ont introduit pour la première fois dans un article intitulé "The central role of the propensity score in observational studies for causal effects", le score de propension, connu sous le terme anglais propensity score, désigne la probabilité d'être exposé au traitement conditionnellement aux caractéristiques observées du sujet avant l'exposition (Rosenbaun et Rubin 1983).

Conditionnellement au score de propension, la distribution de ces caractéristiques observées est indépendante de l'exposition au traitement (Rosenbaun et Rubin 1983). L'appariement par score de propension permet donc d'apparier sur de multiples caractéristiques en résumant celles-ci en un seul chiffre (le score de propension). Elle est actuellement la plus utilisée dans les études d'évaluation d'impact basée sur les méthodes non expérimentales ou quasi expérimentales (Austin 2009). Toutefois, cette méthode présente des forces et des faiblesses.

Tableau 1 : Forces et faiblesses de la méthode d'appariement par score de propension

Forces	***Faiblesses***
- Eliminer les sources de biais pendant la recherche des groupes traités et non traités, qui présentent des caractéristiques similaires ou identiques.	Les procédures d'appariement exigent la collecte de grandes bases de données couvrant des échantillons importants.
Les estimateurs d'appariement mettent en évidence le problème du support commun ;	Même si les bases de données existent, il existe parfois un risque de manque de support commun entre le groupe de traitement et les non participants.
L'appariement ne nécessite pas des hypothèses de forme fonctionnelle pour l'équation de résultat (c'est-à-dire qu'il est non paramétrique).	Elle n'équilibre pas les groupes de traitement et de comparaison sur la base de variables non observées.
- Permettre l'équilibrage des deux groupes sur la base de leurs covariables observables.	Elle ne capte pas les caractéristiques inobservables qui influent sur l'effet d'un traitement.

Source : Résume de l'auteur à partir de Dehejia et Wahba (1998) ; Smith et Todd (2000) ; Gayat. E et Porcher. R (2011) et Sibilia et Sanofi (2013).

II.3. Revue empirique

Cette partie passe en revue quelques études similaires sur l'effet de l'adoption des technologies. En outre, cette partie est destinée à la détection de manière critique la littérature des travaux de recherche passés en rapport avec les objectifs de l'étude, afin que les revues théoriques et les preuves empiriques des revues permettant une meilleure compréhension du sujet.

II.3.1. Définition et caractéristiques physico-chimiques du biochar

Le biochar est le sous-produit de la pyrolyse, une décomposition thermochimique de la matière organique qui se réalise quand de la biomasse est exposée à des températures supérieures à 350°C en l'absence ou très basse concentration d'oxygène (O_2) (*Lehmann et Joseph, 2009*). Ces conditions sont similaires à celles de la production du charbon de bois lors d'un feu de forêt ou de champs (*Schmidt et Noack, 2000*) ou lors de la carbonisation dans les charbonnières traditionnelles.

Historiquement le charbon a été principalement une source énergétique domestique (cuisson, chauffage) ou industrielle (fonte de minerais, production d'acier) même si d'autres applications possibles étaient la médecine, les peintures rupestres et l'agronomie (*Brown, 2009*). Le biochar est le charbon produit spécifiquement pour être appliqué au sol pour en améliorer la productivité, les qualités physicochimiques et les stocks de carbone (*Lehmann et al., 2006a*). La production de charbon et de biochar est associée à la production de substances huileuses et de gaz (syngas) qui peuvent être employés à des fins énergétiques. La proportion des trois sous-produits change selon les caractéristiques de la biomasse au départ (tel que la teneur en cellulose, hémicellulose et lignine (*Shafizadeh, 1982*) et les conditions de production, principalement la température (température maximale et taux d'augmentation de la température par unité de temps) et le temps d'exposition de la biomasse aux conditions de pyrolyse. La pyrolyse lente est mise en place si on veut maximiser la production de biochar, la pyrolyse rapide pour maximiser les huiles combustibles, la gazéification pour le gaz (Tab.1). Dans ce travail de mémoire, je me suis focalisée sur le biochar produit avec des méthodes améliorées de carbonisation par la pyrolyse lente avec un four à moufle et Elsastove, un four pyrolytique conçu par Blucomb s.r.l. pour la cuisson domestique dans les Pays en Voie de Développement (Fig. 1).

Tableau 2: Techniques de pyrolyse et gazéification et leurs produits typiques (Bridgwater, 2007)

Technique de production	Paramètres	Produits		
		Liquide(%)	Charbon (%)	Gaz (%)
Pyrolyse rapide	Température modérée˜500˚C	75	12	13
	Temps brefs de résidence vapeur ˜1sec.			
Pyrolyse à vitesse modérée	Température modérée˜500˚C	50	20	30
	Temps moyens de résidence vapeur ˜1sec-20sec			
Pyrolyse lente	Température modérée˜500˚C	30	35	35
	Temps très long de résidence vapeur ˜5-30min			
Gazéification	Température élevée>750	5	10	85
	Temps moyens de résidence vapeur ˜1sec-20sec			



Figure 2 : Four pyrolytique qu'on utilise pour la production de biochar (photo prise sur le terrain)

Le biochar est caractérisé sur la base de ses caractéristiques physiques et chimiques même si elles sont très variables selon la matière organique d'origine et les conditions de production. D'un point de vue chimique, le biochar est une matrice composée principalement de carbone (C : 70-90% de sa masse) (Cohen-Ofri et al., 2007, 2006). Après le C les éléments plus abondants sont l'oxygène(O) et l'hydrogène (H). Leur concentration est inférieure au C parce qu'ils sont volatilisés de manière plus importante pendant la déshydratation sous forme d'H_2O et pendant la pyrolyse, sous forme de hydrocarbures, vapeurs de goudron, H2, CO et CO2 (Antal et Grønli, 2003).

Le rapport H/C du biochar est plus faible, que celui de la biomasse de départ (black carbon ≤0.2 Kuhlbusch and Crutzen (1996) ; charbon/biochar produit autour de 400°C ≤0.5 ; cellulose et lignine ~1.5 (Graetz and J.O. Skjemstad, 2003)) surtout pour les biochars produits à de hautes températures. La même tendance est observée pour le rapport O/C (*Hammes et al., 2006*).

Le biochar contient aussi des éléments minéraux (cendres) en proportion variable selon la matière d'origine et les conditions de pyrolyse. En générale les biomasses ligneuses sont pauvres en cendres (<1% du poids) tandis que dans les biomasses herbacées ou graminées ainsi que dans la couverture des graines, les cendres peuvent représenter jusqu'à 24% du poids(*Raveendran et al., 1995*). Le contenu des cendres de la biomasse d'origine se reflète dans le contenu des cendres du biochar et, à cause de l'évaporation de C, H et O, elles représentent une portion du poids plus importante dans le biochar que la biomasse fraiche (biochar de litière de poulet :45% de cendres, (*Koutcheiko et al.,2007*).

Enfin le biochar est aussi composé d'une partie des huiles qui sont produites lors de la pyrolyse et qui restent attachées à la surface (*Schnitzer et al., 2007*) en forme de composés N-hétérocycliques, furanes substitués, phénols, benzène, groupes carbocycliques et aliphatiques.

Les produits de pyrolyse (charbon et biochar) présentent des structures cristallines amorphes et des couches de graphène non-ordonnées très stables (*Paris et al., 2005*). Le niveau d'organisation de ces matériaux augmente avec la température de production (>600°C) (Cohen-Ofri et al., 2007, 2006). Leur structure est dominée par des composés aromatiques récalcitrants. Si la température de production est entre 350 et 500°C les caractéristiques moléculaires de la biomasse d'origine restent partiellement visibles. Au-dessus de 500°C la conversion des groupes fonctionnelles de la plante tend à être plus complète en passant des groupes alkyl et O-alkyl C, associés avec cellulose et hémicellulose, à aryl C et formation de structures hétérocycliques avec N (*Krull et al., 2009*).

La surface du biochar/charbon peut être hydrophile ou hydrophobe, acide ou basique, plus ou moins réactive et avec une capacité de sorption d'anions ou cations plus ou moins forte, des caractéristiques opposées qui peuvent coexister sur la surface du même morceau de biochar/charbon à cause de la présence de différents groupes fonctionnels attachés aux couches de graphène, ainsi que d'hétéroatomes (H, O, N, P et S) (*Brennan, Bandosz, Thomson et Gubbins, 2001*). Le type de groupes fonctionnels présents dépend de la biomasse de départ (par exemple le biochar de fumier a plus de groupes N et S par rapport à un biochar ligneux), qui peut s'altérer dans le 16 temps. En effet, suite à des réactions avec l'oxygène de l'air, les groupes contenant O sur la surface du biochar/charbon augmentent (*Bourke et al., 2007*).

Le biochar est une matière très poreuse. Les micropores (diamètre 50nm) dérivent directement de la structure vasculaire des plantes utilisées pour la production du biochar. Elles sont responsables de la plus grande partie du volume intérieur du biochar (3 cm3 /g de biochar pour les biomasses herbacées, 1.25 cm3 /g pour les biomasses ligneuses (*Brewer et al., 2014*). Le biochar perd entre 3 et 91% du poids de la biomasse de départ pendant la pyrolyse ou gazéification (150-1000°C) (*Baldock et Smernik, 2002; Czimczik et al., 2002*) tandis que le volume extérieur se réduit beaucoup moins. Par conséquent, la densité du biochar est toujours plus faible que la densité de la matière organique de départ (Byrne and Nagle, 1997).

La capacité d'échange cationique (CEC) du biochar est en général plus basse que celle de la matière organique du sol (*Cheng et al., 2008a, 2006*) mais elle augmente avec la température de production (Lehmann, 2007). La capacité d'échange anionique (AEC) est plus élevée, surtout à des pH bas (*Cheng et al., 2008a*). Les propriétés d'échange ionique du biochar changent une fois qu'il est amendé au sol : la CEC augmente avec le temps à cause de l'augmentation des groupes fonctionnelles oxygénés sur la surface du biochar (carboxylique, phénolique, hydroxyle, carbonyle or quinone) tandis que la AEC tend à disparaitre (*Cheng et al., 2008a, 2006; Lehmann et al., 2011*).

Le pH du biochar peut varier de 4 à plus de 12 (*Lehmann, 2007*) : le pH est bas (acide) pour de basses températures de production, avec une biomasse de départ à basse teneur en cendres et d'une présence élevée de groupes fonctionnels O (Lopez-Ramon et al., 1999) (Lehmann, 2007). Après apport aux sols le pH du biochar peut diminuer (biomasse ligneuse) ou augmenter (biomasse herbacée) (*Nguyen et Lehmann, 2009).*

II.3.2. Le potentiel du biochar/charbon à augmenter le stockage de Carbone dans les sols

Le biochar est une matière très riche en carbone organisé dans des formes chimiques stables. Une fois ajouté au sol il permet donc d'en augmenter le potentiel de stockage du carbone à des échelles de temps plus longues par rapport à d'autres amendements organiques. L'amendement avec le biochar pourrait permettre de stocker le CO2 atmosphérique.

La stabilité du biochar récent est prouvée par analogie avec les résidus de feux de forêt trouvés dans les sols qui peuvent être âgés de plus de 10.000 ans (Lehmann et al., 2008; Preston and Schmidt, 2006) ou les résidus des feux de camp trouvés, par exemple, dans les sols amazoniens de "Terra Preta" âgés de 500-7000 ans (*Neves et al., 2003*) ou encore des

expériences de terrains agricoles contenant du charbon, cultivés pour des longues périodes aux Etats Unis (*Skjemstad et al., 2002*) et en Allemagne (*Schmidt et al., 2001*).

Le potentiel maximal de séquestration du carbone au niveau global grâce à l'enfouissement du biochar dans les sols agricoles a été quantifié en 1,8 Gt CO2-$C_{équivalent}$, ce qui correspond au 12% des émissions anthropiques de C (Woolf et al., 2010). Pour ce scenario une application de 50 Mg C ha-1 à une profondeur de 0,15 m a été considérée. Le potentiel de séquestration a été estimé en prenant en compte a) la séquestration directe du C due à l'enfouissement de la matière organique stable (Joseph et al., 2007); b) la réduction potentielle des émissions d'autres gaz à effet de serre (N2O et de CH4) de la part des sols suite à l'application du biochar (*Yanai et al., 2007*) et c) les émissions de CO2 évitées en raison de la substitution des combustibles fossiles grâce à la production d'énergie lors de la pyrolyse et de la gazéification.

Cependant la stabilité du biochar a été mise en question. La méta-analyse de Singh et al., (2012) met en évidence que le biochar contient une composante labile et une autre plus récalcitrante avec des temps de résidence moyens de 3 et 870 ans respectivement en moyenne.

Les facteurs qui influencent la dégradation du charbon/biochar sont multiples et bien synthétisés dans la Fig.3 :

- Décomposition biologique : le biochar peut être métabolisé par les microorganismes (bactéries et surtout les champignons) et cela représente le mécanisme le plus important en terme de décomposition du biochar dans les sols (*Baldock et Smernik, 2002; Cheng et al., 2006*). La métabolisation du charbon/biochar est favorisée par la présence d'autres composés organiques labiles dans le sol ou dans le biochar lui-même qui sont facilement disponibles pour les microorganismes et qui peuvent stimuler la dégradation du biochar par le 'priming effect' (*Cheng et al., 2006*).

- processus abiotiques : une fois apporté au sol, la surface du biochar est modifiée par hydrolyse et oxydation, et la plus grande partie de ces changements a une cause abiotique dans les premiers mois d'incubation (Cheng et al., 2006). L'oxydation abiotique ne cause pas la perte directe de quantités importantes de carbone mais peut faciliter la suivante métabolisation par les microorganismes (*Lehmann et al., 2009*) ;

-Transport : Le biochar peut être transporté en profondeur dans les sols par l'action de l'eau (percolation) (*Czimczik et al., 2005; Preston et Schmidt, 2006*) ou érodé de la surface du sol surtout dans les premiers temps après l'application (*Rumpel et al., 2006*). Suite à l'érosion le

charbon/biochar s'accumule dans des dépressions ou dans des sédiments fluviaux ou océaniques où, en l'absence d'oxygène, le biochar reste stable pour des temps géologiques (*Masiello et Druffel, 1998*). Ces phénomènes de transport peuvent être responsables de la plus grande partie de la perte de biochar observée dans les études qui ont calculé des temps de résidence moyens dans le sol très courts (de l'ordre de la décennie) (*Nguyen et al., 2008*).

- Fragmentation : la taille des fragments de charbon/biochar amendés au sol se réduit dans le temps (*Nguyen et al., 2008*). Cela permet une augmentation de la surface directement accessible aux microorganismes et de celle exposée aux réactions abiotiques, facteurs importants pour la dégradation du biochar car l'oxydation commence en surface (*Cheng et al., 2006*) et atteint difficilement la partie intérieure du fragment même après des millénaires (*Lehmann et al., 2005*; *Liang et al., 2006*). De plus, des petits morceaux de charbon/ biochar sont plus susceptibles d'être transportés par rapports à des fragments de grande taille. Les cycles de congélation-décongélation freeze–thaw dans les régions froides ainsi que les pratiques agricoles (labour) peuvent contribuer au fractionnement du biochar, ainsi que les processus abiotiques (*Naisse et al., 2015*).

En plus d'être partiellement décomposé, le biochar est aussi stabilisé dans les sols, ce qui augmente son temps de résidence moyen. Cela se réalise par :

- l'interaction avec les composantes minérales du sol surtout sur la surface du biochar où s'établissent des associations avec Al, Si, Fe (*Nguyen et al., 2008*). L'adsorption de métaux est un mécanisme qui réduit la biodisponibilité du biochar et donc augmente sa stabilité dans les sols (*Lehmann et al., 2009*).
- l'inclusion dans des agrégats du sol (Liang, 2008) est un phénomène qui protège le biochar des décomposeurs et qui se réalise par exemple à travers l'action des vers de terre (Topoliantz et al., 2006). La présence du biochar dans les sols peut favoriser elle-même la création d'agrégats par la prolifération de mycorhize (Warnock et al., 2007).

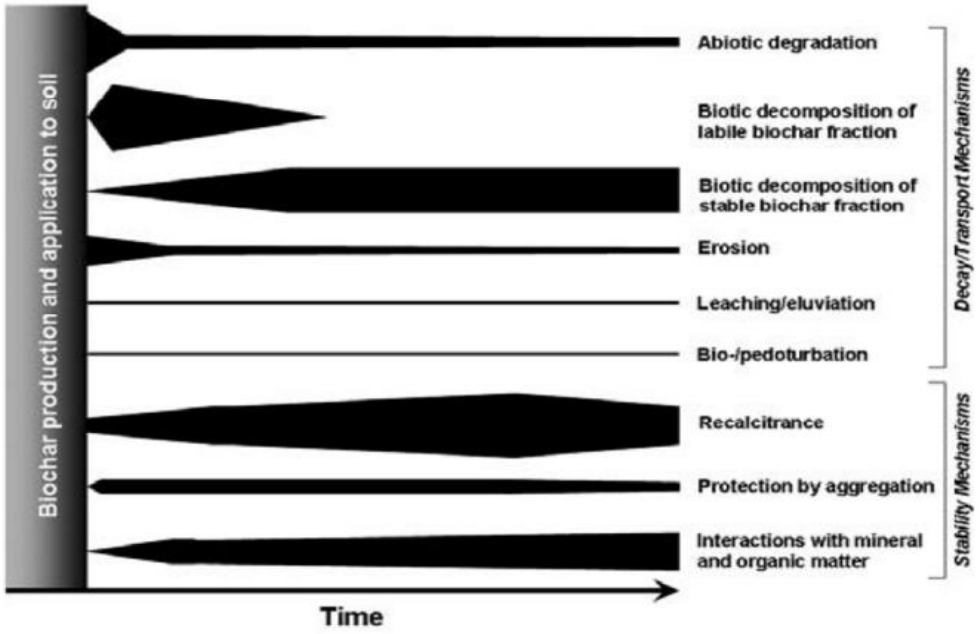


Figure 3 : Facteurs qui influencent la stabilité et la décomposition ou transport du biochar dans les sols dans le temps. L'épaisseur des barres représente l'importance de chaque facteur dans le temps.

Source : Lehmann et al., (2009)

Tous ces facteurs vont avoir un impact plus ou moins important sur la dégradation et la stabilisation du biochar selon la biomasse de départ et la technique de production du charbon/ biochar, le type de sol et le pédoclimat au lieu de son épandage. De plus, d'un point de vue méthodologique, des techniques différentes de mesure et de calcul des temps de résidence peuvent donner des résultats contrastés (*Lehmann et al., 2009*). Le potentiel de stockage du C par les biochar à long terme n'a jamais été vérifié en condition de terrain. Dans cette thèse, je me suis proposé de quantifier ce potentiel en utilisent des sols d'ancien charbonnières.

II.3.3. Impact du biochar/charbon sur les propriétés du sol

Grâce à sa nature poreuse le biochar/charbon est capable d'améliorer l'aération et la capacité de rétention de l'eau des sols (*Chan et al., 2007*). La teneur en cendres alcalines (hydroxydes et oxydes de Ca, Mg, K and Na) des biochar/charbon peut, après ajout aux sols acides, altérer le pH (Chan et Xu, 2009) et augmenter la teneur en nutriments. L'effet des biochars/charbons sur ces paramètres physicochimiques peut être important, surtout s'il est issu d'une biomasse riche en nutriments tel que la litière de volaille (*Atkinson et al., 2010; Glaser et al., 2002*). La présence des biochars/charbons peut aussi augmenter la Capacité d'Echange Cationique

(CEC) du sol (*Lehmann et al., 2003; Yuan et Xu, 2012*). À cause de la création des groupements fonctionnels à la surface du biochar/charbon pendant les processus d'oxydation la CEC continue à augmenter dans le temps (*Cheng et al., 2008a, 2006*). En effet, une importante teneur en nutriments et le changement du pH ont été observés non seulement dans les sols récemment amendés avec des biochars/charbons (*Yuan et al., 2011*) mais aussi dans les sols où le biochar/charbon a été présent depuis des millénaires, comme la Terra Preta en Amazonie (*Lehmann et al., 2003*).

En revanche, la richesse en sites adsorbants à la surface du biochar peut porter aussi des conséquences négatives tel que l'accumulation de métaux lourds et pesticides (*Jenkins et al., 2016*) tandis que l'apport de nutriments peut se traduire par une lixiviation accrue de P et de K comme démontré par Buecker et al., (2016). Mais ce phénomène en général est moins important dans les sols dans lesquels le charbon est présent depuis des siècles (*Lehmann et al., 2003*). Toutefois, l'impact que le même biochar a sur la lixiviation des nutriments à différentes échelles de temps n'a jamais été objet d'étude.

L'apport de biochar/charbon augmente aussi les stocks d'azote des sols. Même si cet élément est présent sous forme de composés organiques hétérocycliques (*Chan et Xu, 2009*), difficilement utilisable pour les microorganismes du sol, il a été montré qu'il peut être absorbé par les plantes (*De la Rosa et Knicker, 2011*). Au contraire des autres macroéléments, l'ajout des biochars est en général associé avec une réduction de la lixiviation de nitrates et ammonium. Cela a été observé dans des expériences en pot (*Buecker et al., 2016; Ding et al., 2010; Laird et al., 2010*) sur le terrain (*Ventura et al., 2012*), à plusieurs échelles temporelles (Lehmann et al., 2003) et a été expliqué par plusieurs mécanismes. Les nitrates ($NO3^-$) sont moins lixiviés grâce à une réduction de l'activité de nitrification (*Yang et al., 2015*) et à l'immobilisation de l'azote dans la biomasse microbienne qui augmente grâce à la présence d'une grande quantité de carbone (*Clough et al., 2013; Clough et Condron, 2010*). L'ammonium est moins lixivié parce qu'il est adsorbé sur la surface du biochar/charbon (*Yang et al., 2015*).

Le biochar influence profondément aussi les caractéristiques physiques d'un sol tel que : l'épaisseur, la texture, la granulométrie, la porosité, la densité et le niveau de tassement, facteurs qui influencent la disponibilité en eau et en air pour les plantes, l'ouvrabilité du sol, le niveau d'agrégation, la perméabilité, la capacité de rétention des cations, la provision d'habitat pour les microbes ainsi que sa réponse aux fluctuations des températures (*Downie et*

al., 2009). L'impact du biochar sur ces caractéristiques est généralement positif, mais dépend des caractéristiques du biochar comme aussi celles du sol amélioré (Brady et Weil, 2008). Enfin le biochar réduit l'albédo de la surface des sols (*Genesio et al., 2012*). Grâce à ces améliorations différents auteurs ont observé une augmentation de la production de biomasse ou des rendements (*Biederman et Harpole, 2012; Jeffery et al., 2011*) dans les sols améliorés à plusieurs échelles de temps. Toutefois, les flux des éléments dans le système sol-plante n'a jamais été évalués pour un même biochar apporté au sol à différentes échelles du temps.

L'effet positif que le biochar a sur les cycles biogéochimiques, sur la présence de pathogènes dans les sols ainsi que sur la croissance des plantes peut être expliqué aussi par les changements induits dans les communautés microbiennes du sol. En effet dans la plus grande partie d'études menées sur ce sujet on a observé une augmentation de la biomasse microbienne ainsi qu'un changement significatif de la composition des communautés et de l'activité enzymatique. Cependant ces phénomènes sont encore peu compris compte tenu de leur complexité. Les effets du biochar sur la faune du sol sont encore moins étudiés sauf quelques rares recherches sur les vers de terres (*Lehmann et al., 2011*).

À cause de la longévité du biochar/charbon dans les sols, les modifications induites par son ajout aux sols doivent être évalués à court ainsi qu'à long terme. Ce mémoire propose donc d'évaluer le degré d'adoption du Biochar et ses effets socio-économiques sur les ménagers de la zone d'étude.

II.3.4. Impact du biochar/charbon sur la croissance des plantes

La littérature qui a essayé de répondre à la question « Quel est l'impact que le biochar a sur la croissance des plantes ? » est très vaste et complexe à synthétiser à cause de la grande variété de biochar/charbons employés (biomasse de départ et conditions de production), quantité de biochar/charbon amendé, type de sol et climat où le biochar/charbon est épandu, type d'expérience scientifique (au laboratoire, sur le terrain) ainsi que l'espèce de plante semé/planté. Deux synthèses de littérature (méta-analyses) ont été publiées récemment pour résumer cette complexité de résultats. Biederman et Harpole (2012) à partir de 114 articles scientifiques concluent qu'en moyenne le biochar stimule la productivité de biomasse aérienne et les récoltes agricoles même s'il n'y a pas de relation évidente entre la quantité de biochar/charbon amendé au sol et la réponse des plantes en terme de productivité.

La méta-analyse de Jeffery et al. (2011) montre que la productivité de biomasse aérienne et les récoltes agricoles augmentent en moyenne de +10% mais la gamme des résultats varie entre −28% et +39%. Les meilleures performances ont été obtenues dans le cas de biochars produits à partir de litière de volaille, amendé en quantité de 100 t/ha, dans des sols acides et avec une texture grossière. Cela suggère que le biochar non seulement agit sur la croissance des plantes en augmentant la disponibilité de nutriments mais aussi à cause de son effet de chaulage (liming) et par son effet sur la capacité de rétention de l'eau qui est majeure dans les sols amendés par rapport aux sols non amendés.

L'effet positif que le biochar/charbon a sur les récoltes dépend aussi d'autres facteurs tels qu'une augmentation de l'activité microbienne dans le sol (*Lehmann et al., 2011*) et de la température des surfaces des sols à cause d'un changement de l'albedo (*Genesio et al., 2012*), l'hormesis (Graber et al., 2010) et plus souvent une combinaison de plusieurs facteurs (Lehmann et al., 2011).

Il est important de noter que la méta-analyse de (*Jeffery et al., 2011*) inclut des études menées sur des sols de charbonnière en Afrique (Chidumayo, 1994a) ainsi que les sols d'Amazonie ou le charbon a été amendé depuis des millénaires (Lehmann et al., 2003), tandis que dans la revue de (*Biederman et Harpole, 2012*) exclue ces recherches, mais les conclusions générales sur l'impact du biochar/charbon sur la productivité des plantes sont similaires.

II.3.5. Revue empirique de l'Utilisation du Biochar en Europe, en Amérique et en Afrique

Le biochar, un produit de la pyrolyse de biomasse, est largement reconnu pour ses avantages dans la gestion des sols, la séquestration du carbone, et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette revue examine l'utilisation empirique du biochar en Europe, en Amérique, et en Afrique, mettant en lumière les résultats des études régionales et les différences dans l'application.

1. Utilisation du Biochar en Europe

L'Europe a adopté le biochar principalement pour des raisons environnementales, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'amélioration de la santé des sols.

- **Séquestration du Carbone**: Une étude en Allemagne a démontré que l'application de biochar peut augmenter la capacité de séquestration du carbone des sols agricoles (Schmidt et al., 2014).

- **Amélioration des Sols**: En Espagne, des essais sur sols arides ont montré que le biochar améliore la rétention d'eau et la fertilité du sol (Domingues et al., 2017).
- **Normes et Régulations**: L'Union Européenne a développé des normes pour la production et l'application du biochar, soulignant son potentiel dans l'agriculture durable (European Biochar Foundation, 2019).

2. Utilisation du Biochar en Amérique

En Amérique, l'utilisation du biochar varie entre l'Amérique du Nord et l'Amérique latine, influencée par des objectifs environnementaux et économiques.

- **Amérique du Nord**: Aux États-Unis, le biochar est utilisé pour améliorer les sols et réduire les émissions de méthane dans les décharges (Lehmann et Joseph, 2009). Au Canada, des études ont montré que le biochar améliore la rétention des nutriments dans les sols (Joseph et al., 2010).
- **Amérique Latine**: Le Brésil utilise le biochar dans les systèmes agroforestiers pour restaurer les sols dégradés. Les recherches sur les terres noires amazoniennes ont montré l'impact positif du biochar sur la fertilité du sol (Glaser et al., 2002).

3. Utilisation du Biochar en Afrique

L'Afrique explore le biochar comme une solution pour l'agriculture durable, la gestion des déchets et la lutte contre la désertification.

- **Sécurité Alimentaire**: Des projets au Kenya ont montré que l'application de biochar augmente les rendements agricoles sur des sols pauvres (Tamrat et al., 2017).
- **Gestion des Déchets**: Au Ghana, le biochar est produit à partir de déchets urbains, contribuant à une gestion des déchets plus durable (Arthur et al., 2015).
- **Lutte contre la Désertification**: Des études au Sahel ont démontré que le biochar peut aider à restaurer les sols et freiner l'avancée du désert (Ameloot et al., 2016).

En conclusion, l'utilisation du biochar en Europe, en Amérique, et en Afrique reflète les priorités régionales, allant de la séquestration du carbone à l'amélioration de la sécurité alimentaire et la gestion des déchets. Les recherches empiriques montrent son potentiel comme outil crucial pour une agriculture durable et la lutte contre le changement climatique.

II.3.6. Le coût de production du biochar

Compte tenu de l'énorme quantité de biomasse qui serait nécessaire à l'utilisation du biochar pour contrer les changements climatiques, cette entreprise aurait d'importantes répercussions sur l'utilisation des terres. Cela ressort clairement dans un récent article paru dans la revue *Nature Communications*, où l'on décrit la conversion de 556 millions d'hectares de terres agricoles à la production de biochar comme un projet « durable ».

Feu Peter Read, membre du Conseil consultatif de l'International Biochar Initiative, prônait ouvertement l'aménagement d'une superficie pouvant atteindre un milliard d'hectares de nouvelles plantations d'arbres destinés à la production de biochar. Si l'on considère qu'il existe actuellement au total dans le monde 1,5 milliard d'hectares de terres cultivables, ce projet aurait de graves implications.

Read s'attendait à ce que l'Afrique subsaharienne apporte une contribution de 893 millions d'hectares à cette superficie projetée. Il croyait qu'une surface aussi grande que la France pourrait être convertie chaque année en plantations dans les régions tropicales et subtropicales.

L'article de *Nature Communications* parle de la conversion de prairies tropicales ainsi que de soi-disant « terres cultivables abandonnées ». Le terme « terres cultivables abandonnées » est souvent utilisé à titre de synonyme de « terres marginales » ou de « terres dégradées », et appliqué à des terres dont dépendent pour leur survie des millions de communautés, dont un grand nombre sont composées de pasteurs. On utilise aussi ce terme pour décrire les écosystèmes non forestiers.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a récemment publié (sans toutefois nécessairement en approuver le contenu) le Climate Change Science Compendium. Selon cette publication, « l'estimation la plus conservatrice » relativement au potentiel du biochar est de 20 milliards de tonnes de carbone séquestrées, ce qui équivaut à un milliard de tonnes par année. D'autres études suggèrent qu'une production annuelle de biochar variant entre 5,5 et 9,5 milliards de tonnes pourrait être réalisée. Pour y arriver, toujours selon ces études, l'aménagement de 500 millions d'hectares de plantations constitue une évaluation très conservatrice, et ce chiffre est susceptible d'être beaucoup plus élevé.

Conclusion du deuxième chapitre

Dans ce chapitre, nous avons montré les approches psychosociales et économétriques de l'analyse de l'adoption. Nous avons aussi montré la théorie du changement qui explique un passage d'une situation actuelle à une nouvelle situation et les principales méthodes proposées dans la littérature sur l'évaluation d'impact des projets. En confirmant la méthode d'appariement par score de propension comme la plus utilisée dans les études d'évaluation d'impact, ce chapitre a permis également de montre son évolution et dégager ses forces et faiblesses. Des études empiriques sur les contraintes, déterminants et effet de l'adoption ont révélé les contraintes de l'adoption, des facteurs qui influencent l'adoption d'une technologie et l'effet de l'adoption d'une technologie agricole sur le rendement des agriculteurs. En effet, les avantages du biochar sur le sol et sur les plantes ont été documentés.

CHAP III. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

III.1. Aperçue de l'étude

Ce chapitre fournit la description des outils analytiques utilisés dans cette étude et l'ensemble de données. Les techniques analytiques consistent à détailler les procédures d'utilisation du coefficient du tau de Kendall (1978), du modèle logit(J.Berkson en 1944) et la méthode d'appariement par score de propension.

En commençant par une brève description de la zone d'étude, il décrit en détail les variables qui sont considérées pour analyser les contraintes liées à l'adoption, évaluer le taux et identifier les déterminants de l'adoption. Les données sont obtenues à travers la conception du questionnaire, de l'échantillonnage et la collecte de ces dernières. La description détaillée du processus méthodologique est expliquée ci-dessous.

III.2. Description de la commune Gashikanwa

La commune Gashikanwa est située au centre de la province Ngozi non loin du chef- lieu de cette dernière. Elle est composée par trois zones ;Gashikanwa,Ngoma et Gatobo. Elle a une superficie de 142,78 Km2, soit 9,6 % de la province (1.478,36 Km2) et 0,5% du pays (27.834 Km2).

Elle est délimitée au Nord par la commune Nyamurenza, au Sud par la commune Ruhororo, à l'Est par les communes Kiremba et Tangara et à l'Ouest par les communes Mwumba et Ngozi. La commune Gashikanwa est subdivisée en 3 zones et 24 collines.

Du point de vue climatique, la commune Gashikanwa est située dans la région naturelle de Buyenzi qui se caractérise par une altitude moyenne comprise entre 1.500 et 1.900 m, un climat tropical humide avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1.200 et 1.500 mm. Les températures moyennes se situent entre 17 et 20°C. Les grands écarts de température apparaissent en saison sèche.

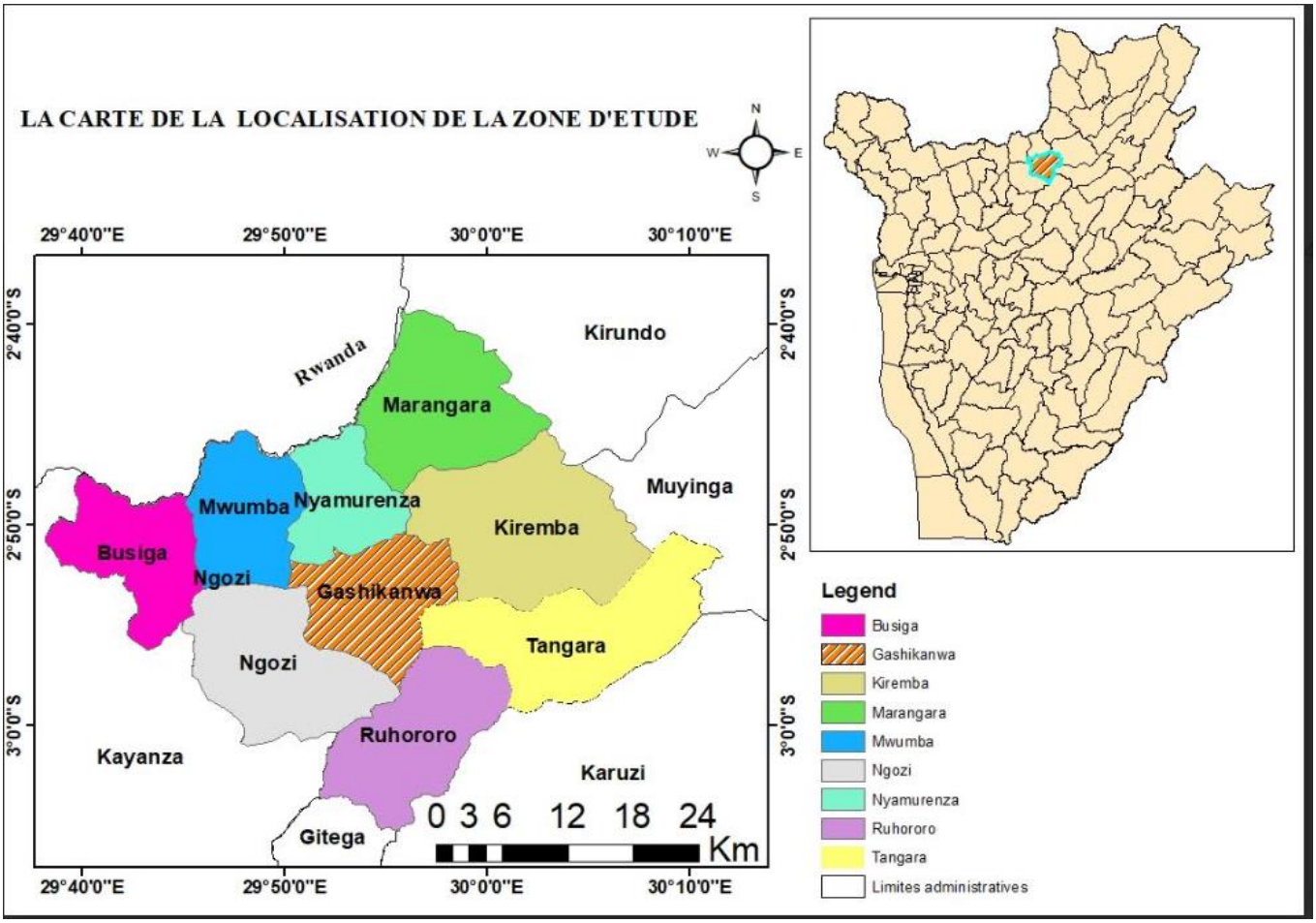
Le relief de la commune Gashikanwa est caractérisé par des pentes relativement faibles. La commune Gashikanwa est irriguée par des rivières et des ruisseaux dont les plus importants sont la Nyamuswaga et la Nyakijima. Les sols de Gashikanwa sont argileux, lourds et fertiles. Sur les pentes, les sols sont peu profonds et exposés à l'érosion.

Du côté flore, la commune Gashikanwa est caractérisée par la végétation naturelle presque inexistante. Quelques espaces vierges sont caractérisés par une végétation d'éragrostis caractéristique d'une dégradation poussée. La faune y est pauvre.

La pratique culturale de la population de Gashikanwa est de type traditionnel, assurée pratiquement par les paysans selon les méthodes traditionnelles, non améliorées et caractérisées par l'emblavement de petites superficies d'une moyenne de 66 ares/ménage, l'utilisation d'outils rudimentaires (la houe), la carence chronologique en intrants améliorés. La main d'œuvre est essentiellement familiale et non rémunérée. Il en résulte des rendements généralement faibles ainsi qu'une production qui génère peu de revenus. L'association des cultures est le mode de culture prédominante avec des associations de trois à quatre cultures. Les spéculations agricoles sont regroupées en cultures vivrières, industrielles, maraîchères et fruitières.

Selon la DPAE Ngozi, les principales cultures vivrières de la commune Gashikanwa sont, par ordre d'importance : la banane, la patate douce, la pomme de terre, le manioc, le haricot, le riz et le maïs. D'autres cultures vivrières sont également exploitées à Gashikanwa, mais à faible échelle. Il s'agit du soja, de la colocase, du petit pois, du sorgho et de l'arachide.

Figure 4 : Aperçu de l'environnement de l'étude



III.3. Conception de l'étude

Notre étude sera menée en procédant à une collecte d'information, en mettant plus d'accent sur l'analyse documentaire pour la grande partie du travail afin d'acquérir une base théorique suffisante sur le sujet.

De plus, la recherche bibliographique est une étape fondamentale dans l'élaboration d'une recherche scientifique. Elle est une démarche de lecture qui va nous permettre de savoir ce qui a été fait sur un sujet, comment cela a été fait et ce qui n'a pas encore été fait. La recherche documentaire va nous aider à identifier et localiser des ressources informationnelles déjà traitées et les données du contexte relatives au sujet, par la lecture de divers documents. Elle constitue la première étape d'une recherche. Cela va nous conduire dans les bibliothèques, les centres de documentation, les centres de recherche et sur l'internet. La recherche va nous permettre non seulement de situer notre travail par rapport aux débats en cours mais aussi de guider et approfondir notre réflexion.

La vérification des hypothèses de notre recherche va provenir des réponses des questions issues d'un questionnaire bien formulé pour une enquête auprès des agriculteurs de la zone d'étude. Aussi, le groupe de personne à interroger (échantillon) sera tiré aléatoirement dans une population bénéficiaire du projet de STARTER.S.R.L de la zone d'étude. En effet, l'élaboration des différentes questions ne sera orientée qu'aux objectifs spécifiques de notre travail. En fin, des entretiens personnalisés auprès des agriculteurs compléteront des informations recueillies. La méthodologie qui sera utilisée dans cette étude repose sur la recherche documentaire et l'estimation économétrique sur les données.

En se concentrant sur l'analyse de l'objectif premier poursuivi par ce travail, l'étude va se focaliser sur l'analyse dans trois cas. Le premier cas est celui des effets de l'adoption du biochar dans les techniques de cuisson. Le second cas est celui des effets d'adoption du biochar dans la productivité du sol. Le troisième cas est celui des facteurs qui ont influencés l'adoption du biochar. En outre, concernant notre deuxième objectif, il sera question de déterminer les facteurs influençant les agriculteurs à l'adoption de l'amendement par le biochar. Il s'agit ici d'interroger les bénéficiaires sur leur volonté d'utiliser le biochar et les techniques de sa production recommandée par STARTER.S.R.L. Les bénéficiaires de cette technologie seront demandées s'ils ont adopté ou pas cette dernière et les facteurs qui les influençaient à l'adoption. Et en fin, l'étude se concentrera sur l'analyse d'effet réel de l'adoption de biochar sur la productivité du sol et les techniques de cuisson. Il sera question de déterminer l'effet de la participation des agriculteurs à l'utilisation de biochar pour amender leurs sols. Afin, nous estimerons les résultats potentiels et contrefactuels de l'adoption de la technologie conditionnellement aux caractéristiques des agriculteurs.

III.4. Méthodes et outils d'analyse

Après la collecte, la saisie et le traitement des données dans le tableur Excel, elles ont été exportés dans les logiciels SPSS et STATA version 15 pour l'analyse. L'analyse des données a concerné une analyse descriptive et économétrique. L'analyse descriptive a été utilisée pour décrire les caractéristiques démographiques, socio-économiques et institutionnelles des agriculteurs. L'analyse des contraintes a été faite à partir de tests statistiques appropriées. L'analyse économétrique a été utilisée pour étudier les déterminants, le taux et l'effet d'adoption du biochar. La régression logit a été utilisée pour estimer les facteurs qui sont indépendamment associés à l'adoption du biochar. C'est une méthode appropriée à mener lorsque la variable dépendante est dichotomique (binaire).

L'appariement par score de propension a été utilisé pour estimer l'effet de l'adoption du biochar sur la productivité du sol. Comme d'autres procédures d'appariement, le PSM estime un effet de traitement moyen à partir de données d'observation.

III.4.1. Mesures des Contraintes de l'adoption du biochar

Cet objectif vise de découvrir les difficultés qui freinent l'adoption des technologies proposées par STARTER.S.R. L auprès des agriculteurs de la zone d'étude. Pour mieux les découvrir, nous allons proposer de solutions qui seront formulées. Pour atteindre cet objectif, l'étude s'attachera aux aspects sociaux économiques, techniques et financiers.

Au niveau des aspects socioéconomiques, nous évaluerons à travers les témoignages recueillis lors d'une enquête, les contraintes rencontrées pour obtenir les résidus agricoles, pour produire du biochar et à l'utilisation dans le sol ; nous allons également évaluer les contraintes liées à l'achat des foyers pyrolytiques améliorés dédiés à la production de biochar et estimer le cout de production. Une appréciation sera faite des motivations réelles des agriculteurs et de leur évolution dans le temps avec les technologies reçues.

Cela permettra également de mettre en évidence les difficultés liées à l'approvisionnement en intrants (résidus agricoles) et à la production de cet amendement par les foyers pyrolytiques améliorés. Au niveau des aspects techniques, nous évaluerons les conditions physiques et matérielles dans lesquelles les agriculteurs reçues la formation en production et utilisation de biochar pour mettre en valeur leurs exploitations.

Cela nous servira de déterminer les difficultés liées à l'application des différentes techniques de production et utilisation de biochar proposées par STARTER.S.R.L.

Au niveau des aspects financiers, nous nous concentrerons sur les contraintes liées à l'accessibilité aux moyens financiers des agriculteurs.

Pour analyser les principales contraintes à la productivité des champs dans lesquels sont utilisés le biochar dans la zone d'étude, nous donnerons une des facteurs militants à la production d'une des cultures cultivées avec l'amendement de biochar échantillonnée à classer dans l'ordre croissant. L'établissement des scores sera fait sur ces classements en fonction des fréquences de chacun d'eux sur la liste donnée aux agriculteurs. A la fin, nous testerons le degré de corrélation entre les fréquences et les rangs en utilisant **le test tau-b de Kendall**. Il s'agit d'une mesure non paramétrique de la corrélation pour les variables ordinales ou classées qui tiennent compte des liens.

Le signe du coefficient indique le sens de la relation, et sa valeur absolue en indique la force, les valeurs absolues les plus élevées indiquant des relations plus fortes. Les valeurs possibles vont de -1 à 1, mais une valeur de -1 ou + 1 ne peut être obtenue qu'à partir de tableaux carrés. Ainsi, le coefficient est donné par la formule suivante :

Le W de Kendall est défini comme suit $\boldsymbol{W = \frac{12S}{m^2(n^2-n)}}$

III.4.2. Cadre économétrique et technique d'estimation des déterminants de l'adoption

L'adoption d'une technologie donnée ou de biochar par l'agriculteur est souvent motivée par un objectif de la maximisation de l'utilité. L'exploitant n'adopte une technologie que lorsqu'elle lui procure une utilité supérieure à celle donnée par l'ancienne technologie. L'adoption de biochar a pour objectif d'améliorer la productivité des cultures et améliorer les conditions de vie des agriculteurs.

L'adoption de biochar peut être la résultante de plusieurs variables.

Dans la littérature économétrique, trois modèles (modèles linéaires et non linéaires) sont souvent utilisés pour analyser l'adoption des technologies :

- Les modèles avec probabilité linéaire ;
- Les fonctions avec densité normale (probit) ;
- Fonction logistique (logit).

D'après Bourbonnais (2011), Jacquot, (2000) et Ngondjeb et al., 2011, ces modèles utilisent souvent des variables à choix binaire comme variable dépendante.

Dans ces types d'étude, les modèles les plus couramment utilisés sont les modèles Tobit, logit et probit. Le modèle Tobit n'est utilisé que lorsque nous avons des informations sur l'adoption ou non d'une technologie et mieux, si nous avons des informations sur le niveau d'utilisation de la technologie. Les modèles Probit et Logit ont des caractéristiques proches (Amemiya, 1981) à la différence que le modèle Probit se base sur la loi normale tandis que le modèle Logit se base sur la loi logistique de distribution de probabilité.

Pour analyser l'adoption du charbon à usage agricole (biochar), l'étude utilise **le modèle Logit** qui a montré ses preuves dans des études similaires (Roussy et al., 2015) et reste le plus utilisé en raison de sa simplicité et les avantages qu'il offre à l'interprétation des données.

Dans le cadre de notre étude, il s'agit de préciser le comportement des agriculteurs face au nouveau type d'amendement du sol en identifiant les facteurs qui influencent son adoption, sous la forme d'une probabilité.

Pour cela nous avons opté pour le **modèle de la régression logistique**(Logit) pour analyser les déterminants de l'adoption du biochar pour les agriculteurs de la commune de Gashikanwa. Pour le modèle logit, l'estimation s'effectue par la méthode de maximum de vraisemblance. Le modèle théorique quant à lui se base sur la théorie de l'acceptation de technologie de Davis (1989), de l'innovation technologique de Rogers (1995) et de la théorie de l'innovation induite. Ces théories indiquent que les facteurs influençant l'adoption d'une technologie sont reliés à celle-ci selon une relation mathématique bien déterminée.

La théorie d'utilité montre que l'agriculteur adopte une sorte d'amendement sur la base du principe de rationalité notamment l'hypothèse de maximisation de l'utilité de la théorie néoclassique. Or, l'agriculteur rationnel préfère les amendements qui lui procurent le plus d'utilité. Certains travaux en économie sur l'adoption des technologies indiquent que des multiples facteurs endogènes ou exogènes (observables et non observables directement) et les caractéristiques essentielles de la technologie influencent les décisions des agriculteurs (Roussy et *al.,* 2015 ; Ngondjeb et *al.*, 2011).

La fonction d'utilité d'un agriculteur i est donnée par la formule suivante :

$U_{ij} = U_{ij}$(Mbetid-Bessane, 2014).

Considérons X_i comme un vecteur colonne K facteurs déterminant la décision d'adoption de nouvelle sorte d'amendement et X_j l'utilité résultant du choix du biochar (j=1,2). L'agriculteur choisira de pratiquer le biochar 1 si $\boldsymbol{U_{ij} > U_{ij}}$ **.** De plus la variable latente représente le choix de l'agriculteur telle que :$\boldsymbol{Y_i^* = \delta X_i + \varepsilon_i}$

Avec **δ un vecteur ligne de k paramètre et $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ le terme d'erreur qui représente une perturbation aléatoire ; $\boldsymbol{Y_i^* > 0\ si\ U_{i1} > U_{i2}}$;$\boldsymbol{Y_i^* \leq 0\ si\ U_{i1} \leq U_{i2}}$**

En considérant le cas d'adoption nous définissons une variable dichotomique Y_i telle que $Y_i = 1$ si le biochar est choisi et adopté et $Y_i = 0$ si non.

Alors la probabilité p_i d'adoption du biochar 1est donnée par :

$$\boldsymbol{p_i = prob(Y_i = 1) = prob(Y_i^* > 0) = prob(\delta X_i + \varepsilon_i > 0) = prob(\varepsilon_i > -\delta X_i)}$$
$$\boldsymbol{= F(\delta X_i)}$$

On fait l'hypothèse que les erreurs $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ sont indépendantes et distribuée de façon identique. Elles suivent la loi logistique. Alors, la spécification du modèle logit est **:** $\boldsymbol{p(y_i) = \frac{e^{\delta x_i}}{1+e^{\delta x_i}}}$

Partant du modèle logit, nous formulons le modèle économique comme suit :

$$\boldsymbol{p(y_i) = \frac{e^{\delta_0+\delta_1 X_1+\delta_2 X_2+\cdots+\delta_k X_n+\varepsilon_i}}{1+e^{\delta_0+\delta_1 X_1+\delta_2 X_2+\cdots+\delta_k X_n+\varepsilon_i}}}$$

Où $\boldsymbol{p}$ est la probabilité qu'un individu face à un choix donné $\boldsymbol{y_i}$, $\boldsymbol{e}$ est la base du logarithme népérien, $\boldsymbol{X_n}$ est un vecteur des variables explicatives, $\boldsymbol{\delta_0}$ est une constante et $\boldsymbol{\delta_k}$ sont des coefficients associés à chaque variable explicative $\boldsymbol{X_n}$ à estimer. Un coefficient positif signifie que la probabilité augmente avec l'accroissement de la variable indépendante correspondante (Neupane et al., 2002) contrairement à un coefficient négatif, la probabilité diminue avec l'accroissement de la variable indépendante correspondante . Les coefficients $\boldsymbol{\delta_0}$ et $\boldsymbol{\delta_k}$ dans la régression logistique sont estimés en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de l'adoption de la technologie de production de biochar et font construire le modèle économétrique suivant:

$$\boldsymbol{Y = \delta_0 + \delta_1 X_1 + \delta_2 X_2 + \delta_3 X_3 + \delta_4 X_4 + \delta_5 X_5 + \delta_6 X_6 + \delta_7 X_7 + \delta_8 X_8 + \delta_9 X_9 + \delta_{10} X_{10}}$$

$\mathbf{X_{1,\ldots\ldots\ldots,Xn}}$ représentent les variables explicatives et Y représente la variable expliquée(à expliquer).

Le logiciel STATA sera utilisé pour les analyses économétriques.

III.4.3. Impacts/Effets d'adoption du biochar sur la productivité du sol

L'objectif de la recherche est de mesurer l'impact de l'adoption de technologie agricole sur la productivité (Δ *ATT),* en estimant la différence entre les ménages bénéficiaires et les non bénéficiaires. Nous appliquons l'approche d'appariement par score de propension introduit par rosenbaum et rubin en 1983 pour estimer l'effet moyen de traitement. L'étude de Lecocq, Ammi et Bellarbre, (2014) a montré les quatre étapes qui seront décrites pas en pas: dans un premier temps, il est nécessaire de déterminer les facteurs expliquant l'affectation au traitement, le deuxième temps est consacré à l'estimation du score de propension, dans un troisième temps, il faut évaluer la qualité du score de propension et dans un quatrième temps, déterminer la zone de support commun. Ce n'est qu'une fois toutes ces étapes effectuées que le score de propension peut être utilisé pour mesure l'effet du traitement d'un programme.

Par conséquent, la participation au programme est représentée par une variable aléatoire T. pour chaque individu i, on a :

$$\begin{cases} T_i = 1 \; si \; les \; agriculteurs \; adoptent \; le \; biochar \\ T_i = 0 \; si \; non \end{cases}$$

L'efficacité du programme est mesurée par la variable résultat Y_i qui est une variable latente :

$$\begin{cases} Y_{Ti} \; si \; l'agriculteur \; recoit \; le \; foyer \; pyrolytique \; amélioré \\ Y_{NTi} si \; l'agriculteurne \; recoit \; pas \; le \; foyer \; pyrolytique \; amélioré \end{cases}$$

Ces deux variables correspondent les résultats potentiels du programme. Elles ne sont jamais simultanément observées pour un même agriculteur. Pour un agriculteur bénéficiant le foyer elsastove, $\boldsymbol{Y_{T_i}}$ est observée tandis que $\boldsymbol{Y_{NT_i}}$ est inobservée. Dans ce cas, la variable $\boldsymbol{Y_{NT_i}}$ correspond au résultat qui aurait été réalisé si l'individu n'avait pas été traité (contrefactuel). Pour un agriculteur non traité, on observe au contraire $\boldsymbol{Y_{NT_i}}$ tandis que $\boldsymbol{Y_{T_i}}$ est inobservée.

La variable de résultat observée pour chaque agriculteur peut se déduire des variables potentielles et de la variable de traitement par la relation suivante :

$\boldsymbol{Y_i = T_i Y_{T_i} + (1 + T_i) Y_{NT_i}}$ **;** où seul le couple $\boldsymbol{(Y_{T_i}, T_i)}$ est observé pour chaque agriculteur. En conséquence, l'effet cause du traitement est définie pour chaque agriculteur par **:**

$$\Delta_i = \boldsymbol{Y_i^1 - Y_i^0} \qquad (\mathbf{1})$$

$\boldsymbol{\Delta_i}$ est l'effet de l'adoption du biochar sur les bénéficiaires i où i=1, 2,…., N.

$\boldsymbol{Y_i^1}$ **et** $\boldsymbol{Y_i^0}$ sont des variables de résultats décrivant le niveau de production des ménages bénéficiaires i conditionnellement à l'adoption ou non des foyers pour la cuisson et la production de biochar (Y^0 représente les résultats contrefactuels).

Les niveaux de productivité des sols amendés par le biochar seront utilisés comme variables des résultats pour comprendre l'impact réel de l'adoption de biochar . Pourtant, nous allons montrer ce que serait la productivité des sols s'ils ne participaient qu'à l'utilisation de biochar de STARTER S.R.L. Nous allons par la suite comparer les moyennes de ces résultats trouvés pour ces variables avec les résultats observés pour dégager les différences qui seront très importantes dans nos conclusions.

En se basant sur les équations de productivité de deux groupes (groupes des bénéficiaires des foyers elsastove et celui des non bénéficiaires), nous pouvons estimer l'effet de traitement (prédire par le contrefactuel). Nous serons à mesure de comparer :

-les résultats attendus des agriculteurs qui bénéficient actuellement les foyers pour la cuisson et la production de biochar par rapport à ceux qui n'en bénéficient pas ;

-les résultats attendus dans les cas hypothétiques des contrefactuels (les résultats qu'auraient les agriculteurs bénéficiant actuellement les foyers améliorés pyrolytiques en l'absence de ceux-ci ; les résultats qu'auraient les agriculteurs qui ne bénéficient pas actuellement les foyers elsastove en présence de celles-ci.

Ainsi, nous pouvons d'abord définir les attentes conditionnelles dues à la participation ou non à la pratique d'utilisation des foyers pour la cuisson et l'utilisation du biochar comme amendement du sol comme suit :

-Les agriculteurs qui bénéficient actuellement les foyers améliorés pyrolytiques avec participation au traitement : $\boldsymbol{E(Y_i^0 \,|T_i = 1)}$

-Les agriculteurs qui ne bénéficient pas actuellement les foyers améliorés pyrolytiques avec non-participation au traitement :$\boldsymbol{E(Y_i^0 \,|T_i = 0)}$

Ensuite ,nous prédisons le résultat attendu dans les cas hypothétique des agriculteurs pratiquant la technologie de production de biochar basé sur régime 0, $E(Y_i^0|T_i = 1)$ c'est-à-dire les résultats qu'auraient les agriculteurs qui ne bénéficient pas actuellement les foyers en présence de celles-ci et le résultat prédit des agriculteurs pratiquant uniquement d'autres amendement selon le régime 1, $\boldsymbol{E(Y_i^0 \,|T_i = 0)}$. Cela veut dire que les résultats qu'auraient les agriculteurs bénéficiant actuellement des foyers pour produire de biochar en absence de celles-ci.

Ces différentes estimations nous conduisent de comprendre de façon importante les deux groupes de traitement. Les comparaisons vont nous indiquer les effets moyens de l'adoption de la technologie sur l'ensemble des agriculteurs (Δ_{ATE}) c'est ce qu'on appelle un estimateur naïf mais aussi sur la productivité des bénéficiaires (Δ_{ATT}).

Or, l'effet moyen du traitement sur l'ensemble des agriculteurs est :

$$\Delta_{ATE} = \boldsymbol{E\left(Y_i^1 - Y_i^0\right) = E\left(Y_i^1|T_i = 1\right) - E\left(Y_i^0 \,|T_i = 0\right)}$$

L'effet moyen du traitement dans la population des agriculteurs bénéficiaires des foyers pour la cuisson et la production de biochar est :

$$\Delta_{ATT} = \boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{Y_I^1} - \boldsymbol{Y_i^0} | \boldsymbol{T_i = 1}\right) = \boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{Y_i^1} | \boldsymbol{T_i = 1}\right) - \boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{Y_i^0} | \boldsymbol{T_i = 1}\right)$$

Ces deux effets sont égaux si les variables de résultat sont indépendantes de la variable d'accès au traitement. Dans ce cas, on a :

$$\Delta_{ATE} = \Delta_{ATT} = \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{T = 1}) - \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{T = 0})$$

Néanmoins, dans la réalité la décision de traitement détermine la variable résultat. En outre, dans ce cas, l'estimateur ci-dessous formée par la différence de la moyenne de la variable résultat est affecté d'un biais de sélection.

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{T = 1}) - \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{T = 0}) = \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_T}\,|\boldsymbol{T = 1}) - \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_{NT}}|\boldsymbol{T = 0}) = \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_T}\,|\boldsymbol{T = 1}) - \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_{NT}}|\boldsymbol{T = 1}) + \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_{NT}}|\boldsymbol{T = 1}) - \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_{NT}}|\boldsymbol{T = 0}) = \Delta_{ATT} + \boldsymbol{B_{ATT}}$$

où $\boldsymbol{B_{ATT}}$ est le biais de sélection. L'origine de ce biais vient du fait que la situation moyenne des ménages agriculteurs qui ont reçu les foyers pour la cuisson et la production de biochar ou le traitement n'aurait pas été la même que celle de ceux n'ayant pas reçu le traitement. En d'autres termes, les agriculteurs ayant obtenu des foyers et celles n'ayant pas obtenu ces foyers ne sont pas similaires ou identiques. Ainsi, puisque la moyenne contrefactuelle des agriculteurs traités $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y_{NT}}|\boldsymbol{T = 1})$ n'est pas observée, on doit choisir un substitut afin d'estimer l'effet moyen du traitement sur les traités. Cela n'est possible que sous deux hypothèses :

Hypothèse 1 : Sélection observable et interdépendance conditionnelle appelée en anglais le label *Conditional Independance Assumption* ou Unconfoundeeness. Le matching repose sur l'hypothèse que l'ensemble des variables produisant le biais de sélection (variables de contrôle) sont observées (Rosenbaum et Rubin, 1983; Smith et Todd, 2005 ; Imbens, 2004; Rubin et Thomas 1996). Soit Xi le vecteur des variables observées. L'hypothèse de sélection sur les observables signifie que les variables latentes de résultats ($Y_T et\ Y_{NT}$) sont orthogonales à la participation conditionnelle des caractéristiques (X). Sous cette hypothèse, il est possible d'annuler le biais de sélection en comparant des individus ayant des caractéristiques observées identiques.

Hypothèse 2 : *Existence d'un support commun.* L'application des techniques de matching seulement possible s'il existe des individus non traités ayant des caractéristiques identiques à celles des individus traités. Elle désigne que la probabilité de participer au programme doit être comprise dans un intervalle de 0 et 1 c'est-à-dire $0 < P(T = 1|X) < 1$. Le test de cette hypothèse repose sur une estimation de la zone de support commun (Todd, 2007).

III.4.4. Méthode d'appariement ou Matching

Initialement introduit par Rosenbaum et Rubin en 1983, le score de propension désigne la probabilité d'être exposé à un traitement, selon un ensemble de caractéristiques observables. Cette méthode est largement utilisée dans les recherches quasi-expérimentales en économie. Le score de propension sert à juger la comparabilité des groupes dans les études quasi expérimentales. Il représente une option intéressante lorsque la randomisation n'est pas possible, mais, aussi et surtout, parce qu'elles tendent à être davantage représentatives de ce qui se passe dans le monde réel. Avec un devis quasi expérimental, les individus présentent vraisemblablement des différences au stade initial de l'intervention (Grimes & Schulz, 2002; Steiner, Cook, Shadish, & Clark, 2010). Le score de propension permet d'abord de détecter l'existence de différences préexistantes à la mise en œuvre de l'intervention.

En cas de différences, il permet ensuite de corriger le biais de sélection et de déterminer les effets nets d'un traitement (Winship & Mare, 1992).

III.5. Procédure d'échantillonnage

L'échantillonnage a consisté à la détermination de taille de l'échantillon où se borne l'étude. Par ailleurs, la base de sondage a été présentée pour préciser la localisation spécifique du lieu d'étude. Nous avons montré également la méthode de tirage de l'échantillon de notre étude.

III.5.1. Population cible

La population cible de l'étude était constituée de cultivateurs des zones d'étude scindés en deux groupes ; un groupe des adoptants du biochar et un groupe de non-adoptants. Les adoptants ont constitué le groupe de traitement, tandis que les non-adoptants ont servi de groupe de contrôle ou groupe témoin.

III.5.2. Détermination de la taille de l'échantillon

La taille totale de l'échantillon des ménages a été déterminée à l'aide d'une formule élaborée par Cochran (1977) :

$$\boldsymbol{n = \frac{t^2 p(1-p)}{e^2}} \quad \text{.....(1)}$$

n : Taille de l'échantillon pour une population mère très grande (infinie) ; **t** : Coefficient de marge 1,96 déduit du seuil de confiance « **s** » de 95 % ; **e** : Marge d'erreur que l'on se donne pour la grandeur que l'on veut estimer (la proportion réelle à 5% près) ; **p** : Proportion des éléments de la population-mère ou probabilité de succès ou probabilité de réalisation positive qui présentent une propriété donnée (lorsque p est inconnue, on utilise **p = 0.5**) ; **q = 1-p** : Probabilité d'échec ou probabilité de réalisation négative.

Ainsi notre taille de l'échantillon devient :

$$\mathbf{n=\frac{1{,}96^2 * 0{,}5(1-0{,}5)}{0{,}05^2}} \quad \mathbf{n = 384}$$

A l'aide de la technique d'échantillonnage proportionnelle à la taille (PPS), un échantillon total de 384 ménages a été enquêté.

III.6. Méthodes de collecte et source des données

La collecte des données primaires, quantitatives et qualitatives a été faite par une enquête auprès des adoptants et non adoptants du biochar, à l'aide d'un questionnaire et du logiciel Kobo Collect. Les données ont été collectées auprès des agriculteurs de la Gashikanwa de la Province Ngozi. Les informations générales sur les caractéristiques socio-économiques des ménages, les contraintes liées à l'adoption du biochar, les déterminants et les effets de l'adoption du biochar diffusé par STARTER S.R.L dans les zones d'étude ont été recueillies. Pour une compréhension approfondie de notre étude, différentes sources ont été consultées. Il s'agit des ouvrages généraux, des mémoires et articles publiés sur l'internet, de différents rapports, la FAO et autres articles visités à l'internet.

III.6.1. Pré-enquête

La pré-enquête est une enquête préliminaire visant à vérifier la pertinence et la faisabilité du questionnaire. Il est réalisé avec une sélection aléatoire de personnes de la région cible. Ainsi des personnes ayant adopté le biochar et les non adoptants ont été interrogées. À l'issue de cette pré-enquête, les questions redondantes qui pouvaient facilement induire de fausses informations ont été supprimées, et certaines questions jugées importantes ont été intégrées.

III.6.2. Enquête

Collecter les données vise à recueillir des données nécessaires pour nos analyses à partir des enquêtes quantitatives. Nous avons d'abord visité la source **« synthèse Bibliographique".** Cette source nous a aidé à collecter des documents pour construire une base documentaire. Il s'agit des ouvrages généraux, des mémoires et articles publiés sur l'internet. Un questionnaire élaboré au préalable aura servi à la réalisation de cette collecte à travers l'entretien , focus group et des observations directes sur terrain pour bien comprendre l'impact de l'adoption de la technologie de production du biochar pour la cuisson et la production des agriculteurs enquêtés .L**'interview** est une méthode de recueil d'informations qui nous a servi en des entretiens oraux, individuels ou de groupes, avec plusieurs personnes sélectionnées soigneusement, afin d'obtenir des informations sur des faits ou des représentations, dont on analyse le degré de pertinence, de validité et de fiabilité en regard des objectifs du recueil d'informations (Ketele&Roegiers, 1996). De ce fait, l'attention particulière s'est tenue sur l'entretien semi-directif ou qualitatif (Savoie-Zajc,1997) qui est une technique de collecte de données contribuant au développement de connaissances approfondies favorisant des approches qualitatives et interprétatives relevant en particulier des paradigmes constructivistes (Lincoln, 1995). Ainsi, la collecte des données se déroulera dans la région de Gashikanwa qui sera tenue du 13/09 au 05/10/2024. L'enquête consistera à se rendre sur les périmètres agricoles de cette région.

III.7. Saisie et traitement des données

Après l'enquête, la saisie des données collectées avec les fiches d'enquêtes a été faite avec le logiciel Kobo collect. Les données ainsi collectées et saisies ont été exportées dans le tableur Excel afin de faire la construction des variables d'analyse. Le dépouillement des données a été fait afin de relever certaines modalités n'ayant pas été prises en compte dans le questionnaire de départ. Il s'est suivi la codification et le traitement des données.

III.8. Description des données et des variables

Plusieurs déterminants peuvent influencer l'adoption du biochar. Le tableau ci-dessous explique les différentes variables utilisées et qui seraient pertinentes pour notre étude ainsi que leurs signes attendus :

III.8.1. Variables dépendantes

III.8.1.1. Adoption (Y)

L'adoption des technologies de production et d'utilisation de biochar est la variable dépendante et a été déterminée en demandant aux agriculteurs s'ils ont adopté ou non. Dans ce cas, l'adoption sera mesurée comme 0 pour la non-adoption et 1 pour l'adoption.

Variables indépendantes

Caractéristiques socio-économiques

a) Âge (X1)

L'âge est censé influencer l'adoption de la technologie. Adesina et Zinnah (1993) ont constaté que l'âge était négativement corrélé à l'adoption. Selon Tiamiyu et al. (2009), les jeunes agriculteurs sont plus susceptibles d'adopter de nouvelles technologies s'ils ne sont pas limités par des ressources limitées, tandis que les agriculteurs plus âgés sont moins susceptibles d'utiliser de nouvelles technologies si elles nécessitent une connaissance supplémentaire.

b) Sexe (X2)

Le sexe a également été mesuré comme suit : (homme = 1, femme = 0). Cette variable est censée avoir un effet positif ou négatif sur l'adoption des technologies de production et d'utilisation de biochar, car les agriculteurs masculins sont mieux placés que les féminins pour accéder aux intrants qui améliorent la productivité, tels que les engrais, le crédit et les services de conseil en vulgarisation. Par conséquent, on s'attendait à ce que cette variable ait une influence positive sur l'adoption des technologies chez les agriculteurs et une influence négative chez les agricultrices.

c) Statut matrimonial (X3)

Le statut matrimonial sera mesuré comme suit : (marié = 1, sinon = 0). L'état matrimonial renforce la capacité des agriculteurs à avoir des membres du ménage qui peuvent contribuer à la main-d'œuvre nécessaire à l'adoption de technologie de production et l'utilisation de biochar. On s'attendait à ce que l'état matrimonial ait une influence positive sur l'adoption de technologies.

d) Niveau d'instruction (X4)

On s'attend à ce que le niveau d'éducation des agriculteurs ait une conséquence sur le niveau d'adoption des technologies. Le niveau d'éducation de l'agriculteur se reflète dans sa capacité à accéder, comprendre et utiliser l'information pour prendre des décisions au moment opportun. La compréhension des avantages du biochar (comme l'amélioration de la fertilité des sols, la séquestration du carbone, la rétention d'eau) est cruciale. Plus les parties prenantes sont informées, plus l'adoption est probable.

Des études menées par Atala, 1980 ; Feder et al., 1985 ; Chaves et Riley, 2001 ont montré que le niveau d'éducation des agriculteurs est positivement lié à l'adoption d'innovations agricoles. Le niveau d'éducation a été catégorisé comme suit :(i) Pas d'éducation formelle = 0 (ii) Primaire = 1 (iii) Secondaire = 2 (iv) universitaire= 3

e) Taille du ménage(X5)

La taille du ménage a été mesurée en fonction du nombre de personnes vivant dans le ménage de l'agriculteur. On s'attend à ce que la taille du ménage affecte positivement l'adoption de la technologie. Il a été constaté que cette variable influence l'adoption d'innovations agricoles par les agriculteurs (Jamala et al., 2011). Les ménages de grande taille offrent la possibilité de trouver de la main-d'œuvre interne pour les travaux des champs, ce qui réduit les besoins en main-d'œuvre externe. Ceci est plus significatif pour les innovations qui nécessitent un niveau considérable de main-d'œuvre.

f) Main d'œuvre (X6)

Cette variable a été définie comme le nombre de personnes dans le ménage de l'agriculteur qui est engagé dans le travail agricole. Le nombre de personnes du ménage de l'agriculteur disponibles pour le travail agricole devrait avoir un impact positif sur l'adoption de la technologie.

g) Taille de l'exploitation (X7)

La taille de l'exploitation est censée influencer l'adoption des technologies de production du biochar. La taille de l'exploitation fait référence à la superficie totale des terres (en ares) que possède l'agriculteur. Adesina et Zinnah (1993) ont trouvé une corrélation positive entre la taille de l'exploitation et l'adoption tandis que De Souze et al. (1999) ont rapporté une corrélation négative de la taille de l'exploitation avec l'adoption d'une innovation. Cependant, Bonabana (1998) n'a trouvé aucune association entre les deux variables. La taille de l'exploitation a été mesurée en ares (A).

h) Possession d'un téléphone mobile (X8)

La possession d'un téléphone mobile devient une question importante pour l'information sur le marché et l'accès aux intrants agricoles tels que les engrais par les agriculteurs. On s'attend à ce que les agriculteurs possédant un téléphone portable soient en meilleure position pour accéder aux informations et aux intrants qui favoriseront l'adoption de la technologie de production par rapport aux autres qui n'ont pas accès aux téléphones portables. La possession d'un téléphone mobile sera mesurée comme une variable muette (1 = utilisateur et 0 = non utilisateur).

Caractéristiques institutionnelles

j) Accès à la vulgarisation(X9)

Le contact des agriculteurs avec les services de vulgarisation leur permettra de disposer des connaissances précises des variétés améliorées de patate douce diffusées par la recherche. C'est une variable binaire qui prend la valeur 1 lorsque l'agriculteur a de contact avec les services de vulgarisation et 0 sinon. Elle est supposée influencer positivement le choix d'adoption.

k) Appartenance dans une association (X10)

L'adhésion des agriculteurs dans des associations influence positivement à l'adoption d'une technologie de production d'amendement qui améliore la productivité du sol. Les agriculteurs appartenant à une association sont en excellente disposition pour accéder à la connaissance des bienfaits de l'adoption du biochar ou des technologies agricoles par rapport aux autres n'appartenant pas dans aucune association. L'appartenance dans une association sera mesurée comme une variable binaire. Elle prend la valeur 1 si l'agriculteur appartient à une association et 0 sinon.

Tableau 3 : Les variables du modèle et les signes attendus des paramètres

Variables	Type de variables	Description	Signe attendu
Variable dépendante			
Adoption du biochar= *Adopt*	Qualitative	Variable dépendante :1 s'il y a adoption du biochar et 0 si non	N/A
Variables indépendantes			
1.Age=*âge*	Quantitative	Nombre d'année du chef du ménage	+ ou -
2.Sexe=*sexe*	Qualitative	1 si l'individu est un homme et 0 si non	+ ou -
3.Statut matrimonial=*statut_matr*	Qualitative	=1 si l'individu est marié et 0 si non	+ ou -
4.Niveau d'éducation= *instruction*	Qualitative	Le niveau d'étude a été catégorise comme suit : 0= aucun niveau ; 1 =niveau primaire ; 2= niveau secondaire ; 3= niveau universitaire	+ ou -
5.Taille du ménage= *taille_mena*	Quantitative	Le nombre des personnes vivant dans le ménage	+ ou -
6.Main d'œuvre du ménage= *maindoeuvre_men*	Quantitative	Nombre de personnes cultivateurs dans le ménage	+
7.Taille de l'exploitation= *Superficie*	Quantitative	Taille de l'exploitation en are	+ ou -
8. Possession d'un téléphone mobile= *poss_tel*	Quantitative	Somme d'argent qu'un exploitant peut obtenir par saison culturale	+ ou –
9.Vulgarisation=vulg	Qualitative	Variable muette : 1 utilisateur du téléphone et 0 si non	+
10.Appartenance dans une association = *aparten_asso*	Qualitative	Variable binaire : 1= si l'agriculteur appartient à une association ; 0= non	+

Source : Auteur, 2024

Ainsi, le modèle de l'adoption de l'amendement par le biochar devient :

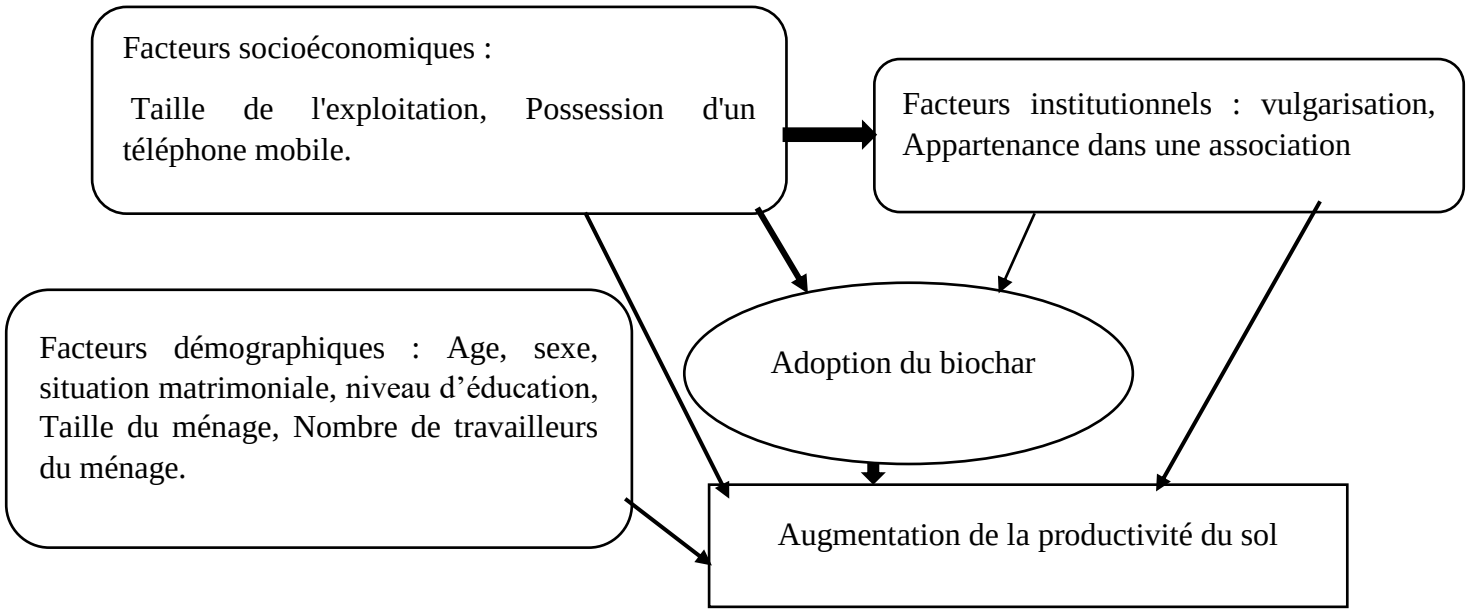
$$\mathbf{Adopt_i}=\beta_0+\beta_1 \hat{a}ge_i+\beta_2 sexe_i+\beta_3 statut_matr_i+\beta_4 instruction_i+\beta_5 taille_mena_i+\beta_6 maindoeuvre_mena_i+\beta_7 superficie_i+\beta_8 poss_tel_i+\beta_9 vulg_i+B_{10} appart_asso_i+Ɛi\ldots$$ (modèle d'adoption)

Où i représente le cultivateur, Yi représente la variable d'adoption, expliquée par les variables Xi indépendantes ; B représente les paramètres à estimer et Ɛ : terme d'erreur.

III.9. Cadre conceptuel de l'étude

Le cadre conceptuel de l'adoption et de ses facteurs associés est illustré dans la figure ci-dessous. On pense que l'adoption est influencée par les facteurs socioéconomiques (Age, sexe, situation matrimonial, niveau d'éducation, taille du ménage, Nombre de travailleurs du ménage, Taille de l'exploitation, Expérience agricole, Possession d'un téléphone mobile, Appartenance dans une association) et institutionnelles (appartenance dans une association, vulgarisation). Ces facteurs peuvent avoir un effet positif ou négatif sur l'adoption et le rendement des agriculteurs.

Figure 5 : Cadre conceptuel de l'étude



Source : Auteur 2024

Conclusion du troisième chapitre

Ce chapitre permettra de montrer la localisation de la zone d'étude et de présenter les méthodes de collecte et d'analyse de données. Ainsi, la détermination de l'échantillon et la collecte de données ont permis d'aboutir à un ensemble d'informations qui nous ont permis de réaliser une analyse descriptive, statistique pour l'identification des contraintes et une analyse économétrique pour l'analyse des déterminants et d'effet d'adoption de la technologie agricole sur la productivité du sol.

CHAPITRE IV. PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Ce chapitre couvre les résultats de l'étude, il a commencé par présenter et interpréter les résultats. Ensuite, il a présenté les discussions de nos résultats en s'appuyant sur d'autres études empiriques effectuées sur ce genre de thématique.

IV.1. Présentation et interprétation des résultats

Cette partie décrit le profil des répondants (les caractéristiques de chefs de ménages). Elle présente les résultats suivis des interprétations économiques de notre étude pour identifier les contraintes limitant la productivité du sol dans la zone d'étude, évaluer le taux d'adoption de l'amendement du sol par le biochar et les raisons d'adoption de cet amendement, pour analyser les facteurs déterminants l'adoption de cet amendement et pour évaluer l'effet de l'adoption de cet amendement sur la productivité du sol.

IV.1.1. Analyse descriptive sur les caractéristiques des exploitants agricoles selon le statut d'adoption

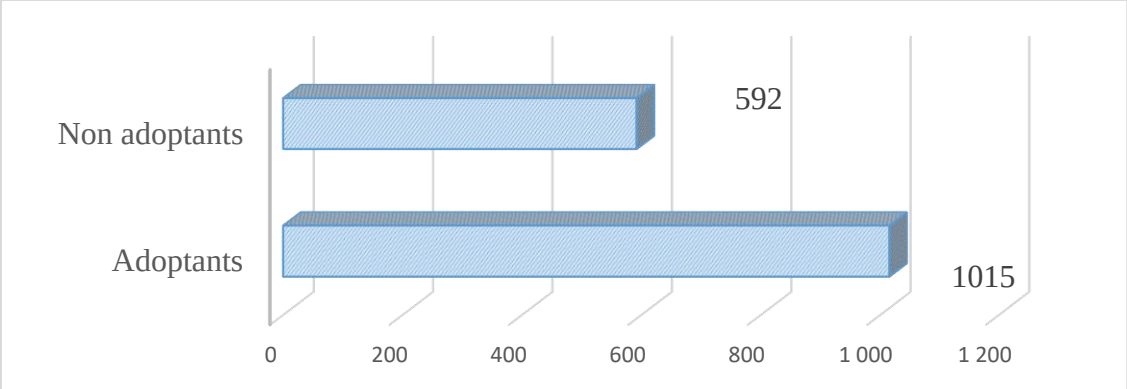
L'utilisation d'une technologie par les agriculteurs peut être influencée par divers facteurs socioéconomiques, sociodémographiques et institutionnels. Ainsi, l'enquête a été menée pour comprendre le point de vue des agriculteurs sur la technologie en particulier l'amendement par le biochar vulgarisé dans la zone d'étude et les facteurs affectant l'application et l'adoption de la technologie enfin d'évaluer l'effet de l'adoption d'une technologie agricole sur le rendement des champs amendés avec le biochar et identifier les contraintes rencontrées par les agriculteurs dans les pratiques de production et d'utilisation du biochar. Les facteurs influençant l'adoption sont donc des facteurs causaux du rendement des agriculteurs. Notre modèle des déterminants comprenait dix variables explicatives et représentait les facteurs censés influencer les processus d'adoption et la diffusion des technologies innovantes dans la zone d'étude. Les variables utilisées dans le modèle sont, de retour, considérées comme des caractéristiques observables des enquêtés pour analyser l'effet de l'adoption du biochar sur la productivité du sol.

La catégorisation de ces variables induites dans le modèle nous permet de faire une analyse globale sur agriculteurs de la zone d'étude. Il s'agit de l'analyse des variables quantitatives et qualitatives.

IV.1.1.1. Production et rendement des agriculteurs

Les résultats de la figure 6 montrent les moyennes de la production des agriculteurs dans la population échantillonnée. Il ressort de cette figure que les adoptants ont une moyenne de 1015kg tandis que les non adoptants ont une moyenne de 592 kg. Cet écart de moyenne montre que les adoptants gagnent plus de production que les non adoptants.

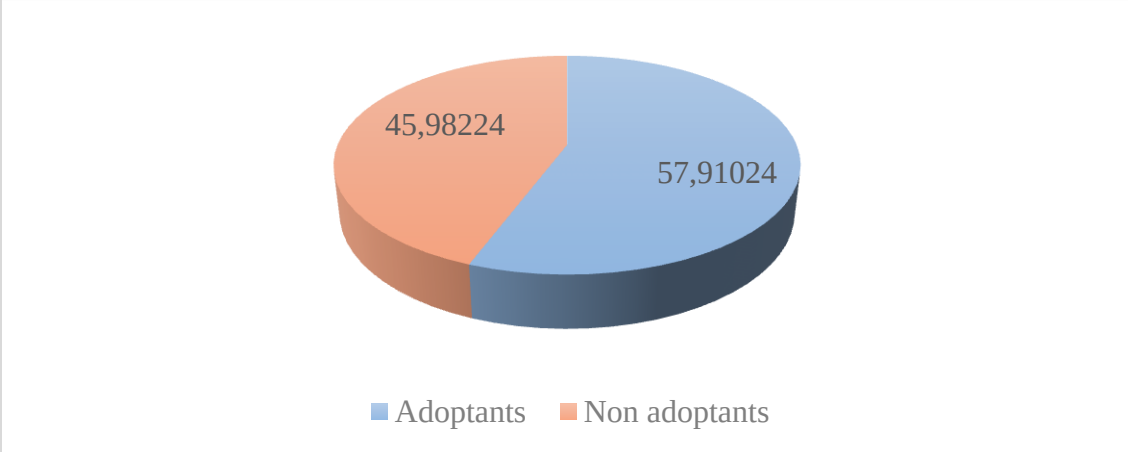
Figure 6 : Illustration de la production en are des agriculteurs qui ont utilisé le biochar dans les champs de haricot



Source : calcul de l'auteur des données d'enquête, 2024

En tenant compte de la superficie emblavée, la figure ci-dessous montre que la moyenne de rendement des agriculteurs qui adoptent le biochar est supérieure à la moyenne de rendement de ceux qui n'ont pas adopté ce dernier type d'amendement.

Figure 7 : Rendement en Kilogramme par are des agriculteurs pour les champs de haricots



Source : calcul de l'auteur des données d'enquête, 2024

Tableau 4 : Illustration de la distribution autour de la Moyenne

variable	observation	Moyenne	écart-type	Min	Max
production	384	51,11458	23,87308	10	140

Source : calcul de l'auteur des données d'enquête ,2024

L'écart-type de 23,87 indique que les valeurs de la production s'écartent, en moyenne, de 51,11 (la moyenne) d'environ 23,87 unités. La variabilité autour de la moyenne est modérée puisqu'elle est comprise entre 10% et 30% de l'écart-type.

Une valeur d'écart-type élevée (23,87) comparée à la moyenne (51,11) suggère une dispersion significative des données autour de la moyenne.

Les valeurs minimales (10) et maximales (140) confirment une distribution étendue, bien que la majorité des valeurs semblent concentrées dans la plage centrale.

La majorité des valeurs de "production" sont proches de la moyenne (51,11), avec une dispersion modérée mais notable.

IV.1.1.2. Caractéristiques sociodémographiques des répondants

Il ressort de l'analyse que les ménages enquêtés sont majoritairement dirigés par les hommes avec 66,93% contre 33,07% des femmes. Les hommes adoptants et non adoptants sont respectivement 27,08% et 39,84% tandis que chez les femmes, elles sont respectivement 14,84% et 18,23%. Cette situation justifie que les ménages agricoles sont en grande partie dirigés par les hommes. Cela indique donc la prédominance de l'homme comme chef de ménage. Par ailleurs, l'état matrimonial est un facteur sociodémographique important affectant l'adoption de la technologie agricole. Parmi les agriculteurs enquêtés, il y avait plus de répondants mariés (68.75%) que les célibataires (4.97%). Les divorcés sont représentés par (12.24%) et les veuf(ve)s par (14. 06%).Toutefois, les non adoptants avaient un pourcentage plus élevé que les adoptants. Il ressort de l'analyse que les non adoptants qui sont mariés, représentaient 36.9% de la population échantillonnée alors que les adoptants étaient de 33.85%. Pourtant, il y avait peu des répondants célibataires : 4,17% des non adoptants et 0,78% des adoptants. Les veuf(ve)s qui ont adopté la technologie sont représentés par 4,17% alors que les non adoptants sont représentés par 9,9%. Les divorcés adoptants sont représentés par 3.13% et les divorcés non adoptants sont représentés par 9,11%.

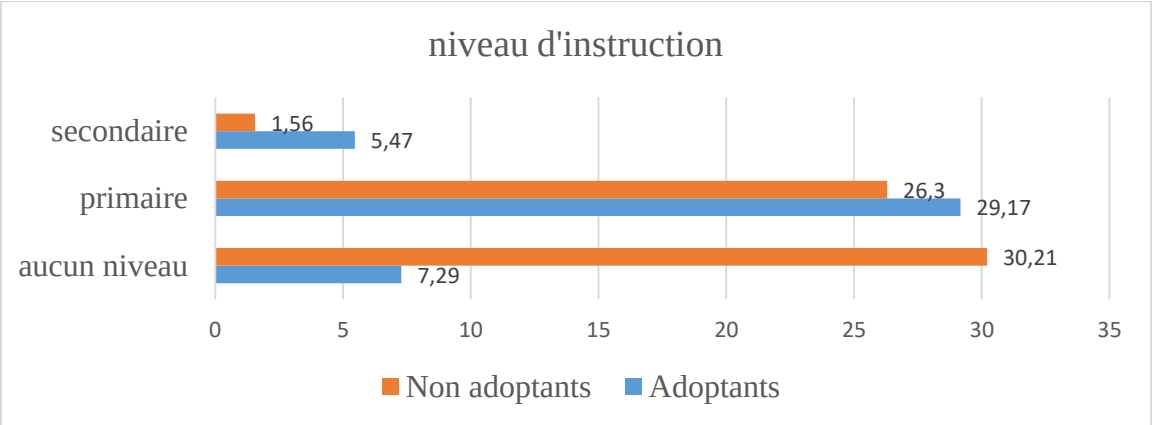
Tableau 5: Sexe et statut matrimonial des répondants

Variables	Modalités	Adoptants(n=161)		Non adoptants(n=223)		Total (n=384)	
		Freq	%	Freq	%	Freq	%
Sexe	Femme	57	14,84	70	18,23	127	33,07
	Homme	104	27,08	153	39,84	257	66,93
Statut matrimonial	Célibataire	3	0,78	16	4,17	19	4,97
	Marié	130	33,85	134	34,9	264	68,75
	veuf(ve)	16	4,17	38	9,9	54	14,06
	Divorcé	12	3,13	35	9,11	47	12,24

Source : Calcul de l'auteur à partir des données de terrain, 2024

Quant au niveau d'instruction, l'étude a révélé qu'environ 37,5% des exploitants agricoles n'avaient aucun niveau d'éducation, 55,47% des agriculteurs avaient une éducation primaire tandis que 7,03% avaient une éducation secondaire. Par statut d'adoption, les statistiques ont révélé que les non adoptants de tous les niveau d'étude sont respectivement représentaient par 30,21% des agriculteurs n'ayant aucun niveau, 26,30% des agriculteurs ayant un niveau primaire et 1,56% des agriculteurs ayant un niveau secondaire tandis que les adoptants sont respectivement représentés par 7,29% des agriculteurs n'ayant aucun niveau, 29,17% des agriculteurs ayant un niveau primaire et 5,47% de niveau secondaire.

Figure 8 : Niveau d'instruction des répondants



Source : Auteur à partir des données de l'enquête avec STATA

Les résultats du tableau 6 montrent que l'ensemble de la population échantillonnée représente la moyenne d'âge de 41,41406ans. Il ressort de ce résultat que les adoptants de l'amendement du biochar a une moyenne de 40,29814ans et de 42,21973ans pour les non adoptants.

Tableau 6: Age, taille de ménage et main d'œuvre familiale des répondants

Variables	Adoptants(n=161)	Non adoptants(n=223)	Total(n=384)
Age du chef du ménage	40,29814	42,21973	41,41406
Taille du ménage	4,291925	4,493274	4,408854
Main d'œuvre de ménage	2,73913	2,726457	2,731771

Source : Calcul de l'auteur à partir des données de terrain, 2024

La taille moyenne de ménages enquêtés était de 4,408854 individus. L'analyse statistique a prouvé une moyenne de taille de ménages de 4,291925 individus pour les adoptants et 4,493274.

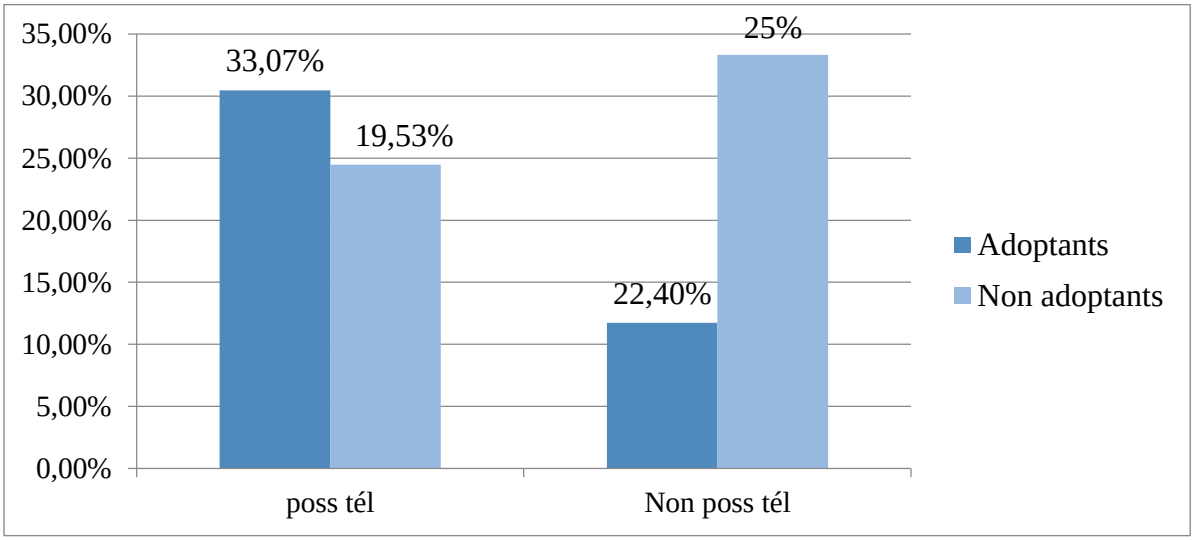
Individus pour les non adoptants.

De plus, les résultats nous montrent également une petite moyenne de la main d'œuvre de la famille (2.731771 individus). Les ménages adoptants et les ménages non adoptants ont respectivement la taille de ménage moyenne de 2,73913 et 2,726457 individus. L'écart entre la taille du ménage et la main d'œuvre de la famille est relativement moyen. Cela est témoigné par les enquêtés que c'est les membres du ménage qui travaillent dans les exploitations sauf les petits enfants. De plus, les chefs de ménages enquêtés ont avéré que les hommes et les femmes partagent les activités agricoles et pour les femmes s'y ajoutent les activités ménagères. Les résultats de l'enquête nous ont montré que la cuisson effectuée pour obtenir le biochar est occupé surtout par les hommes à cause de la technicité nécessaire pour effectuer la pyrolyse les résidus agricoles.

IV.1.1.3. Caractéristiques socioéconomiques des répondants

Cette partie présente des caractéristiques socioéconomiques des agriculteurs dans la zone d'étude en mettant l'accent surtout sur la possession du téléphone mobile, la superficie qu'un agriculteur dispose pour l'exploitation agricole.

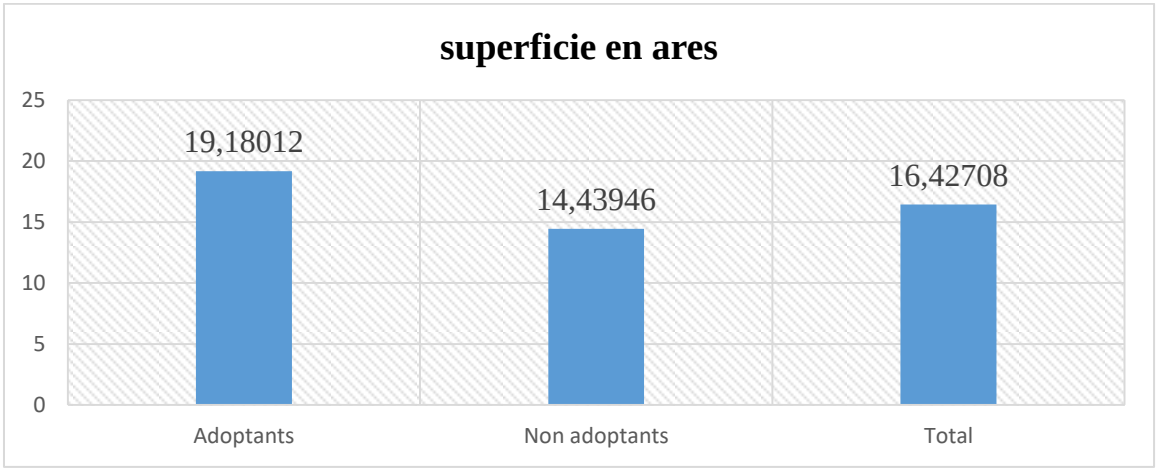
Figure 9: Possession du téléphone des répondants



Source : Auteur à partir des données de l'enquête avec stata

La distribution des répondants par l'utilisation du téléphone montre qu'il y a beaucoup d'utilisateurs des téléphones mobile (52,60%) contre (47,40%) des non utilisateurs de téléphone mobiles. Parmi les utilisateurs de téléphones, 33,07% des agriculteurs ont adopté le biochar contre 19,53% non adoptants. Parmi les non utilisateurs de téléphones 22,40% sont adoptants du biochar contre 25% des non adoptants du biochar.

Figure 10 : Superficie des répondants



Source : Auteur à partir des données de terrain, 2024

Les résultats montrent également que la moyenne des ménages de la zone d'étude a une superficie moyenne de 16,42708 ares. Les résultats de la figure 10 nous montrent que les non adoptants ont une superficie moyenne de 14,43946 ares tandis que les adoptants ont une moyenne de 19,18012 ares.

IV.1.1.4. Caractéristiques institutionnelles des répondants

Dans la population enquêtée les agriculteurs obtiennent les informations agricoles à travers les coopératives ou associations locales ou par les vulgarisateurs. Les agriculteurs qui se mettent ensemble dans les coopératives s'entretiennent sur comment valoriser les résidus agricoles et comment on produit le biochar pour amender le sol.

Dans cette étude, des informations sur l'appartenance à l'association ou coopérative ont été collecté. Le tableau 7 montre le nombre de répondants qui ont l'accès à la vulgarisation à travers les agents vulgarisateurs pendant les saisons culturales.

Par statut d'adoption, parmi les adoptants les 26.82% des agriculteurs adoptants avaient l'accès à la vulgarisation contre 15.36 % des agriculteurs qui n'avaient pas accès à la vulgarisation. Toutefois, 18.49 % des non adoptants avaient l'accès à la vulgarisation contre 39.32% des agriculteurs qui n'avaient pas accès à la vulgarisation.

Tableau 7 : Caractéristiques institutionnelles des répondants

Variables	Modalités	Adoptants(n=162)		Non adoptants(n=222)		Total	
		Freq	%	Freq	%	Freq	%
Appartenance dans une association	App-ass	122	31.77%	150	39.06%	272	70.83%
	Non app-ass	39	10,16%	73	19.01%	112	29.17%
vulgarisation	Accès à la vulgarisation	111	28.91%	124	32.29%	235	61.2%
	Non accès à la vulgarisation	50	13.02%	99	25.78%	149	38.8%

IV.1.2. Les contraintes à l'adoption du biochar

Les quatre principales contraintes identifiées sont présentes dans le tableau ci-dessous selon le degré d'exposition.

Tableau 8 : Classement des contraintes de l'adoption du biochar

Variables	Rang moyen	Rang globale
Manque d'informations sur le biochar	2.15	4eme
Techniques de production du biochar exigeantes	2.56	2eme
Manque des résidus agricoles tout au long de l'année	2.40	3eme
La cherté des foyers pyrolytiques améliorés	2.88	1er

Source : auteur à partir des données d'enquête avec logiciel SPSS 2024

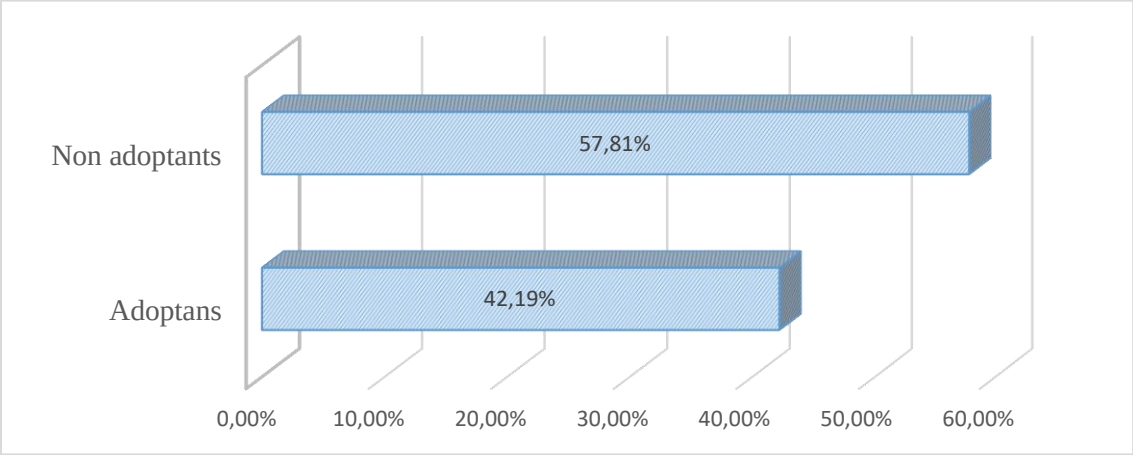
La cherté des foyers pyrolytiques améliorés est apparue comme la première contrainte de l'adoption du biochar dans la zone d'étude. Compte tenue de la nécessité de la vulgarisation d'une nouvelle technologie dans un milieu rural, le biochar n'avait pas été adopté suite au manque d'informations à travers les vulgarisations.

IV.1.3. Evaluation du taux d'adoption du biochar

Le résultat de l'estimation du taux d'adoption du biochar est présenté sur la figure ci-dessous. Le taux d'adoption potentiel (ATE) est de 42,19% indiquant qu'un agriculteur pris au hasard dans la population a une probabilité de 42,19% d'adopter le biochar. Pour rappel, l'adoption est ici définie comme le fait d'avoir utilisé le biochar dans la dernière saison de l'année 2023. Ce résultat montre que cet amendement est faiblement adopté dans la zone d'étude.

Au regard de ce résultat, il ressort de l'analyse que 57,81% des agriculteurs ont préféré de fertiliser leurs sols par autres sortes d'amendements.

Figure 11: Illustration du niveau d'adoption du biochar



De plus, le faible taux d'adoption du biochar peut être expliqué par plusieurs facteurs entre autres, les différentes sortes des fertilisants utilisées dans la région, la méconnaissance sur la qualité du biochar en termes de sa capacité potentielle fertilisante, l'insuffisance des services de vulgarisation dans la région du fait de leur importance quant à l'accès aux informations concernant les techniques culturales adaptées et aux fertilisants améliorées les plus efficaces.

IV.1.4. Les déterminants d'adoption du biochar

Les déterminants ont été identifiés en partant du modèle logit qui nous a permis d'estimer les odds ratio pour montrer les rapports de chances des agriculteurs d'adopter le biochar. De plus, les effets marginaux ont été calculés pour expliciter l'effet de la variation d'une unité supplémentaire sur chaque variable induite dans le modèle. Néanmoins, pour se rassurer que nos résultats soient fiables, nous avons passé aux différents tests du modèle logit.

IV.1.4.1. Test de multicolinéarité

La multicolinéarité a été testée à l'aide du facteur d'inflation de la variance (VIF). Les valeurs obtenues se situent entre 1,03 et 1,80, ce qui ne montre pas de présence de multicolinéarité. Pour tester la multicolinéarité des variables, la corrélation entre les variables indépendantes a été vérifiée à l'aide de l'estimateur de variance-covariance. Plus la valeur est proche de +1 ou de 1, plus la corrélation est élevée (Taylor, 1990). Les valeurs absolues obtenues étaient comprises entre 0,0002 et 0,4697 et n'étaient pas supérieures à 0,75, de sorte qu'il n'y a pas de preuve d'une multicolinéarité. La moyenne du VIF était de 1,26 et montrait l'existence d'une moindre colinéarité parmi les variables indépendantes. Les résultats de l'estimateur de la variance covariance sont présentés à l'annexe.

IV.1.4.2. Test de Hosmer-Lemeshow

Le test de Hosmer-Lemeshow (2000) est utilisé pour déterminer la qualité de l'ajustement du modèle de régression logistique. Il s'agit essentiellement d'un test d'adéquation qui a pour but d'évaluer la qualité d'un modèle. Dans notre modèle, les résultats du test de Hosmer-Lemeshow montrent que la valeur p= 0.4373. Étant donné que la valeur p > 0,05, c'est-à-dire le modèle de régression logistique est ainsi bien adaptée.

IV.1.4.3. Test de ROC

L'aire sous la courbe de ROC est une mesure de la performance du modèle dans la prédiction du modèle d'analyse (Neji et Jigorel, 2015). Elle correspond alors à une mesure de la performance du modèle logit. La courbe ROC permet ainsi de déterminer dans quelle mesure le modèle est informatif. Selon la règle de décision, lorsque l'aire AUC sous la courbe se situe 0,8 et 0,9 le modèle est très informatif. Dans notre modèle, les résultats montrent que l'air sous la courbe ROC est estimé à 0,7546; ce qui montre que le modèle est très informatif.

Figure 12: Courbe de ROC

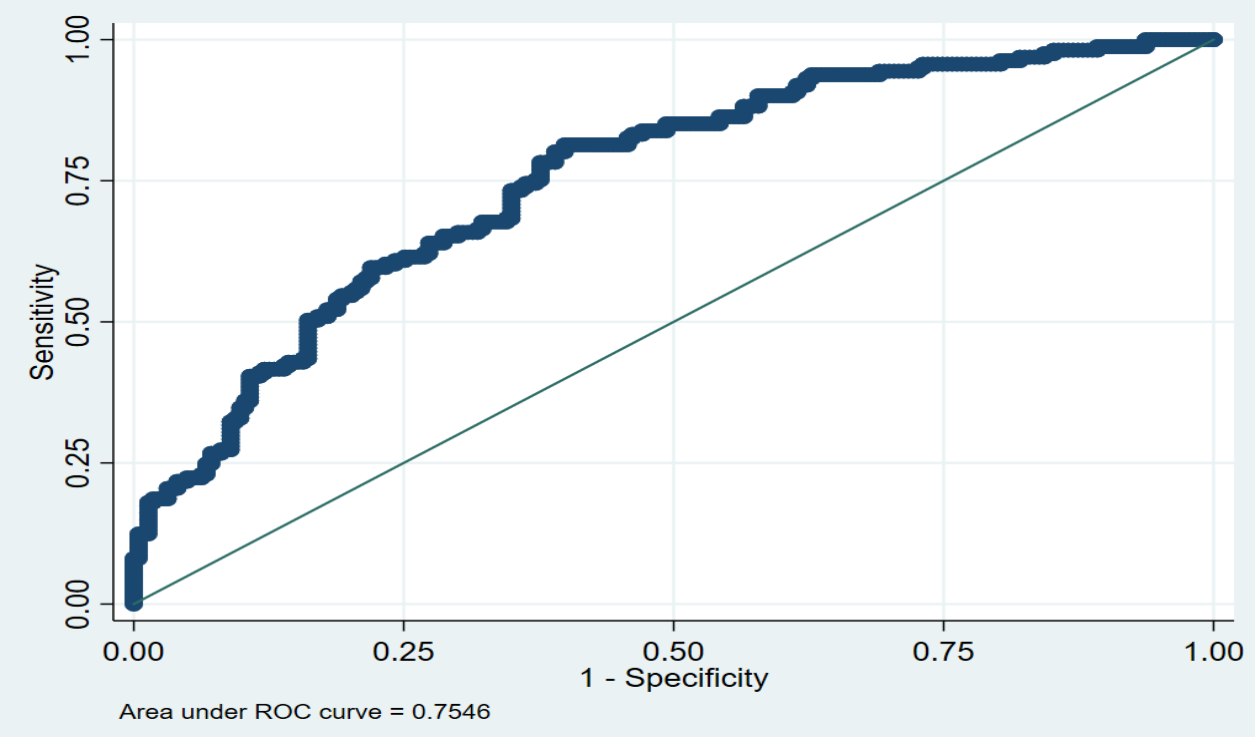


Tableau 9 : Résume des résultats des tests de spécification du modèle

Type de tests	Résultats des tests	Conclusion
Test de multicolinéarité	Moyenne VIF : 1.26	Absence de multicolinéalité
Test de Hosmer et Lemeshow	Test de Hosmer et Lemeshow : Prob>F=0,4373 >5%	Bon ajustement du modèle
Test de bonnes Prédictions avec surface ROC	Coefficient de bonne Prédiction : (0,7 <0,7546 < 0,9).	Moyennement informatifs et acceptable

Source : Synthèse de l'auteur à partir des résultats des tests effectués

IV.1.4.4. Estimation des facteurs influençant les agriculteurs à l'adoption

Les résultats de l'estimation du modèle de régression logistique sont reportés dans le tableau 9. Ils concernent les déterminants de l'adoption du biochar chez agriculteurs et indiquent que le modèle est globalement significatif à 1 %. Donc, il y a une relation significative entre l'adoption et les caractéristiques démographiques, socioéconomiques et institutionnelles prises de notre étude. De plus le niveau de p associée au chi2 est significatif (Prob > chi2 = 0.0000), nous pouvons dire que les paramètres de régression sont statistiquement significatifs.

Tableau 10 : Les déterminants de l'adoption du biochar

Log pseudolikelihood = -219.97339; Number of obs = 384; Wald chi2 (15) = 82.34; Prob > chi2 = 0.0000; Pseudo R2 = 0.1576

Adopt	coef.	Std.Err.	Z	p>|z|	Les effets marginaux(dy/dx)
Sexe	-3208939	.2505017	-1,28	0,200	-.0625865
Age	.0007468	.0125986	0.06	0.953	.0001457
Statutmatrimonial	-.1474925	.1681752	-0.88	0.380	-.0287666
Instruction	1.432178	.2379381	6.02	0.000***	.2793292
Tailledeménage	.0444654	.1163983	0,38	0,702	.0086724
Maind'œuvre familiale	.0134743	.1702229	0.08	0.937	.002628
Superficie en are	.0249859	.0115411	2.16	0.030**	.0048732
Posstél	.4068757	.2424193	1.68	0.093*	.0793562
Appass	.7548362	.2648198	2.85	0.004***	.1472217
Vulgarisation	.5501408	.246004	2,24	0,025**	.1072984
_cons	-2.729724	.7635403	-3.58	0,000	

*** significative à 1%(p<0.01) ; ** significative à 5%(p<0.05) ; * significative à 10%(p<0.1)

Source : calcul de l'auteur à partir des données d'enquête, 2024

Les effets marginaux sont présentés dans la dernière colonne du tableau 9 et montrent l'effet de variation d'une unité de chaque variable sur la probabilité d'adoption.

L'analyse des résultats montre que l'éducation du chef de ménage détermine l'adoption du biochar de manière positive et significative au niveau de 1 %. Ainsi, les effets marginaux montrent que l'augmentation d'une année d'étude augmenterait de 27,93% environ la probabilité d'adopter le biochar, toutes choses restant égales par ailleurs. Cela signifie qu'il est plus probable que ceux qui ont plus d'années d'études adoptent le biochar que ceux qui en ont moins.

La superficie a un coefficient (coef) égal à 0,0249859 et est significative au seuil de 5% (P>|z|= 0.030). Cela signifie que les agriculteurs qui possèdent une grande superficie ont 0,0048732 fois plus de chances d'adopter le biochar comme amendement.

La possession du téléphone a un coefficient(coef) égal à 0, 4068757 et est significative au seuil de 10%(P>|z|= 0.093). Cela signifie que les agriculteurs qui possèdent des téléphones ont 0,0793562 fois plus de chances d'adopter le biochar comme amendement.

Les résultats montrent également que l'appartenance dans une association a un coefficient égal à 0,7548362et est significative pour un seuil de 1% (P>|z|= 0,004). Ce qui signifie que les agriculteurs appartenant dans une association des agriculteurs ont 14,72% plus de chance d'adopter du biochar par rapport à ceux qui n'y appartiennent pas.

Dans la présente étude, les services de vulgarisation ont une influence positive et significative sur la probabilité d'adoption au niveau de 5%. L'effet marginal (0,1072984) signifie que la présence d'un vulgarisateur de plus augmenterait jusqu'à 10,72% la probabilité d'adopter le biochar. Ainsi, le contact avec des services de vulgarisation constitue une étape importante pour l'adoption des nouvelles techniques de production des amendements. (Medagbe et al., 2013),. Cela montre l'importance des services de vulgarisation dans l'adoption du biochar.

IV.1.5. Effet de l'adoption du biochar sur le rendement des agriculteurs

L'effet de l'adoption du fertilisant a été estimé à l'aide d'une variable de résultat (rendement), une variable de traitement (adoption) et dix variables indépendantes (âge, sexe, statut matrimonial, éducation, taille du ménage, main d'oeuvre du ménage, superficie agricole, vulgarisation, possession du téléphone, appartenance à une association).

Pour ce faire, nous avons examiné la qualité du processus d'appariement entre le groupe des adoptants et des non adoptants.

IV.1.5.1. Evaluation de la qualité d'appariement et réduction des biais

La qualité de l'appariement a été évaluée selon plusieurs critères, suivant Kassie et al. (2011). D'abord, le tableau 10 présente les résultats des tests de significativité des différences de moyennes des covariables avant et après appariement et la réduction des biais pour chaque variable introduite dans le modèle.

Les résultats trouvés du tableau 10 montre le biais standardisé moyen avant et après l'appariement et la réduction du biais. Avant l'appariement, les biais standardisés des covariables sont compris entre 0,4% et 35,1% en valeur absolue. Après l'appariement, les biais sont compris entre 0 % et 15,7 % en valeur absolue, ce qui est inférieur au niveau critique de 20 % suggéré par Rosenbaume Rubin (1985). Ce qui justifie que les biais restants n'empêchent pas l'estimation des résultats fiables.

Tableau 11: Test de réduction des biais

Variable	Unmatched Matched	Treated	Control	%bias	%reduct bias	t	p>t
Sexe	U	.64596	.6861	-8.5		-0.82	0.411
	M	.64596	.60248	9.2	-8.3	0.80	0.422
Age	U	40.298	42.22	-18.0		-1.76	0,986
	M	40.298	40.882	-5.5	69.6	-0.43	0.079
Stat-matr	U	1.2298	1.4126	-25.0		-2.36	0.019
	M	1.2298	1.1988	4.2	83.0	0.45	0.595
Instruction	U	.95652	.50673	81.5		7.88	0.000
	M	.95652	.92547	5.6	93.1	0.53	0.594
Tailleménag	U	4.2919	4.4933	-15.4		-1.49	0.136
	M	4.2919	4.3727	-6.2	59.9	-0.53	0.594
Maindoeuvr	U	2.7391	2.7265	1.4		0.13	0.893
	M	2.7391	2.8509	-12.3	-782.2	-1.13	0.594
Superfcie	U	19.18	14.439	-56,6		4.39	0
	M	19.18	21.304	45.0	55.2	-1.73	0.084
Posstél	U	.53416	.43049	20.8		2.01	0.045
	M	.53416	.56522	-6.2	70.0	-0.56	0.577
Appass	U	.75776	.6726	18.9		1.81	0.070
	M	.75776	.71429	9.7	48.9	0.88	0.378
Vulgarisation	U	.68944	.55605	27.7		2.66	0.008
	M	.68944	.59627	19.4	30.2	1.75	0.082

Test significatif au seuil de *10%, **5%, ***1%

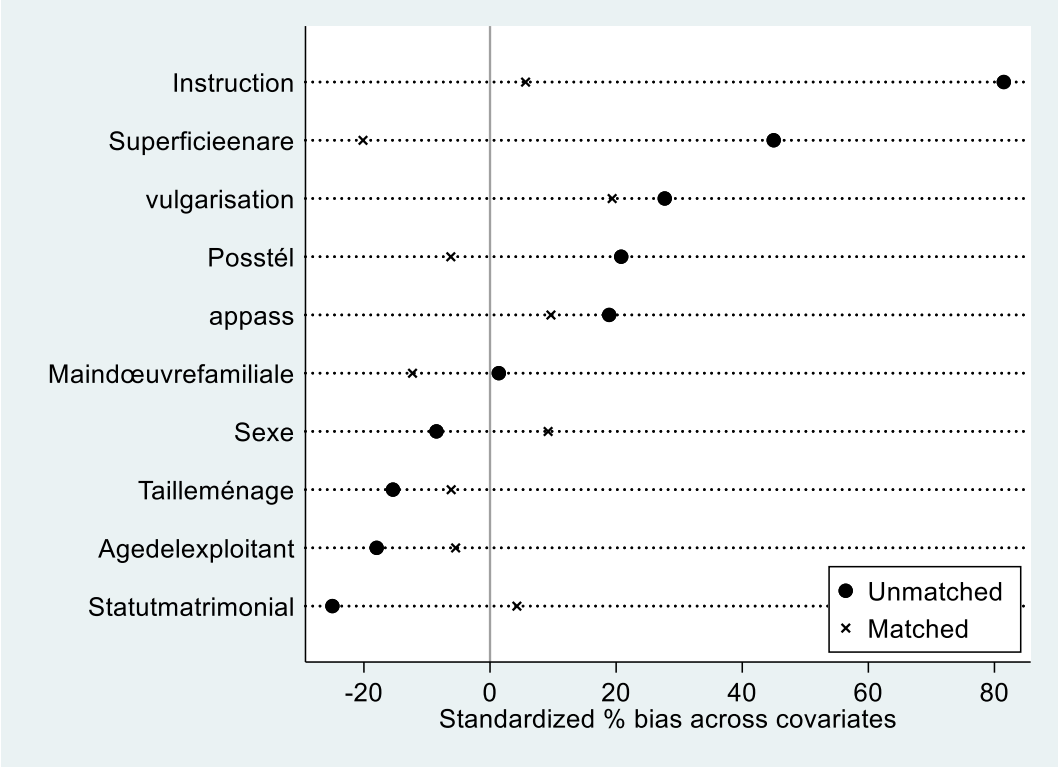
Source : Auteur

Les résultats trouvés ont montré qu'aucune différence significative n'est notée entre les moyennes des variables explicatives après appariement. Cela permet de dire que les groupes des adoptants et non adoptants sont comparables sur le plan des variables observables.

Ces différences significatives des moyennes des variables explicatives avant appariement, sont supposées être à la base de l'autosélection dans l'adoption.

La figure 13 illustre le biais standardisé après appariement le biochar. Il est représenté par les petits cercles avant appariement et par les petites croix après.

Figure 13 : Biais standardisé avant et après appariement



Source : Calculs de l'auteur

Note : « Unmatched » désigne l'échantillon des agriculteurs non appariés et « Matched » celui des agriculteurs appariés. Le biais standardisé est en abscisses.

Cette figure montre une importante réduction du biais standardisé après appariement. Avant appariement, sa valeur est la plupart du temps supérieure à 40% et va jusqu'aux environs de 80% pour des variables comme instruction, superficie en are, vulgarisation, possession de téléphone, Main d'œuvre familial et appartenance dans une association. Après l'appariement, les biais se sont concentrés auprès de zéro voire négatif. Également pour les variables sexe, Taille ménage, Age de l'exploitant et statutmatrimonial, les biais ont été réduits.

Même si les biais ont augmenté pour les variables âge, sexe et la taille du ménage, leur augmentation n'a pas d'effet important sur la moyenne des biais après appariement. Cela justifie les meilleurs résultats qui ont pu être obtenus sur cet échantillon.

Comme suggéré par Caliendo et Kopeing (2008), le tableau 9 présente d'autres critères d'évaluation de la qualité de l'appariement, en l'occurrence le test de maximum de vraisemblance, le pseudo-R2 et le biais moyen. Ainsi, le tableau ci-dessous présente le résume du contrôle de biais standardisés des variables indépendantes.

Tableau 12 : Contrôle de biais standardisés des variables indépendantes

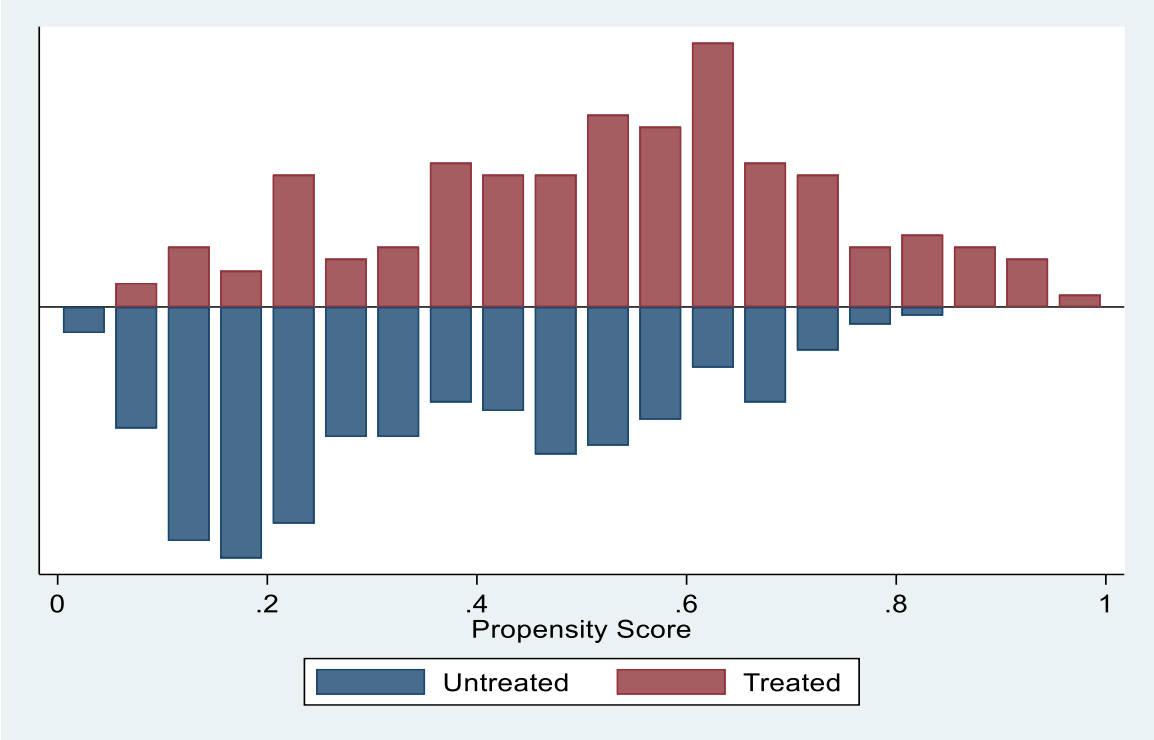
Echantillon	Ps R2	LR chi2	*p>chi2*	Moyenne des Biais
Non appariés	0.159	82.80	0.000***	19.8
Appariés(plus proche voisin)	0.023	10.14	0.428	7.7

*** significative à 1%(p<0.01) ; ** significative à 5%(P<0.05) ; *significative à 10%(P<0.1)

Source : Calculs de l'auteur à partir des données de l'enquête 2024.

Les résultats indiquent une bonne qualité de l'appariement des agriculteurs de la population enquêtée. En effet le pseudo-R2 est faible après appariement (2.3%) contre (15.9%) avant appariement. En outre, le biais moyen est aussi très réduit par rapport à l'échantillon des non appariés. La moyenne des biais après appariement est devenue 7.7% contre 19.8% avant appariement. De plus, le test du rapport de vraisemblance indique que l'hypothèse nulle de la signification conjointe de toutes les covariables pourrait être rejeté avant appariement p>chi2= 0.000. Inversement, après l'appariement, avec le même test, la signification conjointe de toutes les covariables n'a pas pu être rejetée p>chi2= 0.428. Ces résultats indiquent que la propriété d'équilibrage requise de la distribution des scores de propension est satisfaite. Le dernier critère à vérifier pour la qualité de l'appariement est la condition du support commun. Ce dernier est représenté par la figure ci-dessous :

Figure 14 : Distribution des scores de propension et support commun



Source : Compilation de l'auteur à partir des données de terrain, 2024

Note : « Untreated » fait référence aux non adoptants (le groupe contrôle) et « Treated » fait référence aux adoptants (groupe de traitement) qui sont dans le support commun. Les adoptants qui devraient être en dehors du support commun ne sont pas présents. Cela signifie que tous les adoptants ont eu des correspondants du groupe de contrôle ayant des caractéristiques identiques ou quasiment similaires avec lesquelles ils peuvent se comparer. Cela justifie une bonne qualité de l'appariement.

Les différents critères d'évaluation de la qualité de l'appariement ont été remplis par le modèle. En outre, le support commun est respecté. Tout cela permet donc de calculer l'Effet Moyen de Traitement sur les Traités (l'EMTT) et l'Effet Moyen de Traitement sur les non traités (EMTNT).

IV.1.5.2. Résultats de l'effet de l'adoption du biochar sur le rendement des agriculteurs

Le tableau 10 présente les résultats de l'estimation de l'effet moyen de traitement sur les rendements des agriculteurs. Ces résultats trouvés sont estimés à partir de la technique d'appariement du plus proche voisin avec remise.

Tableau 13 : Résultats d'estimation d'effet de l'adoption du biochar

Type algorithme	Variable	Effets sur les types de ménages agricoles	Adoptants	Non adoptants	Effet moyen de traitement	T-stat
Plus proche voisin	Rendement	Ménages des agriculteurs adoptants(EMTT)	1015.49kg/are	791.60kg/are	294.79kg/are	3.94
		Ménage des agriculteurs non adoptants(EMTNT)	1015.49kg/are	720.70kg/are	239.51kg/are	.

Source : Auteur à partir des données d'enquête, 2024

L'interprétation de ce tableau s'est faite en trois catégories :

Premièrement, la moyenne de rendement simulé pour les agriculteurs qui ont adopté le biochar est de 1015.49kg/are, tandis que ceux qui ne l'ont pas adoptée ont une moyenne de 720.70kg/are. Deuxièmement, les ménages adoptants s'ils décidaient de ne pas adopter cet amendement, leur rendement contrefactuel en haricot serait de 791.60kg/are, tandis que les agriculteurs non adoptants s'ils décidaient d'adopter, leur rendement contrefactuel en haricot serait de 1015.49kg/are. Troisièmement, l'effet moyen du traitement sur le rendement en haricot des adoptants correspond à 239.51kg/are et il est positif et significatif car son test (T-stat=3.94) est supérieur à 1.96 correspondant à l'intervalle de confiance de 95%. La décision d'adopter pour les agriculteurs non adoptants pourrait entrainer la moyenne de rendement de 294.79kg/are. Les résultats indiquent que le rendement des ménages qui ont adopté le biochar a relativement augmenté par rapport à ceux qui ne l'ont pas adoptée. Ce qui implique le rôle positif de l'adoption d'amender le sol par le biochar sur le rendement des agriculteurs de Gashikanwa.

IV.2. Discussion des résultats

Cette étude avait quatre objectifs spécifiques. Le premier était d'identifier les contraintes liées à l'adoption du Biochar. Le second était de déterminer les facteurs influençant l'adoption du biochar. Le troisième était de déterminer le taux d'adoption du biochar. Le dernier était d'évaluer l'effet de l'adoption du biochar sur la productivité du sol. Dans cette partie, les résultats trouvés de notre étude sont discutés pour chacun des objectifs.

IV.2.1. Contraintes liées à l'adoption du biochar

La cherté des foyers pyrolytiques améliorés a été identifiée comme la première contrainte liée à l'adoption du biochar. Les foyers pyrolytiques améliorés nécessitent un investissement initial important pour leur achat et leur installation. Cela est un obstacle pour les agriculteurs de la commune Gashikanwa où la majorité des ménages ont les ressources financières qui sont limitées. Bien que le biochar puisse offrir des bénéfices environnementaux et agronomiques à long terme (comme l'amélioration de la qualité du sol et la séquestration du carbone), les agriculteurs ont montré une réticence à investir dans l'achat des foyers pyrolytiques améliorés puis qu'ils sont chers. Le prix d'achat d'un foyer pyrolytique amélioré peut atteindre 80.000fbu. Cela est révélé par l'adoptant du biochar qui a bénéficié ce foyer auprès de STARTER S.R.L ; une entreprise qui a travaillé sur la production de biochar et la cuisson propre dans les zones rurales du Burundi de 2018 à 2022.

Les coûts associés à la formation et au développement des compétences représentent une contrainte supplémentaire car l'utilisation de foyers pyrolytiques améliorés nécessite une formation spécifique pour les agriculteurs de la zone d'étude.

Les agriculteurs ont été attirés par des solutions moins chères et plus accessibles comme utilisation des fumiers organiques et les engrais chimiques, même si celles-ci ne sont pas aussi efficaces que le biochar. Ces alternatives sont plus faciles à mettre en œuvre et moins coûteuses, du coup, elles découragent l'adoption des foyers pyrolytiques.

Techniques de production du biochar exigeantes constitue la deuxième contrainte qui a été remarquée parmi les réponses des enquêtés. La production de biochar repose sur la pyrolyse, un processus de décomposition thermique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Dans la commune Gashikanwa, l'absence de soutien technique et financier complique l'adoption de cette technologie.

Le manque des résidus agricoles tout au long de l'année vient en troisième position comme une contrainte à l'adoption du biochar. Comme le biochar est produit à partir de biomasse, souvent des résidus agricoles tels que les tiges de maïs, la paille de riz, ou les coques de noix. Ces résidus sont disponibles durant les récoltes seulement ; cela limite la production continue de biochar. Cette insuffisance rend difficile son adoption à grande échelle car les agriculteurs ne peuvent pas garantir un approvisionnement régulier en matières premières.

En dernière position vient le manque d'informations sur le biochar. Les agriculteurs de la zone d'étude ont mentionné pendant l'enquête qu'ils n'ont jamais entendu parler du biochar. Les autres nous ont fait connaitre qu'ils ne connaissent pas les avantages du biochar. Tout cela est dû à l'absence de formation sur la production et l'application correcte du biochar qui demandent des connaissances techniques notamment la pyrolyse et les méthodes d'application optimale dans les sols.

Ces résultats font conclure que la première hypothèse selon laquelle l'adoption du biochar n'a pas rencontré de contraintes a été infirmée.

IV.2.2. Taux de l'adoption du biochar

Les résultats de l'estimation du taux d'adoption du biochar montrent que le taux d'adoption potentiel de la population (ATE) est de 42,19%. Cela indique qu'un producteur pris au hasard dans la population a une probabilité de 42,19% d'adopter le biochar. Ce taux relativement faible s'explique par le manque d'informations sur les avantages du biochar, l'importance portée aux autres amendements ou encore par la perception des agriculteurs. En outre, le fait que tous les agriculteurs n'ont pas reçu la vulgarisation sur le biochar est une des causes du faible taux d'adoption.

Suivant ces résultats, la deuxième hypothèse selon laquelle le taux d'adoption du biochar est faible a été confirmée.

IV.2.3. Les facteurs de l'adoption du biochar

Les résultats trouvés ont montré que l'éducation du chef de ménage influence l'adoption du biochar positivement et significativement à 27,93%. Cela signifie qu'il est plus probable que ceux qui ont plus d'années d'études adoptent le biochar. Ce résultat est conforme aux attentes, car les agriculteurs plus scolarisés sont en mesure de comparer les différents amendements et de faire des choix plus précis.

Le niveau d'éducation influe sur la volonté d'un individu d'apprendre et d'utiliser de nouvelles méthodes et techniques, comme le soulignent Adeogun et al. (2010). Le niveau d'instruction accroît donc le sens de l'innovation, l'habileté et la facilité d'apprécier les nouvelles technologies (Dakin, 2008).

Les résultats trouvés montrent également que plus la superficie des agriculteurs augmente d'un are, la probabilité d'adopter le biochar augmente de 0, 48%. Cela signifie concrètement que les agriculteurs qui sont en mesure de mettre des terres agricoles supplémentaires dans la production agricole, sont plus susceptible d'essayer les pratiques des nouvelles technologies et de les adopter par la suite Onyeneke (2017). Cette conclusion est cohérente avec celle de Mustapha et al. (2012) qui ont indiqué que la possession des terres cultivables affecte de manière significative et positive la décision d'adopter des pratiques de production améliorées comme option d'adaptation au changement et à la variabilité climatique par les petits exploitants agricoles du nord du Ghana.

Ces résultats nous permettent de conclure que les agriculteurs possédant de grandes superficies de terres cultivables pourront être plus disposés à allouer une portion de leurs terres à la nouvelle technologie contrairement aux agriculteurs qui ont les terres de petites superficies.

Les résultats montrent également l'effet positif de la possession du téléphone portable sur la décision d'adoption d'une technologie contrairement à ceux qui ne possèdent pas les téléphones. Un résultat similaire a été trouvé par Afolami et al. (2015). Les résultats impliquent que les agriculteurs reçoivent les informations sur les avantages du biochar à travers la communication par téléphone mobile. Ça créerait une prise de conscience et augmenterait ainsi la probabilité d'adoption du biochar . Les résultats soulignent l'importance de l'information dans le processus d'adoption d'une technologie, suggérant que les technologies de l'information et de communication (TIC) sont parmi les principaux canaux de diffusion de la technologie. Dans la plupart des pays en développement, une forte proportion de ménages possède au moins un téléphone, qui est l'une des moyens les plus rapides pour communiquer des informations agricoles (Dimelu et Nwonu, 2012). Il est ainsi évident que les téléphones mobiles contribuent à l'adoption des amendements qui augmentent la productivité du sol avec protection de l'environnement.

De plus, les résultats montrent que par rapport aux agriculteurs qui ne sont pas regroupés en association, ceux qui appartiennent dans des associations ont une influence positive sur l'adoption du biochar.

Cela traduirait que les ménages dont leurs chefs appartenant dans une association des agriculteurs sont susceptibles d'adopter les amendements qui augmentent la productivité du sol.

Comme le montrent les résultats, l'adoption des nouvelles technologies est améliorée lorsque les agriculteurs sont regroupés en association. De plus, les agriculteurs apprennent les uns des autres. La participation dans une association, comme le soulignent Prasanna et al. (2004) ; Mbonimpa et Ndikubayo (2008), détermine l'adoption de la technologie et influence l'accessibilité des ressources agricoles. Cela nous permet de conclure qu'appartenir dans une association des agriculteurs joue un rôle capital dans l'acquisition des informations sur les amendements de haute valeur ajoutée.

Les résultats révèlent également que les agriculteurs ayant l'accès aux services de vulgarisation adoptent plus par rapport à ceux qui ne bénéficient pas ces services. Cela pourrait donc impliquer que les agriculteurs seraient plus disposés à adopter les pratiques de gestion du sol dans la zone d'étude, si le nombre de contacts de vulgarisation augmentait. De plus, Hussain (1999) a souligné que le nombre de visites de vulgarisation a un impact positif sur l'adoption et l'utilisation des technologies. Ces résultats nous conduisent à conclure que les agents de services de vulgarisation jouent un rôle important au Burundi dans l'adoption des technologies agricoles influençant l'adoption des amendements qui protègent les sols tout en augmentant la productivité. De plus, les agents de services de vulgarisation réduisent le problème d'asymétrie d'information que les agriculteurs rencontrent souvent.

Enfin, le sens de variation des déterminants de l'adoption d'une innovation introduite en milieu rural dépend donc du contexte de l'étude et des suppositions faites par l'auteur au cours de ses analyses. Outre, il faut remarquer que la plupart des résultats de cette étude corroborent ceux des travaux antérieurs effectués sur les déterminants de l'adoption des technologies agricoles. Donc, les résultats trouvés témoignent une influence des caractéristiques démographiques, socioéconomiques et institutionnelles sur la décision d'adopter le biochar.

D'où ces résultats confirment l'hypothèse trois selon laquelle l'adoption du biochar est influencée par les facteurs socioéconomiques et institutionnels des ménages agricoles.

IV.2.4. Effet de l'adoption du biochar sur la productivité du sol (utilisé dans le champ de haricot)

Les résultats de l'estimation montrent un effet positif et significatif de l'adoption du biochar sur le rendement du sol dans le champ de haricot considéré comme exemple. En effet, ils montrent que le rendement des agriculteurs qui ont décidé d'adopter le biochar a augmenté de 1015.49kg/are. Ils ont mis en exergue le rendement potentiel des agriculteurs qui ont adopté s'ils n'avaient pas adopté et le rendement potentiel des agriculteurs non adoptants s'ils avaient adopté.

Ces résultats montrent également que l'adoption du biochar aboutisse au rendement potentiel des adoptants comparativement aux non adoptants. Des résultats similaires ont été trouvés par Zegeye et al. (2022) dans leur étude sur l'impact de l'adoption d'une technologie agricole sur la productivité du blé (Wheat) en Ethopie.

Les résultats de notre étude nous permettent de conclure que la multiplication et la connaissance des amendements qui rendent le sol plus productive(biochar) dans la région joue un rôle indispensable dans l'augmentation des rendements en protégeant le sol des agriculteurs. Ce qui nous conduit à infirmer la quatrième hypothèse qui stipule que **l'adoption du biochar n'a pas d'effets sur la production**.

Conclusion du quatrième chapitre

Dans ce chapitre des résultats et discussions, l'analyse descriptive des variables utilisées dans cette étude a été faite. Les résultats économétriques du modèle logit ont montré que l'adoption du biochar a été influencée positivement et significativement par le niveau d'instruction du chef de ménage, la superficie, la possession de téléphone, l'appartenance aux associations ainsi que l'accès aux services de vulgarisation. Le taux d'adoption du biochar a été estimé à l'aide de la méthode ATE à 42,19%.

Les principales contraintes de l'adoption du biochar ont été classées suivant leur importance et sont ainsi la cherté des foyers pyrolytiques améliorés, techniques de production du biochar exigeantes, manque des résidus agricoles tout au long de l'année ainsi que manque d'informations sur le biochar.

Après les étapes de tests de la qualité d'appariement, la méthode d'appariement par score de propension a révélé un effet positif et significatif de l'adoption du biochar sur le rendement des agriculteurs.

CHAPITRE V. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La présente étude prouve une information importante sur les amendements du sol au Burundi. L'étude était concentrée sur le taux et les déterminants de l'adoption d'amender le sol par le biochar, les contraintes liées à l'adoption et l'effet de l'adoption dudit amendement sur la fertilité du sol. A base des résultats trouvés, des recommandations et des lacunes de l'étude ont été suggérés, ce qui pourrait constituer une contribution capitale au développement du secteur agricole au Burundi.

V.1. Conclusion générale

Au terme de cette analyse, nous concluons que l'effet de l'adoption des amendements qui rendent le sol plus productif tout en protégeant l'environnement est une stratégie essentielle pour augmenter le rendement des agriculteurs sur une longue période.

Ce travail avait pour objectif d'analyser l'effet l'adoption du biochar sur la productivité du sol. Il s'agissait de savoir si l'adoption du biochar a une influence sur la productivité du sol dans lequel est utilisé. A partir de l'objectif global, quatre objectifs spécifiques ont guidé l'étude. Le premier était d'identifier les contraintes liées à l'adoption du Biochar. Le second était de déterminer les facteurs influençant l'adoption de cette technologie pour les ménages et son taux d'adoption. Le troisième était de déterminer le taux d'adoption du biochar et le quatrième était d'évaluer les effets de l'adoption du biochar sur la productivité du sol.

Les données ont été recueillies auprès de 384 ménages cultivateurs de la commune Gashikanwa dont 161 adoptants et 223 non-adoptants. L'analyse empirique a suivi une approche méthodologique. A l'aide du modèle logit, l'étude a évalué les facteurs qui influent sur l'adoption du biochar dans la zone d'étude ainsi que les contraintes associées à l'adoption. Les tests de multicolinéalité ont montré que le modèle est globalement bon. De plus, afin d'estimer l'effet de l'adoption du biochar sur la production des agriculteurs, on a utilisé la méthode PSM par une régression moyenne de l'effet du traitement fondée sur les algorithmes d'appariement du plus proche voisin et les différents tests d'estimation ont été effectués. L'étude a également déterminé le taux d'adoption du biochar par la méthode de l'ATE et le Coefficient de concordance de Kendall a été utilisé pour déterminer les contraintes liées à l'adoption du biochar.

L'analyse des résultats à l'aide du logiciel STATA 15 a révélé que la cherté des foyers pyrolytiques améliorés, techniques de production du biochar exigeantes, manque des résidus agricoles tout au long de l'année ainsi que manque d'informations sur le biochar constituent les principales contraintes de l'adoption du biochar. Ainsi, l'hypothèse nulle selon laquelle **l'adoption du biochar n'a pas rencontré de contraintes** a été infirmée.

En outre les résultats montrent que le taux d'adoption est de 42,19% qui est un taux faible. Pour ce l'hypothèse selon laquelle **le taux d'adoption du biochar est faible** a été confirmée.

Les résultats du modèle logit montrent que l'adoption du biochar a été influencée positivement, entre autres, par le niveau d'instruction du chef de ménage, la superficie, la possession du téléphone, l'appartenance aux organisations paysannes ainsi que l'accès aux services de vulgarisations. Par conséquent, l'hypothèse nulle selon laquelle **l'adoption du biochar est influencée par les facteurs socio-économiques et institutionnelles des ménages agricoles** a été confirmée.

Les résultats de PSM par l'appariement du plus proche voisin montrent que l'adoption du biochar a eu un effet positif mais non significatif sur leur production. Les résultats de l'ATT révèlent que, comparativement aux non-adoptants, l'augmentation de la production moyenne des adoptants variait d'environ 294.79kg. Cependant cette augmentation a été statistiquement non significative au seuil de 5%. Cela conduit au rejet de l'hypothèse nulle qui stipule que l'adoption du biochar n'a pas d'effet sur la production a été infirmée.

V.2. Suggestions

Compte tenu des principales constatations et des conclusions ci-dessus, les suggestions suivantes sont formulées :

A l'Etat

- Organiser des campagnes nationales pour sensibiliser les agriculteurs aux avantages du biochar, notamment sur la fertilité des sols, la rétention d'eau, et la réduction des intrants chimiques ;
- Offrir des programmes de formation pour enseigner aux agriculteurs les meilleures méthodes de production, d'application et d'intégration du biochar dans leurs pratiques agricoles ;
- promouvoir l'adoption du biochar avec précaution puisque sa production présente plusieurs conséquences positives et négatives sur le plan environnemental, économique, et social ;

- Soutenir la recherche pour optimiser l'utilisation du biochar en fonction des types de sols et des cultures.

Aux organisations de développement

- Mettre en place des parcelles de démonstration dans les communautés rurales où le biochar est utilisé avec succès pour illustrer les avantages concrets et encourager les agriculteurs à l'adopter ;

- Faciliter des partenariats entre les agriculteurs, les coopératives, les entreprises privées et les centres de recherche afin de développer des chaînes de valeur autour du biochar.

Aux agriculteurs

- chercher à comprendre les avantages du biochar pour la fertilité des sols, la rétention d'eau, la réduction des intrants chimiques et la séquestration du carbone ;

- Tester à petite échelle **:** Avant d'adopter le biochar à grande échelle, les agriculteurs devraient commencer par expérimenter sur une petite parcelle pour voir comment il affecte la croissance des cultures et la santé des sols dans leur propre contexte.

- Utiliser le biochar en complément d'autres amendements puisqu'il agit comme un support pour les éléments nutritifs ;

Au monde scientifique

- De mener les recherches approfondies sur la production et l'usage de biochar dans les différentes régions du monde.

- De mener des études comparatives entre l'intérêt de l'adoption et le coût de la production du biochar.

- De mener les études locales qui peuvent démontrer les avantages pratiques, ce qui renforcerait la confiance des agriculteurs.

V.3. Domaines et limites de l'étude

Cette étude a évalué le taux d'adoption du biochar, les facteurs ayant influencé l'adoption et son effet. Cependant, pour l'évaluation de l'impact, l'étude n'a évalué que l'effet de l'adoption du biochar sur la production. Elle n'a pas analysé l'effet, sur les revenus, sur la nutrition, sur le coût de production de cet amendement et sur la sécurité alimentaire des ménages.

En outre compte tenu du temps et des moyens matériels et financiers, l'étude a concerné la seule commune Gashikanwa. Par ailleurs, l'étude a utilisé l'appariement par score de propension qui se concentre sur la sélection par des caractéristiques observables. Cependant, des caractéristiques inobservables, comme les préférences ou les motivations des individus, peuvent introduire un biais dans les résultats ; et l'utilisation du matching peut entrainer une estimation biaisée de l'effet.

Ainsi une étude d'effet complète, élargie et approfondie sur toutes les régions de diffusions du biochar serait nécessaire afin de tirer de conclusions plus générales et tenant compte de particularités des régions. Et une étude sur le coût de production du biochar serait importante.

De plus, bien que la méthode PSM réduise les biais de sélection, l'utilisation d'autres méthodes d'analyse qui tiennent en compte des caractéristiques inobservées ou encore la combinaison de deux ou plusieurs méthodes serait meilleur pour une étude d'effet.

Par conséquent, d'autres études sont recommandées pour fournir des preuves empiriques solides de l'adoption et d'utilisation du biochar dans la zone d'étude et dans le pays en général.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Biederman and Harpole, 2012; D. A. Laird, 2008
2. Douglas cheil (2021), Alida Bargués Tobella; Restauration des terres arides de l'Afrique
3. Irene CRISCUOLI 2016(Stabilité du charbon végétal (biochar) dans le sol et impact sur la productivité et les cycles des nutriments des prairies alpines)
4. GIEC (2000), L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie, OMM, PNUE.
5. Fischer G., Shah M., van Velthuizen H.T. (2002), Climate Change and Agricultural Vulnerability, United Nations, IIASA.
6. Fischer G. (2009), "World Food and Agriculture to 2030/2050 : How do climate change and bioenergy alter the long-term outlook for food, agriculture and resource availability ?", Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, Rome, FAO.
7. Nicolas Hulot, 2009 ; Le syndrome du Titanic
8. Yann Arthus-Bertrand, 1999 ; La Terre vue du Ciel
10. Adesina, A. et Zinnah, M. M. (1993). Technology characteristics, farmers' perceptions and adoption decisions: A Tobit model application in Sierra Leone. Agricultural Economics, 9(4), 297–311. doi:10.1016/0169-5150(93)90019-9.
11. Afolami, C. A., Obayelu, A. E. and Vaughan, I. I. 2015. Welfare Impact of Adoption of Improved Cassava Varieties by Rural Households in South Western Nigeria. Agric. Food Econ., 3: 18.
12. Agboh-Noameshie, A.R., Kinkingninhoun-Medagbe, F.M., Diagne, A., 2007. Gendered impact of NERICA adoption on farmers' production and income in central Benin. Paper presented at the meetings of the African Association of Agricultural Economists, Accra, August 20-22, 2007.
13. Amemiya, T. (1981). Qualitative Response Model: A survey. Journal of Economic Literature, 19, 481-536.
14. Anley, Y., Bogale, A. et Haile-Gabriel, A. (2007). Adoption decision and use intensity of soil and water conservation measures by smallholder subsistence farmers in Dedo district, western Ethiopia. Land Degradation & Development, 18, 289–302. doi:10.1002/ldr.
15. Asfaw, S., Shiferaw, B., Simtowe, F. and Lipper, L. (2012). Impact of Modern Agricultural Technologies on Smallholder Welfare: Evidence from Tanzania and Ethiopia. Food Pol., 37(3): 283–295.

16. Austin PC (2009) Balance diagnostics for comparing the distribution of baseline covariates between treatment groups in propensity-score matched samples. Stat Med 28(25):3083–107.
17. Autissier D. et Moutot. A. (2007). Méthode de conduite du changement, diagnostic accompagnement pilotage. Paris : Dunod. 240 p.
18. Azontondé R. (2004). Impact économique de l'adoption des pratiques de la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) au Sud-Bénin : Cas d'Aplahoué (commune de Klouekanme) et de Banigbé (commune d'Ifangni). Thèse d'ingénieur agronome, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey- Calavi, Bénin, p.154.
19. Baidu-Forson, J. (1999). Factors influencing adoption of land-enhancing technology in the Sahel: Lessons from a case study in Niger. Agricultural Economics, 20(3): 231 239. doi :10.1016/S0169-5150(99)00009-2.
20. Bamire AS, Fabiyi YL, Manyong VM. (2002). Adoption pattern of fertilizer technology among farmers in the ecological zones of South-Western Nigeria: A Tobit analysis. Austr J Agric Res. 2002; 53 :901–910.
21. Beintema.N,Magalhaes. E.C ; et Ndimurirwo. L., (2003). Indicateurs relatifs aux sciences et technologies agricoles.
22. Brian C, Ugustine S, Patrick W. (2011). Adoption of conservation Agriculture Technologies by small holder farmers in the Shamva District of Zimbabwe: A tobit Aplication. Ag Econ.2011.
23. Chirwa EW, 2005. Adoption of fertiliser and hybrid seeds by smallholder maize farmers in southern Malawi. Development Southern Africa 22(1):1–12.
24. Cunguara, B. et Darnhofer, I. (2011). Assessing the impact of improved agricultural technologies on household income in rural Mozambique. Food Policy, 36(3), 378–390.
25. Dakin L. 2008. Impact socio-économique des interventions du PDRT sur les femmes rurales du département de la Donga. Thèse d'ingénieur agronome, Faculté d'Agronomie Université de Parakou, Bénin, p.106.
26. Dehejia, R. H., &Wahba, S. (1998). Propensity scores matching methods for non experiemantal studies. Review of Economics and Statistics, 84(1), 151-161.
27. Delacour. H ; Servonnet A ; Perrot. A ; Vigezzi. J.F ; Ramirez.J.M (2005). La courbe ROC (receiver operating characteristic): principes et principales applications en biologie clinique. Laboratoire de biochimie, toxicologie cliniques, Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce, Paris.

28. Dimelu, M. U. and Nwonu, A. (2012). Paradigm Shift in the Agro-Technology Transfer System: Case Study of Agricultural Development Programme in Enugu State, Nigeria (2001 to 2009). J.Agric. Ext. Rur. Dev., 4(19): 495-503.
29. FEDER, G., et D.L. Umali. (1993). «The Adoption of Agricultural Innovations. » Technological Forecasting and Social Change 43.
30. Gomgnimbou A.P.K., Bandaogo A.A., Coulibaly K., Sanon A., Ouattara S. et Nacro H.B. (2019). Effets à court terme de l'application des fientes de volaille sur le rendement du maïs (Zea mays L.) et les caractéristiques chimiques d'un sol ferralitique dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 13 (4) : 2041-2052.
31. Groupe des nations unis pour le développement (2008). Note d'orientation complémentaire relative aux PNUAD : Théorie du changement.
32. Gueye. (2016). « Amélioration de techniques de semis, de fertilisation et de recolte de fonio blanc (Digitaria exilis stapf ; poaceae) au Sénégal oriantal et en Casamance (Sénégal) ».
33.Heckman, James. (1992). "Randomization and social program Evaluation.". In Manski, Charles, and Irwin Garfinkel, eds. Evaluating Welfare and Training programs. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1992, pp.201-30.
34. Hosmer D., Lemeshow S. (2000) Applied logistic regression, Second edition, John Wiley & Sons, Inc.
35. Imbens, G.W., & Wooldridge, J.M. (2009). Recent Development in the Econometrics of Program Evaluation. Journal of Economic Literature, 45(1), 5-86. doi=10.1257/jel.47.1.5.
36. Irz.X, Lin.L, Thirtle.C et Wiggins. S. (2001). Agricultural Productivity Growth and Poverty Alleviation.
37. Kebede Y, Gunjal K & Coffin G, (1990). Adoption of new technologies in Ethiopian agriculture: The case of Tegulet-Bulga District, Shoa province. Agricultural Economics, 4(1) :27–43.
38. Mcbride, W.D. et Daberkow, S.G. (2003). Information and the Adoption of Precision Farming Technologies. Journal of Agribusiness, 21(1), 21–38.
39. McFadden, D. (1975). The revealed preferences of government bureaucracy: Theory. The Bell Journal of Economics, 6(2), 401-416.
40. Mendola M. (2007). Agricultural technology adoption and poverty reduction: A propensity –score matching for rural Bangladesh. Food Policy, n° 32, pp. 372-393.

41. Monge M, Hartwich F, Halgin D, (2008). How change agents and social capital influence the adoption of innovations among small farmers. IFPRI Discussion paper 00761. Washington

42. Neji, S. et A. Jigorel (sd). (2015). régression logistique, consulté le 10 septembre 2015 sur http://www.ucs.inrs.ca/Cours/Neji

43. Pufahl, A. 1 and Weiss, C.R., (2008). Évaluation des effets des programmes agricoles : Résultats de l'appariement par score de propension.

44. Roussy, C., Ridier, A. et Chaib, K. (2015). « Adoption d'innovations par les agriculteurs : rôle des perceptions et des préférences ». Working Paper SMART LERECO N°15-03. https://www6.rennes. inra.fr/smart/content/download/.../WP15 03.pdf consulté le 21 octobre 2015.

45. Van Den Ban, A. W., Hawkins, H.S., Browvers, J.H.A.M., Bonn, C.A.M. (1994). La vulgarisation Rurale en Afrique. Paris, France : CTA/KARTHALA, 373 p.

46. Venkatesh, V., & Davis, F.D. (1996). A model of antecedents of perceived ease of use: Development and test. Decision Sciences, 27(3), 451-481.

47. Yokamo, S., 2020. Adoption of improved agricultural technologies in developing countries: Literature review. Int. J. Food Sci. Agric 4, 25-36.

48. Young H P, 2007. Innovation diffusion in heterogeneous populations: Contagion, social

49. Zomboudre (2017). Analyse des déterminants socio-économiques de l'adoption de l'activeur "compost plus" dans la boucle du mouhoun au burkinafaso.

50. European Biochar Foundation. (2019). Guidelines for a sustainable production of biochar. Retrieved from https://www.european-biochar.org/.

51. Tamrat, B., Raghavan, V., & Ramaswamy, H. (2017). Effects of biochar on soil properties and crop yield in Ethiopia. *Agriculture for Development*, 30, 15-20.

52. Arthur, R., Baidoo, M. F., & Antwi, E. (2015). Biochar: a sustainable approach to agricultural waste management in Ghana. *Journal of Environmental Management*, 161, 111-117.

ANNEXES

==========

Annexe 1 : Résultats détailles

1. Tests du modèle logistique

1.1. Test de multicolinearite

1.1.1. Analyse de la corrélation des variables explicatives du modèle

(obs=384)

	Sexe	Agedel~t	Statut~l	Instru~n	Taille~e	Maindœ~e	Superf~e	Posstél	appass	vulgar~n
Sexe	1.0000									
Agedelexpl~t	0.0968	1.0000								
Statutmatr~l	-0.1127	0.1772	1.0000							
Instruction	0.0401	-0.2733	-0.1847	1.0000						
Tailleménage	0.0082	0.3073	0.0803	-0.2293	1.0000					
Maindœuvre~e	0.0848	0.3663	-0.0586	-0.0742	0.5912	1.0000				
Superficie~e	0.0634	0.0115	-0.0755	0.3320	-0.1082	0.1068	1.0000			
Posstél	-0.0422	0.1940	-0.0010	-0.0487	0.0504	0.1424	0.0500	1.0000		
appass	-0.0005	-0.0280	-0.0333	-0.0881	-0.0053	-0.0570	-0.0865	0.0354	1.0000	
vulgarisat~n	-0.0486	-0.0665	-0.0990	0.0414	-0.0823	-0.0233	0.0394	0.1458	-0.0524	1.0000

1.1.2. Résultats du test de VIF

```
. estat vif
```

Variable	VIF	1/VIF
Maindœuvre~e	1.78	0.560887
Tailleménage	1.70	0.589385
Agedelexpl~t	1.34	0.743650
Instruction	1.28	0.779528
Superficie~e	1.18	0.844173
Statutmatr~l	1.11	0.901769
Posstél	1.09	0.920699
vulgarisat~n	1.05	0.952421
Sexe	1.04	0.959616
appass	1.03	0.975522
Mean VIF	1.26	

1.2. Test de Hosmer et Lemeshow

Logistic model for Adopt, goodness-of-fit test

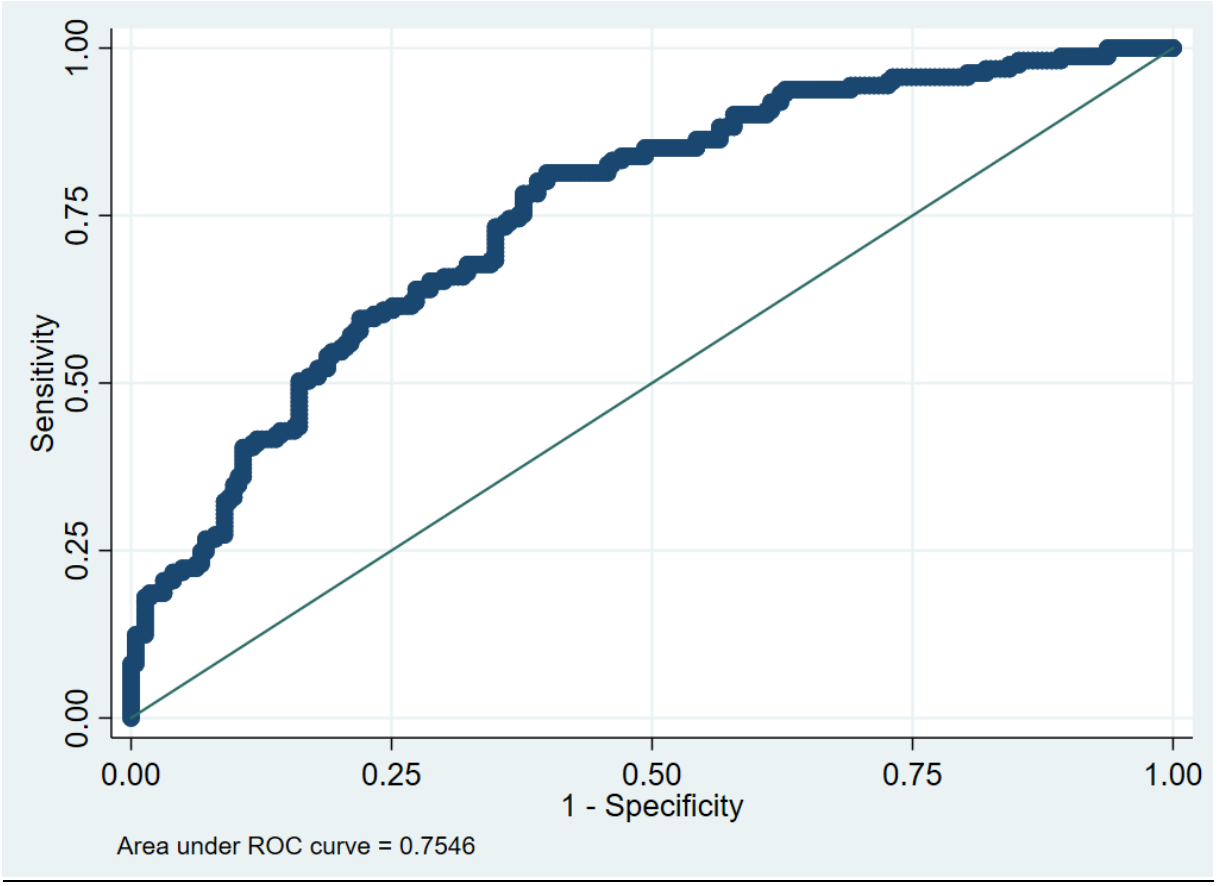
number of observations =	384
number of covariate patterns =	384
Pearson chi2(373) =	376.66
Prob > chi2 =	0.4373

==========

1.3. Test de bonnes prédictions du modèle avec la Surface ROC

```
Logistic model for Adopt

number of observations =       384
area under ROC curve   =    0.7546
```



==========

2. Les déterminants de l'adoption

2.1. Estimation des rapports de chance

Logistic regression — Number of obs = 384
LR chi2(10) = 82.34
Prob > chi2 = 0.0000
Log likelihood = -219.97339 — Pseudo R2 = 0.1576

Adopt	Coef.	Std. Err.	z	P>|z|	[95% Conf.	Interval]
Sexe	-.3208939	.2505017	-1.28	0.200	-.8118682	.1700805
Agedelexploitant	.0007468	.0125986	0.06	0.953	-.023946	.0254396
Statutmatrimonial	-.1474925	.1681752	-0.88	0.380	-.47711	.1821249
Instruction	1.432178	.2379381	6.02	0.000	.9658284	1.898528
Tailleménage	.0444654	.1163983	0.38	0.702	-.1836711	.2726019
Maindœuvrefamiliale	.0134743	.1702229	0.08	0.937	-.3201566	.3471051
Superficieenare	.0249859	.0115411	2.16	0.030	.0023658	.0476059
Posstél	.4068757	.2424193	1.68	0.093	-.0682575	.8820088
appass	.7548362	.2648198	2.85	0.004	.2357989	1.273873
vulgarisation	.5501408	.246004	2.24	0.025	.0679819	1.0323
_cons	-2.729724	.7635403	-3.58	0.000	-4.226236	-1.233213

2.2. Les effets marginaux

	Delta-method dy/dx	Std. Err.	z	P>|z|	[95% Conf.	Interval]
Sexe	-.0625865	.0484963	-1.29	0.197	-.1576374	.0324644
Agedelexploitant	.0001457	.0024572	0.06	0.953	-.0046703	.0049616
Statutmatrimonial	-.0287666	.0326944	-0.88	0.379	-.0928466	.0353133
Instruction	.2793292	.0379898	7.35	0.000	.2048705	.3537879
Tailleménage	.0086724	.0226898	0.38	0.702	-.0357988	.0531436
Maindœuvrefamiliale	.002628	.0331982	0.08	0.937	-.0624392	.0676952
Superficieenare	.0048732	.0022026	2.21	0.027	.0005561	.0091903
Posstél	.0793562	.0466308	1.70	0.089	-.0120386	.170751
appass	.1472217	.0497223	2.96	0.003	.0497677	.2446757
vulgarisation	.1072984	.0468923	2.29	0.022	.0153912	.1992055

Annexe 2 : Questionnaire d'enquête auprès agriculteurs GASHIKANWA

Questionnaire d'enquête

Bonjour !

Je m'appelle NDAYIZEYE Méthode, je suis l'étudiant en deuxième cycle de l'Université du Burundi dans la faculté des sciences économiques et de gestion. Je viens vers vous pour nous entretenir sur la façon dont vous amender vos sols surtout avec le biochar. Les informations que vous me donnerez serviront ensuite à approfondir la recherche sur les pratiques agricoles des paysans. Elles permettront aussi d'identifier vos besoins, et contraintes en matière des amendements afin de pouvoir les lever. Vous pourrez me parler en toute confiance car votre identité restera strictement confidentielle.

Merci de votre attention, nous pouvons maintenant commencer.

I. identification d'enquêteur

Nom et prénom de l'enquêteur : ……

Date d'enquête…/…/…24

Nom de l'enquêté : ……

II.SECTION A : Caractéristiques de l'exploitant

1.0. Caractéristiques socioéconomiques

1.1. Sexe :

1. Homme ☐ ; 2. Femme ☐

1.2. Age de l'exploitant (…)

1.3. Statut matrimonial : 1. célibataire ☐ ; 2. marié ☐ ,3. divorcé ☐

4. Veuf (ve) ☐

1.4. Quel est votre niveau d'étude?

1. Aucun niveau d'étude ☐ ; 2. Primaire ☐ ; 3. secondaire ☐ ;4. Universitaire ☐

1.5. Combien de personnes dans votre ménage (y compris le chef du ménage) ?

1. ☐

1.5.1. Quelles sont les personnes qui travaillent dans les exploitations agricoles dans votre ménage ?

1.6. Quelle est la superficie de votre champ agricole(are) ?

1. ☐

1.7. Avez-vous un téléphone portable ?

1. Oui ☐ ; 2. Non ☐

2.0. Caractéristiques institutionnelles

2.1. Appartenez-vous à une association(coopérative);

1. Oui ☐ ;2. Non ☐

2.2. Si la réponse à la question 2.1 est oui, que fait l'association(coopérative) pour vous ?

1. Approvisionnement des résidus agricoles ☐ ; 2. formation sur la production du biochar ☐

3.nous éduquer à valoriser les résidus agricoles en fabriquant les engrais biologiques ☐

2.3. Un agent de vulgarisation vous rend-t-il visite ?

1. Oui ☐ ; 2. Non ☐

2.3.1. Si oui, combien de fois l'agent de vulgarisation vous a-t-il rendu visite pendant la saison culturale précédente ? ☐

3. Pratiques agricoles

A) Quels types de cultures pratiquez-vous ?

1.Haricot, ☐ 2.Mais ☐ 3.manioc ☐

B) Quelles sont vos principales techniques de fertilisation?

1)engrais chimique ☐ ; 2) fumiers organiques ☐ ; 3) Chaulage ☐

4)biochar ☐

III. Section B : Adoption

1. Avez-vous adopté le biochar ?

1. OUI ☐ **2.NON** ☐

A) si oui Depuis combien de temps utilisez-vous le biochar ?

1.1ans ☐ 2. 2ans ☐ ; 3. 3ans ☐

B) Quelles sont vos sources d'approvisionnement en biochar ?

1.propre production ☐

2.achat ☐

C)Comment avez-vous été informé de l'existence du biochar ?

1. par radio ☐

2. par coopérative ☐

3. par agent de vulgarisation ☐

4.par ONG ☐

D) Quelles sont les raisons principales qui vous ont poussé à adopter le biochar ?

1. Accès facile ☐

2. Amélioration des rendements ☐

3. Réduction des coûts ☐

E) Quelles sont les raisons principales qui vous ont poussé à n'est pas adopter le biochar ?

1. accès difficile ; 2.pas d'amélioration des rendements ; 3. Réduction des couts

F) Comment appliquez-vous le biochar dans vos pratiques agricoles en quantité?

- Quantité ☐
- Méthode : ☐

1. Incorporation dans le sol ☐ ; 2. Epandage de surface ☐ **;** 3. Mélange dans l'eau d'irrigation ☐

- Fréquence ☐

IV. Section C : Impact de Biochar

C.5.Impact sur la production agricole

5.1. Quelle est la quantité de production dans votre champ de haricot ?

……

5.2. Avez-vous observé un changement de la qualité des sols après avoir commencé d'utiliser le biochar?

1. très fertilisant ;2. fertilisant ;3. peu fertilisant

5.3. Avez-vous remarqué des changements dans la rétention d'eau ou la fertilité du sol ?

1. Oui, 2.Non

C.6.Impact économique

1) Quelle est la quantité d'engrais chimique utilisez-vous avant l'adoption du biochar(en kg)?

…….. ;

2) Quelle est la quantité d'engrais chimique utilisez-vous après l'adoption du biochar(en kg)?

……

3) Estimez-vous que le biochar a contribué à la stabilité de vos revenus agricoles ?

1. Oui ☐ 2.Non ☐

4) Quel est votre revenu agricole? (fbu en mille)

……..

C.7.Impact social

A) Avez-vous observé une amélioration de votre niveau de vie grâce à l'augmentation de vos revenus ?

1. Accès à l'éducation ☐ , 2 .soins de santé ☐

B) L'adoption du biochar a-t-elle influencé les relations au sein de la communauté agricole ?

2. Partage de connaissances ☐, 2. coopération ☐

C) Y a-t-il eu des changements dans l'emploi ou la main-d'œuvre agricole sur votre exploitation suite à l'adoption du biochar ?

…….

C.8. Impact environnemental

- Avez-vous remarqué des changements dans la biodiversité locale ?

1. Plantes ☐ , 2. insectes ☐

- L'utilisation du biochar a-t-elle réduit l'utilisation d'engrais

  Chimiques ☐ Pesticides ☐

- Avez-vous constaté des impacts sur la qualité

  de l'eau ☐ ou l'érosion des sols ☐

V. Section D. Perceptions et défis

1. Contraintes qui agissent contre l'adoption de la technologie de production et utilisation du biochar.

Enumérez les contraintes qui limitent la production et l'utilisation du biochar

Les contraintes majeures de la production et l'utilisation du biochar	Rangez du plus grand au plus petit (selon le dégré d'exposition)
1. Manque d'informations sur le biochar 2. Techniques de production du biochar exigeantes 3. Manque des résidus agricoles tout au long de l'année 4. La cherté des foyers pyrolytiques améliorés	
NB : Encadrez le chiffre correspondant de la réponse	