



HAL
open science

Changement climatique au Mali: impact de la secheresse sur l'agriculture et stratégies d'adaptation

Christelle Flore Tchoupé Makougoum

► To cite this version:

Christelle Flore Tchoupé Makougoum. Changement climatique au Mali: impact de la secheresse sur l'agriculture et stratégies d'adaptation. Economies et finances. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2018. Français. NNT : 2018CLFAD011 . tel-02536502

HAL Id: tel-02536502

<https://theses.hal.science/tel-02536502v1>

Submitted on 8 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ÉCONOMIQUES,
JURIDIQUES, POLITIQUES ET DE GESTION**
Université Clermont Auvergne

Ecole Doctorale des Sciences Economiques, Juridiques, Politiques et de gestion
Centre d'Etudes et de Recherche sur le Développement International (CERDI)

Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France

**CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MALI : IMPACT DE LA
SÉCHERESSE SUR L'AGRICULTURE ET STRATÉGIES
D'ADAPTATION**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 21 novembre 2018
pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences Economiques

par

Christelle Flore TCHOUPÉ MAKOUGOUM

sous la direction de Catherine ARAUJO BONJEAN

Membres du Jury

Martine AUDIBERT, Directrice de Recherche, CNRS	Présidente du jury
Pam ZAHONOGO, Professeur à l'Université de Ouagadougou II	Rapporteur
Céline BIGNEBAT, Chargée de Recherche, INRA	Rapporteur
Catherine ARAUJO BONJEAN, Chargée de Recherche, CNRS	Directrice de thèse

L'université d'Auvergne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur.

« La question de la sécurité alimentaire est indissociable de la problématique du dérèglement climatique. »

Citation en septembre 2015 de S.E Ibrahim Boubacar Keita, Chef de l'Etat malien, et président en exercice du Comité permanent inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel (Cilss).

Remerciements – Acknowledgements

Cette thèse traite du changement climatique et voilà que durant ces dernières années, le climat n'a pas été toujours clément pour moi. Heureusement, j'ai eu la chance d'être entourée de personnes exceptionnelles qui m'ont permis d'être plus résiliente au changement de mon « micro climat ». Et je tiens ici à les remercier.

Tout d'abord, mes mots de reconnaissance vont à l'endroit de Catherine Araujo-Bonjean pour avoir accepté de diriger ma thèse. Je lui dois bien plus que je ne saurais exprimer ici. Elle a fait sienne mon initiation à la recherche, a été d'une disponibilité sans réserve et m'a guidée tout au long de l'élaboration de ce travail. L'encadrement que j'ai reçu, a allié rigueur et compréhension. Lors des moments où le doute semblait s'installer, elle m'a canalisée et mise sur les bons rails. J'imagine à quel point il ne lui a pas été facile de le faire. Madame, vous avez été la première personne à me faire confiance. En repensant à tout, je mesure combien votre confiance, votre encadrement et votre soutien ont été le socle de la réussite de mon travail et je ne l'oublierai jamais.

Je remercie Martine Audibert, Pam Zahonogo et Céline Bignebat, qui ont accepté de faire partie du jury de cette thèse. Je vous suis reconnaissante de m'avoir accordé tout le temps nécessaire à l'évaluation de ce travail. Je remercie aussi Catherine Simonet d'avoir accepté l'invitation du Jury.

Si faire une thèse de doctorat est un exercice laborieux, s'y engager sans financement est un défi encore plus pénible à relever. C'est conscient de cela que je tiens à remercier la Mairie de Clermont-Ferrand, l'Unité DIME de la Banque Mondiale, l'Université des Nations Unies (UNU-INRA), la Fondation pour les Etudes et Recherches sur le Développement International (FERDI) qui m'ont permis de financer mes travaux de recherche. Mes remerciements vont également à l'endroit de Michel Tenikué qui a permis à cette thèse de débiter en lui insufflant l'espoir d'un possible financement à travers le Luxembourg Institute of Socio-Economic Research (LISER). Je suis d'ailleurs reconnaissante au LISER d'avoir mis à ma disposition quasiment toutes les données agricoles utilisées dans cette thèse, malgré l'issue non favorable du financement espéré.

La liste des personnes à remercier est longue et je risquerais de me tromper en voulant les citer tous. Alors, à toutes les personnes que je ne vais pas pouvoir nommer ici et qui pourtant

m'ont soutenue et accompagnée durant ces années de thèse, je dis sincèrement merci et leur demande de me pardonner d'avoir résisté à la tentation de faire « une thèse entière de remerciements ».

Mon parcours académique est étroitement lié au CERDI qui m'a offert la formation et le cadre de travail adéquats, indispensables pour mes travaux de recherche. A cet effet, je remercie tout le personnel enseignant et administratif que j'ai côtoyé au CERDI. J'ai une pensée particulière pour Marie Huc Vialard, Johan Guiot, Chantal Brige-Ukpong, Annie Cuer, Caroline Bregegère. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Olivier Santoni qui m'a fourni les bases de données climatiques. Mes sincères remerciements à Martine Bouchut pour son assistance informatique constante et renouvelée. Merci à Éric Kéré et à Sébastien Marchand avec qui j'ai eu des échanges fructueux. Ma thèse, c'est aussi une formidable aventure humaine avec l'ensemble des doctorants. Parmi eux : Ababacar, Aliou, Alioun, Clément, Eric, Hervé, Laurene, Maria, Melaine, Pierre, Sékou. A eux et à tous les doctorants du Labo, je dis merci pour les nombreux moments mémorables.

Mes années de thèse auraient été moins agréables si mon chemin n'avait croisé ceux d'autres personnes exceptionnelles. Je pense aux familles de Jacques Verdier, Charlie Happi Kouamako, Augustine Makana, Dragbo Alassane, Adama Kaboré avec qui j'ai passé des moments de pur bonheur et qui ont très souvent été d'une aide importante et incommensurable. Je ne saurai oublier de dire merci à Linda, qui a été présente sous mon ciel pendant les beaux temps mais aussi pendant les pluies et les canicules. A mon inconditionnelle amie Carine, je dis sincèrement merci pour le soutien multiforme. Le temps n'a pas eu raison de l'amitié nouée depuis ma tendre enfance avec Carelle, Jacques, Josiane T., Fabiola, Stéphanie ; je leur dis merci pour le réconfort moral et les encouragements. Je dis merci à Josiane D., Phanie, Diouf, Brenda et à Christine pour leur assistance. Merci à Meyou Pascal, mon oncle, qui m'a soutenu pour ma formation en statistique, me permettant ainsi d'acquérir les prérequis importants pour la suite de mes études.

Au cours de cette aventure, le soutien de ma famille a été capital. Je tiens à remercier ma mère, Kouekem Louise, pour toute une vie d'amour et de sacrifice. Merci à mes frères Guy, Fabrice et Rostand qui m'ont toujours accordé l'amour, le soutien moral et les encouragements très importants dans les moments de doute et de découragement. Merci à ma sœur Josiane. Joo, ton amour, ta bienveillance, ton aide et notre complicité furent source de

réconfort et de stimulation. J'ai une pensée très particulière pour mon père Tchoupé Félix et mon frère aîné, Tchoupé William, malheureusement trop tôt partis.

A ma belle-famille, les Tokam et en particulier au père Tokam Philippe, je dis merci pour l'affection et les encouragements. Merci à eux d'avoir fait de moi l'une des leurs.

Merci à Christian Raould, un vrai rayon de soleil. En plus de tout ce que toi-même tu sais, tu m'as permis de faire face aux orages et aux vents contraires. Merci à nos deux merveilleux arcs-en-ciel : Chris-Alexandra et Chris-William. Quelquefois, en éprouvant mon statut de mère, vous avez servi à tester ma robustesse face à cette thèse qui devenait interminable. Je ne m'en plains pas, vous étiez dans votre rôle. Et puis, quelle que soit la spécification du modèle de ma vie, vous êtes significatifs et la corrélation avec mon bien-être est positive. Chris-Alexandra soit rassurée, « les devoirs à rendre à ma maîtresse », c'est fini. Je pense que l'avenir nous apportera sûrement, à tous les quatre, les joies que ma thèse a ravies!!!

Résumé de la thèse

Le Mali est un pays de l'Afrique de l'Ouest où l'agriculture est essentiellement pluviale et, par conséquent, largement tributaire des conditions climatiques. Cette forte dépendance de l'agriculture à l'égard du climat en fait *de facto* un champ d'investigation privilégié et ce, d'autant plus que l'agriculture est le socle sur lequel repose l'économie du Mali. En alliant travaux empiriques et théoriques, cette thèse se propose de contribuer à une meilleure compréhension de l'incidence du changement climatique sur l'agriculture et les pratiques agricoles permettant de s'y adapter. Le premier chapitre examine les manifestations du changement climatique et leurs impacts sur l'agriculture. Les résultats indiquent que le changement climatique a globalement un effet négatif sur la production agricole et particulièrement sur les rendements céréaliers. Cette première analyse au niveau de la production est ensuite complétée par une analyse qui se focalise sur le comportement du producteur. Le deuxième chapitre s'intéresse aux performances managériales des agriculteurs. Il ressort de cette étude qu'en partie, l'inefficience des agriculteurs est effectivement due au changement climatique bien que cette inefficience climatique soit marginale comparée à l'inefficience technique. Par la suite, nous menons une réflexion sur la façon de garantir le maintien ou l'augmentation de la production agricole dans un contexte de changement climatique. A cet effet, le troisième chapitre identifie les déterminants de l'adaptation au changement climatique. L'intérêt est porté sur les pratiques agricoles d'adaptation qui préservent l'environnement. Il ressort de l'analyse que les caractéristiques sociodémographiques des ménages agricoles, les caractéristiques biophysiques des parcelles et la survenue d'épisode de sécheresse influent sur l'adoption des stratégies d'adaptation. Enfin, le quatrième chapitre étudie les facteurs de la mécanisation des exploitations agricoles. Les résultats relèvent que l'intensité de la mécanisation agricole augmente avec la taille des exploitations et diminue avec l'accroissement de l'effectif en main-d'œuvre familiale. Par ailleurs, la sécheresse réduit les chances de l'agriculteur de mécaniser les exploitations agricoles.

Mots clés : changement climatique, sécheresse, adaptation, mécanisation, Mali, Stochastic Frontier Analysis, Logit multinomial, model de Heckman.

Summary of the thesis

Mali is a West African country where agriculture is mainly rain-fed, therefore essentially dependent on climatic conditions. This strong dependence between agriculture and climate makes it an interesting field of investigation, and especially with agriculture being the mainstay of Mali's economy. Relying on empirical and theoretical methods, this thesis aims to contribute to a better understanding of the impact of climate change on agricultural production and on farmers' practices that make it possible to adapt to climate change. The first chapter of this thesis focused on the manifestations of climate change and their impacts on agriculture. The results indicate that, overall, climate change has a damaging effect on agricultural production and particularly on cereal yields. After this analysis at the production level, we turned to the analysis of producer's behavior. Hence, the second chapter focuses on the managerial performance of farmers. We found that a part of the farmers' inefficiency is due to climate change. The results also revealed that even though there is inefficiency due to climate, it is low compared to technical inefficiency of the farmer. Subsequently, we concentrated on how to maintain or increase agricultural production in a context of climate change. For this purpose, the third chapter identifies the determinants of adaptation to climate change. We focused on agricultural adaptation practices that preserve the environment. The analysis demonstrated that the socio-demographic characteristics of farm households, the biophysical characteristics of plots and the occurrence of a drought influence the adoption of adaptation strategies. Finally, the fourth chapter studies the determinants of farm mechanization. The results suggest that drought reduces the odds of farm mechanization. We also found that the intensity of farm mechanization increases with increase of farm size and decreases with the increase of family workforce.

Key words: climate change, drought, adaptation, mechanization, Mali, Stochastic Frontier Analysis, Multinomial Logit, Heckman model.

Sommaire

<i>Résumé de la thèse</i> -----	VII
<i>Summary of the thesis</i> -----	VIII
<i>Introduction générale</i> -----	1
<i>Chapitre 1 : Changements climatiques et production agricole au Mali</i> -----	25
<i>Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models</i> -----	57
<i>Chapitre 3: Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables.</i> -----	89
<i>Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?</i> -----	121
<i>Conclusion générale et Perspectives</i> -----	159
<i>Table des matières</i> -----	XVI

Liste des figures

Introduction générale	1
<i>Figure i. 1: Changement climatique et agriculture en Afrique subsaharienne</i>	4
<i>Figure i. 2: Contributions au changement de la température observé en surface entre 1951 et 2010</i>	7
<i>Figure i. 3 : Sévérité de la sécheresse selon le scénario A2 du GIEC (changement de 2000 à 2090)</i>	13
<i>Figure i. 4: incidences probables associées à l'occurrence de sécheresse</i>	15
<i>Figure i. 5 : Calendrier saisonnier (campagne agricole 2004/2005)</i>	170
Chapitre 1 : Changements climatiques et production agricole au Mali	25
<i>Figure 1. 1 : Principaux unités agro écologiques du Mali</i>	28
<i>Figure 1. 2 : Manifestation de la sécheresse au Mali : diminution de la pluviométrie et déplacement des isohyètes vers le Sud dans la localité de Sikasso entre 1960 et 2100</i>	29
<i>Figure 1. 3: Evolution de la valeur ajoutée agricole, en pourcentage du PIB, de 1967 à 2015</i>	30
<i>Figure 1. 4 : Evolution des productions, des superficies et des rendements de céréales au Mali</i>	32
<i>Figure 1. 5: Production annuelles moyenne de céréales dans les régions du Mali</i>	33
<i>Figure 1. 6: Production annuelle moyenne par type de céréales (sur la période 2011 à 2016)</i>	34
<i>Figure 1. 7: Production annuelle moyenne par type de céréales et par région (sur la période 2011 /2016)</i>	34
<i>Figure 1. 8 : les types de sécheresse</i>	37
<i>Figure 1. 9 : Etat de la sécheresse dans les régions du Mali en 1983</i>	48
<i>Figure 1. 10: la sécheresse au Mali en 1999 et en 2010</i>	49
<i>Figure 1. 11: corrélation entre la production de céréales</i>	50
<i>Figure 1. 12: Evolution des températures, des précipitations et occurrence des sécheresses au Mali sur la période 1970 à 2012</i>	51
<i>Figure 1. 13: Evolution de l'évapotranspiration potentielle au Mali sur la période 1970 à 2012</i>	52
Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models	57
<i>Figure 2. 1: the frontier production function and efficiency</i>	61
<i>Figure2. 2: precipitation shocks among Mali districts in 2001 using two differents indicators. Note : shock_pre_01 : absolute deviation of the average yearly precipitation from it's own trend. sd_shock_tmp_01 : standard deviation of precipitations serie. source : CRU TS3 data and author's construction.</i>	86
<i>Figure2. 3: temperature shocks among Mali districts in 2001 using two differents indicators. Note : shock_tmp_01 : absolute deviation of the average yearly temperature from its own trend. sd_shock_tmp_01 : standard deviation of temperature serie. source : CRU TS3 data and author's construction.</i>	86
Chapitre 3: Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables.	89
<i>Figure 3. 1: Carte de vulnérabilité à la sècheresse du Mali</i>	92
<i>Figure 3. 2: En presence de sécheresse</i>	106
<i>Figure 3. 3: En l'absence de sécheresse</i>	106

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter? ----- 121

Figure 4. 1: Conceptual framework showing the links between drought and the use of machines ----- 125
Figure 4. 2: Adopters and non-adopters of farm mechanization ----- 139
Figure 4. 3: Percent of adopters of farm mechanization by region----- 140
Figure 4. 4: 6-month SPEI index among adopters and non-adopters of farm mechanization (Decision to adopt according to occurrence of drought) ----- 141

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Changements climatiques et production agricole au Mali-----25

<i>Table 1. 1: Classement des événements de risque par caractéristiques et impacts -----</i>	<i>35</i>
<i>Table 1. 2: Classification de l'indice PSDI d'après Palmer -----</i>	<i>39</i>
<i>Table 1. 3: Classification de l'indice SPI d'après McKee et al. -----</i>	<i>40</i>
<i>Table 1. 4: Présentation des différents indices de sécheresse -----</i>	<i>42</i>
<i>Table 1. 5: Statistiques régionales sur la sécheresse (valeur du SPEI) -----</i>	<i>47</i>
<i>Table 1. 6: Corrélation entre la production et les variables climatiques -----</i>	<i>50</i>

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models-----57

<i>Table 2. 1: The most widely used methodologies to measure TE -----</i>	<i>63</i>
<i>Table 2. 2: summary statistics of the sample of 788 plots studied -----</i>	<i>74</i>
<i>Table 2. 3: Estimated parameter of the production frontier-----</i>	<i>75</i>
<i>Table 2. 4: results of tests on the specification of stochastic frontier-----</i>	<i>78</i>
<i>Table 2. 5: Gross TE, Net TE and climate change inefficiency among Malian farmers -----</i>	<i>79</i>
<i>Table 2. 6: Distribution of Gross TE and Net TE -----</i>	<i>80</i>
<i>Table 2. 7: correlation coefficient between the cereals production and different variants of efficiency-----</i>	<i>81</i>
<i>Table 2. 8: Cereals prices surveyed on Malian's markets. -----</i>	<i>87</i>
<i>Table 2. 9: Descriptive statistics of rainfall and temperature in the regional level (year 2001) -----</i>	<i>87</i>

Chapitre 3: Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables. -----89

<i>Table 3. 1: Conditions hydro-climatiques selon les différents seuils de l'indice SPEI -----</i>	<i>99</i>
<i>Table 3. 2: Distribution des agriculteurs selon la stratégie d'adaptation aux changements climatiques -----</i>	<i>102</i>
<i>Table 3. 3: Définition des variables-----</i>	<i>103</i>
<i>Table 3. 4: Statistiques descriptives des variables explicatives continues-----</i>	<i>104</i>
<i>Table 3. 5: Statistiques descriptives des variables explicatives discrètes (n=6516 agriculteurs)-----</i>	<i>104</i>
<i>Table 3. 6: Effets marginaux des variables explicatives de l'adaptation des agriculteurs aux changements climatiques (estimation du Modèle Logit Multinomial) -----</i>	<i>107</i>
<i>Table 3. 7: Facteurs d'inflation de la variance -----</i>	<i>119</i>
<i>Table 3. 8: Paramètres des variables explicatives de l'adaptation au changement climatique (élasticités issues de l'estimation du modèle Logit Multinomial) -----</i>	<i>120</i>

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter? ----- 121

<i>Table 4. 1: Test for the appropriate model to be used (statistics from regression of adoption and intensity of farm mechanization) ⁺⁺⁺ -----</i>	<i>128</i>
--	------------

<i>Table 4. 2: Description of variables used in the regression model and expected signs</i> -----	138
<i>Table 4. 3: Descriptive statistics of Dichotomous variables</i> -----	142
<i>Table 4. 4: Descriptive statistics of continuous variables</i> -----	142
<i>Table 4. 5: Adoption and intensity of adoption of farm mechanization</i> -----	147
<i>Table 4. 6: OLS estimation of the intensity of farm mechanization</i> -----	156
<i>Table 4. 7: Double hurdle model</i> -----	157

Acronymes et abréviations

CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COP21	21th Conference of the Parties
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ONU	Organisation des Nations Unies
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
ONGs	Organisations non gouvernementales
PAM	Programme alimentaire mondial
PIB	Produit Intérieur Brut
PNCC	Plan National sur le Changement Climatique

Introduction générale

1. Contexte général de la thèse

L'un des événements marquants de cette dernière décennie est la vingt-et-unième Conférence des Parties de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique tenue à Paris en 2015. Au terme de cette conférence, les pays signataires de l'accord sur le climat ont adopté l'objectif de limiter le réchauffement climatique "bien en dessous de + 2 °C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle "et de" poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1,5°C ".

Cet événement historique a contribué à raviver l'intérêt de la communauté internationale pour les enjeux liés au changement climatique. Les sujets tels que l'impact, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique sont, plus que par le passé, sur le devant de la scène médiatique. Ces sujets alimentent les débats politiques et scientifiques, faisant l'objet de nombreuses recherches et investigations dont les résultats ne sont pas pour rassurer la communauté internationale. En effet, à l'instar de nombreuses contributions scientifiques, le rapport du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Changement climatique (IPCC, 2014), indique qu'à l'échelle globale, le changement climatique est néfaste pour la planète entière et particulièrement rude pour les régions vulnérables telles que l'Afrique subsaharienne. D'après la littérature, l'une des raisons principales de la vulnérabilité au changement climatique observée dans les pays de l'Afrique subsaharienne est la forte dépendance de leur économie à une agriculture essentiellement pluviale (Lobell et al. 2010, Mendelsohn et al. 2008, Deschênes et al. 2007 ; Mohamed et al. 2002 ; Rosenzweig et Parry, 1994). Dans ces pays, l'effet du changement climatique sur le secteur agricole se ressent directement sur l'économie, étant donné que, en moyenne, l'agriculture contribue à hauteur de 20 à 30% du PIB et représente 55% de la valeur totale des exportations (FAO, 2016). A travers l'impact sur l'agriculture, le changement climatique est aussi dommageable pour la sécurité alimentaire comme le prouve un grand nombre d'études (Di Falco et al. (2011) ; Butt et al. (2005)). Ce résultat est réaffirmé dans le rapport 2017 de la FAO qui indique qu'en Afrique subsaharienne, le changement climatique est l'une des causes principales de la prévalence de la sous-alimentation dont le taux était de 22,7 pour cent en 2016.

Cet état des lieux succinct pose un certain nombre de constats, notamment le fait que le changement climatique entretient la sous-alimentation en Afrique subsaharienne et le constat

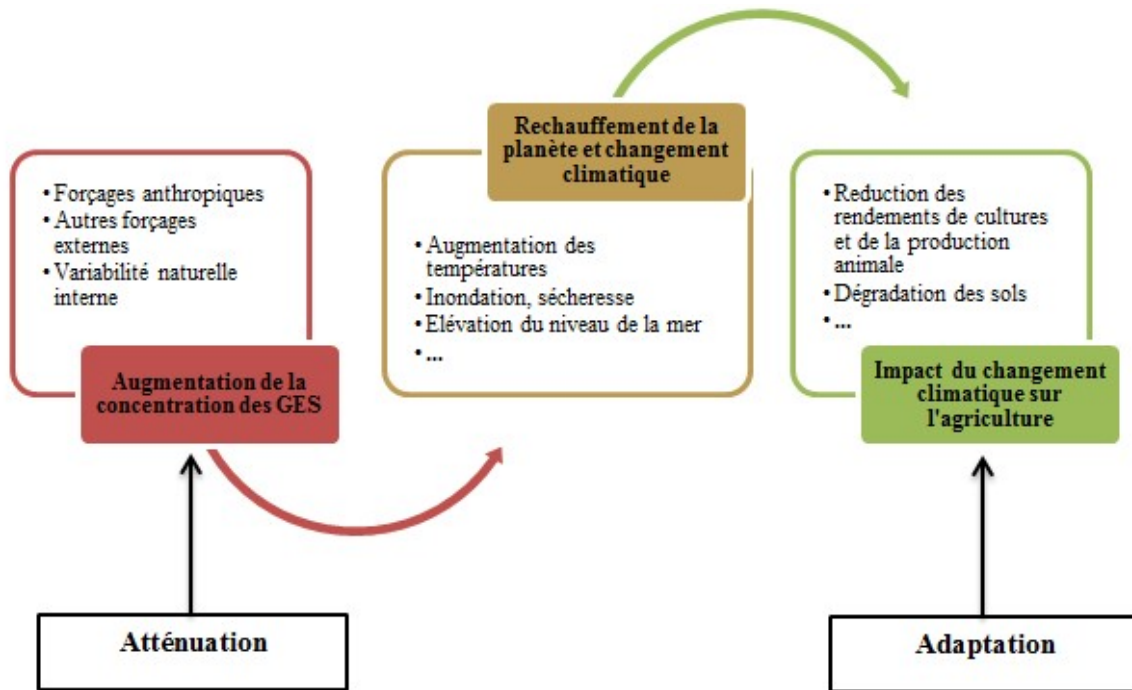
selon lequel garantir la disponibilité en nourriture est un enjeu majeur dans cette partie du monde.

Au regard de ces constats, il apparaît pertinent de s'intéresser à la relation entre la production agricole et le changement climatique dans les pays de l'Afrique subsaharienne. L'idée étant de contribuer à une meilleure compréhension de la relation complexe et multidimensionnelle entre l'évolution du climat et l'agriculture. C'est ce à quoi nous nous employons dans cette thèse qui s'inscrit dans la suite des travaux préexistants en économie agricole.

2. Cadre théorique et conceptuel de la thèse

Les études sur le changement climatique en Afrique subsaharienne présentent un certain nombre de résultats communs : (i) le climat change (IPCC, 2014), (ii) le changement climatique impacte négativement divers secteurs, en particulier celui agricole (Mendelsohn (2008); Blanc (2012), Mohamed et al., 2002 ; Rosenzweig et Parry, 1994). Une autre évidence qui fait consensus dans la littérature est qu'en Afrique subsaharienne l'atténuation et l'adaptation au changement climatique sont des solutions (Di Falco et al., 2011). Ces preuves qui découlent de la littérature font référence à des notions clés notamment : le climat, le changement climatique, la vulnérabilité et la résilience au changement climatique, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. La figure i.1 présente un cadre conceptuel qui décrit les liens entre ces différentes notions. Il apparaît donc pertinent de préciser les définitions des notions clés autour du changement.

Figure i. 1: Changement climatique et agriculture en Afrique subsaharienne



Source : Auteur à partir de la littérature préexistante

3. Définition¹ de mots ou expression clés (climat, changement climatique, adaptation, atténuation)

3.1. Le climat

Le glossaire publié dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001 a) définit le climat, au sens étroit du terme, comme le « temps moyen » ou plus précisément une description statistique en termes de moyenne et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes allant de quelques mois à des milliers ou des millions d'années. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) suggère que la période type pour le calcul du climat soit de 30 ans. Les quantités pertinentes du climat sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Au sens large du terme, le climat se définit

¹ La plupart des définitions dans cette partie sont issues du glossaire publié dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001 a, b, c).

comme l'état du système climatique, y compris une description statistique de celui-ci. Le climat ne doit pas être confondu au « temps » qui est, non pas un état de moyenne, mais plutôt une situation météorologique à un moment précis. Schlenker et al. (2006) ont souligné que la principale différence entre les deux notions est l'échelle temporelle. Il existe une multitude de types de climat, tels le climat tropical, le climat tempéré et le climat équatorial.

Le climat peut être considéré comme un intrant direct dans la fonction de production agricole (Fried et al., 2002). Cependant, contrairement à d'autres intrants tels que la main-d'œuvre et la quantité d'engrais, l'agriculteur ne peut contrôler le climat qui entre dans sa fonction de production. La principale raison étant que le climat change. Ce qui amène à se demander ce qu'est le changement climatique.

3.2. Le changement climatique

Le changement climatique désigne une variation de l'état du climat qui peut être identifiée (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des changements affectant la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, persistant pendant de longues périodes, généralement des décennies ou plus (GIEC, 2001). Le changement climatique peut être la conséquence (i) de processus naturels internes ou (ii) de forçages externes tels que les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des terres. Le changement climatique est souvent désigné par l'expression « variabilité climatique »², ce qui conduit à distinguer les variations de faible amplitude et les variations de forte amplitude (extrêmes climatiques) comme les inondations et les sécheresses. La définition du changement climatique présentée par la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) est légèrement différente de celle du GIEC. En effet, la CCNUCC, dans sa définition, insiste sur les causes du problème en ces termes : le changement climatique est l'ensemble « des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». Cette définition établit une distinction explicite entre le changement climatique qui peut être attribué aux activités

² Dans cette thèse, nous emploierons indifféremment les expressions « changement climatique » et « variabilité climatique »

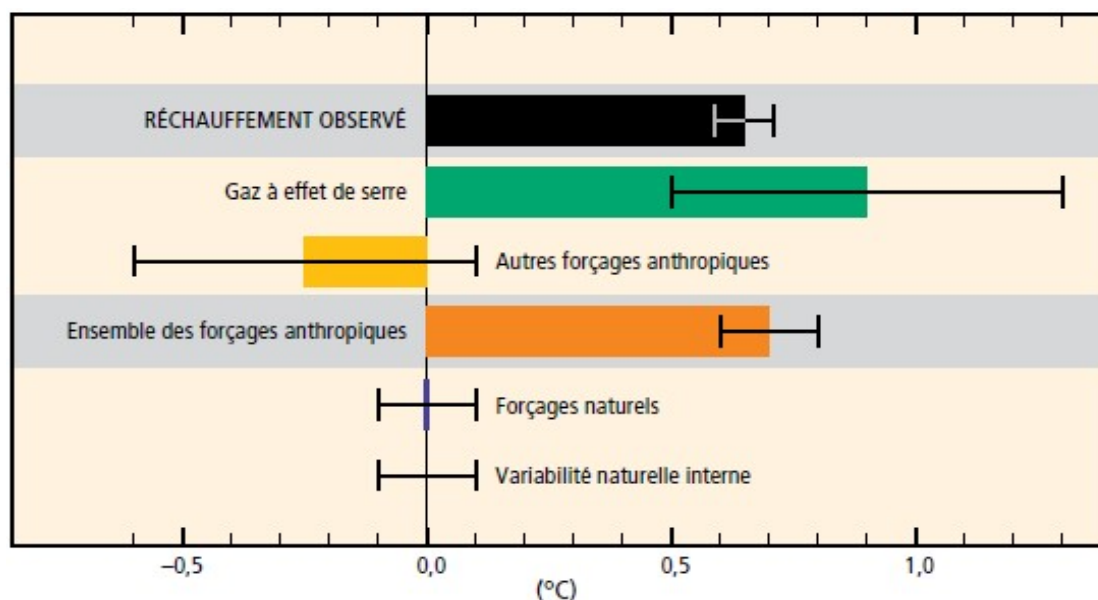
humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la variabilité climatique due à des causes naturelles.

3.3. Cause du changement climatique : quelle est la part de responsabilité de l'Homme?

Les définitions du changement climatique soulignent que les causes sont les processus naturels internes et les forçages externes tels que les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des terres. Il est largement noté dans la littérature que parmi toutes ces causes, l'action de l'homme sur le système climatique participe le plus au changement climatique à travers les émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui sont de plus en plus élevées.

Selon le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5, IPCC 2014), les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) que sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), ont fortement augmenté depuis l'ère préindustrielle induisant par la même occasion l'augmentation des températures mondiales et le changement climatique. Le total mondial des émissions anthropiques de GES a continué d'augmenter entre 1970 et 2010, avec une hausse en valeur absolue plus marquée entre 2000 et 2010. Les émissions anthropiques annuelles de GES ont atteint 49 (± 4,5) Gt_{eq}CO₂³ en 2010. Le GIEC relève que les croissances économique et démographique expliquent ces chiffres élevés. Ces deux facteurs continuent d'être les moteurs les plus importants de l'augmentation des émissions de CO₂ dues à l'utilisation des combustibles fossiles. Les émissions de CO₂ imputables à l'usage de combustibles fossiles et aux procédés industriels ont contribué dans une proportion de 78% à l'accroissement du total mondial des émissions de GES entre 1970 et 2010. Selon ce rapport, il est extrêmement probable que l'Homme ait été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XXe siècle. Cette hypothèse est soutenue par les preuves apportées sur la Figure i.2 sur laquelle on voit les contributions au changement de la température observé en surface entre 1951 et 2010.

Figure i. 2: Contributions au changement de la température observé en surface entre 1951 et 2010



Note : Estimations de la plage probable (segments horizontaux) et médianes correspondantes (barres) pour les tendances du réchauffement sur la période 1951–2010 dû aux gaz à effet de serre au mélange homogène, à d'autres forçages anthropiques (y compris l'effet refroidissant des aérosols et celui du changement d'affectation des terres), à l'ensemble des forçages anthropiques, aux forçages naturels et à la variabilité naturelle interne (qui correspond à la partie de la variabilité du climat qui se produit spontanément au sein du système climatique, même en l'absence de forçage). Ce graphique est une reproduction de la Figure R.ID 3 du rapport de synthèse sur le changement climatique (IPCC, 2014).

La conséquence directe de la hausse des températures est le changement climatique qui a un impact sur divers secteurs dont celui agricole.

3.4. Impact du changement climatique

Dans le rapport du GIEC (2001), l'impact du changement climatique désigne les conséquences sur les systèmes naturels et humains des événements météorologiques et climatiques extrêmes. Les impacts désignent généralement les conséquences sur les vies, les moyens de subsistance, la santé, les écosystèmes, les économies, les sociétés, les cultures, les services et les infrastructures dues au changement climatique ou des événements climatiques dangereux, se produisant à une période donnée.

Introduction générale

En ce qui concerne l'impact du changement climatique en Afrique subsaharienne, un grand nombre d'études prédisent une baisse drastique de la production agricole due essentiellement au changement climatique (Blanc, 2012 ; Lobell et al. 2010, Mendelsohn (2008) ; Deschênes et al. 2007 ; Mohamed et al. 2002 ; Rosenzweig et Parry (1994)). Dans certains pays, le rendement de l'agriculture pluviale pourrait chuter de 50% d'ici 2020 (Boko et al., 2007). L'impact sur les rendements se trouve dans les résultats de l'impact sur les sols et la longueur des saisons.

A partir d'un Modèle de Circulation Générale Atmosphère-Océan (MCGAO), Lotsch (2007) trouve qu'il est susceptible que l'Afrique perde en moyenne 4,1% de ses terres cultivables en 2039, et 18,4% d'ici la fin du siècle. Fischer et al. 2005; Shah et al. 2008 prévoient une augmentation des zones arides, sèches et semi-arides en Afrique de 5 à 8%, soit 60 à 90 millions d'hectares à l'horizon 2080. En outre, Orindi et Murray (2005) renseignent qu'en Afrique orientale, les précipitations accrues consécutives au changement climatique, pourraient entraîner le lessivage des nutriments et la perte de la couche arable, toutes choses qui vont sérieusement affecter la production agricole. Sur l'ensemble du continent, les zones arides et semi-arides devraient augmenter dans un ordre variant entre 5 et 8% d'ici à 2080, soit une perte d'environ 60 à 90 millions d'hectares de terres agricoles productives (WBGU, 2008).

Le changement climatique se manifeste de plusieurs façons : les températures très élevées, les précipitations à la fois insuffisantes et imprévisibles, les fréquentes inondations, les vents violents ou les sécheresses. Parmi les manifestations du changement climatique, la sécheresse est le phénomène le plus silencieux, le moins impressionnant et dont l'enjeu sociétal est énorme.

Selon un rapport du groupe de la Banque Mondiale, les sécheresses engendrent une « misère au ralenti », avec des effets plus profonds et plus durables qu'on ne le pensait auparavant (Damania et al, 2017). D'après Simonet et al (2015), le cas de la sécheresse au Mali permet de mettre en évidence le lien complexe et dynamique existant entre les extrêmes climatiques, la pauvreté et le développement. Ainsi, le Mali est un exemple qui illustre comment les sécheresses récurrentes peuvent enraciner la pauvreté et ébranler la résilience.

Dans le secteur agricole, selon Boko et al (2007), une période de sécheresse prolongée au Sahel et sur la corne de l'Afrique risque d'entraîner une dégradation des sols et une baisse des récoltes avec un risque élevé d'incendie. Burke et al., (2006) trouvent qu'en 2050, les augmentations de température en période chaude auront d'importants effets sur la croissance

Introduction générale

de trois principales cultures céréalières d'Afrique subsaharienne que sont le maïs, le mil et le sorgho. En faisant une projection sur un horizon plus lointain (i.e. 2100), Li et al., (2005) indiquent que globalement, la superficie de sinistre liée à la sécheresse va augmenter de 15,4 à 44%, avec l'augmentation des températures mondiales et que l'Afrique est la zone présentant le plus grave risque de sinistre.

En 2016, les pays d'Afrique australe ont été touchés par une deuxième saison consécutive de sécheresse entraînant de mauvaises récoltes. Selon la FAO, les conséquences sont dramatiques, exposant près de 40 millions de personnes à l'insécurité alimentaire. La sécheresse et ses conséquences sur les populations africaines sont toujours d'actualité. Selon les chiffres rendus publics par l'Organisation des Nations Unies (ONU), la sécheresse frappe depuis fin 2016 plusieurs pays d'Afrique. Déjà en juillet 2011, la corne de l'Afrique a été frappée par une importante sécheresse, l'une des pires depuis plusieurs décennies, puisque plus de 12 millions d'habitants ont été touchés par la famine. D'après les estimations de la FAO, ce chiffre serait revu en 2017 à près de 17 millions de personnes qui risquent de faire face à de graves pénuries alimentaires dans les pays de la Corne de l'Afrique. Auparavant, Burke et al. 2009, Couttenier et al, 2013 ont relevé qu'entre 1945 et 2005, la grande majorité des pays d'Afrique subsaharienne (76 %) a connu au moins une année de sécheresse extrême. Sur cette période, le climat subsaharien est devenu globalement de plus en plus sec. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliard de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliard en sont mortes de causes directes ou indirectes. Au-delà de la famine, la sécheresse serait aussi la cause d'instabilité sociopolitique. Des études récentes trouvent que la sécheresse est l'une des causes des guerres civiles (Couttenier et al, 2012).

Certaines régions sont donc vulnérables au changement climatique tandis que d'autres y sont résilientes. Quelles soient les définitions des notions de vulnérabilité et de résilience au changement climatique ?

- **Hétérogénéité de l'impact du changement climatique**

Les débats autour du changement climatique relèvent que les entités (régions, pays, cultures, ...) réagissent différemment à l'impact de la variabilité climatique. Rosenzweig et Parry (1994) conduisent une étude à l'échelle mondiale et leurs résultats indiquent que les pays

développés ne seront pas impactés de la même manière que les pays en développement, plus vulnérables aux aléas climatiques. L'étude de Seo et al., (2009) sur un échantillon de seize zones agro écologiques révèle que le changement climatique induit une mauvaise production agricole dans les zones de savane sèches et humides mais une production meilleure dans les zones de forêt humide et subhumide.

Certaines études se sont intéressées à des cultures spécifiques : Schenkler et Lobell (2010) ont examiné l'impact du changement climatique en Afrique subsaharienne à l'horizon 2050. Ils trouvent que le maïs sera la culture la plus affectée. Thornton et al. (2009), à travers une étude faite en Afrique orientale sur le maïs et le haricot, indiquent que les impacts peuvent être très variables à travers l'espace et dans le temps, en fonction des interactions entre la hausse des températures et le changement dans le volume et la variabilité des précipitations.

3.5. Vulnérabilité et résilience au changement climatique

Selon le rapport du GIEC(2001), la vulnérabilité au changement climatique est le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes du changement climatique. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, du rythme du changement climatique auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation. La définition présentée par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) ne diffère pas de celle présentée par le GIEC. La vulnérabilité est alors la propension ou la prédisposition à être affecté de manière négative par le changement climatique. La vulnérabilité recouvre plusieurs concepts et éléments, notamment la sensibilité ou la susceptibilité d'être atteint et le manque de capacité à réagir et à s'adapter. Une région qui est vulnérable au changement climatique est peu (ou pas du tout) résiliente.

La résilience au changement climatique, selon l'ONERC, est la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation dangereuse, en répondant ou en se réorganisant de manière à maintenir la capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation. Une autre définition est apportée par le SIPC, l'organe des Nations Unies chargé de la stratégie internationale de prévention des catastrophes naturelles : la résilience est la capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée aux risques de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets

d'un danger d'une manière opportune et efficace, notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base .

De nombreuses études arrivent à la conclusion que les pays de l'Afrique subsaharienne sont structurellement les plus vulnérables au changement climatique (Blanc, 2012 ; Lobell et al. 2010, Mendelsohn (2008) ; Deschênes et al. 2007 ; Mohamed et al. 2002 ; Rosenzweig et Parry, 1994, Butt et al. 2005 ; Kurukulasuriya et Mendelsohn, 2006.c ; Di Falco et al. 2011). D'après la littérature, la vulnérabilité de ces pays au changement climatique s'explique par trois principales raisons. D'abord, la localisation géographique de l'Afrique où les conditions météorologiques sont extrêmement variables c'est-à-dire en basse latitude et proches des tropiques. De plus, la faible capacité des pays africains à s'adapter et à faire face au changement climatique en raison de leur niveau économique (Rosenzweig et Parry, 1994 ; Fischer et al, 2005). Troisièmement, leur vulnérabilité est exacerbée par la forte dépendance de leur économie à une agriculture essentiellement pluviale. Alors que l'économie est dépendante largement de l'agriculture.

Cependant, tout un pan de la littérature indique que l'adaptation et le l'atténuation pourraient résorber l'impact négatif du changement climatique. En effet, la société peut s'adapter à la variabilité du climat. Il s'agirait par exemple de modifier les pratiques de production, développer de nouvelles technologies, modifier les modes de culture régionaux et les habitudes de consommation et de production. Smit et Skinner (2002) offrent une revue plus détaillée sur les types de stratégies d'atténuation et d'adaptation à l'instabilité climatique.

3.6. Adaptation, atténuation et résilience au changement climatique

Selon l'ONERC, l'adaptation au changement climatique est l'ensemble du processus d'ajustement au climat présent ou attendu et à ses effets. Dans les systèmes humains, l'adaptation cherche à modérer ou éviter les nuisances ou à exploiter les opportunités bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'ajustement au climat attendu et à ses effets. Le GIEC définit l'adaptation comme étant l'ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation au changement climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques. L'atténuation et l'adaptation présentent des différences notables, en particulier dans leurs

Introduction générale

objectifs. L'atténuation traite des causes du changement climatique (l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère), alors que l'adaptation concerne les impacts du changement climatique. Les deux approches sont complémentaires et nécessaires dans un contexte de changement climatique. En effet, même si des efforts importants étaient faits sur l'atténuation, le climat continuerait à changer pendant les prochaines décennies, rendant nécessaire l'adaptation à ce changement.

On distingue divers types d'adaptation, notamment l'adaptation anticipée et réactive, l'adaptation publique et privée, et l'adaptation autonome et planifiée. Les travaux de Smither et al. (1997) reviennent en détail sur l'adaptation au changement climatique.

Butt et al. (2005) ont montré que l'adoption de nouvelles techniques agricoles, de cultures mixtes ou l'utilisation d'une variété de cultures plus résistantes à la chaleur peuvent aider les agriculteurs du Mali à mieux faire face au changement climatique et à atténuer les dommages généraux causés par ce changement. Di Falco et al. (2011) ont constaté que les ménages agricoles qui se sont adaptés à un climat changeant, ont tendance à produire plus que les ménages agricoles qui ne s'y sont pas adaptés et que l'accès au crédit ainsi que la détention d'information relative au climat sont des déterminants importants de l'adaptation. Si les coûts de l'adaptation sont trop élevés, les personnes confrontées à des conditions météorologiques trop hostiles pourraient être forcées d'émigrer, comme le montrent Black et al. (2011). De nombreuses études se sont intéressées aux déterminants des stratégies d'adaptation au changement climatique³.

Cette abondante littérature met en exergue trois principales catégories de facteurs qui encouragent ou découragent l'agriculteur à adopter des stratégies d'adaptation au changement climatique. Il s'agit des caractéristiques sociodémographiques des ménages, les caractéristiques biophysiques des parcelles ainsi que l'instabilité du climat. Pour certaines variables, la littérature est unanime sur le signe de la relation avec l'adoption de stratégies d'adaptation au changement climatique.

S'il est vrai que l'Afrique subsaharienne est en proie à la sécheresse, il faut cependant relever que certains pays sont plus concernés que d'autres. C'est le cas des pays du Sahel qui est une région très touchée par la sécheresse. La steppe du Sahel connaît un dessèchement relativement

³ Voir le chapitre 3 pour plus de détails.

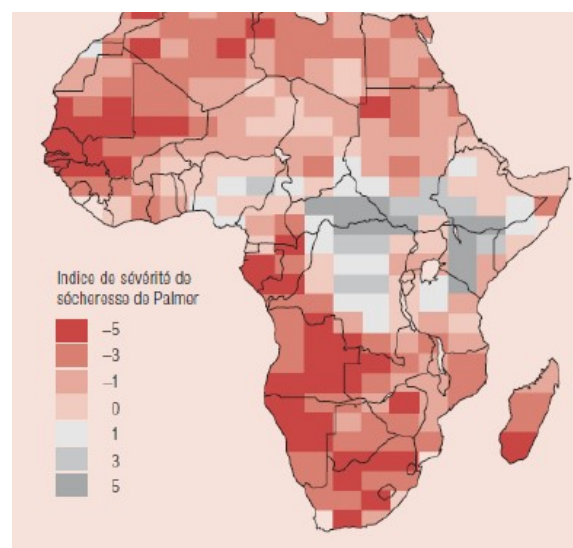
brutal. Selon les estimations du Programme alimentaire mondial (PAM)⁴ pour l'année 2017, le nord du Mali, le Niger, le Tchad et le nord du Nigeria sont touchés. Le phénomène concerne dix millions d'habitants.

4. Le changement climatique et l'agriculture au Mali : l'impact prépondérant de la sécheresse

Le Mali est l'un des pays les plus durement touchés par la sécheresse à l'instar d'autres pays du Sahel. Il a un climat de type intertropical continental, caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une saison des pluies allant de 2 mois au Nord à 5 ou 6 mois au Sud. La pluviométrie très irrégulière dans l'espace et dans le temps varie de moins de 200 mm au Nord à environ 1100 mm au Sud. Le Mali est aussi l'un des pays les plus arides de la planète et deux tiers du territoire national est désertique⁵. La majorité du pays est soumise à un climat chaud et sec. Selon le scénario A2 du GIEC, le Mali est classé parmi les pays les plus à risque avec un indice de sévérité de la sécheresse de -5 comme le montre la Figure i.3 (c'est-à-dire le niveau le plus élevé de sécheresse calculé avec l'indice de sévérité de Palmer).

Au Mali, la sécheresse entraîne une transformation « silencieuse » et profonde de l'environnement. Elle touche une large population et a des incidences sur tous les secteurs, surtout l'économie par le biais de son impact sur le secteur agro-pastoral. En effet, l'agriculture est l'un des principaux moteurs de l'économie. Selon le CPS/SDR (2016), la Population active agricole en 2016 représentait environ 80% de la population totale⁶, et 3/4 des exportations sont issues du secteur agricole en 2015⁷. Le secteur agricole joue fortement sur le Produit Intérieur Brut (PIB) avec une contribution

Figure i. 3 : Sévérité de la sécheresse selon le scénario A2 du GIEC (changement de 2000 à 2090)



Source : Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques au Mali (2013)

⁴ <http://geopolis.francetvinfo.fr/soudure-alimentaire-a-haut-risque-au-sahel-153571>

⁵ La superficie du Mali est de 1.242.248 km² (site de l'Institut National de la Statistique)

⁶ Dans le rapport 2017 de la cellule de planification et de statistique du secteur de développement rural (CPS/SDR) on tire les informations suivantes : la population du Mali en 2015 est de 18 083 763 d'après l'INSTAT et selon le rapport de l'EAC, 2015/2016 la population agricole est de 14 107 926. Il résulte que la population agricole représente 78% de la population total en 2015.

⁷ <http://www.statistiques-mondiales.com/mali.htm>

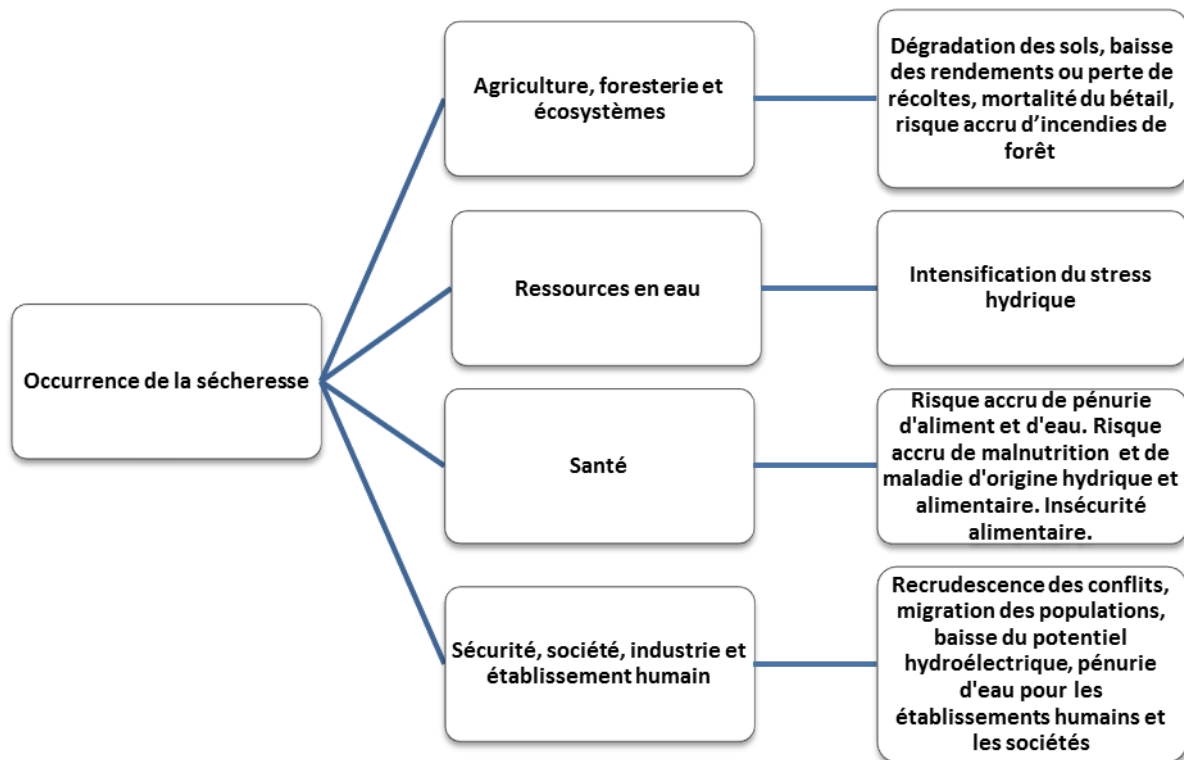
Introduction générale

L'agriculture du Mali étant essentiellement pluviale, elle est fortement dépendante du climat et donc vulnérable au changement climatique. Dans la littérature, un résultat qui fait consensus est l'impact négatif du climat sur la production agricole au Mali. Très récemment, une « concept note » de *Green climate fund*, a relevé qu'au Mali on observe une baisse des rendements agricoles et une augmentation de l'insécurité alimentaire qui est passée de 24% en 2014 à 25,6% en 2017 (concept note, Green climate fund (2018)). Dans le même ordre d'idée, les travaux de Butt et al., (2005) et Chaisemartin et al. (2010) montrent que les tendances climatiques dans les scénarios futurs impliquent une recrudescence des impacts négatifs du changement climatique sur l'agriculture et l'élevage au Mali.

Outre l'impact sur l'agriculture et sur l'économie, des études montrent l'existence de liens entre stress hydrique et l'instabilité socio-politique au Mali (Arsenault, 2015, Kälin, 2008). Le Brookings Institute a publié une étude démontrant que de façon générale, à chaque variation de la température moyenne et du taux des précipitations de 1%, correspond un accroissement de la fréquence de la violence transfrontalière de 4% (Kälin, 2008). Dans le même temps, la violence intercommunautaire, telle que celle qui sévit au Mali, peut s'élever jusqu'à 14% avec de telle variation du climat. Selon la Banque mondiale, c'est l'agriculture qui a permis au pays de résister à la crise de 2012.

En somme, le changement climatique et plus particulièrement la sécheresse peut être néfaste pour l'agriculture, la sécurité alimentaire, la production d'hydroélectricité, les activités industrielles, la santé humaine et animale, la sécurité des moyens de subsistance et celle des personnes (quand les femmes doivent parcourir de grandes distances pour aller chercher de l'eau, par exemple) et l'accès à l'éducation (quand les filles ne vont plus à l'école car la corvée d'eau prend trop de temps). La figure i.4 montre les incidences probables associées à l'occurrence de sécheresse.

Figure i. 4: incidences probables associées à l'occurrence de sécheresse



Source : l'auteur à partir de la revue de la littérature

Concernant l'adaptation au changement climatique au Mali, Butt et al. (2005) apportent la preuve que la mise en œuvre de pratiques d'adaptation au changement climatique pourrait jouer un rôle important dans la réduction des pertes de rendement agricole. La perte en termes de rendement de céréales qu'on aurait observé avec le changement climatique, est réduite d'environ 33% lorsque l'adaptation est au niveau de l'agriculteur. Cette baisse de production céréalière est d'environ 12% plus importante quand l'adaptation est entreprise par le gouvernement. Leur analyse distingue ainsi l'adaptation au niveau du gouvernement de l'adaptation au niveau de l'agriculteur (notamment le changement de la date de mise sous terre des semences et l'utilisation des semences résistant aux temps de forte chaleur).

Au regard de cette brève description de la relation entre le changement climatique et l'agriculture au Mali, il apparaît pertinent de conduire des études sur ce vaste pays de l'Afrique de l'Ouest.

La revue de la littérature fait ressortir certains faits stylisés:

- Le Mali fait partie des pays les plus vulnérables au changement climatique et en particulier à la sécheresse,

- Le climat est un intrant agricole exogène qui échappe à la maîtrise de l'agriculteur,
- La production agricole au Mali est négativement impactée par la variabilité climatique et cela pourrait s'amplifier si rien n'est fait,
- L'atténuation et l'adaptation peuvent limiter l'impact négatif du changement climatique sur l'agriculture du Mali.

Ces évidences soulèvent une question centrale : comment maintenir ou améliorer la production agricole au Mali dans un contexte de changement climatique ?

5. Contribution de la thèse

Bien qu'un grand nombre de travaux soit dédiés à la relation entre le changement climatique et l'agriculture, peu d'études y sont consacrées au Mali. Quand bien même les rares études faites sur le Mali sont considérées, on relève que certains aspects importants de la problématique générale du changement climatique n'ont pas été abordés. Cette thèse apporte des contributions à la littérature préexistante à travers les chapitres qui la constituent.

D'abord, toutes les études qui se sont intéressées à l'impact du changement climatique sur l'agriculture au Mali sont basées sur des modèles de projection (Butt et al., 2005 ; Chaisemartin et al., 2010). Or, bien que ces modèles aident à prévoir les futures productions agricoles consécutives à la variabilité climatique simulée, il peut s'avérer intéressant de visualiser les faits qui se sont produits. Cette thèse saisit l'avantage de la disponibilité des données historiques sur l'agriculture⁸ et sur le Climat⁹ du Mali pour cerner la corrélation qu'il y a eu entre la production agricole et le changement climatique.

La seconde contribution de cette thèse part du constat que jusqu'ici, les études sur l'efficience technique des agriculteurs n'ont pas cherché à déterminer dans quelle mesure le changement climatique impacte la performance managériale des agriculteurs. En effet, ne pas intégrer la variabilité du climat dans l'analyse pourrait conduire à des résultats biaisés et des conclusions erronées sur les scores d'efficience des agriculteurs et même sur leur classement. En s'inspirant des travaux de Coelli et al. (1999) réalisés dans le secteur de l'industrie

⁸ Les données agricoles provenant du Recensement Général Agricole du Mali 2004/2005, les Enquêtes Agricoles de Conjoncture (EAC), les données de la FAO et celles de la Banque Mondiale.

⁹ La base CRU TS3

Introduction générale

aéronautique, cette thèse propose une approche méthodologique originale afin d'estimer l'effet du changement climatique sur la performance managériale des agriculteurs.

La troisième contribution de cette thèse concerne l'analyse de l'adaptation au changement climatique. Constatant que sur la problématique de l'adaptation, la quasi-totalité des études dédiées au Mali évalue le gain de l'adaptation (les études de Butt et al., 2005 ; Ebi et al., 2011), cette thèse considère que les processus adaptatifs sont d'abord des phénomènes liés aux caractéristiques des ménages agricoles. Et en cela, une contribution de cette thèse est de chercher à déterminer les caractéristiques sociodémographiques des ménages et les caractéristiques biophysiques des parcelles qui expliquent la propension élevée d'un ménage agricole malien à s'adapter au changement climatique. En effet, alors que des études foisonnent dans ce sens dans certains pays (voir la revue de la littérature en chapitre 3), il n'y a pas d'étude sur les déterminants de l'adaptation pour le Mali. Les études précédentes qui mesurent le bénéfice de l'adaptation au changement climatique au Mali sont importantes, car elles mettent en évidence le fait que les technologies et les processus adaptatifs, à court terme ou à long terme, sont de véritables réponses techniques aux conditions climatiques variables. Connaître le profil du ménage agricole qui s'adapte au changement du climat est important pour l'élaboration des politiques agricoles.

Enfin, bien que les déterminants de la mécanisation agricole aient été largement étudiés, on relève cependant que les études se concentrent uniquement sur « l'adoption » et ne tiennent pas compte de « l'intensité de l'adoption » de la mécanisation agricole, c'est-à-dire la part de la surface de l'exploitation sur laquelle les opérations agricoles sont effectivement mécanisées. Cela dit, contrairement aux études précédentes, cette thèse étudie non seulement les décisions d'adoption de la mécanisation agricole, mais aussi l'intensité de l'adoption. Par ailleurs, en introduisant la sécheresse comme variable explicative de la mécanisation agricole, cette thèse apporte un autre éclairage sur le comportement de l'agriculteur dans un contexte de changement climatique. En plus, cette thèse propose une première analyse économétrique appliquée spécifiquement au Mali car, malgré le nombre important d'études dédiées à la mécanisation agricole, le secteur agricole malien n'est pas encore sorti de l'auberge.

6. Plan de la thèse

La présente thèse se veut une contribution au débat théorique et empirique sur la relation entre le changement climatique et l'agriculture au Mali. Notre travail se focalise sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture au Mali et les stratégies qui permettent de s'y

adapter. Cette thèse est structurée en quatre essais complémentaires. Les chapitres 1 et 2 traitent de l'impact du changement climatique respectivement sur la production agricole et la performance managériale des agriculteurs. Les chapitres 3 et 4 analysent les procédés qui pourraient garantir le maintien ou l'augmentation d'une bonne production agricole dans un contexte de changement climatique. C'est ainsi que l'adaptation au changement climatique et la mécanisation, sont étudiées.

Le premier chapitre intitulé « Changements climatiques et production agricole au Mali », analyse le changement climatique et l'agriculture au Mali. L'objectif est de contribuer à une meilleure compréhension des manifestations du changement climatique et de leurs impacts sur l'agriculture au Mali. D'abord, nous passons en revue les signes du changement climatique. L'analyse se recentre ensuite sur la sécheresse étant donné qu'elle est, parmi les manifestations du changement climatique, le phénomène le plus silencieux, le moins impressionnant et dont l'enjeu sociétal est énorme. Nous faisons donc un exposé général sur la notion de sécheresse en la définissant et en présentant les indices qui permettent de l'appréhender. Puis, nous présentons le Mali du point de vue de sa géographie (climat, hydrographie, types de sol) et du point de vue de son secteur agricole. Nous utilisons un large éventail de mesures statistiques et d'outils graphiques pour réaliser une analyse exploratoire et descriptive de données climatiques et agricoles du Mali. Les tendances et les spécificités dans les séries de données sont identifiées et les corrélations entre les variables des productions agricoles et celles du changement climatique sont mises en évidence. Comme on pouvait le prévoir, nos résultats révèlent une forte corrélation négative entre l'agriculture et les variables telles la sécheresse et les températures, et une corrélation positive avec les précipitations.

Le chapitre 2 s'intitule « Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models ». Il s'appuie sur le constat que les différences de conditions climatiques entre les localités géographiques peuvent entraîner des variations systématiques sur les performances des agriculteurs. L'objectif de cette étude est de comprendre dans quelle mesure le changement climatique affecte la performance managériale des agriculteurs maliens. Nous proposons un nouveau modèle économétrique basé sur la méthodologie de Coelli et al (1999) pour mesurer l'efficacité technique nette des agriculteurs (l'inefficacité climatique calculée en amont est soustraite de l'efficacité technique brute). Ainsi, nous estimons d'abord une frontière de production qui tient explicitement compte de l'influence du changement climatique. Ensuite, pour chaque agriculteur, nous déterminons l'efficacité technique brute, l'inefficacité due au changement

Introduction générale

climatique et nous déduisons l'efficacité technique nette. En utilisant les données du Mali issues de l'«Enquête Agricole de Conjoncture» et de la base des données climatiques CRU TS3, notre analyse montre que l'instabilité climatique explique une partie de l'écart à la frontière de production. Autrement dit, le changement climatique diminue l'efficacité technique en modifiant par la même occasion le classement des agriculteurs qu'on aurait obtenu si l'instabilité climatique n'avait pas été prise en compte lors de l'estimation des scores d'efficacité. Notre étude souligne l'importance de renforcer les capacités des agriculteurs en termes de choix de la composition des intrants, car l'inefficacité technique réelle représente la plus grande partie de l'inefficacité, l'inefficacité climatique étant faible.

Le troisième chapitre est intitulé « Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables ». Il se fonde sur l'argumentaire plausible selon lequel certaines pratiques agricoles réduisent la vulnérabilité de la production agricole au changement climatique tout en préservant l'environnement. Ce chapitre s'intéresse au maintien de la production agricole dans un contexte de changement climatique. Dans cette étude, nous cherchons à identifier les déterminants de l'adoption de stratégies durables d'adaptation au changement climatique. L'analyse porte sur trois stratégies d'adaptation : l'utilisation des semences améliorées, la diversification des cultures sur une parcelle et le choix de la date de mise sous terre des semences. Nous utilisons un modèle Logit multinomial sur les données provenant du recensement général agricole réalisé au Mali en 2004. Les informations sur les conditions hydro climatiques des arrondissements dans lesquels se situent les parcelles, proviennent de la base CRU TS3. Les résultats indiquent que la décision des agriculteurs est influencée par les caractéristiques sociodémographiques des ménages, les caractéristiques biophysiques des parcelles ainsi que la survenue d'épisodes de sécheresse au cours de la précédente saison des pluies.

Le chapitre 4, intitulé « Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter? », est consacré à la réflexion visant à augmenter la production agricole au Mali dans un contexte de changement climatique. L'attention est portée sur l'intensification de la production grâce à la mécanisation des travaux agricoles. Cette étude a pour objectif l'identification des facteurs qui influencent l'accès et l'intensité de la mécanisation agricole au Mali. Les résultats montrent une relation inverse entre la sécheresse et la mécanisation agricole. Ce qui suggère que la sécheresse réduit les chances de l'agriculteur de mécaniser les opérations d'une ferme. Si ce premier résultat est contraire à l'hypothèse que nous avons formulée, les autres résultats sont en ligne avec les conclusions de

Introduction générale

la littérature. Nos résultats indiquent que les caractéristiques financières telles que l'accès au crédit, les caractéristiques sociodémographiques des chefs de ménage et leur capital social, la disponibilité de la main-d'œuvre agricole et le relief des exploitations agricoles influent sur la décision de mécaniser les travaux sur l'exploitation. Par ailleurs, l'intensité de la mécanisation agricole augmente avec la taille des exploitations et diminue avec l'effectif de la main-d'œuvre familiale.

- Arsenault, C. (2015). Drought, Expanding Deserts and 'Food for Jihad'Drive Mali's Conflict. Reuters, April, 27.
- Black, R., Bennett, S. R., Thomas, S. M., & Beddington, J. R. (2011). Climate change: Migration as adaptation. *Nature*, 478(7370), 447.
- Blanc Elodie. 2012. « The Impact of Climate Change on Crop Yields in the Sub-Saharan Africa. » *American Journal of Climate change* 1(1): 1-13.
- Boko, M., Niang, I., Nyong, A., & Vogel, C., et al. (2007). Africa. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof et al. (Eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 433–467). Cambridge: Cambridge University Press.
- Burke, E. J., Brown, S. J., & Christidis, N. (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 1113-1125.
- Butt T., B. McCarl, J. Angerer, P. Dyke and J. Stuth. 2005. The economic and food security implications of climate change in Mali. *Climatic Change* 68: 355-378.
- Chaisemartin, A. M. Normann, and J. Pestiaux. « Extreme climate conditions: How Africa can adapt ». *McKinsey's journal*. June 2010.
- Coelli T.J, Sergio Perelman, and Elliot Romano. 1999. « Accounting for environmental influences in stochastic frontier models: with application to international airlines. » *Journal of Productivity Analysis*, 11: 251-273.
- Couttenier, M., Hofstetter, A., & Soubeyran, R. (2012). Sécheresse et Guerre Civile en Afrique Sub-Saharienne. *INRA sciences sociales*, (6/2013), 1-4.
- Damania, Richard; Desbureaux, Sébastien; Hyland, Marie; Islam, Asif; Moore, Scott; Rodella, Aude-Sophie; Russ, Jason; Zaveri, Esha. 2017. *Uncharted Waters : The New Economics of Water Scarcity and Variability*. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28096> License: CC BY 3.0 IGO
- Deschênes, O. and Greenstone, M. 2007. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. *The American Economic Review*, 97(1):354–385.

Introduction générale

- Di Falco Salvatore, Marcella Veronesi & Mahmud Yesuf, 2011. Does adaptation to climate change provide food security? A micro perspective from Ethiopia. *American Journal of agricultural economics* Volume 93, Issue 3, pp. 829-846.
- Ebi, K. L., Padgham, J., Doumbia, M., Smith, J., Butt, T., & McCarl, B. (2011). Smallholders adaptation to climate change in Mali. *Climatic Change*, 108(3), 423.
- FAO (2018). *Climate Change and its impact on the work and activities of FAO: Building resilience to address extreme vulnerability of Africa's agriculture and rural livelihoods*. . FAO regional conference for africa, February 2018. Khartoum, the Sudan.
- FAO, 2016. Africa regional overview of food security and nutrition. The challenge of building resilience to shocks and stresses. <http://www.fao.org/3/a-i6813e.pdf>
- Fischer, G., Tubiello, F. N., Van Velthuis, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 1083-1107.
- Fried, H. O.; C. A. K. Lovell; S. S. Schmidt. (2002). Accounting for Environmental Effects and Statistical Noise in Data Envelopment Analysis. *Journal of productivity analysis* 17, 157-17.
- GIEC, 2001a : *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.G. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, et C.A. Johnson (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis, 881 pp.
- Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques (Novembre 2013) : Gestion intégrée de la terre et de l'eau Pour l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au mali.
- IPCC_ Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; *Climate Change 2014: Synthesis Report*; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2014; 151p.
- IPCC_ *Climate Change 2007*. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Core Writing Team, Pachauri, R. K., and Reisinger, A., 104 pp., IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- Kälin, W. (2008) *Displacement Caused by the Effects of Climate Change: Who Will Be Affected and What are the Gaps in the Normative Framework for Their Protection?* The

Introduction générale

- Brookings Institute. www.brookings.edu/research/papers/2008/10/16-climate-change-kalin
- Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R. (2007). A Ricardian analysis of the impact of climate change on African cropland. The World Bank.
- Lobell, D. B. and Burke, M. B. 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11):1443–1452.
- Lotsch, A. (2007). Sensitivity of cropping patterns in Africa to transient climate change. The World Bank.
- Mendelsohn, R. (2008). The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1):5–19.
- Mohamed, A. B., Van Duivenbooden, N., & Abdoussallam, S. 2002. Impact of climate change on agricultural production in the Sahel–Part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change*, 54(3), 327-348.
- Orindi, V. A., & Murray, L. A. (2005). Adapting to climate change in East Africa: a strategic approach (No. 117). International Institute for Environment and Development.
- Rapport national Sur le développement durable au Mali (Juin, 2012) : dans la perspective de RIO+20
- Rosenzweig, C. and Parry, M. L. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 367(6459):133–138.
- Schlenker, W., & Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014010.
- Seo, S. N., Mendelsohn, R., Dinar, A., Hassan, R., & Kurukulasuriya, P. (2008). A Ricardian analysis of the distribution of climate change impacts on agriculture across agro-ecological zones in Africa. The World Bank.
- Shah, M., Fischer, G., & van Velthuisen, H. (2008). Food security and sustainable agriculture. the challenges of climate change in Sub-Saharan Africa. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Simonet Catherine, Janot Mendler de Suarez et Blane Harvey. 2015. Sécheresse, chocs complexes et pauvreté au Mali dans Wilkinson, E., & Peters, K. (2015). Extrêmes climatiques et réduction de la pauvreté par la résilience.

Introduction générale

Smit, B., & Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114.

Smithers, J. & B. Smit, 1997: Human adaptation to climatic variability and change. *Global Environmental Change*, 7(2), 129–146

Thornton, K. P., Jones, P. G., Alagarswamy, G., & Andresen, J. 2009: Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa. *Global Environmental Change*, 19, 54–65.

WBGU (CHANGE, GERMAN ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL). *Climate Change as a Security Risk*. 2008.

Chapitre 1

Changements climatiques et production agricole au Mali

1. Introduction

Le Mali est l'un des pays les plus arides de la planète¹⁰ et durement touchés par le changement climatique et en particulier la sécheresse. Selon le scénario A2 du GIEC, le Mali est classé parmi les pays les plus à risque avec un indice de sévérité de la sécheresse de -5, c'est-à-dire le niveau le plus élevé de sécheresse (calculé avec l'indice de sévérité de Palmer).

Le changement climatique a un impact négatif important sur la production agricole au Mali. Chaisemartin et al. (2010) utilisent des simulations de scénarios pour estimer les pertes économiques que le Mali connaîtra en 2030. Ils estiment que le changement climatique pourrait entraîner des pertes d'environ 300 millions de Dollars par année (environ 15% de la valeur de l'agriculture et de l'élevage) selon le scénario pessimiste. Ces pertes seraient de 120 millions de Dollars par an (6% de la valeur de l'agriculture et de l'élevage) suivant le scénario optimiste. Ces résultats sont plus alarmistes que ceux trouvés auparavant par Butt et al. (2005) qui prévoient que le Mali subira des pertes économiques de l'ordre de 96 et 116 millions de dollars. Ils parviennent à ce résultat en utilisant les projections de changement climatique induit par l'émission des gaz à effet de serre à l'horizon 2030 et réalisées grâce aux modèles climatiques HADCM et CGCM. Les canaux de transmission de cet impact négatif du changement climatique sur l'agriculture sont précisés dans le rapport 2012 sur le Développement durable au Mali. En effet, selon ce rapport, le changement climatique devrait continuer à affecter négativement la production agricole à travers un déficit accru en eau, la dégradation des terres, les perturbations du calendrier agricole, la multiplication des événements climatiques extrêmes (rapport DD 2012).

De surcroît, au-delà de l'impact négatif sur la production agricole, le changement climatique est dommageable pour la sécurité alimentaire des populations maliennes. Très récemment, une « concept note » de *Green climate fund*, a relevé qu'au Mali on observe une baisse des rendements agricoles et une augmentation de l'insécurité alimentaire qui est passé de 24% en 2014 à 25,6% en 2017 (concept note, Green climate fund (2018)). Dans le même ordre d'idée, Simonet et al. (2015) montre que changement climatique aggrave aussi la pauvreté au Mali.

¹⁰ La superficie du Mali est de 1.242.248 km² et deux tiers de cette superficie est désertiques (site de l'Institut National de la Statistique)

Le changement climatique au Mali est donc un enjeu important pour la production agricole devant garantir une disponibilité suffisamment importante pour les populations. Ainsi, afin de mieux de mieux s'adapter, il apparaît pertinent de mieux comprendre dans quelle mesure le changement climatique a impacté le secteur agricole malien au cours de ces dernières années. Ce chapitre a donc pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des manifestations du changement climatique et de leurs impacts sur l'agriculture au Mali, un accent est porté sur la sécheresse.

Ce chapitre est structuré en quatre sections. Dans la deuxième section, nous présentons le Mali du point de vue de sa géographie (climat, hydrographie, type de sol...) et du point de vue de son secteur agricole. La troisième section est un exposé général sur le concept de sécheresse : nous le définissons et nous passons en revue les indices qui permettent de l'appréhender. Les méthodes d'évaluation de l'impact du changement climatique sont présentées dans la section quatre. La cinquième section, nous examinons les séries de données climatiques et agricoles du Mali. L'idée est de dégager les tendances et les spécificités dans ces séries et de mettre en évidence les corrélations entre les variables de productions agricoles et celles de changements climatiques à l'instar des précipitations, des températures et de l'indice de sécheresse SPEI. La section 4 conclut le chapitre.

2. Zone d'étude : le Mali un pays chaud et sec où l'agriculture est pilier économique

Le Mali¹¹ est un vaste pays enclavé d'Afrique de l'Ouest couvrant une superficie d'environ 1.24 million de km², dont 51 pour cent sont constitués de terres désertiques. Les superficies cultivées (terres arables et terres en cultures permanentes) occupent environ 4.7 millions d'ha, soit 4% du territoire. Le Mali se distingue des pays de l'Afrique subsaharienne par son climat chaud et sec, l'hydrographie insuffisante et le type de sol particulièrement aride. Ces éléments sont importants pour expliquer le changement climatique ou même pour en être les conséquences liées.

¹¹ Ce paragraphe est rédigé avec pour référence le document de Politique de développement Agricole du Mali (2013), le CP Mali (FAO, 2013) et le travail sur le profil fourrager du Mali de Almoustapha Coulibaly (FAO, 2003).

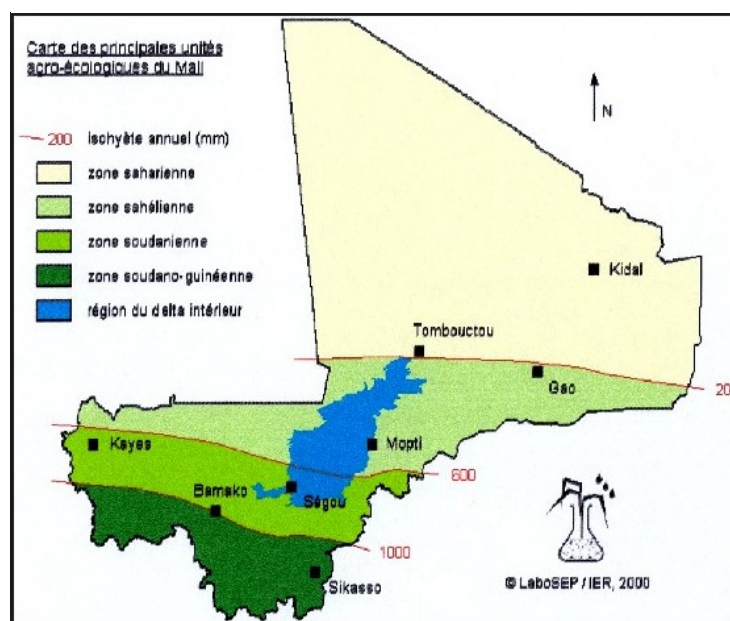
2.1. Le climat et les zones agro-écologiques

La majorité du Mali est soumise à un climat chaud et sec. Il figure parmi les pays les plus arides de la planète et présente une large gamme de milieux agro-écologiques, allant du climat aride saharien au Nord au climat humide guinéen au Sud. On y distingue quatre principales zones agro-écologiques (Figure 1.1):

La zone saharienne dans le septentrion du pays (632 000 km², 51% de la superficie totale) hyper aride et désertique avec des températures élevées. La pluviométrie (inférieure à 200 mm/an) est faible avec comme conséquence une sécheresse aggravée par l'harmattan. Les sols sont sableux ou caillouteux avec une faible capacité de rétention de l'eau. Les cultures ne sont possibles que dans des conditions particulières. La Période de Croissance Végétale (PVC) est de 15 jours environ.

Figure 1. 1 : Principaux unités agro écologiques du Mali

La zone sahélienne dans le Delta intérieur du Niger (320 000 km², 26%) avec une pluviométrie comprise entre 200 et 600 mm/an. Elle se caractérise par une longue saison sèche de 9 à 11 mois. Les sols sont sableux d'origine éolienne et l'activité principale est une agriculture de subsistance associée à un élevage de type nomade et transhumant. La PCV est comprise varie de 15 jours à 100 jours.



Source: Profil fourrager du Mali (Almoustapha Coulibaly, FAO (2003))

La zone soudanaïenne (215 000 km², 17% de la superficie totale) est semi-aride et subhumide. Sa pluviométrie est comprise entre 600 et 1 200 mm/an et les sols sont ferrugineux tropicaux. À cause d'une pluviométrie plus grande, les activités agricoles y sont plus intenses avec une certaine garantie de réussite (la PCV varie entre 100 à 160 jours). L'élevage y est sédentaire avec une migration saisonnière.

La zone soudano-guinéenne a un climat subhumide (75 000 km², soit 6% de la superficie totale) avec des précipitations supérieures à 1 200 mm/an. La saison pluvieuse dure entre 5 et

7 mois. Cette zone correspond au secteur pré forestier. Les sols sont ferrallitiques rouges. Les activités agricoles s'orientent de plus en plus sur la production de fruits et de tubercules. La PCV est supérieur à 160 jours.

2.2. L'hydrographie

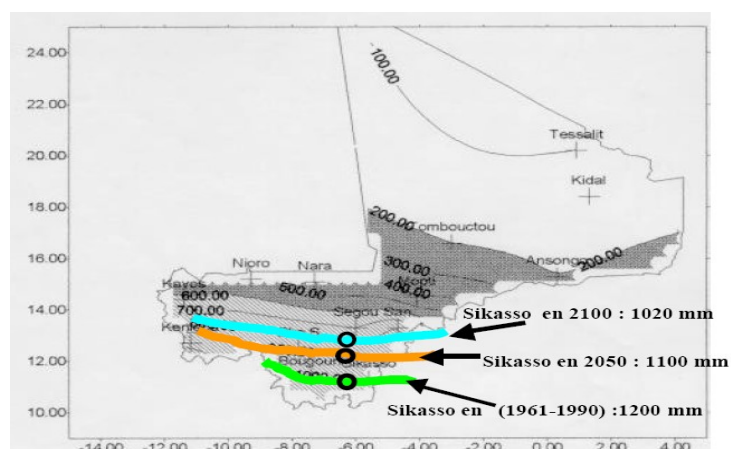
Au Mali, les ressources en eau sont constituées de précipitations et des eaux provenant essentiellement des fleuves Sénégal, Niger et leurs affluents. Environ 47 pour cent de la superficie totale du Mali se trouvent dans le bassin versant du fleuve Niger et 11 pour cent dans le bassin versant du fleuve Sénégal; 41 pour cent de la superficie du pays font partie du bassin intérieur du désert de Sahara, et seulement 1 pour cent se trouve dans le bassin versant du fleuve Volta. Malgré cette hydrographie le déficit hydrique reste préoccupant pour l'agriculture et l'élevage. D'après la version 2013 du Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques, le débit moyen du fleuve Niger est passé de 1300 m³/s pour l'année 1978 à 895 m³/s en 2002 à cause de la baisse de la pluviométrie, ce qui représente une baisse de débit de 405 m³/S en 24 ans. La pluviométrie a donc beaucoup évolué d'une décennie à l'autre avec notamment des années de sécheresse très marquée dans les années 1970 et 1980.

2.3. Le changement climatique au Mali

L'Agence Nationale de la Météorologie du Mali (MALI-

Figure 1. 2 : Manifestation de la sécheresse au Mali : diminution de la pluviométrie et déplacement des isohyètes vers le Sud dans la localité de Sikasso entre 1960 et 2100

METEO) fait remarquer que depuis l'apparition des périodes de sécheresse en 1970, on observe un climat plus aride sur l'ensemble du territoire malien, ainsi qu'une tendance à la diminution globale des pluies « utiles ». Comme le montre la Figure 1.2, les isohyètes se sont déplacées de 200 Km vers le Sud. L'isohyète 1200 mm



Source : Mali Météo

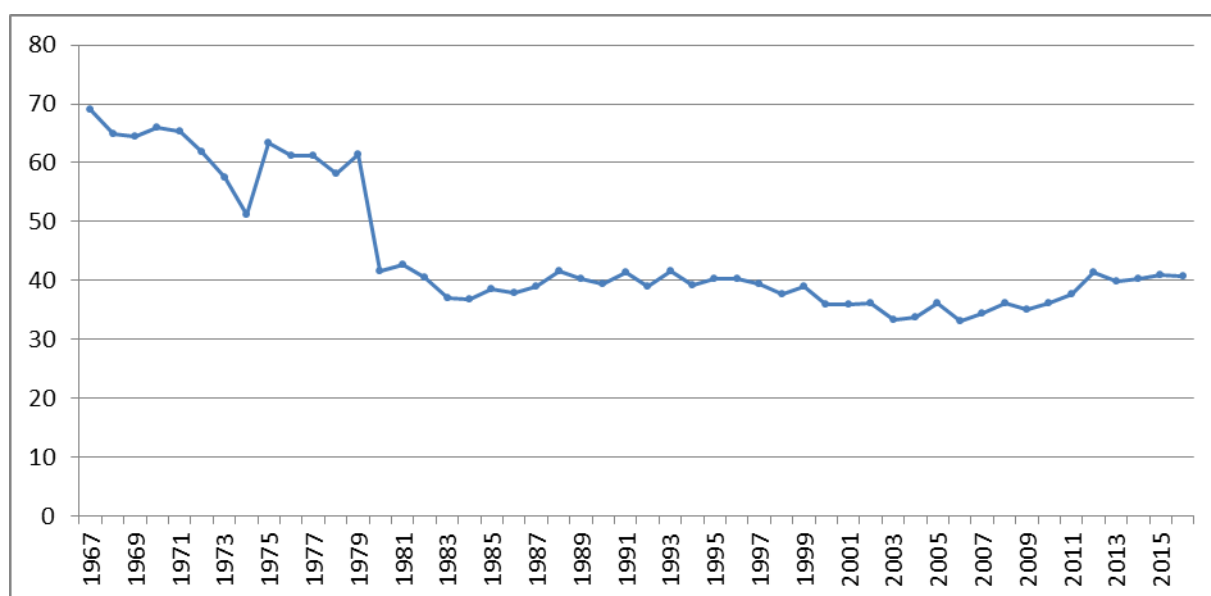
n'existe plus sur la carte du Mali : ce qui prouve que le régime pluviométrique au

Mali est très affecté les changements climatiques. Dans le même ordre d'idée, le rapport 2011 du Plan National sur le Changement Climatique (PNCC), indique que le Mali a connu cinq épisodes majeurs de sécheresse en 27 ans (sur la période 1980-2007).

2.4. L'agriculture au Mali

Le Mali est un pays à vocation exclusivement agricole. Selon le CPS/SDR, 2016, la Population active agricole en 2016 représentait environ 80% de la population totale¹², et 3/4 des exportations sont issues du secteur agricole en 2015¹³. Le secteur agricole joue fortement sur le Produit Intérieur Brut (PIB) comme le montre la Figure 1.3. En effet, la part de la valeur ajoutée agricole dans le PIB reste importante au fil des années. La contribution de l'agriculture malienne au PIB reste élevée en 2016, le secteur agricole malien a généré 40,75 du PIB (Source, Banque Mondiale).

Figure 1. 3: Evolution de la valeur ajoutée agricole, en pourcentage du PIB, de 1967 à 2015



Source : L'auteur avec les données de la Banque Mondiale

¹² Dans le rapport 2017 de la cellule de planification et de statistique du secteur de développement rural (CPS/SDR) on tire les informations suivantes : la population du Mali en 2015 est de 18 083 763 d'après l'INSTAT et selon le rapport de l'EAC, 2015/2016 la population agricole est de 14 107 926. Il résulte que, la population agricole représente 78% de la population total en 2015.

¹³ <http://www.statistiques-mondiales.com/mali.htm>

Au Mali, la majeure partie de la production provient de petites exploitations pratiquant une agriculture de subsistance. Le secteur agricole malien est dominé par des exploitations familiales de petite taille qui représentent 68 pour cent de l'ensemble des exploitations du pays (SPAAA, 2013). Les femmes ont en général moins accès à la terre que les hommes et gèrent des petites superficies. L'agriculture malienne fait face à deux grands défis : les aléas climatiques et les invasions acridiennes avec les criquets pèlerins qui détruisent les cultures avant la maturité et les récoltes (exemple de l'invasion acridienne de 2005). La part de terres agricoles reste assez faible en valeur relative, 35 pour cent, quoiqu'elle représente une valeur absolue non négligeable compte tenu de l'étendue du pays et de la part du désert: 43,7 millions d'hectares (MEA, 2011). Les terres arables, c'est-à-dire l'ensemble des terres qui se prêtent aux usages agricoles, représentent quant à elles entre 11,5 et 21 millions d'hectares, c'est à-dire entre 9,2 et 16 pour cent de la superficie totale du territoire (MEA, 2011). D'après le rapport national sur le développement durable du Mali (2012), l'étude du Projet Inventaire des Ressources Terrestres (PIRT) de 1986 avait relevé que les trois régions du Nord qui représentent plus de 60% du territoire ont moins de 3% des terres arables.

La production agricole au Mali est divisée en production orientée vers la subsistance (céréales) et la production commerciale (coton et riz). La plupart des investissements dans l'agriculture malienne a été allouée à la production de coton et de riz et dans une certaine mesure le maïs. Moins d'importance a été accordée au développement des cultures de mil et de sorgho.

- **Une production dont les cultures commerciales sont le coton et le riz ...**

Le coton est la principale culture commerciale du Mali suivi par le riz. La région de Sikasso est la première zone de cultures industrielles. Les filières de coton et de riz bénéficient de la majeure partie des dépenses publiques dédiées à l'agriculture et l'alimentation, et comme le relevait déjà Aune (2008) l'augmentation des rendements pour le riz est en majeure partie due à l'Office du Niger qui a développé l'irrigation, l'usage de fertilisants et l'accès au crédit. Outre les cultures industrielles qui représentent 19% des superficies, les légumineuses ne représentent que 9%, et les cultures les plus pratiquées sont les céréales avec 72 % des superficies,

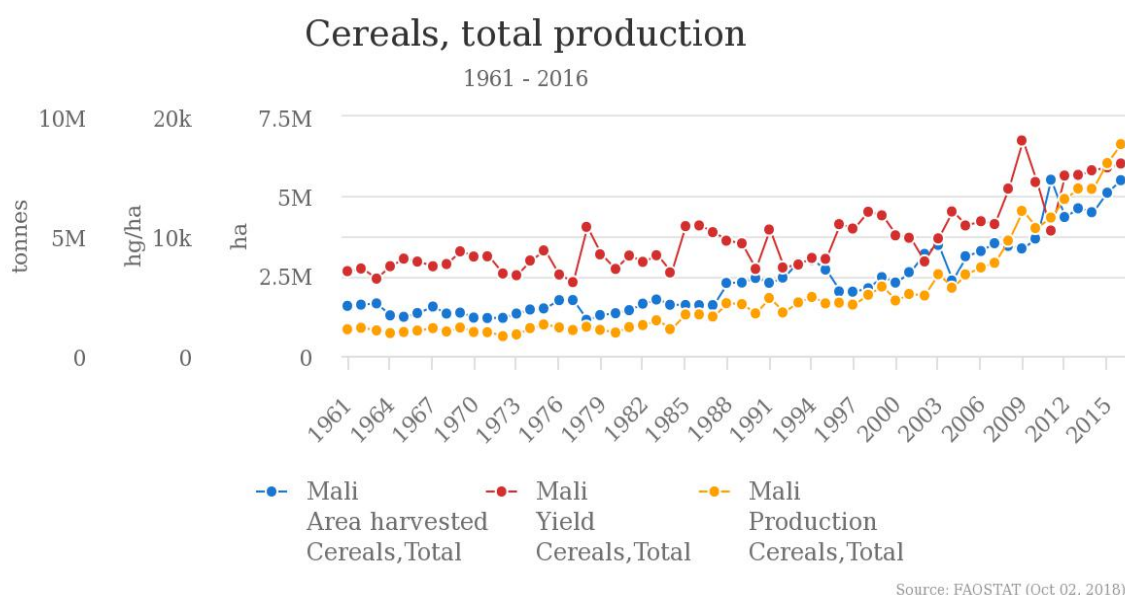
- **Une production et une consommation dominée par les céréales et le riz ...**

L'agriculture du Mali est essentiellement vivrière avec en particulier la production céréalière (FAO, 2013). Les céréales sont aussi et surtout la base de la consommation des ménages. De

ce fait elles sont décisives sur le plan de la sécurité alimentaire¹⁴ par exemple les cultures du mil et du sorgho fournissent en moyenne 30% des apports caloriques journaliers (SPAAA, 2013).

La culture céréalière a présenté d'importants taux de croissance en termes de production avec une croissance annuelle moyenne de 4,66% entre 2011-2016 (EAC-CPS/SDR, 2016). A noter que cette croissance reflète plus l'expansion des superficies cultivées qu'une progression du rendement (0,49 % de taux de croissance entre 2011-2016). Autrement dit, les céréales (à l'exception du riz) sont des cultures extensives au Mali en ce sens que l'augmentation des productions résulte en grande partie d'une augmentation des superficies. La superficie totale cultivée en céréales (riz, mil, sorgho, maïs, fonio, blé et orge) est passée de 1 597 025 ha en 1984/1985 à 3 914 806 ha en 2008/2009. Elle a donc plus que doublé en l'espace de 25 ans. On estime le taux de croissance moyenne des emblavures à 2,2% par an. On note par ailleurs, selon les statistiques nationales, que la tendance des rendements est croissante avec une production qui dépasse 1 tonne par ha (Figure 1.4).

Figure 1. 4 : Evolution des productions, des superficies et des rendements de céréales au Mali



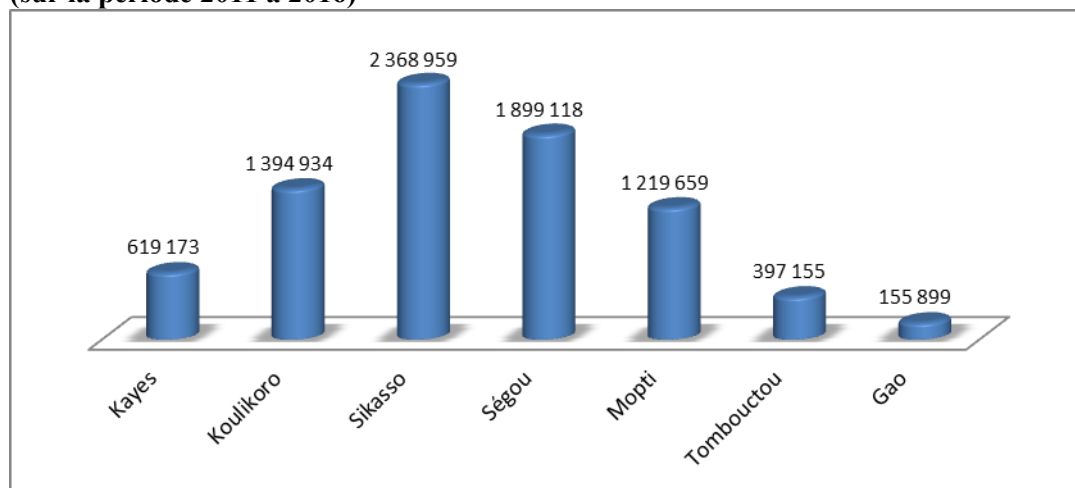
Source: site de la FAO

¹⁴ L'importance de la production céréalière dans l'agriculture au Mali et son rôle stratégique dans la consommation des ménages et la lutte contre l'insécurité alimentaire font que cette thèse se focalise sur les céréales.

En 2007, les céréales représentaient 72 pour cent des superficies cultivées au Mali (Samaké, Bélières et al, 2008a). La production céréalière annuelle moyenne lors des 5 dernières années est estimée 6 644 775 tonnes¹⁵. Pour la campagne agricole 2015-2016, la production totale a atteint un chiffre record de 8 054 896 de tonnes dont 29% de riz. Cette production nationale de la dernière campagne agricole représente une hausse de 15,4 % par rapport à la campagne précédente (2014-2015).

Cette production céréalière élevée cache d'importantes disparités dans les quantités produites entre les différentes régions du Mali comme le montre la Figure 1.5. En 2015-2016, les céréales sont produites pour l'essentiel dans les régions de Ségou, Sikasso, Koulikoro, Mopti, et Kayes respectivement de 29%, 24%, 17%, 15% et 8% de la production totale de céréales.

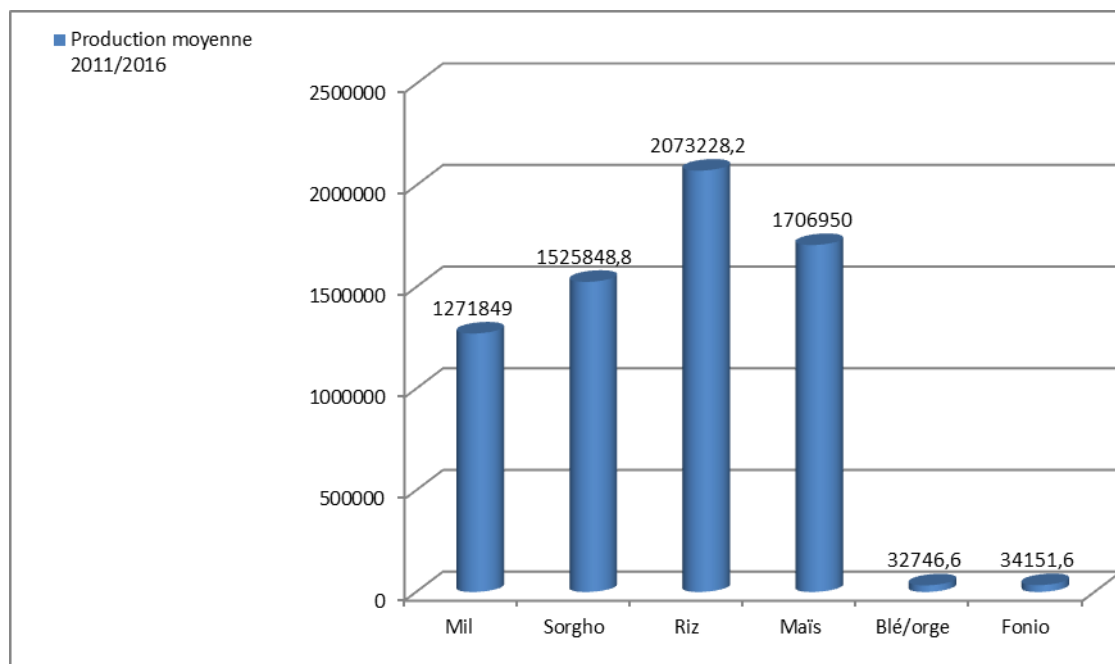
Figure 1. 5: Production annuelle moyenne de céréales dans les régions du Mali (sur la période 2011 à 2016)



Parmi les céréales, le maïs a la production la plus importante avec une production annuelle moyenne 1 706 950 tonnes sur la période 2011 à 2016. La note d'information N° 2012-2 du PROMISAM relève aussi que depuis une vingtaine d'années, le maïs est la céréale sèche qui a connu la croissance la plus rapide au Mali, avec une production passant d'environ 200 000 tonnes en 1991 à près de 700 000 en 2009. Une revue documentaire nous montre que cette tendance à la hausse reste d'actualité car la production de maïs était de 2 276 036 tonnes pour la campagne agricole 2015/2016 d'après le rapport de l'EAC 2015/2016 (Figure 1.6).

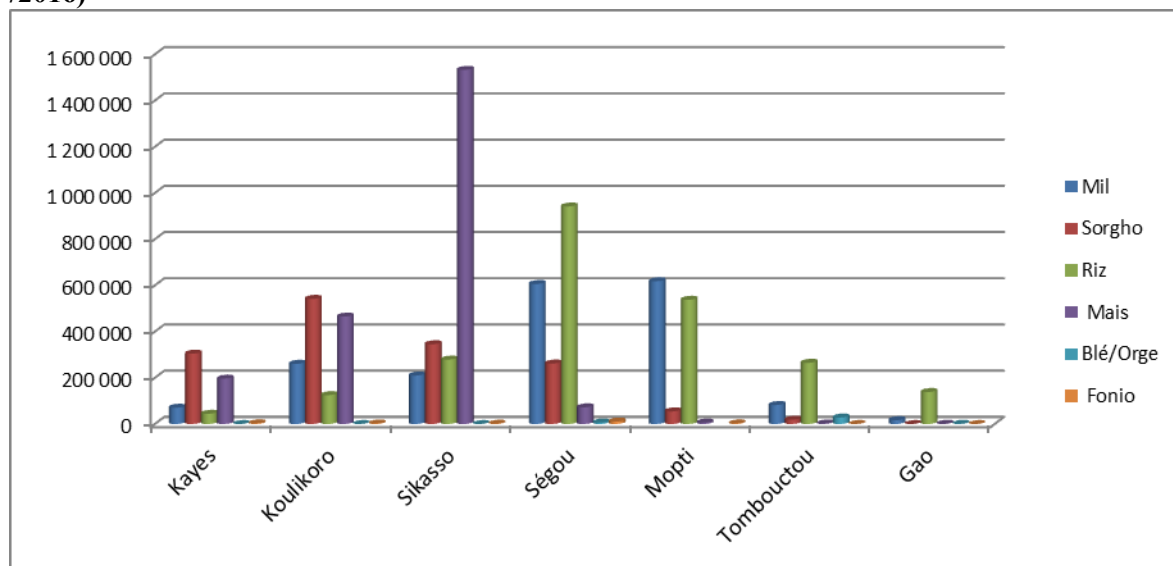
¹⁵ Chiffre obtenu à partir des tableaux 21, Page 26 du rapport de Juin 2016 du CPS/SRD du Ministère de l'agriculture du Mali.

Figure 1. 6: Production annuelle moyenne par type de céréales (sur la période 2011 à 2016)



Les régions centrales autour de Ségou et Sikasso jouent le rôle important dans la production des céréales (Figure 1.7).

Figure 1. 7: Production annuelle moyenne par type de céréales et par région (sur la période 2011 /2016)



Une importante partie de la production des céréales est autoconsommée par les familles de producteurs et une autre est commercialisée sur le marché domestique. Une faible quantité est exportée, uniquement dans la sous-région.

3. Les manifestations du changement climatique au Mali

Le premier signe du changement climatique est la hausse globale de la température aussi bien dans l'atmosphère que dans les océans. Pour le Mali, Butt et al. (2005) utilisent des modèles de projection de climat HADCM et CGCM. Ces auteurs montrent qu'au Mali, à l'horizon 2030, les températures moyennes pourraient augmenter de 1°C à 2,75°C avec une baisse des précipitations. En considérant un horizon plus lointain (i.e. 2100), le rapport 2012 sur le Développement Durable au Mali indique que de 2012 à 2100, la température pourrait augmenter d'environ 0,2°C par décennie et la pluviométrie pourrait diminuer d'environ 20% par décennie. L'augmentation des températures entraîne de nombreuses autres manifestations. Au Mali les principaux signes perceptibles du changement climatique sont les inondations, les vents violents, les sécheresses.

Les travaux de Wilhite (2000) sur la sécheresse au Mali, montre que la sécheresse est classée premier parmi les événements à risque à l'échelle de la planète (Table 1.1). Ce classement s'explique par le fait que son impact est très important pour la quasi-totalité des facteurs d'impacts étudiés (notamment : le degré de sévérité, la durée de l'évènement, les pertes en vie, les pertes économiques ...). Ce classement nous suggère de porter une attention particulière à la sécheresse.

Table 1. 1: Classement des événements de risque par caractéristiques et impacts

Overall rank ^b	Event	Grading of characteristics and impacts ^a								Occurrence of associated hazards
		Degree of severity	Length of event	Total areal extent	Total loss of life	Total economic loss	Social effect	Long-term impact	Suddenness	
1	Drought	1	1	1	1	1	1	1	4	3
2	Tropical cyclone	1	2	2	2	2	2	1	5	1
3	Regional flood	2	2	2	1	1	1	2	4	3
4	Earthquake	1	5	1	2	1	1	2	3	3
5	Volcano	1	4	4	2	2	2	1	3	1
	Extra-tropical									

Note : a- Les caractéristiques et les impacts des événements à risque sont représentés dans les colonnes. Les impacts sont classés sur une échelle de 1 (très important) à 5 (importance faible), b- le classement général (en ligne) est basé sur le classement moyen. Ce tableau est une reproduction partielle de la Table 1.1 tiré de l'article de Donald A. Wilhite (2000).

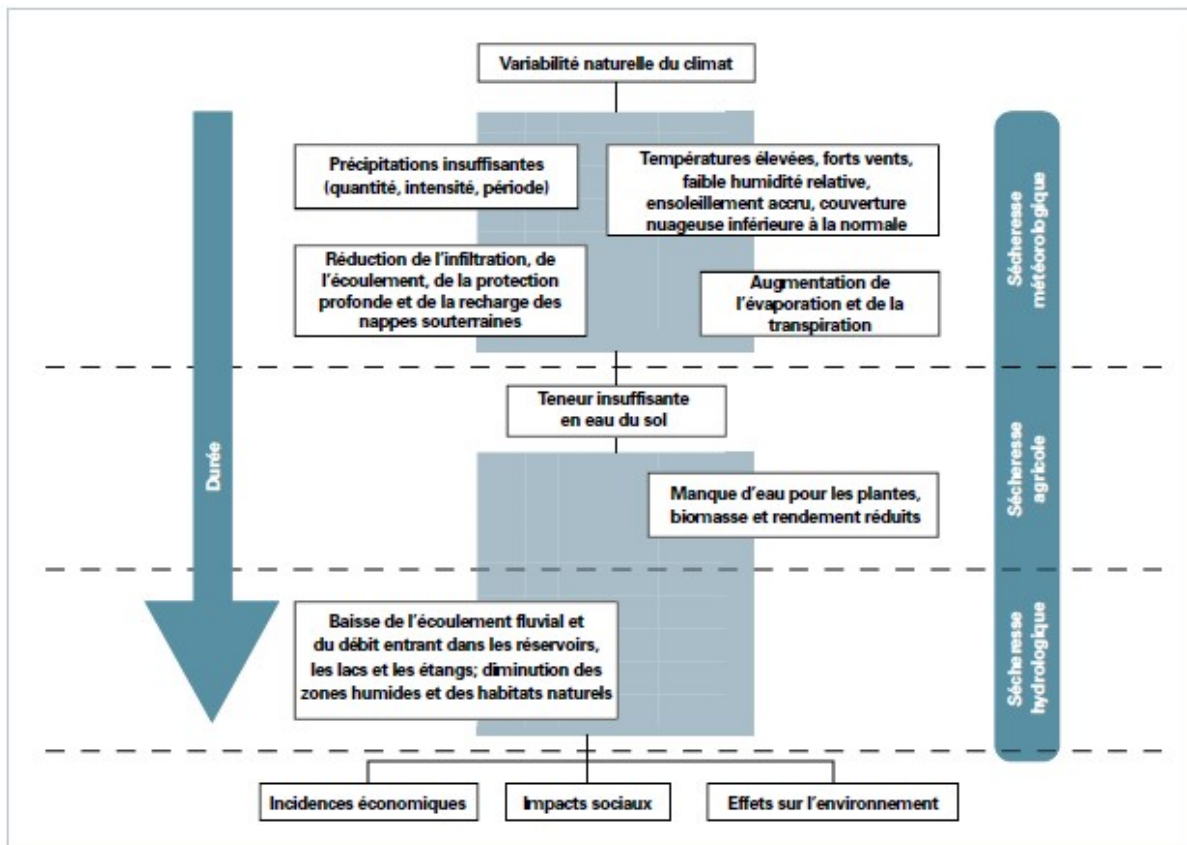
3.1. La sécheresse, un phénomène climatique extrême : définition de la sécheresse

La sécheresse n'admet pas une définition universelle. L'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM) définit la sécheresse comme étant une période prolongée de précipitations insuffisantes, qui causent un déficit d'eau, qui touchent en même temps une multitude de secteurs (économique, sociaux, et environnementaux) et une large population. La sécheresse, peut aussi être définie comme un phénomène récurrent du climat qui diffère des autres fluctuations climatiques par le fait qu'elle s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années. Ce déficit cumulé de précipitations peut se manifester rapidement sur une courte période, mais cela peut aussi prendre des mois avant que le manque d'eau se traduise par une diminution du débit des cours d'eau et une baisse du niveau des réservoirs ou de la nappe phréatique (OMM, 2006).

L'OMM distingue la sécheresse de type météorologique, agricole et socio-économique (Figure 1.8). La sécheresse de type agricole étant la présence dans le sol d'une quantité d'eau insuffisante pour assurer la croissance des cultures et du fourrage. En cela la sécheresse agricole se différencie de la sécheresse météorologique qui traduit l'écart des quantités de précipitations par rapport aux valeurs normales sur une période prolongée. Il y a sécheresse socio-économique lorsque la demande pour un bien excède l'offre à cause d'un manque hydrique relié au climat.

L'incidence de la sécheresse peut être néfaste pour l'agriculture et la sécurité alimentaire, la production d'hydroélectricité, les activités industrielles, la santé humaine et animale, la sécurité des moyens de subsistance et celle des personnes (quand les femmes doivent parcourir de grandes distances pour aller chercher de l'eau, par exemple) et l'accès à l'éducation (quand les filles ne vont plus à l'école car la corvée d'eau prend trop de temps).

Figure 1. 8 : les types de sécheresse



Source: Centre national de lutte contre la sécheresse, Université du Nebraska–Lincoln, États-Unis d’Amérique

La sécheresse s’installe lentement dans une localité et se développe au cours du temps. Comme d’autres aléas climatiques, la sécheresse peut être décrite par son intensité, son emplacement, sa durée et son moment d’apparition.

3.2. Caractérisation de la sécheresse : les indices qui permettent de l’appréhender

Pour caractériser la sécheresse on retrouve dans la littérature une multitude d’indices qui ont été développés. Un indice de sécheresse est une représentation numérique de l’intensité des sécheresses et il est calculé à partir d’un ensemble d’indicateurs.

Les indicateurs de sécheresse sont des variables qui décrivent les conditions de sécheresse (les précipitations, la température, l’écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l’humidité du sol et le manteau neigeux). Le manuel fourni par l’OMM (2016) présente les indices de sécheresse et compare leurs avantages et inconvénients. Dans ce chapitre, nous

présentons¹⁶ ici trois indices de sécheresse qui sont les plus utilisés dans les études en économie agricole. Il s'agit du Palmer Drought Severity Index (PDSI) développé par Palmer (1965), le Standardized Precipitation Index (SPI) développé par McKee et al. (1993) et le Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) de Vicente-Serrano et al. (2010).

- **Palmer Drought Severity Index (PDSI)**

Développé par Wayne Palmer en 1965, l'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) utilise des données de précipitations, de températures et de la teneur du sol en eau pour mesurer la sécheresse. Il est fondé sur un modèle de « l'offre et de la demande » de l'eau. Élaboré principalement pour déceler les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture, le PDSI a également servi à détecter et suivre les sécheresses qui ont d'autres types d'impacts. S'il est vrai que le PDSI est un point départ important des études portant sur l'élaboration des indices de sécheresses, il comporte cependant des limites : il ne tient pas compte des ressources hydrologiques de surface pouvant influencer les conditions de sécheresse, comme les cours d'eau, les réservoirs, la couverture neigeuse ou le gel du sol. Une autre limite est qu'il ne tient pas compte des changements pouvant survenir dans l'utilisation des ressources en eau. Sur le plan empirique, il est reproché à l'indice de Palmer d'être fondé sur des paramètres qui ont été déterminés de manière empirique et principalement testés aux États-Unis. Cela limite son utilisation dans d'autres régions et empêche les comparaisons géographiques basées sur le PDSI (voir Akinremi et al. , 1996, Heim 2002). De plus l'échelle temporelle est de 9 mois ce qui crée un retard dans la détection de la sécheresse. Wells et al. 2004 a résolu ce problème en développant une variante du PDSI : les indices Palmer auto-calibrés. Ils sont spatialement comparables et ils rendent compte des événements d'humidité et sécheresse extrêmes à des fréquences qui correspondent aux conditions rares.

$$PDSI_i = 0,897 * PDSI_{i-1} + Z_i/3$$

Où $PDSI_i$ est l'indice de Palmer pour le mois i

$PDSI_{i-1}$ est l'indice de Palmer pour le mois $i-1$

¹⁶ Les indicateurs et les indices présentés décrivent les caractéristiques hydrométéorologiques des sécheresses, sans considérer les facteurs socio-économiques et environnementaux qu'il est parfois nécessaire de prendre en compte pour évaluer et anticiper les conséquences et les impacts.

Z_i est le « Moisture Anomaly index » ou indice de l'anomalie en humidité dont la formule est donnée par $Z_i = K(P - P_e)$ où K est un facteur de poids, P est la précipitation observée en mm et P_e est la précipitation en mm de CAFEC (c'est-à-dire Climatically Appropriate for Existing Conditions). $P_e = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL$.

Dans cette équation $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$ sont des coefficients climatiques à estimer pour le mois de l'année j et PE, PR, PRO et PL sont exprimés en millimètre et représentent respectivement l'évapotranspiration potentielle, la recharge du sol potentielle, le ruissellement potentiel, la perte d'eau potentielle dans le sol. La table 1.2 donne la classification de l'indice PSDI d'après Palmer.

Table 1. 2: Classification de l'indice PSDI d'après Palmer

Valeurs du PSDI	Conditions hydro-climatiques
4.0 et plus	Extrêmement humide
3.0 à 3.99	Très humide
2.0 à 2.99	Modérément humide
1.0 à 1.99	Légèrement humide
0.5 à 0.99	Très légèrement humide
0.49 à -0.49	Proche de la normale
1.0 à 1.99	Légèrement sec
2.0 à 2.99	Modérément sec
3.0 à 3.99	Sévèrement sec
4.0 et plus	Extrêmement sec

Source: NOAA

- **Standardized Precipitation Index (SPI)**

Le SPI développé par McKee et al. (1993) est déterminé à partir de techniques statistiques qui permettent de quantifier l'écart des précipitations d'une période par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période qu'ils s'agissent des déficits (sécheresse) ou des surplus (inondation). Le principe de calcul du SPI est basé sur la comparaison des précipitations d'une période donnée (3, 6, 12 ou 24 mois) avec des données historiques de précipitation. Par exemple un indice SPI pour détecter une sécheresse sur une période de 6 mois (de Juin à Novembre) d'une année donnée consistera à comparer les données de précipitations de ce semestre avec l'ensemble des données de précipitations de tous les semestres allant de Juin à Novembre pour toutes les années de la longue série de données.

Le calcul du SPI a pour point de départ une fonction de densité de probabilité Gamma obtenu sur l'histogramme qui représente la distribution des précipitations pendant la période de référence. Cette fonction de densité de Gamma est ensuite utilisée pour déterminer la probabilité cumulée d'un niveau de précipitation particulier correspondant à l'échelle de temps choisi. Le résultat est enfin transformé en une distribution normale de moyenne 0 et de variance 1 ce qui permet d'obtenir les valeurs de SPI exprimées en écart type par rapport à la médiane.

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_p}$$

Où P est la précipitation d'une période (par exemple 6 mois) en mm, P_m est Précipitation moyenne historique de la période (par exemple de tous les semestres) en mm, σ_p est L'écart type historique des précipitations de la période en mm.

McKee et al. (1993) établissent une classification pour définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI (Table 1.3). Une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif.

Table 1. 3: Classification de l'indice SPI d'après McKee et al.

Valeur du SPI	Conditions hydro-climatiques
2.0 et plus	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Très humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
- 0.99 à 0.99	Légerement humide
-1.0 à -1.49	Modérément sec
-1.5 à -1.99	Sécheresse sévère
-2.0 et moins	Extrêmement sec

Source: McKee et al. (1993)

Le SPI est relativement simple à calculer, spatialement consistant, temporellement flexible (en ce sens qu'il permet de déterminer les déficits de précipitations pour différentes échelles). De plus, le SPI n'est pas influencé par les effets d'échelle car il calcule une valeur standardisée partant de la moyenne de long terme du trend. Toutes ces propriétés du SPI sont en effet ses avantages comparé à plusieurs autres indices de sécheresse à l'instar du PDSI (Blanc 2010 ; Khan, 2008). Cependant la critique faite au SPI s'appuie sur deux hypothèses liées au fait

qu'il s'appuie uniquement sur les précipitations (i) la variabilité des précipitations est supposée être très supérieure à celle des autres variables climatiques comme la température et l'évapotranspiration potentielle et (ii) les autres variables sont supposées être stationnaires (Vicente-Serrano, 2012). Le Standardized Precipitation Evapotranspiration Index que nous présentons plus en détails ci-dessous corrige les limites sus mentionnées.

- **Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)**

Le SPEI développé par Vicente-Serrano et al. 2010, permet de rendre compte de la disponibilité en eau comme le PDSI et le SPI. Il est construit à partir de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle avec une distribution Log-logistique. L'évapotranspiration étant la combinaison de perte d'eau du sol c'est à dire l'évaporation et de perte d'eau du couvert végétal c'est-à-dire la transpiration (Maman et al. 2003).

Le SPEI est basé sur la différence (D_i) entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration (ETP)¹⁷ au cours d'un mois (i) :

$$D_i = P_i - ETP_i$$

Cette différence D_i reflète donc le déficit ou le surplus en eau pour le mois considéré. Par la suite, toutes les différences mensuelles sont cumulées suivant l'échelle temporelle (K) considérée (par exemple K peut être égale à 2 mois, 6 mois ...) pour données.

Le SPEI et le SPI sont fortement corrélés (Vicente-Serrano et al. 2012). Ainsi le classement du SPI (valeur de l'indice Vs intensité de sécheresse) peut s'appliquer au SPEI.

Le SPEI est de plus en plus préféré au SPI et au PDSI en raison des avantages qu'il présente (Vicente-Serrano, 2012). Le premier avantage de l'indice SPEI est qu'il combine les effets des températures et des précipitations et c'est ce qui le distingue de l'indice SPI dont la principale critique est d'être calculée uniquement à partir des précipitations. Un autre avantage du SPEI est qu'il permet l'identification du début et de la fin de la sécheresse et la comparaison des épisodes de sécheresses selon leurs gravités dans le temps et dans l'espace. Ceci est particulièrement important dans la mesure où le climat est un phénomène complexe et dynamique. De plus, au-delà d'être facile à calculer, le SPEI peut être déterminé pour

¹⁷ L'évapotranspiration est fonction des températures (ETP). Le calcul de l'ETP peut être consulté dans Vicente-Serrano et al. 2010

différentes échelles temporelles (1 à 3 mois, 6 mois, 12 à 24 mois) suivant la procédure que le SPI. À cet égard, le SPEI est capable de décrire un large éventail de conditions hydro-climatiques et c'est ce qui le différencie de l'indice PDSI qui bien que tenant compte de la disponibilité en eau, ne peut être calculé que pour une période relativement longue (entre 9 et 12 mois). Enfin, le SPEI est un indice standardisé, et en cela il permet la comparaison entre différentes conditions hydro-climatiques c'est-à-dire la comparaison du climat entre différentes zones géographiques. Le Table 1.4 résume ces trois indices.

Table 1. 4: Présentation des différents indices de sécheresse

		Indicateurs de sécheresse		
		PDSI	SPI	SPEI
Caractéristiques	Auteurs	Palmer, W.C (1965)	T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist (1993)	Sergio M. Vicente-Serrano, Santiago Beguería, Fergus Reig, Borja Latorre (2010)
	Paramètres d'entrée	Précipitations Evapotranspiration	Précipitations	Précipitations Température
	Principaux avantages	• Valeurs de sortie facile à obtenir	• Simple à calculer • temporellement flexible • possibilité de calculer l'indice sur des échelles différentes • spatialement consistant : possibilité de comparaison	• Résultats comparables car normalisation lors du calcul • Prise en compte des températures • déterminé pour différentes échelles temporelles (1 à 3 mois, 6 mois, 12 à 24 mois)
	Principales limites	• Nécessité de disposer une série complète de données • Complexité des calculs • L'échelle temporelle est de 9 mois d'où le retard dans la détection de la sécheresse	• Les précipitations sont les seules valeurs d'entrée	• Nécessité de disposer une série complète de données
	Sources	http://hydrology.princeton.edu/data.pdsi.php	http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx	http://spei.csic.es/

Source : l'auteur à partir de la revue de la littérature

La sécheresse comme les autres manifestations du changement climatique impactent l'agriculture. Pour évaluer l'impact de nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature.

4. Méthodes d'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture et bases de données utilisées

La vulnérabilité de l'agriculture aux aléas météorologiques pose le défi important de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la production agricole. Une importante littérature s'est consacrée à proposer des méthodes permettant de faire face à ce défi. Trois méthodes sont proposées à cet effet : les modèles biophysiques de simulation des plantes, l'approche hédonique (aussi appelée approche Ricardienne), et l'approche statistique. Compte tenu des contraintes liées à la disponibilité des données, dans ce chapitre nous adoptons une méthode plus simple basée sur l'analyse exploratoire des données. Nous présentons cependant les trois méthodes les plus utilisées dans la littérature.

4.1. Méthodologie adoptée dans ce chapitre pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture au Mali

Les méthodes d'évaluation de l'impact du changement climatique sur la production agricole présente chacune des avantages même si quelques limites ont été relevées. Dans le cadre de la présente étude, plusieurs contraintes font qu'aucune de ces trois approches n'est applicable. En effet, la méthode de simulation de culture requiert une logistique, une période de temps considérable nécessaire pour l'observation de la croissance des plantes et une connaissance plus poussée en agronomie. De plus c'est une expérimentation qu'il n'est pas aisé d'envisager compte tenu du contexte spécifique du Mali. Par ailleurs, utiliser le modèle ricardien suppose que l'on dispose des informations sur le revenu net de l'exploitation ou sur la valeur de la terre. Les bases de données que nous disposons ne comportent pas ces variables. Nous aurions pu utiliser les modèles statistiques car ils n'exigent pas d'avoir l'information sur le revenu net de l'exploitation ou la valeur des terres, la base de données requise est plus légère. Cependant, dans le cas du Mali les données de panels sur les rendements des cultures sont limitées.

Considérant les contraintes à l'application des méthodes proposées dans la littérature, nous adoptons une analyse purement descriptive. Même si elle peut être jugée simpliste, l'analyse descriptive et exploratoire des données fournies une idée de la relation entre le changement climatique et la production agricole, toute chose égale par ailleurs.

4.2. Les modèles biophysiques de simulation de croissance des plantes

Ces modèles sont réalisés à partir de la culture des plantes sur des terrains expérimentaux. La croissance des cultures est simulée en tenant compte des facteurs tels que les propriétés des sols, la disponibilité de l'eau, la température et la dynamique de l'azote dans le sol (Hertel et Rosch, 2010). Les facteurs de gestion sont également pris en compte notamment, le choix des variétés de semences, le choix de la date de semis, les quantités plantées, l'écartement des rangs et l'irrigation. De plus, les phases de développement des cultures sont modélisées par des équations mathématiques. Dans un premier temps, les équations de base sont établies, puis elles sont calibrées. Pour réaliser du contrefactuel, il est possible de leur soumettre de nouvelles valeurs de concentration en gaz à effet de serre reflétant un scénario climatique possible. À cet effet, des niveaux différents de concentration en CO₂ peuvent être testés. Il est alors possible d'observer la réponse potentielle des cultures selon différents scénarios climatiques. Ainsi, simuler l'impact des changements climatiques sur la production agricole est possible en observant les quantités produites suite à des variations des niveaux de températures et de précipitations. (Hertel et Rosch, 2010).

Ces modèles présentent l'avantage d'être à mesure de capter les effets fertilisants du CO₂ car ce gaz à effet de serre affecte non seulement le climat, mais il joue aussi un rôle dans le processus physiologique de la photosynthèse et de la transpiration (Field et al., 1995). Cependant, la principale limite des modèles de simulation de croissance de cultures est qu'ils ne tiennent pas compte du fait que les agriculteurs sont des agents rationnels capables de s'adapter aux changements climatiques. Cette limite leur a valu le nom « méthodes de l'agriculteur muet », (Mendelsohn et al. 1994). L'omission de la capacité d'adaptation de l'agriculteur conduit à surestimer les impacts négatifs des changements climatiques. Pour pallier à cette limite Mendelsohn et al. (1994) ont proposé l'approche hédonique permettant d'estimer l'impact du Climat sur l'agriculture à partir de la valeur foncière des terres en prenant en compte la capacité d'adaptation des agriculteurs.

4.3. Le modèle hédonique ou approche ricardienne

Le modèle hédonique pour estimer les impacts du changement climatique sur l'agriculture est issu des travaux de Mendelsohn et ses collègues (Mendelsohn, Nordhaus, et Shaw, 1994, 1996, 1999). Elle est encore appelée méthode ricardienne en référence aux travaux théoriques pionniers de l'économiste classique David Ricardo du 19^{ème} siècle. Selon Ricardo, les agriculteurs sont supposés, toutes choses étant égales par ailleurs, maximiser leurs profits en utilisant des terres dont la productivité décroît naturellement au fil du temps, en rapport avec le climat et la qualité du sol. Ainsi, sous l'hypothèse d'un bon fonctionnement des marchés, la rentabilité potentielle d'une parcelle de terre devrait être reflétée dans sa valeur du marché. Dès lors, les variations spatiales du climat conduisent à des variations spatiales des valeurs des terres. S'appuyant sur cette hypothèse, l'approche hédonique utilise des données transversales pour estimer les relations de long terme entre la valeur des terres agricoles et les variables climatiques.

De façon empirique la valeur des terres ou les revenus nets de l'exploitation sont régressés sur les variables climatiques, les variables caractérisant les types de sols, les variables géographiques et les variables économiques qui sont indépendantes du choix de l'agriculteur (Mendelsohn 2009). Cette méthode suppose également que les prix sont constants (Kurukulasuriya et Mendelsohn, 2008) et que les agriculteurs ajustent leurs intrants et les pratiques agricoles pour profiter au mieux des avantages de l'emplacement de la ferme, et du climat (Mendelsohn 2009; Seo et Mendelsohn 2008). Les coefficients estimés pour les variables climatiques reflètent le coût économique de l'effet des changements climatiques sur l'agriculture, les autres facteurs étant constants. A titre illustratif, mentionnons les travaux de Mendelsohn, Nordhaus, et Shaw (1994) qui indiquent qu'une augmentation des températures moyennes en juillet de 1° F dans les quarante-huit États américains contigus, devraient diminuer la valeur des terres de 155 \$ par ha en moyenne (calculée en dollars de 1982). Ces relations statistiques sont appelées sensibilités climatiques ricardiennes (Polsky, 2004).

Le modèle hédonique a deux principales limites. D'abord, elle est sensible aux biais de variables omises. En effet, l'omission de certaines variables, potentielles explicatives de la relation climat – agriculture, conduit à biaiser l'ampleur de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture. Deuxièmement, cette méthode suppose que les agriculteurs sont des agents économiques parfaitement rationnels, de sorte que les relations économétriques ne varient pas de façon significative au fil du temps et sont exclusivement déterminées par les conditions locales. Pour pallier à ces limites les méthodes statistiques ont été développées.

4.4. Approche statistique

La méthode statistique s'appuie sur des observations historiques pour évaluer des effets du changement climatique sur les cultures. Elle consiste à estimer les relations statistiques entre les rendements des cultures et les variables climatiques telles que les précipitations, et les températures (Schlenker et Roberts, 2006 ; Lobell et al., 2008 ; Schlenker et Lobell, 2010). Ainsi, les conditions climatiques agissent comme une "expérience naturelle" ce sont des variables exogènes du modèle. Schlenker (2009) préconise une approche sur données de panel dans laquelle une section transversale des rendements est suivie au cours du temps, en utilisant des effets fixes pour tenir compte de l'emplacement précis des déterminants de la production agricole. Contrairement au modèle de simulation de culture, dans le modèle statistique, le chercheur est seulement capable d'observer l'issue de l'expérience sans pour autant contrôler la quantité de l'intrant naturel.

Le modèle statistique présente plusieurs avantages. Les échelles spatiales et temporelles sont plus importantes que celles utilisées dans les analyses de simulation de cultures. De plus, une fois que le modèle statistique est estimé, il est aussi possible de lui soumettre de nouvelles conditions météorologiques et de prédire quelle sera la réponse de la variable d'intérêt. La valeur prédite peut par conséquent être comparée à la réalisation historique, et le changement peut alors être attribué à la variation des conditions climatiques.

Malgré les avantages des modèles statistiques, quelques limites sont à relever. En effet, ces modèles peuvent se heurter au problème de multicolinéarité (Sheehy et al., 2006 ; Lobell and Ortiz-Monasterio, 2007). Le fait est que, dans le modèle statistique, plusieurs variables climatiques peuvent être utilisées pour estimer les variations des rendements. Or ces variables peuvent être colinéaires. De plus pour une variable climatique donnée, le chercheur peut intégrer dans le modèle les valeurs désagrégées de cette variable pour refléter les effets saisonniers (exemple : température en saison de pluie, températures en saison sèche). Dans ce cas la colinéarité entre les variables est encore plus risquée. Une autre limite de ces modèles est que, l'étude porte sur une seule culture, tout comme dans les modèles de simulation des cultures. Ce qui implique que dans ce modèle comme dans le modèle de simulation de culture, il est implicitement supposé que les agriculteurs ne peuvent pas s'adapter à un environnement variable offrant de nouvelles conditions climatiques.

4.5. Bases de données utilisées

Les données sur l'agriculture utilisées dans ce chapitre proviennent de diverses sources dont les principales sont : le Recensement Général Agricole du Mali 2004/2005 (RGA), les Enquêtes Agricoles de Conjoncture du Mali (EAC), le site de l'organisation des nations unies pour l'alimentation (FAO) et le site de la Banque Mondiale. L'Appendice A, présente plus en détails les données provenant du RGA et de l'EAC. Ces deux bases de données contiennent des informations sur les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs, les caractéristiques des parcelles, les quantités d'intrants utilisés et les rendements agricoles. Les données météorologiques que nous utilisons dans ce chapitre sont extraites de la base climatique CRU TS3.

5. Résultats

Avant de montrer la corrélation entre les variables climatiques et la production des céréales, nous présentons les statistiques régionales sur la sécheresse. La sécheresse étant ici les valeurs de l'indice SPEI que nous avons calculé. Nos résultats montrent que les sécheresses observées à l'échelle globale du Mali cachent des spécificités régionales (Table 1.5). Autrement dit, suivant les années, certaines régions du Mali sont plus touchées par la sécheresse que d'autres. En effet, on relève que pour bon nombre de régions, la sécheresse (i.e. valeur minimale du SPEI) est survenue dans les années 1980. Plus précisément, la plus faible valeur du SPEI à Kayes est enregistrée en 1985, à Kidal et Ségou en 1988, à Koulikoro et Sikasso en 1984. On remarque aussi que les écarts types du SPEI sont importants ce qui traduit l'instabilité dans le climat.

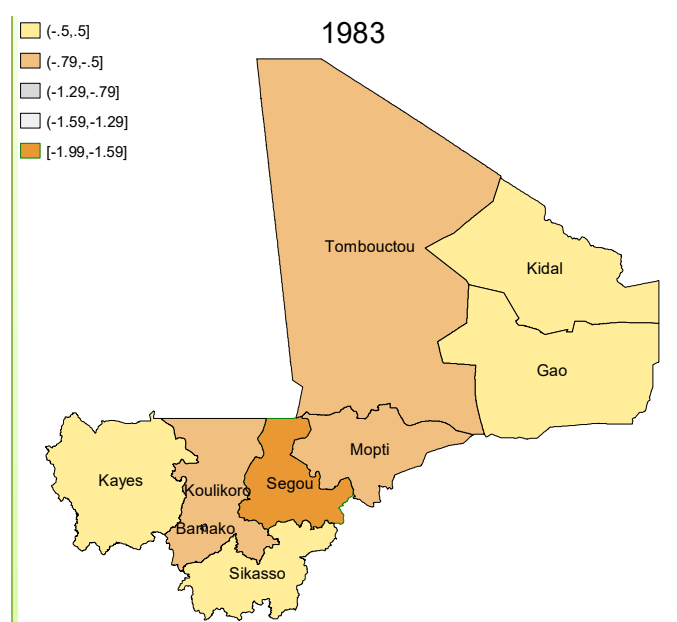
Table 1. 5: Statistiques régionales sur la sécheresse (valeur du SPEI)

Région	Min du SPEI		Max du SPEI		Ecart type du SPEI
		Année		Année	
Gao	-1,65	1985	2,07	2000	1,00
Kayes	-1,68	1988	2,11	2009	0,99
Kidal	-1,79	2001	1,70	1990	0,99
Koulikoro	-2,13	1984	1,81	2011	0,99
Mopti	-2,62		2,16		1,02

		2003		2011	
Ségou	-2,24		1,95		1,01
		1988		2000	
Sikasso	-1,94		1,72		0,99
		1984		1992	
Tombouctou	-1,56		1,71		0,99
		1998		2000	

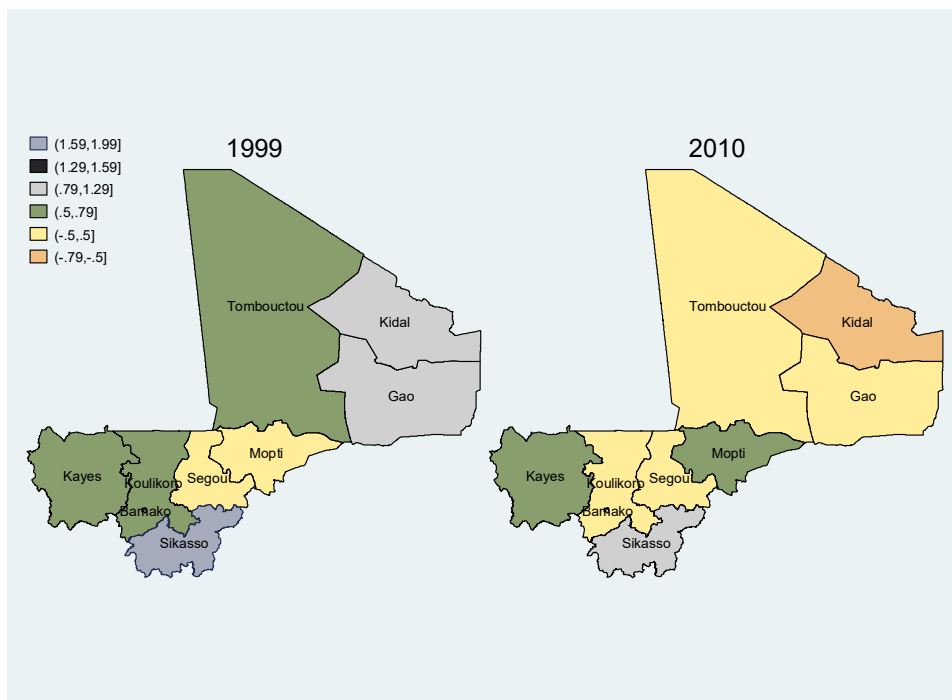
Bien que le début véritable des sécheresses au Mali se situe à l'aube des années 1970 et les années 1982, 1983 et 1984 furent plus sec (PNCC (2010) ; Météo Mali). Etant donné que ces années sont atypique du fait de l'ampleur de la sécheresse, il apparaît intéressant de voir le niveau de la sécheresse dans les différentes régions. Nous utilisons l'indice SPEI pour l'année 1983 pour produire la carte de la Figure 1.9. On remarque qu'en 1983 toutes les régions étaient touchées par la sécheresse. En effet, toutes les valeurs du SPEI étant inférieur à -0,5. La sécheresse au Mali gagne de plus en plus de terrain. Sur la Figure 1.10 on remarque que le nombre de régions touchées par la sécheresse a doublé en 10 ans passant de 2 régions en 1999 à 4 régions en 2010¹⁸.

Figure 1. 9 : Etat de la sécheresse dans les régions du Mali en 1983



¹⁸ Au sujet de la sécheresse de 2010, Simonet et al (2015) relèvent que parmi les événements récents figurent une crise induite par la sécheresse qui a touché les éleveurs nomades du nord du pays en 2010.

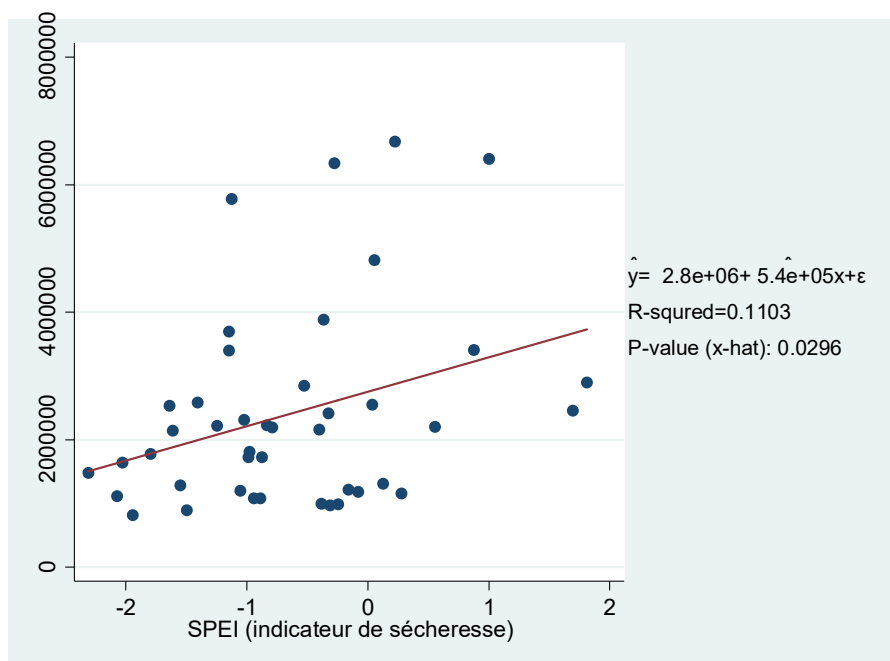
Figure 1. 10: la sécheresse au Mali en 1999 et en 2010¹⁹



La figure ci-dessous montre la corrélation entre la production de céréales et la sécheresse. On relève que la relation entre une faible intensité de sécheresse et la quantité produite de céréales est significative ($P < 0.05$) et positive. L'équation sur la Figure 1.11 nous indique que une amélioration du climat (c'est-à-dire une faible intensité de la sécheresse caractérisé avec un SPEI qui augmente de + 1)) entraînerait une augmentation de la production de céréales de + 5,4 Exp (+05) tonnes. La Table 1.6 montre la corrélation entre la production des céréales et la sécheresse mais aussi avec la température, les précipitations et l'évapotranspiration. Autrement dit la sécheresse (l'indicateur SPEI) prend bien en compte les fluctuations dans les autres variables de climat.

¹⁹ Sur cette figure, nous représentons la sécheresse grâce aux valeurs de l'indicateur SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) que nous avons calculé pour chacune de ces régions.

Figure 1. 11: corrélation entre la production de céréales et l'occurrence de la sécheresse



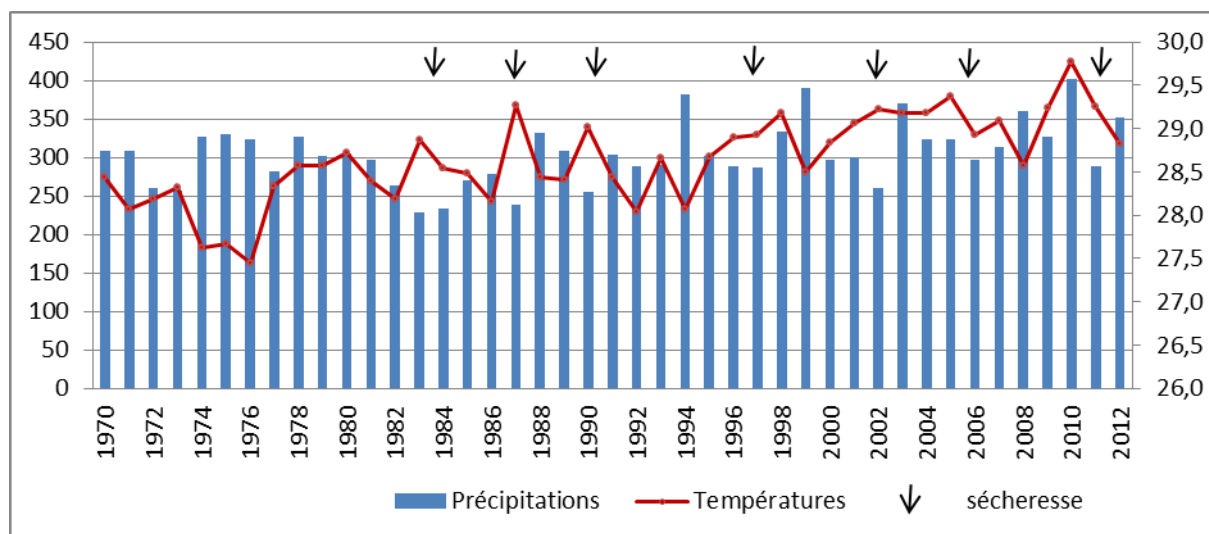
Note : Il est important de noter que plus le SPEI est élevé moins il y a de sécheresse. Ce qui explique que la relation avec la production soit positive dans ce graphique.

Table 1. 6: Corrélation entre la production et les variables climatiques

	Production	sécheresse	Précipitation	température	Evapotranspiration
Production	1.0000				
sécheresse	0.2704*	1.0000			
Précipitation	0.5046*	0.8939*	1.0000		
Température	0.5956*	-0.3151*	0.0455	1.0000	
Evapotranspiration	0.2498*	-0.6772*	-0.2877*	0.7650*	1.0000

Au Mali, le déficit pluviométrique et l'augmentation des températures constituent des facteurs explicatifs et même aggravant de la sécheresse. La Figure 1.12 illustre cette assertion. Par exemple, la sécheresse observée en 1983 est la résultante d'une baisse de la pluviométrie moyenne de 13,5% (264,18 mm 1982 contre 228,5 mm en 1983) tandis que la température moyenne annuelle a augmenté d'environ 2,5% (28,18 °C en 1982 contre 28,9°C en 1983). On relève aussi sur cette figure que lorsque les températures augmentent et restent très élevées malgré une augmentation des précipitations il y a sécheresse. Dans de telle situation l'évapotranspiration est très élevée et cela traduit l'occurrence de la sécheresse.

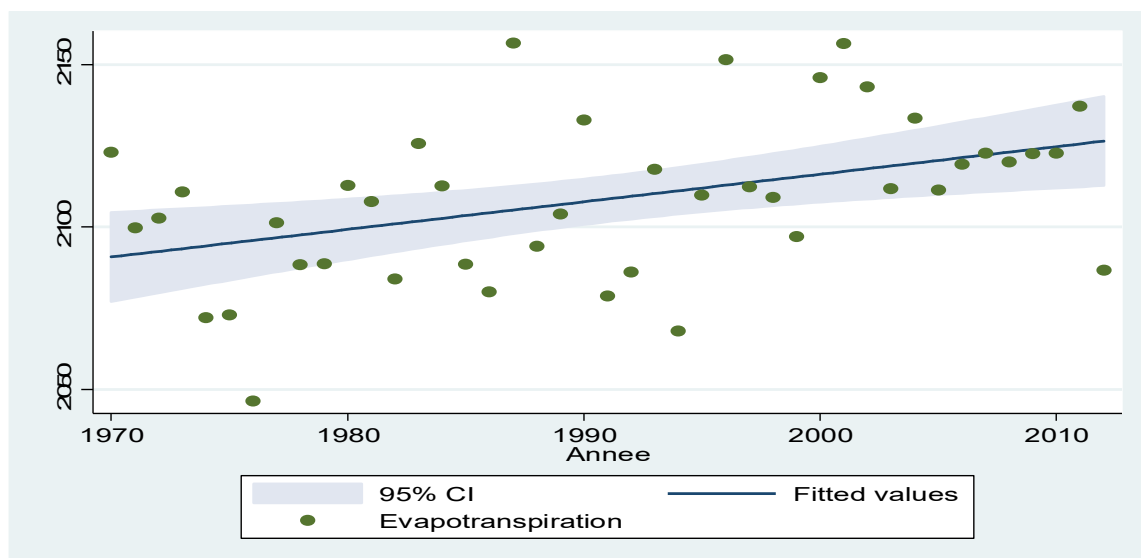
Figure 1. 12: Evolution des températures, des précipitations et occurrence des sécheresses au Mali sur la période 1970 à 2012



Source: l'auteur avec les données issues de la base CRU TS3

L'évapotranspiration est en effet la combinaison de deux processus : l'évaporation du sol et la transpiration du couvert végétal. C'est le cas de l'année 2010 pour laquelle on observe la pluviométrie annuelle moyenne la plus élevée (401,9 mm) combinée à la température moyenne annuelle la plus élevée (29,8 °C) de la période. L'évolution de l'évapotranspiration permet donc aussi de rendre compte de l'occurrence des sécheresses. La Figure 1.13 montre que l'évapotranspiration au Mali augmente dans le temps ce qui traduit le fait que le pays est de plus en plus en proie à la sécheresse. Ce constat est corroboré par le rapport de la FAO (2013) qui fait remarquer que l'évapotranspiration est très élevée même dans les zones les plus arrosées et cela à cause des températures élevées, de la faiblesse de l'humidité relative et l'effet desséchant de l'harmattan CP Mali (FAO, 2013).

Figure 1. 13: Evolution de l'évapotranspiration potentielle au Mali sur la période 1970 à 2012



- **Incidence de la sécheresse sur l'agriculture au Mali**

La sécheresse a eu des incidences importantes sur les secteurs de l'agriculture. Le quotidien des populations reste marqué par les grandes distances que les femmes rurales doivent parcourir pour aller chercher de l'eau. En outre, l'accès à l'éducation des filles se rétrécit, car prises par les nombreuses tâches ménagères, notamment la pesante corvée de l'alimentation en eau, du fait des trop longues distances. En effet, la version 2013 du Guide Méthodologique de la vulnérabilité face aux risques climatiques révèlent que les épisodes majeurs de sécheresse ont engendré une dégradation de l'environnement et des ressources naturelles comme le tarissement des points d'eau, l'abaissement du niveau de la nappe phréatique, l'élévation des températures, la perturbation de la biodiversité, la baisse de la productivité et de la production ainsi que la baisse du débit moyen des fleuves.

Le stress hydrique est aussi un facteur déterminant d'insécurité alimentaire. Selon L'édition 2017 de l'Enquête Nationale sur la Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle au Mali, le changement climatique figure parmi les contraintes aux activités génératrice de revenu. A l'échelle nationale, 0,9% de ménages interviewés lors de cette enquête ont déclaré que les aléas climatiques constituent la contrainte principale à leurs activités génératrices de revenu (ENSAN, 2017). La sécheresse affecte donc les personnes et contribuent à fragiliser l'ensemble des écosystèmes et plus particulièrement ceux des zones sahéliennes et sahélo-soudanienne. Selon le PNCC (2011) sur la période 1980-2007), le pays a connu cinq épisodes

majeurs de sécheresse et deux grandes inondations qui ont affecté près de 3 millions de personnes. Les statistiques un peu plus récentes sont celles des sécheresses de 2011-2012, accentué par l'instabilité politique et le prix encore élevés des céréales provoquent une insécurité alimentaire et de forts taux de malnutrition (taux de malnutrition aiguë globale de 8,9 % en 2012, mais supérieur au seuil de 10 pour cent pour deux régions Kayes et Ségou). (FAO, Mali country stat, 2013).

6. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de faire une analyse sur les séries de données climatiques et agricoles du Mali afin de dégager les tendances et les spécificités d'une part, et d'exhiber les corrélations entre ces séries de données d'autres part. Dans un premier temps, nous avons présenté le Mali du point de vu de sa géographie et de son secteur agricole. Il est ressorti que le Mali est un pays chaud et sec surtout dans les régions situées au Nord. Le déficit hydrique s'y est accentué dans les années 1980 et désormais la sécheresse semble s'y être définitivement installée et les effets néfastes sur le secteur agricole sont visibles. Comme impact du à l'instabilité climatique on note la baisse de la production agricole notamment des céréales, la pratique d'une agriculture extensive pour résorber l'insécurité alimentaire, la baisse du revenu des ménages qui ont pour la plupart l'agriculture comme activité génératrice de revenu. Nous avons relevé que le secteur agricole malien était dominé par les cultures vivrières constitué essentiellement des céréales tandis que les cultures commerciales sont principalement le coton et le riz.

Dans la deuxième section nous avons exposé plus général le concept de sécheresse. Cette section a été l'occasion de définir la sécheresse et de présenter les indices qui permettent de l'appréhender notamment le PDSI, le PSI et le SPEI. Pour chacun de ces indices nous avons donné la méthodologie de calcul, l'auteur, les avantages et les inconvénients. Nos résultats montrent que les sécheresses observées à l'échelle globale du Mali cachent des spécificités régionales. On relève que la relation entre une faible intensité de sécheresse et la quantité produite de céréales est significative et positive. Et cette relation s'explique par le niveau de pluviométrie, de températures et d'évapotranspiration.

Au terme de cette analyse exploratoire et de cette revue documentaire, nous relevons qu'au Mali, l'agriculture est un secteur important compte tenu de ses multiples rôles en matière de sécurité alimentaire, d'emploi et de contribution aux PIB. Or cette agriculture est pluviale et fortement dépendante de la variabilité du climat et en particulier de l'occurrence des

sécheresses. Claire est de constater aussi que la compréhension du changement climatique, ses causes, son impact et son adaptation dans le contexte malien s'est considérablement améliorée dans la littérature, avec la production de nombreux rapports et études, mais la question est de savoir s'il ne faudrait pas poursuivre cette dynamique de production scientifique en conduisant des études empiriques et plus approfondies qui se basent sur des approches multidimensionnelles et économétriques pour vérifier les constats établis par l'analyse exploratoire, la recherche documentaire et les premières études faites au Mali.

Référence

- Almoustapha Coulibaly (2003). Profil fourrager MALI. FAO, 2003.
- Arsenault, C. (2015). Drought, Expanding Deserts and 'Food for Jihad'Drive Mali's Conflict. Reuters, April, 27.
- Butt T., B. McCarl, J. Angerer, P. Dyke and J. Stuth. 2005. The economic and food security implications of climate change in Mali. *Climatic Change* 68: 355-378.
- Chaisemartin, A. M. Normann, and J. Pestiaux. Extreme climate conditions: How Africa can adapt . McKinsey's journal. June 2010.
- CPS/SRD (2016). Resultats definitifs de la campagne 2015/2016 Situation des marches regionaux.
- Ebi, K. L., Padgham, J., Doumbia, M., Smith, J., Butt, T., & McCarl, B. (2011). Smallholders adaptation to climate change in Mali. *Climatic Change*, 108(3), 423.
- FAO (2013). Mali : géographie, climat et population.
- GIEC, 2007 : bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [équipe de rédaction principale, Pachauri, r.k. et Reisinger, a. (publié sous la direction de)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages
- Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques (Novembre 2013) : gestion intégrée de la terre et de l'eau Pour l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Mali.
- McKee T. B., N. J. Doesken and J. Kleist, "The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales," 8th Conference on Applied Climatology, California, 17-22 January 1993, pp. 179-184.
- Palmer, W.C., 1965: Meteorological Drought, Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington.
- Politique de développement Agricole du Mali (2013)
- Politique nationale sur les changements climatiques au Mali, rapport final. (PNCC, 2011)

Chapitre 1 : changements climatiques et production agricole au Mali

OMM (2016). Manuel des indicateurs et indices de sécheresse.

OMM (2006). Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs.

Rapport national Sur le développement durable au Mali (Juin, 2012) : dans la perspective de RIO+20

Simonet Catherine, Janot Mendler de Suarez et Blane Harvey. 2015. Sécheresse, chocs complexes et pauvreté au Mali dans Wilkinson, E., & Peters, K. (2015). Extrêmes climatiques et réduction de la pauvreté par la résilience.

SPAAA (2013) _Suivi des politiques agricoles et alimentaires en Afrique : analyse des incitations et pénalisations pour le mil et le sorgho au mali.

Vicente-Serrano, Sergio M., Beguería, Santiago, Lorenzo-Lacruz, Jorge, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 2012, vol. 16, no 10, p. 1-27.

Vicente-Serrano, S.M.Beguería, S., López Moreno, J.I., Angulo, M., & ElKenawy, A. 2010. A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901-2006) Of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based On the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology* 11(4), 1033-1043.

Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions.

Chapter 2

Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models²⁰

²⁰ This chapter is a version of a paper co-authored with Michel Tenikué of Luxembourg Institute of Socio-Economic Research. The paper was presented during the conference of the Nopoor General Assembly meeting 6-8 July 2016, Mexico.

1. Introduction

Studies of climate change impacts on agriculture conducted on a global scale have provided evidence of the spatial heterogeneity of the impact of climate change on agricultural production. It is shown that temperature increases bring large crop losses for countries located in lower latitudes (generally countries located in the tropics), whereas, it increases crop production in countries located in higher latitudes (Mendelsohn, 2008; Rosenzweig et al., 1996). That is to say, differences of climate conditions across localities can create systematic variation among farmers' production. It is also likely that climatic conditions and, more generally, environmental conditions influence input allocation (land, labor, fertilizer etc). In practice, some farmers adjust inputs, such as labor or land, in response to environmental conditions they are facing such as climate change. That is, their managerial performance depends on climate conditions. In other words, farmers with the same production technologies and virtually similar abilities will produce different quantities of grain if faced with different intensity of temperatures, precipitation or other environmental production conditions.

Although climate is crucial for plant growth, most of the previous studies had estimated managerial performance of farmers without introducing climate variables in their analysis. By doing that, the main assumption of those studies is that all the farmers face similar environmental conditions. However, the reality is that, farmers are not all exposed to the similar environmental conditions. Indeed, environmental conditions of production are rarely symmetrically distributed among farmers. As pointed out by the work of Coelli et al. (1999) and the work of Sherlund et al. (2002), the omission of environmental condition generally leads to upward bias in estimated managerial performance of firms also called technical efficiency²¹. Let us specify that a farmer is technically efficient if he produces the maximum possible output with a minimum quantity of inputs, given the prevailing technology and environmental conditions. Therefore, failure to account for climate conditions in analysis of farmers' technical efficiency could lead to wrong conclusions. Thus, accounting for climate

²¹ In this chapter we use indifferently the expressions "managerial performance of the farmer" and "farmers' technical efficiency"

change in the analysis of farmers' performance is important from the standpoint of economy-wide impact and food security, especially for countries which are highly dependent on climate. Indeed, to improve technical efficiency, one needs an effective measure of efficiency scores, that is, one which has been purged of the climate change influences.

This statement has an important implication: there is a need for increased understanding of the impact of climate change on the farmers' managerial performance. This issue has seldom been investigated. Indeed, until now, literature on agricultural productivity has paid little attention to this issue and this research attempts to fill the gap in the farmers' technical efficiency literature by taking into account the context of climate change faced by farmers. The main objective of this chapter is to understand to what extent climate change affects farmers' technical efficiency. Our contribution to the previous literature is then the suggestion of a new econometric approach which can help meet this objective. Coelli et al. (1999) provide the starting point of this new econometric approach. To our knowledge, this is the first study that involves climate change in the estimation of farmers' technical efficiency.

Given the fact that Mali is a climate vulnerable country and considering the high dependency of its economy on a rain fed agriculture, it appears interesting to study this country. Indeed, agriculture is the most important sector for Mali's economy given its contribution. According to the CPS/SDR²² (2017) report, agriculture in Mali provided employment to nearly 80% of the total workforce²³ in 2016. Also, in terms of export income, the agricultural sector contributed to around $\frac{3}{4}$ of total exportation for the year 2015²⁴. However, findings from numerous studies highlight that in Mali food security may be threatened by climate change as high variability in temperature and rainfall impact negatively on agricultural production. This is because climate change would cause reduced soil moisture, faster depletion of soil organic matter, pre-mature drying of grain and increased heat-stress. Some evidence of climate change impacts on agriculture in Mali are brought by Chaisemartin et al. (2010): using

²² CPS stand for « Cellule de planification et de statistique du secteur de développement rural ».

²³ In the 2017 report of the « cellule de planification et de statistique du secteur de développement rural (CPS/SDR) » the following information is available: population of Mali for year 2015 was 18 083 763 according to National institute of statistics (INSTAT) and according to EAC' report for 2015/2016 agricultural population was 14 107 926.

²⁴ <http://www.statistiques-mondiales.com/mali.htm>

projection models, they found that, by 2030, climate change would lead to economic losses of 6% or 15% in the 2010' value of agriculture and livestock in Mali respectively for pessimistic and optimistic scenarios. In the same way, Butt et al. (2005) found that, by the year 2030, the risk of hunger (or should this be famine?) is projected to increase from a base level of 34 percent of the Malian population to a range of 64-70 percent due to decline in agricultural production.

The production frontiers are estimated using data on inputs, outputs and climate change from 788 cereals farmers in Mali. These farmers are from four different regions namely Kayes, Koulikoro, Sikasso, Segou and Mopti. Hence, from one region to another farmers are facing different climatic conditions. We estimate a production frontier that explicitly accounts for the influences of climate change. Second, we determine the effective managerial performance of farmers and their inefficiency due to climate change. Our analysis provides evidence that inefficiency is partly due to climate change. Our results also stress the importance of providing farmers' capacity building in terms of mixing input as technical inefficiency represents the larger part of inefficiency whereas climate inefficiency is small.

The chapter is organized as follows: Some of the conceptual issues regarding the production frontiers are analyzed in Section 2. Section 3 reviews the existing literature. Section 4, discusses the data and the methodology. The mains finding are reported in Section 5 and Section 6 concludes.

2. Conceptual issues

Technical Efficiency is used as the benchmark when it comes to evaluating the performances of Decision Making Units like farmers. Therefore, it is a key aspect which is important to be defined. Hereafter, we briefly present the concept of technical efficiency and the main basic methodologies provided in the literature for its measurement.

2.1. Definition of the concept of TE

The frontier production function is the most commonly used tool for measuring technical efficiency. In the neo-classical theory of production, a frontier production function is defined as the maximum level of outputs that can be produced by a firm conditionally on combinations of input levels and technology (Kalirajan et al., 1999). Production technologies can be represented using isoquants (or production functions), with cost functions (or profit functions)²⁵. The frontier production function is formed by all the efficient economics units from the data set. The technical efficiency is then defined as the ability and willingness of an economic unit to produce the maximum possible output from a given set of inputs and technology given the prevailing environmental conditions. Primary studies which dealt with empirical measurement of technical efficiency can be found in the work from Farrell (1957). It states that if an organization is technically efficient, it is placed on the frontier. Those economic units who operate below the frontier are said to be inefficient. So, the frontier production function assumes the existence of inefficiency in the process of production (Puriya, 2005). The level of inefficiency is measured by the gap between the realized output and the corresponding frontier output, conditioned by a given level of input. In other words, inefficiency is the distance to an economic unit from the efficiency frontier.

Figure 2. 1: the frontier production function and efficiency

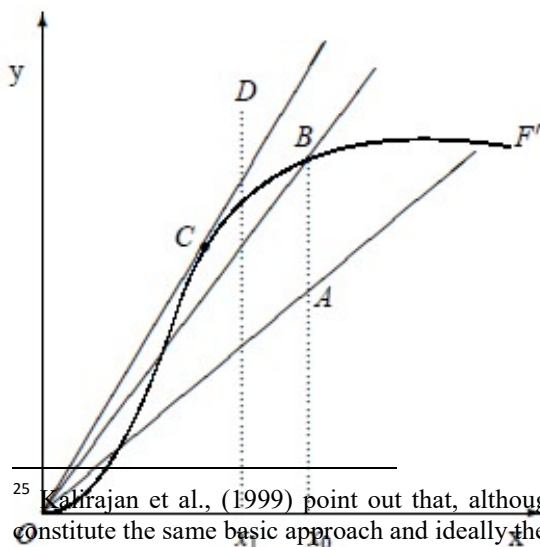


Figure 2.1 portrayed the frontier production function and technical efficiency for a case of one input and one output. Assume that x represents input and y is output.

In Figure 2.1, OF' is the production frontier. All the points on and below this production frontier are feasible. The Decision Making Units (DMUs) operating

²⁵ Kalirajan et al., (1999) point out that, although analyses based on these models appear to be distinct, they constitute the same basic approach and ideally their result should converge.

on OF' are considered as technically efficient. For example the DMUs represented by the point B and the point C are technically efficient: they produce the maximum possible output with a specified quantity of inputs, given the prevailing technology and their environmental conditions. Technical efficiency (hereafter TE) at point B and C is equal to one ($TE=1$). Inversely, the DMUs operating below OF' are technically inefficient. For instance, the DMU represented at point A is technically inefficient. TE at point A would be measured as $TE = Ax_0 / Bx_0$. Alternatively, technical inefficiency (hereafter TI) would be $TI = 1 - Ax_0 / Bx_0 = AB/Bx_0$. Note that $0 < TE, TI < 1$, since no firm can practically operate above the frontier. Therefore, $TE+TI=1$.

A number of techniques to estimate technical efficiency have been developed in literature. The paragraph below presents the most widely applied methodologies.

2.2. Methods of measuring Technical Efficiency

Methodologies for the measurement of technical efficiency are mainly divided into parametric and non-parametric approaches on the one hand; and deterministic and stochastic approaches on the other hand. The main difference between parametric and non-parametric approaches is that, the parametric approach is used to estimate efficiency of a DMU against some idealized benchmark, while the non-parametric approach is to assess efficiency of a DMU relative to other DMUs in the set. As for the distinction between deterministic and stochastic approaches, the interpretation of the error term is the main means of differentiation. Actually, for the deterministic methods, all the deviations from the frontier are due to inefficiency and it ignores the random factors affecting production process. For the stochastic methods the deviations from the frontier are due not only to inefficiency but also to randomness. Inside these main groups of approaches, there are two most widely used methods for measuring technical efficiency: the Data Envelopment Analysis (DEA) which is a non-parametric and deterministic approach, and the Stochastic Frontier Analysis (SFA) which is a parametric and stochastic approach. The choice between these two alternatives approaches depends upon the nature of problem to be handled.

Given the context of this study we have selected the SFA model to analyze the farmers' technical efficiency. The reasons are twofold. First, SFA allows for the decomposition of the error into normal random effect and to TE, as noted by the work of Purija (2005). Agriculture data, particularly in developing countries, are heavily influenced by measurement error and the effects of weather, natural calamities, etc. In addition, the statistical nature of SFA allows hypotheses to be tested regarding the existence of inefficiency and the structure of the production technology (Battese and Coelli, 1995). Table 2.1 provides an overview of the two most widely used methods in the literature. As suggested above, under the SFA method, an idealized benchmark is assumed to be known and the distance from the frontier is composed of inefficiency and a random element. When it comes to the DEA method, the frontier is constructed from the data in natural terms.

Table 2. 1: The most widely used methodologies to measure TE

		Methodologies	
		Parametric and Stochastic	Non-Parametric and Deterministic
		Stochastic Frontier Analysis (SFA)	Data Envelopment Analysis (DEA)
characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Idealized benchmark is assumed to be known • the deviation is composed of inefficiency and a random element • allows hypotheses to be tested 	<ul style="list-style-type: none"> • assesses efficiency of a DMU relative to other DMUs • the deviations from the frontier are due to inefficiency (assume no random factors affecting production process) • does not allows hypotheses to be tested 	

3. Literature review

This section is devoted to literature review including existing methods which have been developed in the literature to estimate environmental effect on Technical efficiency.

3.1. Taking into account the environmental effect on farmers: existing method

When considering the effect of environmental variables on technical efficiency, two main approaches are generally used. The first approach relies on the Data Envelopment Analysis (DEA) method (Fried et al., 2002; Avkiran and Rowlands, 2006) and the second approach is based on the Stochastic Frontier Analysis (SFA) method (Batesse and Coelli, (1995); Coelli et al., 1999). Kumbakar and Lovell (2000) provided an extensive review of SFA and DEA methods.

Regarding the approach which relies on the DEA method, it involves a three stage analysis. The objective is to purge producer performance of environmental effects and statistical noise (Fried et al., 2002). In the first stage the author applied DEA to input and output data to obtain an initial evaluation of producer performance. This evaluation did not account for the impact of either the operating environment or statistical noise on producer performance. Therefore, in the second stage they used SFA to attribute variation in first stage producer performance to environmental effects, managerial inefficiency, and statistical noise. In the third stage, they adjusted producers' inputs or outputs in a manner that accounts for the environmental effects and the statistical noise uncovered in the second stage. Then, they repeat the first stage analysis by applying DEA to the adjusted data. According to the authors, this third stage re-evaluation of producer performance provides improved measures of managerial efficiency, since the data have been purged of both environmental effects and statistical noise in the second stage SFA regression.

As for the second approach, the measures of technical efficiency are obtained from stochastic frontier production functions which have been adjusted to account for environmental influences. Coelli et al., (1999) are the authors of this method with a pioneering application made to international airlines from four different regions (America, Asia, Europe and Oceania). The authors considered two alternative approaches to account for environmental influences in stochastic frontier models. Case 1 assumes that the environmental factors influence the shape of the technology, while Case 2 assumes that the environmental factors directly influence the degree of technical inefficiency. Coelli et al. (1999) compared the results obtained when using these two approaches. According to the authors, both approaches appear reasonable depending upon philosophical perspective. Overall, they found that the two sets of results provide similar rankings of the Decision Making Units they studied (i.e. the

airlines company). However their results suggest difference in the scores of technical inefficiency from case 1 to case 2.

In this study, we implemented case 1 of the Coelli et al. (1999) approaches. Using this Case 1, we considered that the climate variability had a direct influence on the cereals production structure. We then modeled the technology by introducing some climatic variables, namely temperatures and precipitations alongside the usual production factors. This was achieved by separating out values of each climatic variable into two components: the trend associated with the variable and the “noise”. The trend of each climatic variable is the value for which a farmer is assumed to be in his most stable environment. That is to say, if it was this value of the trend that was realized as climatic value (i.e. without “noise”), the farmer would had been in his most favorable environment as he would not have faced an unpredictable climatic event. So “noise” (the residual of the OLS regression) captures the unpredictable fluctuation of the climatic variable that the farmer has to cope with (i.e. the less favorable environment). By doing so, we assumed that each farmer faced a different production frontier. Equations and more details are given in section 4 of this chapter which discusses the new methodology we provide.

3.2. Taking into account the climate instability on farmer TE: literature review

A wide range of studies have addressed the measurement of farmers’ technical efficiency during the last decades. Many of them evaluate the performance of farmers on the basis of their inputs and outputs. In the other words, farmers are evaluated in terms of their capacity to maximize output production with respect to the given inputs or to minimize input usage in the production of given outputs relative to the performance of other farmers in some comparison set. But very few studies incorporate climatic variables into the evaluation of farmer technical efficiency. Also, none of them provide for each farmer a decomposition of the farmers’ performance into the part attributable to climate change effects and the part attributable to managerial inefficiency.

Literature reviewed prior to research showed that: Mugeru and Zereyesus (2010) investigated the impact of climate variability on the production efficiency of farms in Kansas. The climate variables were annual temperature and precipitation for 4 seasons (summer, autumn, winter and spring). The effects of temperature and precipitation were modeled under different stochastic production frontier specifications. Then climatic variables entered the model multiplicatively alongside the inputs variables (capital, labor, purchased inputs) and the other variables that explain technical efficiency. Later, Aboyomi (2012) introduces continuous climate variables while estimating TE among cocoa farmers in Nigeria. By doing that, he took into account the heterogeneity among localities and could interpret the effect of climate on crop yield in terms of elasticity. However, the climatic variables used in the two studies mentioned above did not represent climate change. Besides, Muhammad et al., 2012 estimated technical efficiency among paddy farms in Indonesia. In their study, climate is introduced as a dummy variable (1 if cropland was affected by climate change, 0 otherwise). The climate as a dummy variable did not reflect the heterogeneity of climate (temperature and rainfall) among plots in different localities. In addition, such dummy variables did not capture the elasticity of crop yields with respect to climate.

Besides these rare studies which insert climate variables into the analysis of technical efficiency, a significant set of studies did not. In fact, another range of studies were devoted to estimating the impact of climate change on agricultural production using deterministic models such as OLS or panels models (Mendelsohn, 2008; Deschenes and Greenstone, 2007; Wolfram and Lobell, 2010; Blanc, 2012) or global climate model (GCM) models (Rosenzweig et al., 1996; Ben Mohamed et al., 2002). This last category of studies implicitly assumes the absence of technical efficiency on production implies that farmers' managerial performance does not affect production.

4. Data and methodology

4.1. Data

The data used in this chapter comes from various sources. The foremost source is the “Enquête Agricole de Conjonture” survey dataset (EAC) for year 2001. The EAC dataset provides information on plots (inputs and outputs), and on economic and socio-demographic characteristics of farmers. For this study, we used data of 788 plots on which cereals are produced under monoculture (e.g.: just maize) or in combination with other cereals (e.g.: maize + millet, millet + sorghum). As for outputs, we considered the total production of cereal crops. Cereal productions are converted from quantity to values using prices data. The source we depended on is the prices data from the Afrique Verte web site²⁶. Conversion of quantities produced in to values is relevant as it allows aggregation of production of all the different cereals. The other source of data is the CRU TS3 dataset which provided climatic data. Using the geographical location of each plots we matched the agricultural and climatic information (more details on EAC and CRU TS3 data set are available in Appendix A of this thesis).

- **Variables**

In this study, we focused on plots on which cereals were grown, namely: maize, millet, sorghum and fonio²⁷. Three ranges of variables enter the frontier production function. The dependent variable is the amount of cereals produced during the year. Then we have explanatory variables: the usual inputs on the one hand and the climatic variables on the other hand.

The usual inputs are labor, land, capital, seed, fertilizers and chemical (pesticides, fungicides and other chemical products). Labor is both from family and hired labor in term of person per days engaged in agriculture operation. Land refers to the plot on which cereals are cropped (in hectares). Capital is the amount of machines and agricultural equipment used (in FCFA). The amount of fertilizers used per ha, the expenses on seed and chemicals are also classified as usual inputs (all in FCFA). The variables which stand for environmental conditions are: average yearly temperatures and annual rainfall. These climatic variables are classified as

²⁶ www.afriqueverte.org.

The price produced by “Afrique verte” is also used by FAO for its Food Price Data Analysis Tool. That is to say, this source of price data is relevant.

²⁷ Rice farming is excluded because the rice requirement of temperatures and water differs from that of other cereals.

environmental because they are out of the farmer's control. Using temperature and precipitation, we follow a large range of previous studies. Actually, as pointed out by Mohamed (2002) the most important climate variables are temperature, precipitation, wind, and solar radiation. In fact, all other climate variables may be deduced thereof (e.g. evapotranspiration, drought and humidity). We do not have data on wind and solar radiation. Hence, we consider only temperature and rainfall in this study.

- **Computing the climate change variables**

To assess the climate change impact on farmers' TE, one needs an appropriate indicator. Measuring climatic variability involves evaluating the difference between the values actually observed and the long term trend or permanent state of a climate variable. According to Guillaumont and Simonet (2011b); Goujon and Feindouno (2015) the standard deviation and, the absolute deviation of the average yearly rainfall (or temperature) from its own trend can be considered as a good approximation of the climatic variability of a geographical entity. The first indicator is given by the equation (6) where σ is the standard deviation, z_i is the i^{th} element from the climatic variable, μ is the mean of that variable, and N is the number of period.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \mu)^2} \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \mu)^2} \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \mu)^2}$$

(6)

$z_i = \alpha + \beta t + \varepsilon_i$ The second indicator is $|\varepsilon_i|$, obtained through the estimation of the OLS model given by the equation below:

$$z_i = \alpha + \beta t + \varepsilon_i \tag{7}$$

Where Z_i is the yearly climate data (temperatures or precipitations), β is a parameter to be estimated. The trend is represented by t ; ε_i is the error term and α is a constant.

In this study we used the indicator obtained through the estimation of the OLS model (see appendix for details relying on the choice of this indicator instead of standard deviation).

4.2. Empirical model: a new approach provided to account for environmental influences in agriculture stochastic frontier model

When it comes to the effect of environmental variables affecting technical efficiency, two main approaches are generally used. The first approach relies on the Data Envelopment Analysis (DEA) and the second range of approaches is based on the Stochastic Frontier Analysis (SFA) method. For this study, the approach based on SFA was preferred to DEA for two reasons. First, we considered the advantages of SFA over DEA (see section 3 of this chapter which presents the conceptual issues regarding the production frontier). The second reason resulted from the first one: in the agricultural domain, the production function is well known. In fact, the DEA method is generally preferred when the production function is unknown.

The new approach we provide follows the case 1 from Coelli et al. (1999) methodology. The case 1, had been chosen as we assume that climate change has direct effect on the crops production structure. Our methodological contribution was then the adjustment of case 1 to account for the effect of temperature and rainfall variability on farmer technical efficiency.

The starting point of our approach follows Aigner, Lovell and Schmidt's (1977) specification of stochastic production frontier. We spelled out a conventional specification of the production frontier that has no environmental factors but only a composed error term. In order to simplify the presentation, we hypothesized that the production function is a simple Cobb-Douglas. Note that in all the equations below the term “*t*” stands for period. For the present study, as we are working on transversal data, the term “*t*” can be removed in all these equations. **To generalize our approach “*t*” is kept in all the equations below.**

Thus, the specification of the production frontier is given by equation (1) below.

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k \ln x_{k,it} + v_{it} - u_{it} \quad (1)$$

Where $\ln y_{it}$ and $\ln x_{k,it}$ indicate the log-linear of output and the k inputs, respectively ($i=1, 2, \dots, N$ farmers and $t=1, 2, \dots, T$ periods); β_0 and the β_k are parameters to be estimated. v_{it} is

a random error term and u_{it} is a non-negative random variable which is used to compute technical efficiency. It is assumed to represent technical inefficiency in production.

If we want to estimate the parameters of this model with a maximum likelihood model, we must select the distributional forms for the two error terms (v_{it} and u_{it}). In this study, we hypothesized that the random error term, v_{it} , is independently and identically distributed as $N(0, \sigma_v^2)$, and that u_{it} has a distribution equal to the upper half of the $N(0, \sigma_u^2)$ distribution. Let's point out that u_{it} is distributed independently of the error term v_{it} which represents errors of observation and not measurement of production.

The equation (1) suggested specifying the definition of the agricultural stochastic production frontier. The agricultural production frontier represents the maximum crop yield that can be produced given a set of inputs levels. Farmers operating on the frontier are technically efficient (his efficiency score is 1) whereas farmers below the frontier are inefficient (their efficiency score is in $[0,1[$).

Following the estimation of the unknown parameters of the model defined in equation (1), the residuals of the model will not be the realization of u_{it} but realizations of $\varepsilon_{it} = v_{it} - u_{it}$ with ε_{it} representing the residuals of the model. According to Battese and Coelli (1988), one may define the technical efficiency predictor using

$$TE_{it} = E\left[\frac{\exp(u_{it})}{\varepsilon_{it}}\right] \quad (2)$$

The frontier model based on equation (1) does not account for the fact that different farmers may face different environmental conditions which may later influence their technical efficiency levels. Keeping in mind the objective of this study, this is to derive separately the technical inefficiency and the climate change inefficiency from a stochastic frontier models.

In order to achieve this objective we took into consideration as mentioned above, the case 1 approaches provide by Coelli et al., (1999).

Following Coelli et al. (1999), Equation (1) above is adjusted to account for climatic conditions. We get the following equation (3) where the climatic variables are introduced beside the usual inputs variables. In terms of equation (1) and assuming that M climatic variables which are represented in the equation (3) by $z_{j,it}$, enter in a simple log-linear way in the production frontier²⁸. Now, the production frontier appears modified and will yield equation (3) below:

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k \ln x_{k,it} + \sum_{j=1}^M \theta_j \ln z_{j,it} + v_{it} - u_{it} \quad (3)$$

Where $\beta_0, \beta_k, \theta_j$ are parameters to be estimated.

This third equation differs to equation (1) with the $z_{j,it}$ environmental variables introduced in a simple log –linear way in the production frontier represented by equation (1). $z_{j,it}$ is the j^{th} environmental variable ($j=1, 2, \dots, M$) for the i^{th} farm in the period t .

The evolution of weather over time influences the farmers' production decisions. Indeed, it is likely that environmental conditions including climatic condition influence input allocation of land, labor, etc. In practice, some farmers adjust inputs, such as labor and land, in response to environmental conditions they are facing such as climate instability. In other words, farmers with the same production technologies and virtually similar abilities will produce different quantities of grain if faced with different intensity of temperatures, precipitations or other environmental production conditions.

The $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z_{j,it}$ of equation (3) can be broken down into two components using the OLS estimation. So the first component is $\sum_{j=1}^M \delta_j \ln z'_{j,it}$ representing the trend i.e. the predictable value of climate (with that value the farmer is assumed to be in his most favorable environment because there is no unpredictable climatic event. So it is his most stable

²⁸ in the present study, we have two $z_{j,it}$ variables: temperatures and precipitations

environment). The second component $\sum_{j=1}^M \gamma_j \ln z''_{j,it}$ is the variability of the climate i.e. the residual of OLS equation (when residuals are different from zero it means that the farmer faced unpredictable climatic event (i.e. climate change). He is assumed to be in his less favorable environment. Thus, there is unpredictable fluctuation on climate that the farmer has to cope with).

The TE predictor is then re-evaluated with that change. Considering such a modification, the production frontier appears modified and will yield the equation (4) below:

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k \ln x_{k,it} + \sum_{j=1}^M \delta_j \ln z'_{j,it} + \sum_{j=1}^M \gamma_j \ln z''_{j,it} + v_{it} - u_{it} \quad (4)$$

Where β_0 , β_k , δ_j and γ_j are parameters to be estimated.

When equation (2) is used to define predictors of technical efficiency relative to the frontier model defined in equation (4) the **technical efficiency measures obtained will be net of environmental influences (hereafter Net TE)**. One may also **obtain measures of gross technical efficiency (hereafter Gross TE)**; i.e., inclusive of environmental influences by re-evaluating the technical efficiency predictors with $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z''_{j,it}$ removed from equation (4). That is, only the trend represented by $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z'_{j,it}$ remains in the equation. Thus, each farmer will be compared using the frontier associated with his own favorable environment.

Empirically, to obtain measures of gross efficiency the following equation (5) is estimated.

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k \ln x_{k,it} + \sum_{j=1}^M \delta_j \ln z'_{j,it} + v_{it} - u_{it} \quad (5)$$

Where β_0 , β_k , δ_j are parameters to be estimated.

Note that the differences between the gross and net technical efficiency measures of the i^{th} farmer may be viewed as the contribution of these climatic factors to the inefficiency of that farmer (hereafter *Clim_ineff* for climatic inefficiency). Furthermore, given that we can assume that all major environmental factors have been accounted for, the net efficiency measure may then be interpreted as a measure of managerial performance.

$$\text{Clim_ineff} = \text{Gross_TE} - \text{Net_TE} \quad (6)$$

- **Difference between our approach and Coelli et al., (1999) case 1**

The difference between our approach and that of Coelli et al., (1999) is as follows. To account for the environmental factors, the Coelli et al., (1999) model consists of putting all farmers in the same state of nature. This is achieved in two different ways: (1) adjust upward the environmental inputs of producers who have been advantaged by their relatively favorable environment or (2) to adjust downward the environmental inputs of the producers who have been disadvantaged by their relatively unfavorable environment. Empirically the TE predictor is re-evaluated by $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z_{j,it}$ replaced with $\max [\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z_{j,it}]$ (or $\min [\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z_{j,it}]$) and all firms will be compared with the frontier associated with the most favorable (or bad) environment.

Our approach is different as a farmer is not compared with his peers, but with his historical environmental condition. Indeed, each farmer will be compared with the frontier associated with his own favorable environment (i.e. the predictable environment observed over a long period). Empirically the TE predictor re-evaluating the technical efficiency predictors with $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z''_{j,it}$ removed from the equation (4). That is only the trend represented by $\sum_{j=1}^M \theta_j \ln z'_{j,it}$ remains in the equation of production frontier to be estimated.

- **One may ask why we provide a new approach? Why not use the approach from Coelli et al. (1999)?**

As mentioned above, the model proposed by Coelli et al. (1999) puts all farmers in the same state of nature (maximum or minimum values of environmental covariates) and compares the technical efficiency related to this condition with the technical efficiency actually observed. In agriculture, for a given farmer, we cannot consider that a maximum (or a minimum) temperature or rainfall provides the most favorable (or disadvantaged) conditions for growing a given crop. It appears therefore relevant to compare a farmer with his historical performance and not with his peers. Thus, each farmer is compared to the frontier associated with weather conditions that would be observed in the absence of climate variability (his own trend).

4.3. Summary statistics of plots studied

Table 2.2 summarizes the main characteristics of the plots. Generally, average expenses on inputs (seeds, chemical products, fertilizers, capital) are very low. This may suggest that Malian farmers are facing financial constraints. Alternatively, the smaller expense on seed could also highlight the fact that farmers generally use a part of the previous year's production as seed. That is generally the case in Africa. The average expense of capital used is about 5000 CFA (10 US\$), which reflects low mechanization among farmers of our sample. Regarding the average of climate variables; yearly temperatures range from 27.8 to 30.2 ° C and total rainfall varies from 306 to 933 m³. The variability of precipitation and temperature is high: 38.51 m³ respectively and 0.117 ° C. In Appendix, Table 2.9 shows the descriptive statistics of climate variables for each region in Mali²⁹.

Table 2. 2: summary statistics of the sample of 788 plots studied

VARIABLES	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Cereals' yield (kg per ha)	917.9	577.8	30	3 560
Cereals Yield value (1000 FCFA)	1.497	9.768	5	7.908
Area (ha)	0.182	0.301	0.0041	42.36
Capital (1000 FCFA)	4.781	0.020	0.005	285.7
Labor (Person- day per ha)	0.0247	0.236	1	5.949
Fertilizer (kg)	7.06	20.43	0	195

²⁹ To save space the descriptive statistics of climate variables at the district level are not reported in this study because the number of districts investigated is large (306 districts).

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

Seed (1000 FCFA)	0.595	4.645	0	105.7
Chemical (1000FCFA)	4.033	24.14	0	357.7
Annual rainfall in 2001 (m ³)	635.9	130.1	306	932.9
Average annual temperature in 2001(°C)	28.82	0.407	27.81	30.19
Trend in annual rainfall from 1981 to 2011(m ³)	640.4	142.3	367.1	1 030
Trend in average annual temperature from 1981 to 2011(°C)	28.91	0.408	27.87	30.00
Change in annual rainfall from 1981 to 2011(m ³)	38.51	30.72	0.224	117.7
Change in average annual temperature from 1981 to 2011(°C)	0.117	0.0613	0.0136	0.253

5. Econometric results³⁰

Table 2.3 shows estimation of three stochastic production frontiers. For each frontier, the Cobb-Douglas function was estimated by maximum likelihood³¹. In column 1, climate variables were not included (model 1). In column 2 the climate actually observed is introduced; variability and trend of precipitation and temperature (model 2). From this estimation, we predict the net technical efficiency (Net-TE) (i.e., the real managerial performance of farmers). Finally, in the third column the trends of climate variables are introduced but not variability (model 3). Gross efficiency (Gross_TE) is computed from results in this column. The difference between the gross and the net technical efficiency represent the climate inefficiency.

Table 2. 3: Estimated parameter of the production frontier

Variables	model 1 SFA without climate	model 2 SFA with climate (trend and is variability)	model 3 SFA with climate (trend)
ln_capital	0.0227 (0.0147)	0.0362** (0.0145)	0.0292** (0.0146)
ln_land	0.0311** (0.0143)	0.0295** (0.0133)	0.0345** (0.0139)
ln_labor	0.000770 (0.140)	0.0596 (0.130)	0.0614 (0.138)

³⁰ All the models were estimated using STATA 12.

³¹ Coelli and BATESSE (1995) show that on large sample, maximum likelihood estimation is better than OLS estimation.

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

ln_fertilizer	-0.132*** (0.0366)	-0.0708** (0.0356)	-0.126*** (0.0351)
ln_chemical	0.0683*** (0.0229)	0.0814*** (0.0219)	0.0725*** (0.0226)
ln_seed	0.0820** (0.0324)	0.0675** (0.0309)	0.0875*** (0.0324)
ln_trend_rainfall		0.400*** (0.119)	0.284** (0.119)
ln_trend_temperature		9.873*** (2.036)	6.789*** (1.982)
ln_temperature_change		-1.851*** (0.316)	
ln_rainfall_change		-0.0495*** (0.0163)	
Intercept	14.24*** (0.132)	-21.22*** (7.491)	-10.45 (7.312)
$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$	0,39	0,36	0,41
$\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$	0,86	0,87	0,89
Log(Likelihood)	-332.3	-295.1	-338.6
Observations	640	625	646
Standard errors in parentheses,			
statistical significance *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1			

Result 1. Cereal yields in Mali are highly dependent on the farmers' managerial performance and climate is also important.

We conducted a test to assess whether cereals production, in our sample, depended on the farmers' managerial performance or not. To achieve this, we used $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ to

determine whether the total variance of the residual term given by $(\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ was largely explained by the variance of the efficiency given by (σ_u^2) . The value of γ is between 0 and 1. In the case where γ is zero the distance from the production frontier is entirely due to random factors and the frontier can be estimated by OLS. However, if γ is 1, the distance from the frontier is entirely due to a very bad managerial performance of the farmer. In this case a deterministic model is preferred to estimate the frontier.

For model 1, model 2 and model 3; the values of γ are respectively 0.86; 0.87; and 0.89 (see Table 2.3). As these values of γ are lower than 1, it suggests for each model that, some farmers are inefficient. Based on this result, the use of a stochastic model to estimate the production function is warranted. Another interesting result is the fact that the value of γ obtained in model 2 is lower than that obtained in model 3 ($0.87 < 0.89$). This suggests that the climate change (variability in temperature and rainfall) is an important factor of inefficiency.

Result 2. The specification of agriculture production function should include climate variables

We also investigated whether the omission of climate variables in agriculture production function is a problem or not. To this end, we performed a series of likelihood ratio tests to assess the specification of the stochastic frontier function. The results are shown in Table 2.4. The null hypothesis of the tests is that, climate variables are not essential in specifying the production frontier. The statistic³² of the test, noted λ , is shown in the second column of the Table 2.4 and the last column shows the p-values. We reject the null hypothesis, so we conclude that for the relevance of climatic variables: the specification of agriculture production function should include climate variables

³² The statistic is calculated according to the formula $-2 [\log(\text{likelihood}(H_0)) - \log(\text{likelihood}(H_1))]$. λ is distributed according to a Chi_deux, $(d1-d0)$ degree of freedom. $d0$ and $d1$ are respectively the degrees of freedom of the constrained model and the unconstrained model.

Table 2. 4: results of tests on the specification of stochastic frontier

Test of hypotheses	Log likelihood	Statistic of χ^2	Test result (decision)
Climate (trend + variability) influence crop yields (model 1 Vs. model 2)			
H ₀ : Climate variables do not influence crop yields	-332.3	74***	Reject H ₀
H ₁ : climate variables influence crop yields	-295.1		
Climate (trend) influence crop yields (model1Vs model3)			
H ₀ : Climate variables do not influence crop yields	-332.3	12.6**	Reject H ₀
H ₁ : climate variables influence crop yields	-338.6		

(*), (**), (***) , confidence level of the test at 90%, 95% et 99%.

Result 3. Almost all inputs influence cereal production, climate change negatively affects the production

From Table 2.3 above, we found that, except for Labor variable, coefficients associated with almost all variables are significant and give the expected sign. The result of no significant effect of Labor on production is not unusual in agriculture production function (See Ahmad and Bravo-Ureta (1995)). These results tend to confirm trends seen in the agricultural sector in Africa: the agricultural workforce, which is usually family labor, is insufficient for croplands which are generally large. So the total workforce remains low as the use of hired labor is not common in a context where households are poor and they face important financial constraints. Unlike labor, we found that, grain production increase with the cropland, capital, seed, chemical, rainfall and temperature. The positive effect of this trend (of temperature and rainfall) can be explained by the fact that the temperature threshold after which production begins to decline is not yet reached. In this light, Ben Mohamed et al (2002) and White (2012) found the temperature threshold in Niger was 30 ° C for millet. Beyond this value, any 1°C

increase induces a decrease in the quantity produced. Another result is that, as expected, the variability of climate negatively affects the production. The coefficient on fertilizer is negative and does not conform to the previous studies.

Result 4. Climate change pulls down the scores of farmer efficiency: Failure to account for climate variability could lead to wrong conclusions about farmers' TE

As mentioned above, Net technical efficiency is estimated when the observed climate (trend + variability) is used to estimate the stochastic production frontier. Gross efficiency is estimated only when the trend component of climatic variables is used to estimate the stochastic production frontier. Recalling the fact that climate inefficiency is the difference between Gross TE and Net TE, we found that climate change reduces the effective managerial performance of farmers by 0.11 point (Table 2.5). This represents about 20% of the Gross technical efficiency. What can be derived from this result is that, failure to account for climate variability could lead to wrong conclusions about farmers' technical efficiency. The farmers ranking according to their TE could also be impacted (result 5).

Table 2. 5: Gross TE, Net TE and climate change inefficiency among Malian farmers

year	Net efficiency (mean)	Gross efficiency (mean)	Climate change inefficiency (mean)
2001	0.64	0.55	-0.11

Result 5. Failure to account for climate variability could bias the ranking of farmers according to their managerial performance.

Comparing the results obtained when using climatic variables with results obtained when climatic variables are not used, we observe that the two specification of production frontier provided different rankings of farmers. With climate variability, the group of the top performers whose efficiency score belongs to the interval [75% , 100% [has 41% of farmers which is higher than the 38% observed when climate variability is not taking into account

(Table 2.6). In the same line, the number of poor performing farmers for whom TE scores are <50% reduces when net TE is computed while the number of top performer increases.

Table 2. 6: Distribution of Gross TE and Net TE

Gross TE (mean)				Net TE (mean)		
Group	Number (N)	Percentage (%)	score	Number (N)	Percentage (%)	score
< 50%	60	8%	.17	51	6%	.17
[25%, 50% [	176	22%	.39	166	21%	.39
[50%, 75% [	254	32%	.63	252	32%	.63
] 75%, 100%]	298	38%	.85	319	41%	.86

These results suggest that, failure to account for climate variability could alter the ranking of farmers according to their managerial performance.

Result 6. Although climate change is partly responsible for the deviation from the frontier, farmers’ managerial performance is more to undermine.

Table 2.7 shows that the Spearman correlation coefficient between cereals production and different variants of efficiency are all positive. That is to say, grain production is greater when producers perform well even in the absence of climate variability.

Table 2. 7: correlation coefficient between the cereals production and different variants of efficiency

	Cereals production	Gross TE	Net TE	Climate inefficiency
Cereals production	1.0000			
Gross TE	0.1785	1.0000		
Net TE	0.9566	0.2055	1.0000	
Climate inefficiency	0.9474	0.0474	0.0973	1.0000

The correlations between grain production and Gross TE as well as Net TE are stronger than correlation between grain production and climate inefficiency. This result suggests that, even if climate change is partly responsible for low farmer performance; farmer’s technical efficiency play a more important role in the explanation of the distance on the frontier.

6. Conclusion

Environmental factors like climate variability could bias the measures of farmers' technical efficiency. Literature on agricultural productivity has given little attention to how climate change affects efficiency. Considering this statement, this chapter aimed to investigate to what extent climate change affects farmers' technical efficiency. The main objective was to measure the technical efficiency of Malian farmers who have been purged of the climate instability influences. The contribution of this chapter to the previous literature on technical efficiency is the suggestion of a new econometric approach based on the methodology from Coelli et al (1999) that takes into consideration the climate change influences in stochastic frontier models in the specific area of agriculture.

Based on a sample of 788 plots surveyed in Mali in 2001 and using the "case 1" of the methodology proposed by Coelli and al (1999) we explicitly identified the effects of temperature and precipitation on farmers' inefficiency. The real technical efficiency was then estimated, given that the inefficiency due to climate variability had been subtracted. Doing so, we have taken into account the fact that the plots were subjected to different climatic conditions.

We demonstrated that the technical efficiency score of Malian' farmers is reduces when climatic variability is taken into account by estimating the stochastic frontier production. The magnitude of the farmers' technical efficiency scores tends to be large when the conventional approach (without taking into account climate variability) is used. This result provides evidence that climate instability contributes to the deviation from the production frontier, so technical efficiency decreases on average with the increase of temperatures and the decrease of precipitations. Our results also highlighted that, technical inefficiency is greater than "climate inefficiency". We also found that, climate change modified the ranking of farmers that would have been observed if climate instability had not been taken into account when estimating the efficiency scores.

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

The results suggested above outline that although climate change was partly responsible for the deviation from the frontier, the farmers' managerial performance is not to undermine. From our study, we conjectured that, policy makers should try to provide capacity building to Malians' farmers in terms of inputs since technical inefficiency represents the largest part of total inefficiency. Indeed, the overall performance can be enhanced by fostering the farmers' resilience to climate change and strengthening socio economic factors that determine their adaptation to climate change. To achieve these objectives, it would be necessary to identify the main determinant of climate change adaptation among farmers in Mali. This issue is addressed in chapter 3 of our thesis.

References

- Abayomi S. (2012). "Impact of Climate Change on Cocoa Agriculture and Technical Efficiency of Cocoa Farmers in South-West Nigeria." *J Hum Eco*, 40(2): 143-148.
- Ahmad, M., Bravo-Ureta, B., 1995. "An econometric analysis of diary output growth." *Am. J. Agric. Econ.* 77. (4), 314-321.
- Avkiran N. K. and Rowlands T. (2006). "How to better identify the true managerial performance: state of the art using DEA. *International Journal of management science.*
- Battese, G. E, and T. J. Coelli. (1995). "A model for technical efficiency effects in stochastic frontier production function for panel data." *Empirical economics* 20, 325_332.
- Blanc Elodie. 2012. « The Impact of Climate Change on Crop Yields in the Sub-Saharan Africa. » *American Journal of Climate change* 1(1): 1-13.
- Butt T., B. McCarl, J. Angerer, P. Dyke and J. Stuth. 2005. The economic and food security implications of climate change in Mali. *Climatic Change* 68: 355-378.
- Chaisemartin, A. M. Normann, and J. Pestiaux. « Extreme climate conditions: How Africa can adapt ». *McKinsey's journal*. June 2010.
- Coelli T.J, Sergio Perelman, and Elliot Romano. 1999. « Accounting for environmental influences in stochastic frontier models: with application to international airlines. » *Journal of Productivity Analysis*, 11: 251-273.
- Deschênes, O., and M. Greenstone. 2007. « The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in water. » *American Economic Review* 97(1): 354-385.
- Farrell, M. J., & PEARSON, E. S. (1957). SERIES A (GENERAL). *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 120(3), 253-29.
- Fried, H. O.; C. A. K. Lovell; S. S. Schmidt. (2002). Accounting for Environmental Effects and Statistical Noise in Data Envelopment Analysis. *Journal of productivity analysis* 17, 157-17.
- Guillaumont P et Simonet C. (2011b), To What Extent Are African Countries Vulnerable to Climate Change? Lessons from a New Indicator of Physical Vulnerability to Climate Change. FERDI Working Paper / I08 Revised Version -November 2011

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

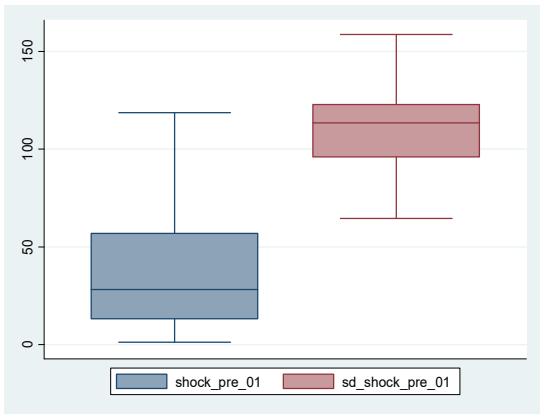
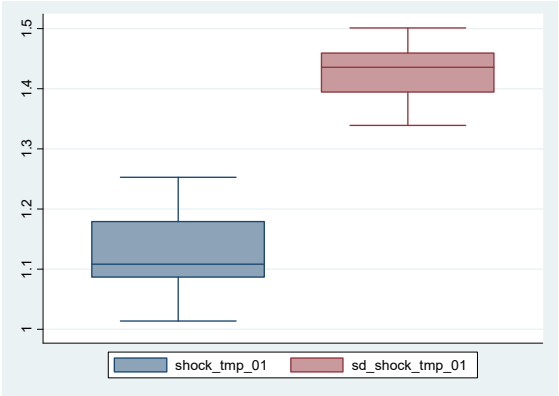
- Goujon Michael, Olivier Santoni, Sosso FEINDOUNO. Tendances et chocs climatiques a La Reunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.. 2015.10. 2015.<halshs-01150853>
- Kalirajan, K. P. and R. T. Shand (1999). Stochastic frontier production functions and technical efficiency measurements: A review. In K. P. Kalirajan and W. Yanrui (Eds.). 'Productivity and Growth in Chinese Agriculture'. McMillan Press Ltd., Great Britain.
- Kumbhakar, S. C. and C. A. K. Lovell (2000). *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press.
- Mendelsohn Robert. 2008. « The impact of Climate change on Agriculture in Developing Countries. » *Journal of Natural resources Policy Research* 1(1): 5-19.
- Mohamed, A. B., Van Duivenbooden, N., & Abdoussallam, S. (2002). Impact of climate change on agricultural production in the Sahel–Part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change*, 54(3), 327-348.
- Mugera, A. W., & Zereyesus, Y. A. (2010). The Impact of Climate Variability on Production Efficiency and Incomes of Kansas Farms.
- Muhammed F. M., Y. Ferriante, R. Suslinawati. (2012).” Impact of climate change on productivity and efficiency Paddy Farms: Empirical study on Tidal Swamp Land South Kalimantan Province_Indonesia.” *Journal of economics and sustainable development*. Vol.3, N°14, 2012.
- Pujari, A. (2005). Efficiency and Productivity in Indian Agriculture: A Stochastic Frontier Approach.
- Rosenzweig Cynthia, Günther Fischer, Klaus Frohberg, Martin Parry. 1996. «The potential effects of climate change on world food production and security. » Chapter 9 in Fakhri Bazzaz, Wim Sombroek. « Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. » FAO Rome, 1996.
- Sherlund, S. M., Barrett, C. B., & Adesina, A. A. (2002). Smallholder technical efficiency controlling for environmental production conditions. *Journal of development economics*, 69(1), 85-101.
- Wolfram Schlenker and David B. Lobell. 2010. « Robust Negative Impacts of Climate Change on African Agriculture. » *Environmental Research Letters* 5(1): 1-8.

Appendix 4

These two indicators of variability are computed and compared. Figure 1 and 2 present the box plot of the distributions of temperature and precipitations variables with regard to the two different indicators. In each graph, obvious differences are immediately apparent between the two indicators. The value of variability of temperature (or rainfall) measured with standard deviation is nearly twice the values of variability measured with absolute deviation from it trend.

Figure2. 3: temperature shocks among Mali districts in 2001 using two differents indicators. Note : shock_tmp_01 : absolute deviation of the average yearly temperature from its own trend. sd_shock_tmp_01 : standard deviation of temperature serie. source : CRU TS3 data and author's construction.

Figure2. 2: precipitation shocks among Mali districts in 2001 using two differents indicators. Note : shock_pre_01 : absolute deviation of the average yearly precipitation from it's own trend. sd_shock_pre_01 : standard deviation of precipitations serie. source : CRU TS3 data and author's construction.



The graphs indicate that, contrary to the variability computed with the standard deviation, the variability computed with the deviation from the trend appear to have larger variation and an average dragged down by the lower values of the series. All the four samples are reasonably symmetric, except the sample of rainfall change determine with standard deviation (schock_pre_01) which is tilted to the right. There are no obvious outliers in any of the samples.

Such difference between these two indicators is consistent with literature on climate shock indicators. As noted by Simonet (2011), the standard deviation weighted more extreme events than the average difference (in absolute value). Indeed, by construction, the formula of the standard deviation difference between the observed value and the average is squared.

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

Given this comparison, this study used temperature and rainfall changes calculated with absolute deviation (in absolute value) of the average yearly rainfall and temperature from their own trend.

Table 2. 8: Cereals prices surveyed on Malian's markets.

Cereals	Prices (FCFA)
Fonio	250
Maize	132
Sorghum	145
Millet	169

Source: Afrique verte data and author's calculations.

Table 2. 9: Descriptive statistics of rainfall and temperature in the regional level (year 2001)

VARIABLES	REGIONS	mean	sd	min	max
Kayes					
rainfall		702.6	102.6	508.3	1,003
temperature		28.92	0.432	28.12	29.80
change in rainfall		2.12e-07	92.09	-173.5	240.8
trend in rainfall		702.6	45.14	628.2	777.1
change in temperature		-9.91e-10	0.349	-0.641	0.812
trend in temperature		28.92	0.254	28.50	29.34
Koulikoro					
rainfall		825.5	111.3	633.9	1,117
temperature		28.02	0.356	27.25	28.77
change in rainfall		-1.42e-07	103.4	-165.5	228.1
trend in rainfall		825.5	40.98	757.9	893.1
change in temperature		7.96e-10	0.353	-0.752	0.797
trend in temperature		28.02	0.0472	27.94	28.09
Sikasso					
rainfall		1,029	123.5	812.7	1,385
temperature		27.41	0.354	26.71	28.04
change in rainfall		3.28e-07	113.6	-248.1	281.6
trend in rainfall		1,029	48.33	949.1	1,109
change in temperature		1.26e-09	0.328	-0.671	0.763
trend in temperature		27.41	0.134	27.19	27.63
Segou					
rainfall		660.1	110.7	485.7	963.1
temperature		28.75	0.415	27.70	29.68

Chapter 2: Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models

change in rainfall	7.23e-07	102.0	-183.0	236.6
trend in rainfall	660.1	43.16	588.9	731.3
change in temperature	2.49e-09	0.401	-1.029	1.035
trend in temperature	28.75	0.109	28.57	28.93
Mopti				
rainfall	492.9	105.2	314.4	768.7
temperature	29.14	0.398	28.17	30.00
change in rainfall	2.74e-07	86.36	-176.9	222.8
trend in rainfall	492.9	60.08	393.8	592.0
change in temperature	2.58e-09	0.390	-0.948	0.941
trend in temperature	29.14	0.0788	29.01	29.27
Tombouctou				
rainfall	233.8	55.33	135.8	354.4
temperature	29.53	0.429	28.65	30.31
change in rainfall	-3.00e-07	47.20	-101.2	98.41
trend in rainfall	233.8	28.87	186.1	281.4
change in temperature	2.58e-09	0.369	-0.836	0.741
trend in temperature	29.53	0.219	29.17	29.89
Gao				
rainfall	244.1	57.51	144.3	369.0
temperature	30.10	0.423	29.31	31.05
change in rainfall	2.08e-07	50.54	-71.43	109.9
trend in rainfall	244.1	27.45	198.8	289.4
change in temperature	8.41e-10	0.353	-0.746	0.690
trend in temperature	30.10	0.233	29.72	30.49

Source: CRU TS3 data and author's calculations.

Chapitre 3

Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables.³³

³³Ce chapitre est la version détaillée d'un article présenté lors de l'atelier d'échange de l'Institut pour les Ressources Naturelles en Afrique_ Université des Nations Unis (UNU-INRA). L'atelier s'est tenu en Mars 2016 à Accra au Ghana.

L'article tiré de ce chapitre sera un chapitre du livre à paraître en 2018 sous le titre « Promoting Resource Efficiency and Resilience in Small and Medium Enterprises in Rural Africa », United Nations University Institute for Natural Resources in Africa.

1. Introduction

Les pays de l'Afrique subsaharienne sont particulièrement sensibles au changement climatique du fait de leur forte dépendance à l'agriculture pluviale. Selon le rapport de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), les rendements de l'agriculture pluviale, notamment en Afrique, pourront diminuer jusqu'à 50% d'ici 2020. Face à ce phénomène dynamique et d'ampleur imprévisible qu'est le changement climatique, l'adaptation constitue une option qui permettrait de réduire considérablement l'impact négatif du climat (Di Falco et al. 2011 ; Kurukulasuriya et Mendelson, 2006.c, Kurukulasuriya et Rosenthal, 2003). L'adaptation au changement climatique est d'autant plus indispensable qu'elle constitue l'un des domaines primordiaux de l'accord historique de la COP 21 adopté à Paris en 2015. Selon l'Annexe B du rapport de l'IPCC (2001), l'adaptation au changement climatique nécessite l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer leurs effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques.

Pour s'adapter au changement climatique, les agriculteurs peuvent mettre en œuvre une multitude de pratiques agricoles. Parmi ces pratiques, certaines ne préservent pas l'environnement tandis que d'autres préservent l'environnement et constituent de ce fait une agriculture de conservation. Selon le rapport de la FAO 2014, une agriculture de conservation est une agriculture qui a pour but l'amélioration soutenue de la productivité et qui, en cela, pourrait contribuer significativement à réduire le réchauffement climatique. Ainsi, il apparaît important d'avoir une meilleure compréhension des facteurs qui encouragent ou découragent les agriculteurs à s'adapter au changement climatique en préservant l'environnement. Car, cela pourrait renseigner les politiques et les acteurs du développement rural sur les facteurs à cibler afin d'accroître la capacité des agriculteurs à s'adapter tout en préservant l'environnement. Falconnier et al (2017) mettent en évidence la vulnérabilité des petits exploitants. Leur étude montre que les changements climatiques affecteront négativement le revenu par tête des populations avec pour conséquence la réduction significative du pourcentage d'agriculteurs non pauvres. Ainsi, il apparaît de plus en plus important de comprendre les stratégies d'adaptation au changement climatique à l'échelle des petits agriculteurs. De plus, compte tenu du contexte actuel où la préservation de l'environnement est une préoccupation majeure, ce chapitre cherche à répondre à cette question centrale : quels

sont les déterminants de l'adoption de pratiques durables qui permettent de s'adapter aux changements climatiques sans détériorer l'environnement ?

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les facteurs de la décision de l'agriculteur d'adopter des pratiques qui réduisent la vulnérabilité de la production agricole au changement climatique et qui préservent l'environnement par la même occasion.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à trois pratiques agricoles qui, en plus de permettre l'adaptation au changement climatique, favorisent la préservation de l'environnement : l'utilisation des semences améliorées, la diversification des cultures sur une parcelle et le choix de la date de mise sous terre des semences. Il convient donc d'expliquer ces stratégies d'adaptation, puis de montrer en quoi elles préservent l'environnement et réduisent l'impact négatif des changements climatiques.

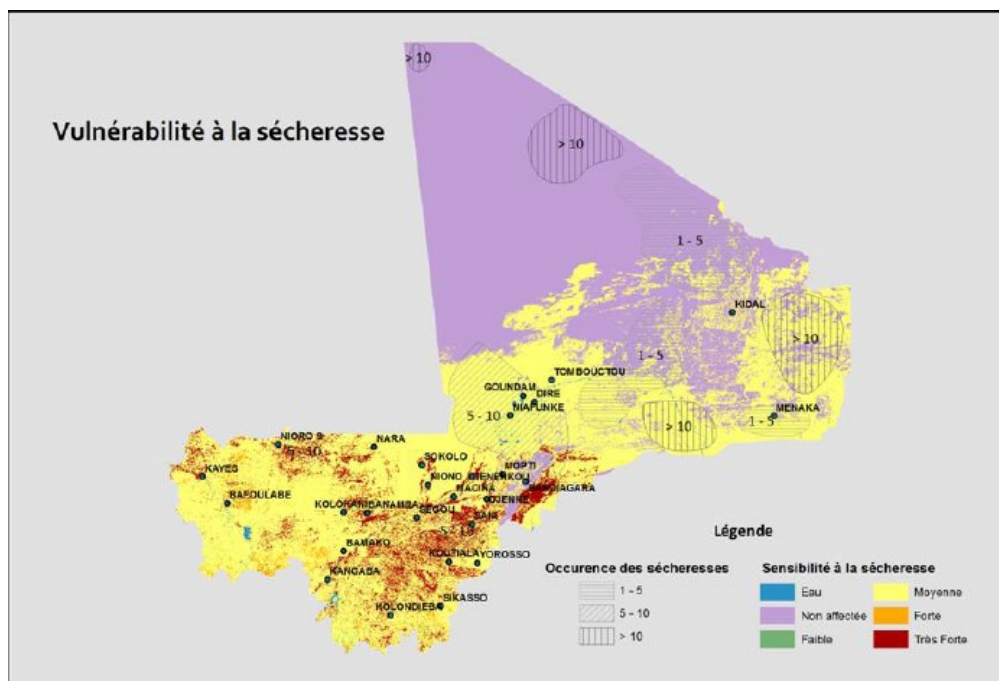
Le choix de la date de mise sous terre des semences désigne l'alignement du calendrier agricole sur les prévisions météorologiques. En d'autres termes, l'agriculteur tient compte de la météo qu'il observe et sème plus tôt ou plus tard par rapport à la date de mise sous terre des semences qu'il a préalablement fixée en début de campagne agricole. En modifiant ainsi la date de mise sous terre des semences, l'agriculteur s'adapte au changement de la météo. En plus, avec cette pratique, il n'y a pas d'interaction directe avec les eaux, la terre et l'air ; l'environnement est donc préservé. Pour ce qui est de l'utilisation des semences améliorées, elle fait référence à l'emploi des semences qui ont un court cycle de croissance et/ou une tolérance au changement climatique. Ces propriétés font donc que les semences sont adaptées et résistent aux caprices du climat. Tant que ces semences ne sont pas des organismes génétiquement modifiés (OGM), il n'y a pas de risques potentiels pour l'environnement. La recette traditionnelle pour les semences améliorées durables consiste à sélectionner les plants les plus résistants naturellement et les amener à se reproduire entre eux pour créer une descendance de végétaux plus forts. La diversification des cultures est le fait de cultiver sur une même parcelle plusieurs types spéculations au cours d'une même période. La symbiose entre les cultures leur permettrait d'être plus résilients au changement climatique notamment aux déficits hydriques. Et en ce qui concerne la préservation de l'environnement, l'association de céréales et de légumineuses par exemple permettrait d'empêcher l'érosion du sol.

Le Mali et plus particulièrement les régions de Ségou et de Sikasso nous servent de cadres d'étude. Ces deux régions sont des cadres d'étude intéressants pour plusieurs raisons. Premièrement, elles font face à une grande vulnérabilité à l'égard de la sécheresse comme le montre la

extraite du Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques (2013). En effet, ces deux régions, respectivement 3eme et 4eme régions administratives du Mali, sont les régions les plus humides et comme on peut le voir sur la

3.1, elles sont situées dans le Sud du Mali. Bien que ces régions soient structurellement humides, elles ne sont pas épargnées par des épisodes de déficits hydriques.

Figure 3. 1: Carte de vulnérabilité à la sécheresse du Mali



Source : Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques (Novembre 2013) it

rurales. Elles bénéficient d'un climat sous-tropical avec des précipitations très abondantes durant la saison des pluies. La production agricole y est abondante. Les fruits et légumes y sont disponibles toute l'année et l'autosuffisance alimentaire y est assurée à la différence du reste du Mali (Almoustapha, 2003). Ces deux régions contribuent fortement à fournir de la

nourriture aux autres régions du Mali, notamment aux régions situées dans le nord où le climat n'est pas favorable à l'agriculture. La région centrale autour de Ségou joue le rôle de centre de distribution pour la production de céréales, mais les contraintes dues à l'évolution du climat et à l'incertitude politique étendent l'insécurité alimentaire chronique vers le sud (Funk et al. 2012). Selon Aune (2008), si l'aide au développement cible les zones vulnérables, cela pourrait accroître l'adaptation des pays sahéliens à la sécheresse et, par voie de conséquence, réduire la pauvreté.

Ce chapitre se focalise sur le comportement d'adaptation chez les producteurs de céréales notamment le mil, le sorgho, le maïs et le fonio. Cette restriction aux céréales se justifie par le fait que les céréales constituent l'alimentation de base des populations maliennes et que des études orientées vers l'augmentation de la production des céréales sont mieux indiquées pour contribuer à l'atteinte de la sécurité alimentaire. En plus, l'étude de Hyman et al. (2008) sur la probabilité de la sécheresse et les effets de celle-ci sur les systèmes d'agriculture tropicale du monde montre que les céréales, en particulier le mil et le sorgho, sont les cultures les plus sensibles à la sécheresse et cela affecte la nutrition des enfants.

Le reste du chapitre est organisé comme suit : dans la section suivante, nous faisons une revue de la littérature sur le sujet, puis la troisième section donne une vue d'ensemble de ce qui est fait en termes d'adaptation au changement climatique au Mali. La section 4 présente le modèle empirique mis en œuvre et les données utilisées. Les résultats sont discutés à la section 5 et la section 6 est consacrée à la conclusion.

2. Revue de la littérature

De nombreuses études se sont intéressées aux déterminants des stratégies d'adaptation au changement climatique. Entre autres études, on peut citer Agwata et al. 2014, Tiwari et al. 2014, Sanga et al. 2013, Nabikolo et al. 2012, Obayelu et al. 2014, Tazeze et al. 2012 ; Nhemachena et Hassan (2008) ; Deressa et al. 2009 ; Neil et al. 2005 ; Pradeep et Rosenthal (2003) ; Schneider et al. 2001, Maddison (2006).

Cette abondante littérature met en exergue trois principales catégories de facteurs qui encouragent ou découragent l'agriculteur d'adopter des stratégies d'adaptation au changement climatique. Il s'agit (i) des caractéristiques sociodémographiques des ménages (l'âge, le sexe

et le niveau d'éducation du chef de ménage, la taille du ménage, l'accès au crédit, le lien avec un réseau d'agriculteur, ...), (ii) les caractéristiques biophysiques des parcelles (le relief de la parcelle, les propriétés et la texture du sol, la zone agro écologique, la taille de la parcelle, ...) ainsi que (iii) l'instabilité du climat (Pluies, températures, sécheresse, inondation, vent fort et violent, ...). Pour certaines variables, la littérature est unanime sur le signe de la relation avec l'adoption de stratégies d'adaptation au changement climatique. Par exemple, dans la littérature, la variable « accès à l'information sur le climat et à l'information sur les pratiques agricoles » présente toujours un signe positif. Par contre, pour d'autres variables comme le sexe du chef de ménage ou la taille de la parcelle, le signe de la relation est controversé dans la littérature. Lorsque dans la littérature, le signe et la significativité associés à une variable sont controversés, les raisons de la controverse sont le contexte géographique, social et culturel de la zone d'étude et/ou la spécificité de la stratégie d'adaptation au changement climatique qui est étudiée. Une revue de la littérature plus détaillée sur les déterminants de l'adaptation au changement climatique au niveau des agriculteurs peut être consultée dans l'étude de Deressa et al. 2009.

3. Initiatives engagées en termes d'adaptation au changement climatique au Mali

Le gouvernement malien a fait de l'adaptation au changement climatique une priorité. Les initiatives du gouvernement en faveur de l'adaptation au changement climatique sont nombreuses et visibles dans le Plan National de Développement du Mali, le Programme National d'Adaptation (NAPA, 2007), la Politique, la Stratégie Nationale et le Plan d'Action sur le changement climatique, développés par le Gouvernement du Mali en 2011. Le programme proposé est conforme aux priorités nationales énoncées par le Gouvernement. Pour faire face à ce défi, un nombre important d'actions gouvernementales ont été entreprises au Mali. Par exemple, en mars 2017, le gouvernement malien, par le biais de son ministre de l'Environnement, de l'assainissement et du développement durable, a signé des contrats avec l'ONG Mali-Folkcenter Nyetaa, l'ambassade de Suède et 10 ONGs membres de l'organisme Reso-Climat, dans le cadre de la mise en œuvre du Programme d'appui aux Initiatives Locales d'Adaptation Durable aux effets des Changements Climatiques des communautés rurales

vulnérables du Mali (PIL-ADCC).³⁴ Avant cette action de 2017, notons que déjà en 2010, le gouvernement malien avait lancé, en partenariat avec le PNUD et grâce au soutien financier du Fonds pour les Pays les Moins Avancés (FPMA) géré par le Fonds pour l'environnement mondial, le projet d'amélioration de la capacité d'adaptation pour mettre le secteur agricole à l'épreuve des dérèglements climatiques. En 2013, le Gouvernement canadien a approuvé l'allocation de financements supplémentaires pour tirer profit des résultats obtenus par le projet financé par le FPMA et les étendre dans le cadre de la Facilité d'Adaptation au Changement Climatique Canada/PNUD (FACC). Le projet de la FACC au Mali vise à réduire les risques liés au changement climatique et à améliorer la sécurité alimentaire dans les quatre communes cibles évoquées ci-dessus.³⁵ On peut aussi citer l'initiative pour l'Adaptation de l'Agriculture Africaine (AAA) lancée en avril 2016 et adoptée en septembre 2017 qui a pour ambition de mettre l'agriculture africaine au rang des priorités internationales. La FAO et le Gouvernement du Mali travaillent ensemble pour contribuer à fournir aux agriculteurs les connaissances et outils nécessaires pour s'adapter au changement climatique à travers un projet intitulé «Intégration de la résilience climatique dans la production agricole pour la sécurité alimentaire en milieu rural au Mali» (GCP/MLI/033/LDF). Le projet de quatre ans, lancé en 2011, vise à créer un environnement propice pour permettre aux agriculteurs de mieux faire face aux changements quotidiens et saisonniers dans leurs systèmes de production. Le projet utilise une variété d'approches éducatives participatives et non formelles, notamment les Champs Ecoles des Producteurs (CEP).³⁶ L'élaboration et l'exécution du Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux effets néfastes des Changements Climatiques (PANA) au Mali entrent aussi dans le cadre de la mise en œuvre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) que le Mali a signée et ratifiée respectivement le 22 septembre 1992 et le 28 décembre 1994. L'objectif de développement du PANA est de contribuer à atténuer les effets néfastes des changements climatiques sur les populations les plus vulnérables, dans la perspective d'un développement durable et de lutte contre la pauvreté au Mali. Le document du Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux effets néfastes des Changements Climatiques du Mali donne un aperçu sur le contenu des activités prioritaires à entreprendre pour faire face aux besoins et préoccupations urgents et immédiats aux fins de l'adaptation aux effets néfastes des

³⁴ <http://www.essor.ml/changement-climatique-10-projets-pour-aider-les-communautés-vulnérables/>

³⁵ http://www.adaptation-undp.org/sites/default/files/resources/ccaf_brochure_mali_fr.pdf

³⁶ <http://www.fao.org/agriculture/ippm/projects/mali/gcp-mli-033-ldf/fr/>

changements climatiques. D'autres part, l'adaptation aux Changements Climatiques s'inscrit dans la mise en œuvre du Programme de préservation des ressources naturelles et vise à renforcer les capacités des populations rurales vulnérables aux risques induits (PAD, 2013).

D'autres initiatives en faveur de l'adaptation aux changements climatiques au Mali sont engagées par les organismes non gouvernementaux et les institutions internationales. En effet, la politique agricole du Mali est basée sur le développement d'une agriculture intelligente et les projets de résilience développés bénéficient du financement de la Banque Islamique de Développement (BID), de la Banque mondiale ainsi que de la BAD et de la FAO³⁷ (PAD, 2013).

Un nombre important de programmes et de projets a été engagé sur l'adaptation. Entre autres initiatives, nous pouvons relever le Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux effets néfastes des Changements Climatiques (PANA) avec 19 idées de projets prioritaires, l'étude des scénarios plausibles futurs pour le climat au Mali, plusieurs projets de renforcement des capacités pour la mise en œuvre des activités de changement climatique, le Programme de pluies provoquées, l'assistance agro météorologique au monde rural, le projet d'amélioration de la capacité d'adaptation et la résilience face aux effets des changements climatiques dans l'agriculture, le Projet Initiative Pauvreté Environnement qui intervient sur l'intégration de l'environnement dans les politiques sectorielles, l'élaboration d'un Cadre Stratégique d'Investissement en matière de gestion Durable des Terres, le Programme d'Appui aux Initiatives de l'organisme Reso-Climat Mali. (Source PNCC, 2011). Il y a aussi le PNNCC qui se propose de renforcer la capacité d'adaptation des populations et la résilience des systèmes écologiques, des systèmes économiques et des systèmes sociaux face aux effets des changements climatiques par l'intégration de mesures d'adaptation prioritairement dans les secteurs les plus vulnérables. OP N°3 : Renforcement des actions d'adaptation aux impacts des changements climatiques. Le PANA adopté en 2007 par le Gouvernement du Mali.

On peut aussi citer le Programme de renforcement de la résilience à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle au Sahel (P2RS) qui préconise le renforcement de la résilience au changement climatique, le financement à long terme du secteur agricole et le développement du commerce et de l'intégration régionale comme solution durable à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle

³⁷ <http://maliactu.net/mali-adaptation-de-lagriculture-aux-effets-du-changement-climatique-linitiative-triple-a-pour-sauver-lagriculture-africaine/>

au Sahel. En plus, il y a des programmes d'irrigation de proximité (IPRO). On peut également citer les différents projets et programmes développés par le CILSS pour renforcer la résilience des pays du Sahel aux effets du changement climatique, notamment le Projet régional d'appui au pastoralisme au Sahel (PRAPS) et le Projet d'appui régional à l'initiative pour l'irrigation au Sahel (PARIIS-SIIP). Tout le Projet de renforcement de la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans la Région de Koulikoro (PRESAN-KL et PRESA-DCI).

Comme autres exemples de projets, on peut citer deux projets allemands : la Planification innovante au développement visant l'Adaptation aux Changements Climatiques (PICP) dans les régions de Kayes, Koulikoro et Ségou. A terme, ce projet permettra la révision ou l'élaboration des outils et instruments d'intégration d'adaptation aux changements climatiques dans la planification du développement. Ainsi, 20 plans de développement socioéconomique (PDESC) intégreront des mesures d'adaptation. On verra aussi l'amélioration de la capacité des décideurs et planificateurs à accéder aux fonds pour le climat et à assurer le suivi et l'évaluation du projet.³⁸ Par ailleurs, les projets et programmes dans les régions du nord incluent le programme de la GIZ qui soutient l'irrigation des exploitations le long du fleuve Niger dans la région de Tombouctou. L'Agence danoise pour le développement international (DANIDA) assiste le gouvernement du Mali sur les problèmes liés à la gestion de l'eau et l'appuie aussi dans un programme de développement de l'eau potable dans les régions de Sikasso et Mopti. Au Mali, la recherche est également au service de l'adaptation au changement climatique³⁹.

4. Caractérisation de la sécheresse : le SPEI, un indice qui permet d'appréhender les extrêmes climatiques

Le glossaire publié dans le Troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001 a, b, c) définit les changements climatiques comme étant une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus). Le changement climatique comporte les variations de faibles amplitudes et les variations de fortes amplitudes (les extrêmes

³⁸ <http://www.jstm.org/adaptation-au-changement-climatique-lallemagne-dirige-deux-projets-au-mali/>

climatiques). Dans ce chapitre, nous nous intéressons au second type de variation du climat, plus particulièrement de la sécheresse.

La sécheresse est un phénomène qui se produit lorsque les précipitations sont sensiblement inférieures aux niveaux normaux enregistrés et provoquent des déséquilibres hydrologiques importants néfastes pour les systèmes de production de ressources terrestres. La sécheresse est l'état normal ou passager du sol et/ou d'un environnement correspondant à un manque d'eau sur une période significativement longue pour qu'elle ait des impacts sur la flore naturelle ou cultivée, la faune sauvage ou les animaux d'élevage.

Dans la littérature, le « climat moyen sur l'année » est généralement utilisé comme variable climatique pour étudier l'adaptation des agriculteurs aux changements climatiques, de (Hassan et al. 2008 ; Deressa et al. 2009). Une autre approche suggère de considérer la variable climatique de l'année qui précède la campagne agricole étudiée (Smither et Smit (1997) et l'IPCC (2001)).

Dans ce chapitre, nous pensons qu'il est plus intuitif de considérer que c'est le niveau de sécheresse observé lors de la saison des pluies en année (n-1) qui pousse l'agriculteur à choisir certaines pratiques agricoles au cours de l'année (n). Ainsi, puisque cette étude porte sur la campagne agricole 2004/2005, c'est le niveau de sécheresse de 2003/2004 que nous introduirons dans nos analyses.

Dans ce chapitre, le niveau de sécheresse est déterminé grâce à l'indice « Standardized Precipitation Evapotranspiration Index » (SPEI⁴⁰) développé par Vicente et al. (2010). Cet indice présente l'avantage de combiner les effets des températures et des précipitations et permet de rendre compte de la disponibilité en eau. En effet, certains indices sont calculés avec une seule variable climatique. C'est l'exemple de l'indice standardisé de précipitation (Standardized Precipitation Index (SPI)) qui est calculé avec les données de précipitations seulement. Un autre avantage de l'indice SPEI est qu'il permet l'identification, du début et de la fin, de la sécheresse. En plus, le SPEI peut être déterminé pour différentes échelles temporelles (1 à 3 mois, 6 mois, 12 à 24 mois). Enfin, le SPEI est facile à calculer comparativement aux autres indices.

⁴⁰ Les formules et les explications détaillées sur l'indice SPEI peuvent être consultées dans l'article de Vicente et al, 2010. Les packages pour le calcul du SPEI sont disponibles sur le logiciel R. Nous avons également fait une présentation détaillée du SPEI dans la section 2 du premier chapitre de cette thèse.

Dans ce chapitre, nous calculons l'indice SPEI sur une période de 6 mois, entre juin et novembre 2003. Cette échelle temporelle nous a semblé plus appropriée pour appréhender les carences ou les excès en eau dans les arrondissements où se situent les parcelles. En effet, c'est la disponibilité en eau pendant cette période qui détermine la quantité de céréales qui sera récoltée, car c'est pendant cette période de croissance des plants que le besoin en eau est indispensable. Une sécheresse de courte durée et d'intensité modérée qui survient alors qu'une culture bien établie est sensible à l'humidité, a parfois un effet plus dévastateur sur le rendement qu'une sécheresse longue et intense qui survient à un moment moins crucial du cycle de culture.

Nous avons d'abord calculé le SPEI dans notre zone d'étude, c'est-à-dire pour les arrondissements de Sikasso et Ségou. Puis, nous avons regroupé les 6516 parcelles situées dans notre zone d'étude suivant le classement des niveaux de l'indice SPEI de la NOAA's National Centers for Environmental (voir Table 3.1 ci-dessous). Il ressort que pour la quasi-totalité de ces parcelles, les conditions hydro-climatiques entre juin et novembre 2003 correspondent à des épisodes de sécheresse.

Table 3. 1: Conditions hydro-climatiques selon les différents seuils de l'indice SPEI

Classement des conditions hydro-climatiques selon le niveau de l'indice SPEI (source NOAA's National Centers for Environmental)		Pourcentage des 6516 parcelles selon les conditions hydro-climatiques (en %)
Valeur de SPEI	Conditions hydro-climatiques	
SPEI >2	Exceptionnellement humide	/
1,60 < SPEI <1,99	Extrêmement humide	/
1,30 < SPEI <1,59	Très humide	/
0,80 < SPEI <1,29	Modérément humide	/
0,51 < SPEI <0,79	Légèrement humide	/
-0,5 < SPEI <0,5	Proche des conditions normales	4.25
-0,79 < SPEI <-0,51	Légèrement sec	12.22
-1,29 < SPEI <-0,80	Modérément sec	47.59
-1,59 < SPEI <-1,30	Très sec	21.96
-1,99 < SPEI <-1,60	Extrêmement sec	10.88
SPEI <-2	Exceptionnellement sec	3.10
Total de parcelles		100

Source : l'auteur avec les données climatiques des arrondissements du Mali issues de la Base CRU TS3

5. Modèle empirique et données

5.1. Modèle empirique : le modèle Logit multinomial

Face à la variabilité du climat, lorsque le choix d'un agriculteur est de s'y adapter, l'ajustement consistera en l'utilisation d'une stratégie ou d'une combinaison de stratégies parmi un ensemble fini et exhaustif de possibilités mutuellement exclusives. Du point de vue économétrique, un modèle de choix discret apparaît donc approprié pour appréhender les aspects rationnels du comportement de l'agriculteur et identifier les facteurs explicatifs de chaque alternative qu'il choisit. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons le modèle Logit Multinomial (MNL) après avoir pris soin de vérifier la validité du modèle, c'est-à-dire qu'il y a indépendance des alternatives non pertinentes. Ce modèle a l'avantage de prendre en compte le fait qu'un agriculteur peut choisir une ou plusieurs stratégies parmi un nombre N de stratégies possibles.

Le modèle est donc spécifié de la façon suivante : soit X le vecteur de variables qui peuvent expliquer le choix d'une stratégie d'adaptation par un agriculteur. X peut contenir les variables de conditions climatiques, les attributs de l'agriculteur et des variables liées aux caractéristiques de sa parcelle. Estimer le modèle MNL revient à étudier comment une modification dans le vecteur X affecte la probabilité de choisir une stratégie d'adaptation donnée. Ainsi, étant donné un vecteur x de variables explicatives, la probabilité qu'un agriculteur i choisisse une stratégie d'adaptation j (avec $j=0, 1, 2, \dots, m$) s'écrit :

$$p(y_i = j/x_i) = \frac{\exp(x_i \beta_j)}{\sum_{k=0}^m \exp(x_i \beta_k)} \quad (1)$$

Avec $\beta_j \in \mathbb{R}^k$ le vecteur des coefficients des variables explicatives x pour la stratégie j

$$p(y_i = j/x_i) = \frac{\exp(x_i \beta_j) / \exp(x_i \beta_0)}{[\sum_{k=0}^m \exp(x_i \beta_k)] / \exp(x_i \beta_0)} = \frac{\exp[x_i (\beta_j - \beta_0)]}{\sum_{k=0}^m \exp[x_i (\beta_k - \beta_0)]} \quad (2)$$

En posant $\beta_j^* = \beta_j - \beta_0, \forall j$, on obtient $\beta_0^* = 0$. Ce changement de variable donne une expression de la probabilité similaire à celle de l'équation (1).

$$p(y_i = j/x_i) = \frac{\exp(x_i \beta_j^*)}{\sum_{k=0}^m \exp(x_i \beta_k^*)} = \frac{\exp(x_i \beta_j^*)}{1 + \sum_{k=1}^m \exp(x_i \beta_k^*)} \quad (3)$$

Cette transformation conduit à normaliser les paramètres et à lever l'indétermination du modèle. Les paramètres du modèle correspondent désormais aux différences entre les paramètres originaux β_j et le vecteur de paramètres de la modalité de référence β_0 .

L'estimation de l'équation (3) donne le logarithme népérien de m_ odds ratios :

$$\ln\left(\frac{p_{ij}}{p_{ik}}\right) = x_i'(\beta_j - \beta_k) = x_i'\beta_j, \text{ si } k = 0 \quad (4)$$

La variable expliquée est donc le logarithme de la probabilité relative d'une alternative donnée (par exemple l'utilisation de semences améliorées) par rapport à l'alternative de référence (la référence étant de n'utiliser aucune stratégie d'adaptation). Afin d'interpréter l'effet de x sur la probabilité p_{ij} l'effet marginal est utilisé suivant les travaux de Greene (2003).

$$\frac{\partial p_j}{\partial x_i} = p_j(\beta_j - \sum_{k=0}^j p_k \beta_k) = p_j(\beta_j - \bar{\beta}_k) \quad (5)$$

L'effet marginal mesure donc le changement dans la probabilité du choix d'une stratégie d'adaptation donnée suite à la modification d'une unité de la variable explicative (Greene, 2003).

5.2. Bases de données et statistiques descriptives des variables descriptives

• Bases de données

Les données utilisées proviennent du recensement général agricole réalisé au Mali en 2004. Cette base de données contient des informations sur les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs, les caractéristiques des parcelles, les quantités d'intrants utilisés et les rendements agricoles. Notre échantillon est constitué de 6516 parcelles situées à Sikasso et à Ségou sur lesquelles sont cultivées les céréales en monoculture ou en association. Nous avons retenu les plus grandes parcelles pour chaque ménage. L'hypothèse est que c'est sur les plus grandes parcelles que le ménage met en œuvre des pratiques stratégiques pour avoir le plus de production. Il est donc intéressant d'étudier le comportement d'adaptation de l'agriculteur sur

sa plus grande parcelle. Les données pour chacune des parcelles et les données climatiques de l'arrondissement⁴¹ dans lequel se situe la parcelle sont appariées.

La variable de sécheresse représentée par l'indice SPEI, est calculée à partir des données météorologiques du Mali pour la période de 1901 à 2004 qui ont été extraites de la base CRU TS3.

- **Statistiques descriptives**

La variable expliquée est l'adoption d'une ou de plusieurs stratégies d'adaptation aux changements du climat parmi les trois stratégies que nous étudions. La Table 3.2 présente la distribution des agriculteurs de notre échantillon selon les différentes stratégies étudiées. Il apparaît que presque la moitié des agriculteurs ne choisissent pas l'une des trois stratégies étudiées (48.66%). Parmi ceux qui s'adaptent à la sécheresse, la plupart opte pour un changement de la date de mise sous terre des semences (30.45%). En outre, 11% des agriculteurs de notre échantillon associent plusieurs cultures sur une même parcelle et un peu moins de 10% d'entre eux utilisent des semences améliorées. Contrairement à la diversification des cultures sur une même parcelle, l'utilisation des semences améliorées est une stratégie d'adaptation coûteuse. Le faible effectif des agriculteurs qui s'en servent peut se justifier par la forte contrainte de financement qui s'impose aux agriculteurs maliens. Le changement de la date de mise sous terre des semences est une stratégie intensive en main-d'œuvre. En somme, la disponibilité des ressources aussi bien humaines que financières semble être un facteur déterminant dans la prise de la décision de s'adapter.

Table 3. 2: Distribution des agriculteurs selon la stratégie d'adaptation aux changements climatiques

Stratégies	Fréquences (effectifs)	Pourcentage (%)
Pas d'adaptation au changement climatique	3 461	53,1
Utilisation des semences améliorées	945	14,5
Diversification des cultures sur une parcelle	1207	18,5
Changement de la date de mise sous terre des semences	1 984	30,4

⁴¹ L'idéal aurait été d'avoir les données climatiques pour chacune des 6516 parcelles de notre échantillon. Mais cela aurait nécessité de réaliser des relevés d'informations météorologiques sur chacune de ces parcelles. Ce cas de figure est difficilement envisageable car au-delà des coûts que cela aurait nécessités, il aurait tout aussi été difficile de réaliser des opérations de relevés de données météorologiques sur une longue période pour identifier les changements climatiques.

Chapitre 3 : Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali ...

Source : L'auteur avec les données du RGA de 2004 du Mali.

Note : Le total dans ce tableau est supérieur à 6516, de même la somme des pourcentages n'est pas égale à 100. En effet, un agriculteur peut mettre en œuvre plusieurs pratiques agricoles listées dans le tableau.

En ce qui concerne les variables explicatives, la littérature permet de relever que les caractéristiques sociodémographiques des ménages, les caractéristiques biophysiques des parcelles ainsi que la survenue de fortes sécheresses au cours de la précédente saison des pluies, sont des facteurs qui peuvent encourager ou décourager le choix d'une pratique donnée. Les variables explicatives utilisées pour cette étude sont définies dans la Table 3.3.

Table 3.3: Définition des variables

Variables explicatives	Description des variables
Age du chef de ménage	Continue, âge du chef d'exploitation
Genre du chef de ménage	Muette = 1 si le sexe est masculin et 0 si non
Niveau d'étude du chef de ménage	Muette = 1 s'il s'agit d'études primaires et 0 si non
Taille du ménage	Continue, nombre d'individus
Participation à une organisation paysanne	Continue, membres de l'exploitation appartenant à une organisation paysanne
Crédit	Muette = 1 s'il y a accès au crédit et 0 si non
Pratique de l'élevage	Muette = 1 si le bétail est en propriété et 0 si non
Possession d'un moyen de transport	Muette = 1 s'il y a une facilité de transport et 0 si non
Superficie de la parcelle	Continue, superficie de la parcelle en hectare
Parcelle sur relief Plaine	muette = 1 s'il y a une parcelle sur relief Plaine et 0 si non
Parcelle sur relief Plateau	muette = 1 s'il y a une parcelle sur relief Plateau et 0 si non
Parcelle sur relief Bas-fonds	muette = 1 s'il y a une parcelle sur relief Bas-fonds et 0 si non
Parcelle sur relief Pente faible	muette = 1 s'il y a une parcelle sur relief Pente faible et 0 si non
Parcelle sur relief Pente forte	muette = 1 s'il y a une parcelle sur relief Pente forte et 0 si non
Distance du domicile à la parcelle	Continue, nombre de km entre le domicile et la parcelle
Accès aux équipements agricoles	muette = 1 si les travaux sont mécanisés et/ou attelés, 0 si non
Droit de propriété sur la parcelle	muette = 1 s'il y a possession du droit de propriété et 0 si non
Sécheresse en saison de pluie en année (n-1)	muette = 1 s'il y a sécheresse en saison de pluie en année (n-1) et 0 si non

Les statistiques descriptives de ces variables sont répertoriées dans la Table 3.4 et la Table 3.5 ci-dessous. Sur l'échantillon étudié, les chefs de ménages sont en majorité de sexe masculin (96,6 %), l'âge moyen du chef de ménage est de 52 ans et parmi eux, seulement 18,5% ont achevé le cycle d'enseignement primaire. Les ménages sont en moyenne constitués de 12 membres avec une moyenne de deux membres qui participent à une organisation paysanne. Les statistiques au niveau des ménages montrent aussi que 16,6% des ménages ont accès au crédit, 81,9% pratiquent l'élevage et 67,1% possèdent un moyen de transport. Par ailleurs, 69,7% des ménages ont accès aux équipements agricoles, 84,1% possèdent un droit de propriété. On relève aussi que le nombre de parcelles cultivées est plus important sur les reliefs en plaine tandis que très peu de parcelles sont cultivées sur les reliefs à pente forte. Au regard des statistiques, la superficie moyenne des parcelles est de 2,5 hectares et environ 95% des parcelles de notre échantillon sont situées dans des arrondissements exposés à la sécheresse entre juin et novembre 2003. Rappelons que l'hypothèse que nous faisons dans cette étude est que c'est la sécheresse pendant la saison des pluies en année n-1 qui est susceptible d'influencer l'agriculteur dans sa décision de s'adapter ou non au changement climatique qu'il a observé. Du point de vue agronomique, la saison des pluies détermine les quantités qui seront récoltées.

Table 3. 4: Statistiques descriptives des variables explicatives continues

Variabes explicatives continues	Moy.	S.D.	Min	Max
Age du chef de ménage	52	14.59	16	99
Taille du ménage agricole	12	9.305	1	99
Participation à une organisation paysanne	2	3.253	0	38
Superficie de la parcelle	2.516	3.984	0.0013	112.4
Distance du domicile à la parcelle	3.336	5.504	0	88

Source : L'auteur avec les données du RGA de 2004 du Mali

Table 3. 5: Statistiques descriptives des variables explicatives discrètes (n=6516 agriculteurs)

Variabes explicatives continues	En pourcentage (%)
Genre du chef de ménage	96,9
Niveau d'études du chef de ménage	18,5
Crédit	16,6
Pratique de l'élevage	81,9

Variables explicatives continues	En pourcentage (%)
Possession d'un moyen de transport	67,1
Parcelle sur relief Plaine	53,2
Parcelle sur relief Plateau	19
Parcelle sur relief Bas-fonds	9,36
Parcelle sur relief Pente faible	15,8
Parcelle sur relief Pente forte	02,64
Accès aux équipements agricoles	69,7
Possession d'un droit de propriété sur la parcelle	84,1
Sécheresse en saison des pluies en année (n-1)	95,7

Source : L'auteur avec les données du RGA de 2004 du Mali

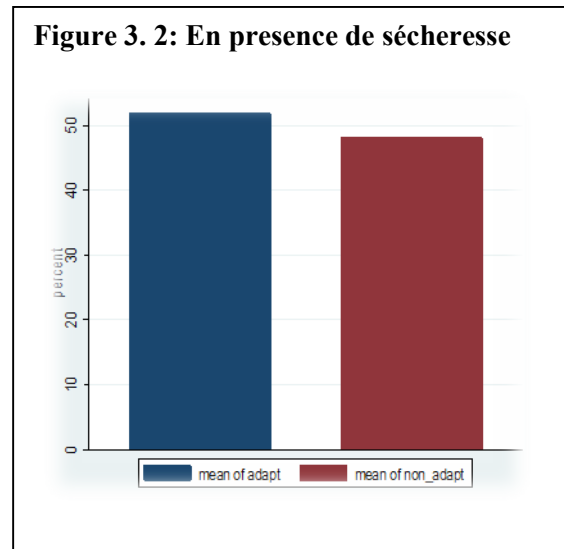
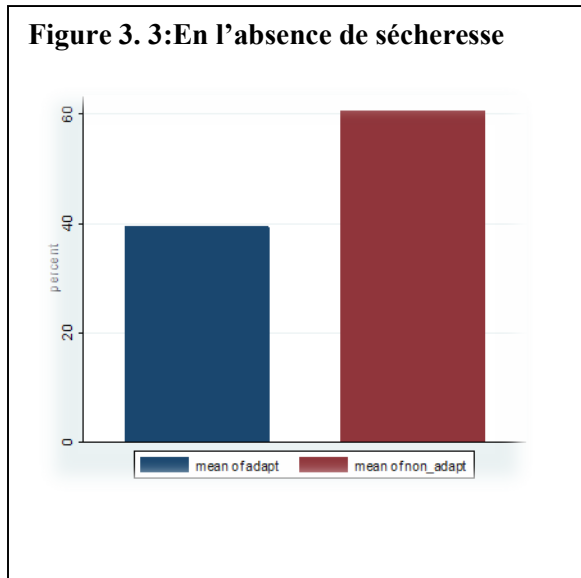
En utilisant les valeurs de l'indice SPEI et le classement⁴² des conditions hydro-climatiques selon la NOAA's National Centers for Environmental Information, nous avons généré une variable du niveau de la sécheresse. Cette variable est binaire et prend la valeur 0 pour les milieux qui ont été exposés aux conditions climatiques proches de la normale ($-0.5 < \text{SPEI} < 0.5$) au cours de l'année précédant la campagne agricole. Cette variable prend la valeur 1 si les conditions n'ont pas été quasi-normales. Comme nous l'avons relevé ci-dessus, sur notre échantillon il n'y a aucune donnée de $\text{SPEI} > 0.5$, les changements climatiques sont donc exclusivement des épisodes de sécheresse plus ou moins importants.

5.3. Faits stylisés : la relation entre la sécheresse et la décision de mettre en œuvre une pratique d'adaptation aux changements climatiques

Les histogrammes ci-après représentent les répartitions des agriculteurs selon leur décision de mettre en œuvre ou non des pratiques qui contribuent à l'adaptation aux changements climatiques en l'absence de changements climatiques (Figure 3.2) tout comme en présence de ces derniers (figure 3.3). On note que les agriculteurs qui n'entreprennent aucune action, représentent en l'absence de changements climatiques un peu plus de 60% de notre échantillon. Cette proportion diminue jusqu'à 48% lorsque les conditions hydro-climatiques ne sont pas favorables à l'activité agricole. A l'inverse, lorsqu'il y a des changements climatiques, un peu plus de 52% des agriculteurs de notre échantillon adopte au moins une stratégie pour pallier les risques climatiques contre 39% lorsqu'il n'y a pas de changements

⁴² Voir le Table 3.1

climatiques. Ces figures montrent l'existence d'une relation entre la survenue d'un épisode de sécheresse et la décision des agriculteurs d'adopter au moins une stratégie pour s'ajuster à l'évolution du climat.



Source : L'auteur avec les données du RGA de 2004 du Mali et les données climatiques issues de CRU TS3

6. Résultats et discussions

Les pratiques que nous étudions, notamment ((i) l'utilisation des semences améliorées, (ii) la diversification des cultures et (iii) la modification de la date de mise sous terre des semences)), sont analysées en comparaison avec l'option de référence qui est la non-adoption d'au moins une de ces trois pratiques.

Avant de procéder à l'estimation, nous vérifions qu'il n'y a pas de multi colinéarité entre les variables explicatives. Les résultats du test du Facteur d'Inflation de la Variance (VIF) sont consignés dans le Table 3. 5 en annexe. Les valeurs du VIF pour l'ensemble des coefficients associés aux variables explicatives sont comprises entre 1.03 et 1.43 avec une moyenne de 1.12. Autrement dit, pour chacun des coefficients associés aux variables explicatives, le VIF est inférieur à 10 (valeur maximale admise). Ceci indique qu'il n'y a pas de problème de multi colinéarité dans les modèles que nous allons estimer en utilisant ces variables.

Nous avons estimé par la suite le modèle MNL suivi du test de validité de l'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA). Le test d'Hausman mis en œuvre à cet effet ne permet pas de considérer l'hypothèse comme nulle d'indépendance à l'égard des différentes stratégies

d'adaptation aux changements climatiques. La statistique du Chi-deux a une valeur comprise entre -3 et 11.87 avec une P-value égale 1. Le résultat de ce test suggère donc que le modèle MNL est approprié pour cette étude. En plus, la statistique de Chi-deux associée au test du ratio de vraisemblance est assez importante : 835.94 avec une P-value nulle. Ce qui montre que le pouvoir explicatif du modèle est élevé.

Comme nous l'avons relevé dans la présentation du modèle empirique, les paramètres résultant de l'estimation du MNL sont des élasticités qui rendent compte du sens de la relation entre la probabilité de choisir une stratégie d'adaptation et les variables explicatives de ce choix. L'intensité de la relation entre la probabilité de choisir une stratégie donnée et les variables explicatives est donnée par les effets marginaux issus de l'estimation du modèle MNL. L'effet marginal mesure la variation espérée dans la probabilité du choix d'une stratégie adoptée en tenant compte de l'augmentation d'une unité supplémentaire de la variable explicative. La Table 3.6 ci-dessous présente les effets marginaux issus de l'estimation du modèle⁴³ MNL pour les trois stratégies d'adaptation étudiées : l'utilisation des semences améliorées, la diversification des cultures et le changement de la date de mise sous terre des semences. Chacune de ces trois stratégies est évaluée par rapport à l'option de ne pas s'adapter au changement climatique.

Table 3. 6: Effets marginaux des variables explicatives de l'adaptation des agriculteurs aux changements climatiques (estimation du Modèle Logit Multinomial)

	Utilisation de semences améliorées		Diversification des cultures		Choix de la date de mise sous terre des semences	
	Coef.	Écart Type	Coef.	Écart Type	Coef.	Écart Type
Genre du chef de ménage	-0.009	0.02	-0.030	0.02	-0.021	0.03
Âge du chef de ménage	-0.001*	0.00	0.001***	0.00	-0.000	0.00
Niveau d'études du chef de ménage	0.012	0.01	0.027**	0.01	-0.027	0.02
Taille du ménage	-0.001	0.00	0.000	0.00	0.002*	0.00
Crédit	0.028**	0.01	-0.100***	0.01	0.079***	0.02
Participation à une organisation	-0.003	0.00	0.003*	0.00	0.005*	0.00
Parcelle en propriété	-0.083***	0.01	0.057***	0.01	0.014	0.02
Superficie de la parcelle	-0.013***	0.00	0.004***	0.00	0.000	0.00
Parcelle sur relief Plateau	-0.072***	0.01	0.049***	0.01	0.028	0.02

⁴³ La Table 3.8 en annexe présente les élasticités.

Parcelle sur relief Bas-fonds	0.004	0.01	-0.094***	0.02	0.042*	0.02
Parcelle sur relief Pente faible	-0.016	0.01	0.026*	0.01	0.000	0.02
Parcelle sur relief Pente forte	0.028	0.02	0.020	0.02	-0.024	0.04
Pratique de l'élevage	-0.031***	0.01	-0.006	0.01	0.035*	0.02
Distance entre le domicile et la parcelle	-0.000	0.00	-0.001	0.00	0.004***	0.00
Accès aux équipements agricoles	0.015*	0.01	0.042***	0.01	0.075***	0.01
Possession d'un moyen de transport	-0.055***	0.01	0.034***	0.01	0.047***	0.01
Sécheresse_ saison de pluie en année n-1	0.090***	0.03	0.048*	0.02	0.009	0.03

Significativité *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

L'âge du chef de ménage

Comme Obayelu et al. 2014, nous trouvons que la relation entre l'âge du chef de ménage et l'utilisation des semences améliorées est négative. Nos résultats montrent que la probabilité d'utiliser les semences améliorées diminue de 0.1% lorsque l'âge du chef de ménage augmente d'un an. Ceux-ci suggèrent qu'à mesure que leur âge augmente, les agriculteurs adopteraient de moins en moins les stratégies risquées et coûteuses comme l'utilisation des semences améliorées. Par ailleurs, nos résultats indiquent que l'âge du chef de ménage influence significativement et positivement la diversification des cultures sur une même parcelle (+ 0.1%). Ce résultat peut trouver sa justification dans la littérature qui explique que l'âge du chef de ménage représente son expérience (Deressa et al. 2009). L'expérience en agriculture augmente la probabilité de s'adapter aux changements climatiques (Nhemachena et Hassan (2008), Maddison (2006)). L'âge du chef de ménage semble ne pas avoir d'effet sur la probabilité de changer la date de mise sous terre des semences.

L'éducation du chef de ménage

L'éducation du chef de ménage a un effet positif et significatif sur l'adoption de la diversification des cultures. Nos résultats indiquent que les chefs de ménage qui ont un niveau d'instruction au moins égal au niveau « fondamentale 1 », ont 2.7% plus de chance de diversifier les cultures sur une parcelle par rapport aux chefs de ménage moins éduqués. Diverses études parviennent à cette même conclusion selon laquelle la relation entre l'éducation et l'adaptation au changement climatique est positive (Tiwari et al. 2014, Sanga et

al. 2013, Tazeze et al. 2012, Maddison (2006)). En plus, selon la Politique de Développement Agricole du Mali (PAD, 2013), ce pays enregistre un faible niveau d'alphabétisation des producteurs agricoles : le niveau d'éducation au Mali reste inférieur à la moyenne des pays d'Afrique subsaharienne et seulement 24% de la population âgée de 15 ans ou plus sont alphabétisés.

Nombre de personnes dans le ménage

Nous trouvons que la taille du ménage est significativement et positivement corrélée au choix de la date de mise sous terre des semences. Ce résultat est similaire aux conclusions de Sanga et al. (2013). D'après notre estimation, si le ménage a un membre supplémentaire, la probabilité de modifier la date de mise sous terre des semences augmente de 0.2%. Comme expliqué dans la littérature (Soe et Mendelson, 2006), on peut inférer qu'un ménage dont le nombre de personnes est élevé, correspond généralement à un ménage à forte dotation en main-d'œuvre agricole, ce qui permet au ménage d'accomplir diverses tâches agricoles. Ainsi, plus un ménage aura plus d'individus plus grande sera sa flexibilité dans l'agenda de réalisation des travaux champêtres. Concernant la diversification des cultures, bien que le coefficient associé à la taille du ménage soit non significatif, le signe positif peut nous conduire à argumenter comme Nhemachena et Hassan (2008) en disant que cette stratégie d'adaptation au changement climatique est intensive en main-d'œuvre. Pour ce qui est de l'utilisation des semences améliorées, bien que le coefficient associé à la variable « taille du ménage » soit non significatif, son signe négatif peut être aussi intéressant à analyser. Partant du constat qu'au Mali les ménages ruraux ont des ressources financières limitées, on peut inférer qu'un ménage qui a plus d'individus aura une faible probabilité à utiliser les semences améliorées, car le peu de ressources financières qu'il possède, sera destiné à la consommation. Tazeze et al. 2012 trouvent aussi un signe négatif et émettent l'hypothèse selon laquelle une famille nombreuse, au lieu d'utiliser les semences améliorées, peut être contrainte à diversifier sa main-d'œuvre vers des activités non agricoles afin que les revenus non agricoles servent à la consommation du ménage.

Accès au crédit

Les résultats du tableau 5 montrent qu'avoir accès au crédit est positivement et significativement lié à la probabilité d'utiliser des semences améliorées (+ 2.8%) et à la probabilité de changer la date de mise sous terre des semences (+ 7.9%). En effet, le crédit est une source de financement qui augmente la capacité de l'agriculteur à faire face au coût de transaction liée à l'adoption des stratégies d'adaptation aux changements climatiques. L'accès au crédit augmente les ressources financières, réduit la contrainte de financement et permet à l'agriculteur d'acheter les inputs comme les variétés de semences résistantes aux intempéries du climat (Sanga et al. 2013, Nabikolo et al. 2012, Bryan et al. 2009, Deressa et al. 2009). Par ailleurs, contrairement à la littérature, nos résultats indiquent que l'accès au crédit a un impact significatif et négatif sur la probabilité de diversifier les cultures sur une même parcelle. Ils suggèrent qu'au Mali, les agriculteurs qui bénéficient du crédit sont plus portés à la pratique de monoculture.

Fréquentation d'une organisation paysanne

Nos résultats indiquent que fréquenter les organisations paysannes augmente les probabilités de diversifier les cultures et de changer la date de mise sous terre des semences respectivement de 0.3% et 0.5%. L'organisation paysanne agirait donc comme un réseau social permettant le partage d'information entre agriculteurs sur les pratiques agricoles efficaces dans un contexte d'instabilité climatique. De plus, selon Agwata et al. 2014 l'agriculteur peut avoir recours à son réseau social s'il est dans le besoin. Ainsi, fréquenter les organisations paysannes augmente la probabilité de voir les agriculteurs s'adapter aux changements climatiques. Cette conclusion est en accord avec celles de Obeyelu et al. 2014, Sanga et al. 2013, Tazeze et al. 2012, Aymone (2009) et Deressa et al. 2009.

La superficie de la parcelle

Comme Agwata et al. 2014 et Tiwari et al. 2014, nous trouvons que la relation entre la superficie de la parcelle et l'utilisation des semences améliorées est négative. Et à l'instar de Sanga et al. 2013, nous trouvons que la relation entre la superficie de la parcelle et la diversification des cultures est positive. En effet, le coefficient associé à la superficie de la parcelle est statistiquement très significatif ; négativement lié avec l'utilisation des semences améliorées (1.3%) et positivement lié à la diversification des cultures sur la parcelle (0.4%). Ce résultat suggère que plus la parcelle est grande, moins les agriculteurs ont recours à des stratégies coûteuses comme l'utilisation des semences améliorées, et plus ils optent pour les

stratégies moins coûteuses comme la diversification des cultures sur la parcelle. Il y a dans la littérature une controverse sur la relation entre la superficie de la parcelle et l'adaptation aux changements climatiques comme l'a fait remarquer Deressa et al. 2009 et Nhemachena et Hassan (2008).

Équipements agricoles (Culture moto-mécanisée et/ou attelée)

Nos résultats montrent que la disponibilité d'équipement agricole est positivement et très significativement corrélée à l'utilisation des semences améliorées (1.5%), la diversification des cultures (4.2%) et au choix de la date de mise sous terre des semences (7.5%). Les agriculteurs disposant de machines et d'animaux pour réaliser les travaux champêtres, sont plus disposés à s'adapter aux changements climatiques que ceux qui n'en possèdent pas. Cette conclusion concorde avec celles de Obayelu et al. 2014 et Nhemachena et Hassan (2008) qui expliquent que les agriculteurs qui ont accès à la technologie, sont plus enclins à adopter les pratiques agricoles innovantes.

Les changements climatiques (la sécheresse en année n-1)

À la suite des résultats auxquels sont parvenus Agwata et al. (2014), nous trouvons que l'agriculteur est sensible à la sécheresse survenue lors de la saison des pluies qui précède la campagne agricole étudiée. Nos résultats montrent que la survenue d'un épisode de sécheresse en saison de pluie de l'année précédente augmente significativement la probabilité d'adopter des semences améliorées (9%) et la diversification des cultures sur la parcelle (4.8%). Pour le choix de la date de mise sous terre des semences, le coefficient associé à la sécheresse est également positif bien qu'il soit non significatif. Ces résultats suggèrent qu'un déficit hydrique en saison de pluies augmente la probabilité que l'agriculteur mette en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Cette conclusion est globalement conforme à celles de Sanga et al. (2013), Deressa et al. (2009), Nhemachena et Hassan (2008).

Élevage

La possession d'animaux a un effet significatif et positif sur le choix de la date de mise sous terre des semences (+ 4.8%). Ce résultat corrobore les conclusions de Tazeze et al. 2012 et Deressa et al. 2009. En effet, en milieu rural, certains animaux sont utilisés pour les travaux champêtres et pour le déplacement (notamment les chevaux, les ânes et les bœufs). Ce rôle

important que jouent les animaux confère à l'agriculteur une flexibilité au niveau de son agenda de travaux agricoles. Concernant l'utilisation des semences améliorées, nos résultats indiquent que l'élevage a un effet significatif et négatif (-0.031%) sur cette pratique. Peut-être parce que les agriculteurs utilisent la fiente des animaux qui substituerait dans ce cas les semences améliorées. Ce résultat est contraire à ceux auxquels sont parvenus nos prédécesseurs (Tazeze et al. 2012, Deressa et al. 2009, Yirga et al. 2007). Ceux-ci expliquent que l'élevage est un indice de richesse et une source de revenu pouvant servir à l'achat des semences améliorées. Notre résultat est donc contre intuitif, mais cela pourrait s'expliquer par le fait que l'achat d'intrants pour l'élevage peut réduire les sommes destinées à l'achat de semences.

Disponibilité d'un moyen de transport

La disponibilité d'un moyen de transport est très significative, positivement corrélée à la diversification des cultures sur la parcelle et au choix de la date de mise sous terre des semences qui sont respectivement de 3.4%, et 4.7%. Ce résultat implique qu'avoir une bicyclette, un animal de transport ou toute autre facilité de transport permet une plus grande flexibilité, ce qui favorise l'ajustement de l'agenda des travaux champêtres et de ce fait, la possibilité pour l'agriculteur de semer un peu plus tôt ou plus tard que d'habitude. En plus de faciliter les travaux champêtres, la littérature considère le fait d'avoir à sa disposition de moyens de transport comme un facteur d'accès à l'information car le moyen de transport rapproche l'agriculteur des marchés qui sont le lieu par excellence d'échange d'information en milieu rural (Nabikolo et al. (2012). En somme, la proximité de l'information a un impact positif sur la décision de l'agriculteur d'utiliser des pratiques agricoles qui permettent de s'adapter au changement climatique (Obayelu et al. 2014, Tazeze et al. 2012, Nhemachena et Hassan. 2008).

La distance entre le domicile de l'agriculteur et la parcelle

Les résultats indiquent qu'une augmentation de 1 km entre la parcelle et le domicile réduit significativement la probabilité de changer la date de mise sous terre des semences de 0.4%. Concernant l'utilisation des semences améliorées et la diversification des cultures, les coefficients associés à cette variable sont négatifs bien que non significatifs. Ce constat suggère que sur des parcelles éloignées du lieu d'habitation, les agriculteurs n'adoptent pas les stratégies *risquées* comme l'utilisation des semences améliorées ou la diversification des

cultures. Les agriculteurs ne peuvent pas surveiller fréquemment les parcelles lointaines. La proximité à une parcelle est donc déterminante dans le choix de l'option à mettre en œuvre pour s'adapter aux changements climatiques. Agwata et al. 2014 trouvent que pour l'ensemble des pratiques agricoles qu'ils étudient, le nombre de minutes à observer entre le lieu d'habitation et la parcelle n'est pas significatif.

Le relief de la parcelle

L'adoption des pratiques d'adaptation aux changements climatiques est spécifique à la zone agro-écologique dans laquelle se situe la parcelle (Agwata et al. 2014, Tazeze et al. 2012, Deressa et al. 2009). Aussi, comme on pouvait le prévoir, le choix des pratiques agricoles dépend du relief de la parcelle cultivée. Nos résultats suggèrent qu'en comparaison aux parcelles situées en zone de plaine, la probabilité qu'un agriculteur opte pour la diversification des cultures augmente sur les reliefs de plateau et de pente faible respectivement de 4.9% et 2.6% et diminue sur les reliefs de bas-fonds (- 9.4%). Par ailleurs, la probabilité d'utiliser les semences améliorées diminue de 7.2% sur les parcelles situées en zone de plateau alors que la modification des dates de mise sous terre des semences est privilégiée par les agriculteurs sur les parcelles situées en bas-fond (4.2%).

Le droit de propriété de la parcelle

Nos résultats révèlent que la détention d'un droit de propriété sur la parcelle augmente de 5.7% la probabilité que l'agriculteur diversifie les cultures sur cette parcelle et diminue de 8.3% la probabilité qu'il utilise les semences améliorées. On peut donc inférer que le fait d'avoir la propriété sur une parcelle l'encourage à adopter des mesures d'adaptation au changement climatique. Comme l'a indiqué Nabikolo et al. 2012, contrairement aux nombreuses preuves empiriques qui montrent une relation positive entre la détention d'un droit de propriété et l'adaptation aux changements climatiques, la raison d'un effet négatif n'est pas du tout claire. Tazeze et al. 2012 trouvent que la détention d'un droit de propriété n'influence pas la décision de l'agriculteur d'adopter une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.

7. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'identifier les facteurs qui influencent la décision de l'agriculteur d'adopter des pratiques agricoles qui réduisent la vulnérabilité aux changements climatiques. Nous nous sommes intéressés à des pratiques agricoles qui, en plus de permettre l'adaptation au changement climatique, favorisent la préservation de l'environnement : l'utilisation des semences améliorées, la diversification des cultures sur une parcelle et le choix de la date de mise sous terre des semences. Nous avons mis en exergue les principales variables qui incitent ou découragent l'agriculteur à adopter chacune de ces trois pratiques agricoles. Pour y parvenir, nous avons estimé un modèle Logit multinomial sur les données d'un échantillon de 6516 parcelles issues du recensement général agricole mené au Mali en 2004 et les informations sur les conditions hydro climatiques des parcelles provenant de la base CRU.TS3.

Les résultats indiquent que les déterminants de l'adaptation aux changements climatiques varient selon la pratique agricole. L'adoption de l'utilisation des semences améliorées semble être favorisée par l'accès au crédit et l'accès aux équipements agricoles alors que l'âge du chef de ménage, la surface de la parcelle, la détention d'un droit de propriété sur la parcelle, la pratique de l'élevage et l'emplacement de la parcelle sur un relief de plateau, semblent avoir une influence significative et négative sur cette pratique agricole. Concernant la diversification des cultures sur la parcelle, nous trouvons que les facteurs qui pourraient inciter l'agriculteur à opter pour cette pratique sont nombreux. En effet, l'âge et le niveau d'étude du chef de ménage, la détention du droit de propriété sur la parcelle, la superficie de la parcelle, l'accès aux équipements agricoles et aux moyens de transport, la fréquentation d'une organisation paysanne, et le fait que la parcelle soit située sur des reliefs de plateau et de pentes faibles au lieu d'être en plaine, exhibent des coefficients significatifs et positifs. Cependant, les freins à l'adoption de cette stratégie semblent être l'accès au crédit et le fait que la parcelle soit située sur un relief de bas-fonds au lieu d'être en relief de plaine. Pour ce qui est du choix de modifier la date de mise sous terre des semences pour s'adapter aux changements climatiques, nous trouvons que les facteurs qui influencent positivement la modification de ladite date sont : la pratique de élevage, l'accès au crédit, la distance entre le domicile et la parcelle, la fréquentation d'une organisation paysanne, l'accès aux équipements agricoles et le fait que la parcelle soit située sur un relief de bas-fonds au lieu d'être sur un

relief de plaine. Les résultats indiquent également que la survenue d'un épisode de sécheresse pendant la saison des pluies précédente est un facteur déterminant pour l'agriculteur et ce, quelle que soit la stratégie qu'il projette de mettre en œuvre pour s'adapter aux changements climatiques.

Sur la base de ces résultats, des actions adéquates qui visent l'adaptation aux changements climatiques et la conservation de l'environnement pourraient être entreprises par les agences gouvernementales et les acteurs du développement rural. Leurs interventions doivent considérer le rôle important de la sensibilisation et de la formation des agriculteurs sur les pratiques agricoles adéquates. De ce fait, le développement des réseaux d'agriculteurs comme les organisations paysannes est à encourager. Toutefois, il faut assurer un suivi de leur activité, leur apporter des aides techniques de formation et d'information, et des subventions. Cette recommandation s'inscrit dans le sillage de l'objectif prioritaire numéro 7, énoncé dans le PNCC (2011) : la sensibilisation et la formation des paysans à l'utilisation des informations et conseils agro météorologiques. Aussi, étant donné que certaines stratégies d'adaptation aux changements climatiques sont coûteuses, les politiques pourraient favoriser l'accès au crédit et promouvoir le développement des activités génératrices de revenus comme l'élevage. D'autres actions des décideurs pourraient aussi être des actions orientées vers l'éducation des populations et les actions qui facilitent l'accès à la propriété foncière. En effet, de telles actions augmenteraient la probabilité que les agriculteurs adoptent les pratiques agricoles qui réduisent la vulnérabilité de la production aux changements climatiques en préservant l'environnement. Les conclusions de la Stratégie Nationale sur les Changements Climatiques au Mali (SNCC) sont toutes aussi édifiantes pour connaître les facteurs de l'adaptation aux changements climatiques.

Références

- Almoustapha COULIBALY, 2003. Profil fourragère du Mali. FAO 2003.
- Aune, J.B., and A. Bationo 2008. Agricultural intensification in the Sahel – The ladder approach. *Agricultural Systems* 98:119-125.
- Aune, J. B. Adapting dryland agriculture in Mali to climate change. Department of international Environment and Development Studies (Noragric), Norwegian University of Life Sciences
- Aymone Gbetibouo Glwadys, 2009. Understanding Farmers' Perceptions and Adaptations to Climate Change and Variability: The Case of the Limpopo Basin, South Africa. IFPRI Discussion Paper 00849. February 2009.
- Balew, S., Agwata, J. & Anyango, S., 2014. Determinants of adaptation choices of climate change adaptation strategies in crop production by small scale farmers in some Regions of Central Ethiopia. *Journal of Natural Sciences Research*. Vol.4, N°4, 2014.
- Bryan, E., Deressa, T. T., Gbetibouo, G.A. & Ringler, C. (2009), Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: Options and Constraints, *Environmental Science & Policy* 12:413-426
- Butt Tanveer, A, Mc Carl, B, Angerer, J, Dyke, P & Stuth, J, 2005. Food Security Implication of climate change. In *Developing Countries: Findings From A Case Study In Mali*. 2005. <http://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarl-bruce/papers/1091.pdf>
- Deressa, T.T., Hassan, R.M., Ringler, C. Alemu, T. & Yesuf, M, 2009. Determinants of Farmers' Choice of Adaptation Methods to Climate Change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global 19: 248-255*. *Environmental change* 19 (2009) 248-255.
- Di Falco Salvatore, Marcella Veronesi & Mahmud Yesuf, 2011. Does adaptation to climate change provide food security? A micro perspective from Ethiopia. *American Journal of agricultural economics* Volume 93, Issue 3, pp. 829-846.
- Falconnier, G. N., Descheemaeker, K., Traore, B., & Giller, K. E, 2017. Agricultural intensification and policy interventions: exploring plausible futures for smallholder farmers in Southern Mali. *Trajectories of agricultural change in southern Mali*, 111.
- FAO, 2014. The main principles of conservation agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1b.html>.
- Greene, W.H. 2003. *Econometric Analysis* fifth edition. New Jersey: Prentice Hall.

Chapitre 3 : Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali ...

- Hassan, R., & C. Nhemachena, 2008. Determinants of African Farmers' Strategies for Adapting to Climate Change: Multinomial Choice Analysis. *African Journal of* 2: 83-104. *Agricultural and Resource Economics*.
- Hyman, G. S. Fujisaka, P. Jones, S. Wood, M. Carmen de Vicente, J. Dixon 2008. Strategic approaches to targeting technology generation: Assessing the coincidence of poverty and drought-prone production. *Agricultural Systems* 98: 50-61.
- IPCC. (Intergovernmental panel on climate change), 2001. *Climate change: the scientific basis*. <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC, 2007. *Climate Change: Impacts, adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge UK.
- Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R., 2006. A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on African Cropland. *AfJARE*, 2(1), 23. <http://doi.org/ISBN:1-920160-08-6>
- Kurukulasuriya, P., & Shane Rosenthal. 2003. *Climate change and Agriculture: A review of impacts and adaptations*. »Climate change series, Paper N° 91.
- Maddison D., 2006. *The perception of and adaptation to climate change in Africa CEEPA*. Discussion paper No. 10. Centre for Environmental Economics and Policy in Africa. Pretoria, South Africa: University of Pretoria.
- Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement du Mali, 2011. *Stratégie Nationale sur les Changements Climatiques au Mali (SNCC)*. Juillet 2011, Version 3.
- Nabikolo, D., Bashaasha, B., Mangheni, M.N. & Majaliwa, J.G.M., 2012. Determinants of climate change adaptation among male and female headed farm households in Eastern Uganda. *African crop science journal*, Vol. 20, Issue supplement s2, pp.203-212.
- Obayelu O.A., Adepoju, A.O., Idowu T., 2014. Factors influencing farmers' choices of adaptation to climate change in Ekiti State, Nigeria. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*. JAEID 2014, 108(1) : 3-16
- Politiques de Développement Agricoles du Mali (PAD, 2013)
- Politique nationale sur les Changements Climatiques (PNCC, 2011)
- Rapport national sur le développement durable au Mali dans la perspective de Rio+20, Juin 2012. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/983mali.pdf>
- Rapport mensuel sur la sécurité alimentaire, février 2005

- Robert Mendelsohn. 2008. The impact of Climate change on Agriculture in Developing Countries. *Journal of Natural resources Policy Research* 1(1): 5-19.
- Sanga, G.J., Moshi, A.B., & Hella, J.P., 2013. Small scale farmers' adaptation climate change effects in Pangani river basin and Pemba: challenges and opportunities. *International Journal of Modern Social Sciences*, 2013, 2(3): 169-194
- Smithers, J. & B. Smit, 1997: Human adaptation to climatic variability and change. *Global Environmental Change*, 7(2), 129–146
- Smit, B. & Skinner, M., 2002. Adaptation options in agriculture to climate change : A typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7, 85–114.
- Tazeze, A., Haji, J. & Ketema & M., 2012. Climate change adaptation strategie of smallholder farmers : The case of Babilie District, East hanrerghe zone of oromia Regional state of Ethiopia. *Journal of Economics and Sustainable Development*. Vol.3, N°.14, 2012.
- Tiwari K.R., Rayamajhi, S., Pokharel, R.K. & Balla, M.K., 2014. Determinants of the climate change adaptation in rural farming in Nepal Himalaya. *International journal of multidisciplinary and current research*. Vol.2 (March/April 2014 issue), 234-240.
- Vicente-Serrano, S.M.Beguería, S., López Moreno, J.I., Angulo, M., & ElKenawy, A. 2010. A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901-2006) Of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based On the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology* 11(4), 1033-1043.
- Yirga, C.T., 2007. The dynamics of soil degradation and incentives for optimal management in Central Highlands of Ethiopia. Ph.D. Thesis. Department of Agricultural Economics, Extension, and Rural Development, University of Pretoria, South Africa.

Appendice 3

Table 3. 7: Facteurs d'inflation de la variance

Variables	VIF	1/VIF
Taille du ménage	1.43	0.701669
Participation à une organisation paysanne	1.26	0.793887
Détention d'un moyen de transport	1.20	0.834188
Age du chef de ménage	1.15	0.868332
Parcelle sur relief plateau	1.14	0.874720
Accès aux équipements agricoles	1.14	0.876892
Pratique de l'élevage	1.13	0.882612
Crédit	1.11	0.900716
Parcelle en relief-pente faible	1.10	0.906685
Superficie de la parcelle	1.10	0.907515
Parcelle en relief bas-fonds	1.08	0.924781
Étude du chef de ménage	1.05	0.951380
Parcelle en propriété	1.04	0.960489
Parcelle en relief pente forte	1.04	0.964418
Sécheresse en saison de pluie en année n-1	1.03	0.967718
Distance entre le domicile et la parcelle	1.03	0.969946
Genre du chef de ménage	1.03	0.972956
Mean VIF	1.12	

Table 3. 8: Paramètres des variables explicatives de l'adaptation au changement climatique (élasticités issues de l'estimation du modèle Logit Multinomial)

	Utilisation des semences améliorées		Diversification des cultures		Modification de la date de mise sous terre des semences	
	Coefficients	Écart Type	Coefficients	Écart Type	Coefficients	Écart Type
Genre du chef de ménage	-0.221	-1.018	-0.411	-1.711	-0.200	-1.131
Âge du chef de ménage	-0.008*	-2.311	0.009**	2.887	-0.001	-0.698
Niveau d'études du chef de ménage	0.151	1.339	0.276*	2.553	-0.065	-0.831
Taille du ménage	-0.011	-1.424	0.006	1.313	0.008*	2.071
Crédit	0.347**	2.628	-0.933***	-6.074	0.275***	3.502
Participation à une organisation paysanne	-0.026	-1.129	0.034**	2.622	0.024*	2.434
Parcelle en propriété	-0.964***	-9.428	0.524***	3.670	0.022	0.266
Superficie de la parcelle	-0.162***	-5.465	0.021*	2.474	-0.017	-1.916
Parcelle sur relief Plateau	-0.807***	-5.175	0.483***	4.554	0.108	1.393
Parcelle sur relief Bas-fonds	-0.044	-0.304	-0.987***	-4.525	0.037	0.363
Parcelle sur relief Pente faible	-0.166	-1.216	0.273*	2.382	0.024	0.282
Parcelle sur relief Pente forte	0.357	1.464	0.238	0.944	-0.027	-0.141
Pratique de l'élevage	-0.350**	-3.273	-0.056	-0.470	0.114	1.365
Distance entre le domicile et la parcelle	0.005	0.593	-0.005	-0.513	0.019***	3.628
Accès aux équipements agricoles	0.435***	4.350	0.668***	6.992	0.528***	7.751
Détention d'un moyen de transport	-0.570***	-5.722	0.389***	3.838	0.216**	3.136
Sécheresse en saison de pluies en année n-1	1.303***	4.064	0.742**	3.066	0.338*	2.334
Constante	-0.608	-1.429	-3.397***	-8.474	-1.161***	-4.409
Diagnostic de la régression						
Catégorie de référence	Aucune des trois stratégies n'est adoptée					
Model chi-square	835.938					
N	6516					

Significativité *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Chapter 4

Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?⁴⁴

⁴⁴This chapter is a more detailed version of a paper which has been presented during the conference of 2018 Africa Meeting of the Econometric Society (Benin, July 2018).

1 Introduction

The world population is forecast to reach 9 billion by 2050 and exceed 11 billion by the end of the century, (FAO, 2016). Over the decades, several agricultural changes have occurred in order to supply enough food to feed the increasing population. Under the major pressure of growing human population, there has been a shift from more extensive to more intensive systems of land use, which has resulted in the mechanization of agriculture. Mechanized agriculture is the process of changing from working largely or exclusively by hand or with animals to doing agricultural work with machinery. A range of studies highlights that introducing mechanization into developing societies can improve the quality of life and enhance food security. For example, Sims et al. (2006) and Sissoko (1998) indicate that farm mechanization is an essential agricultural input with the potential to transform rural families' livelihoods by facilitating increased output of higher value products, while eliminating the drudgery associated with human muscle-powered agricultural production. Despite arguments in favour of farm mechanization⁴⁵, Mali, a West Africa country, is lagging behind regarding the use of machines to achieve farming operations. Mali is a relatively land-abundant country but there is a significant amount of unutilized arable land. In fact, out of 34.1% of arable land only 0.1% of land is used for permanent crops⁴⁶. Considering such figures, one can postulate that farm mechanization in Mali may allow farmers to cultivate greater areas than if they were to manually prepare the land and then induce direct increases in production. Therefore, a central question which can emerge is: what are the critical factors affecting the access and intensity of farm mechanization in Mali? Likewise, given that Mali is a semi-arid country, one can also question if drought is a matter for mechanization.

The main goal of this study is to investigate factors that might be used to predict the access and intensity of farm mechanization. Achieving this goal in the context of Mali appears interesting. Indeed, it was observed that increase in agricultural productivity is more associated with the extension of land cultivated than with the intensification of productivity.

⁴⁵ In all this paper expression "farm mechanization" refer to "use of machine for farm operations".

⁴⁶ <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2097.html>

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

Using data from a general agricultural census carried out in 2004 in Mali and climate data from CRU TS3 database, this study aims to identify the driving forces and barriers to the access and intensity of farm mechanization in Mali.

Despite the fact that this topic has been broadly discussed, this is the first econometrical study applied specifically to Mali. A more comprehensive and rigorous analysis of the problem of farm mechanization is also provided, by studying not only decisions of adoption, but also intensity of adoption. Studies like those of Houssou et al. (2015), Adekunle et al. (2016) and Falconnier et al. (2017) focus only on adoption of farm mechanization and that fails to account for intensity of farm mechanization. Moreover, this study brings another light on the topic, as we investigate the correlation between climate and mechanization by introducing the drought variable. Since this study has a particular interest in the drought variable, we hereafter present the conceptual framework showing the links between drought and mechanization.

- **Conceptual framework showing the links between drought and the use of machines**

Having a better understanding of the relationship between drought and farm mechanization in Mali requires a comprehensive framework. Based on previous studies, this study derives an analytical framework (Figure 4.1) to display the links between the occurrence of drought and the use of machinery in farm operation. The framework suggests that when it comes to drought, two attitudes of farmers can arise regarding farm mechanization. Indeed, in some cases drought can induce farm mechanization but in other cases it can limit or decrease it.

This framework is somewhat in line with Headey and Jayn's (2014) analysis which showed that, when faced with the challenge of having sufficient food, rural populations can respond in three ways: intensifying agricultural production, reducing human fertility rates or migrating out of agriculture so they can earn more in a new activity to buy sufficient food.

As a fact, when it comes to drought, precipitation decreases inducing water shortage and a lower soil quality that becomes drier and harder to plough. With respect to scarcity of rainfall and water shortage, the direct consequences that may arise are three-fold: reduction of time period for farm operations, decrease of fodder production and decline of crops production. As for the decreased soil quality, one direct consequence may be drudgery of farm work.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

The framework presents how each of these drought consequences can positively or negatively influence the farm mechanization.

Firstly, we consider how a decrease of crop production due to drought may impact farm mechanization. The argument here is that frequent droughts induce a decrease in agricultural productivity. As a consequence, agricultural workforces migrate from agriculture to other activities or can migrate within the country and across borders. With migration steadily increasing, a severe shortage of skilled labour in the agriculture sector arise. If agricultural workforce and farm mechanization are not really substitutable, and this happens frequently, then the departure of workers (and farmers) to other activities or to other places will lead to a decrease in farm mechanization. In this case, occurrences of drought reduce farm mechanization. On the other hand, mechanization of small farms can be seen as a panacea for farm labour scarcity due to drought. In this case, drought induces an increase in farm mechanization. Therefore, this pattern is relevant in the case that there is a substitution effect between labour force and farm mechanization. Another way to argue a positive link between drought and farm mechanization, given the loss of farm labourers, is with regard to health, as malnutrition and some diseases are the consequences of food insecurity i.e. the decrease of agricultural production.

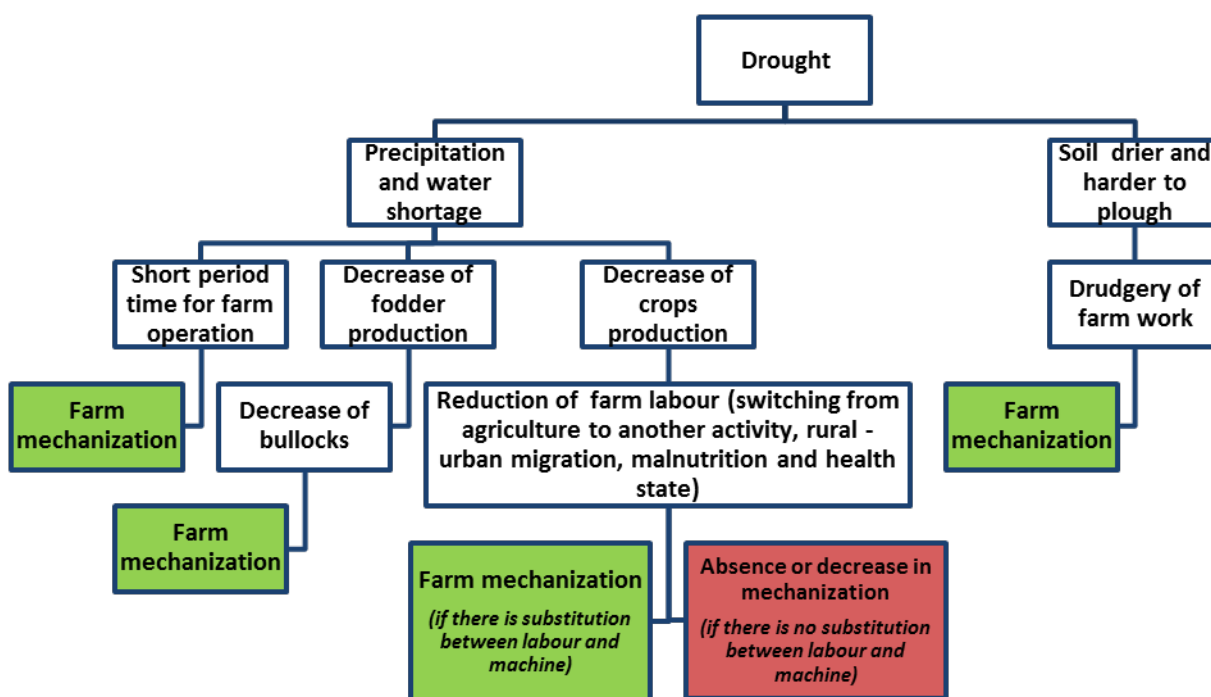
Secondly, we consider how the decrease of fodder production due to drought can impact farm mechanization. In fact, the fall-out of frequent droughts results in an acute shortage of fodder and an ever increasing cost for the maintenance of livestock. Therefore, the number of bullocks which represent one of the most important traditional sources of farm power will sharply decrease due to lack of fodder to feed them and that can lead to farm mechanization. According to a policy brief by the Central Research Institute for Dryland Agriculture studies; the number of bullocks is reducing at a rate as fast as 20% per annum in most rain fed areas.

Thirdly, the framework show how drought may contribute to farm mechanization because of reduced time periods for farming operations. Indeed, erratic rainfall patterns often allow a very short period of time for tillage, sowing and other important farm operations. Given these conditions, in most rain fed areas, farmers often fail to complete farm work in time. The time-advantage in mechanization of farming is clearly reflected here.

Lastly, the framework displays the need for farm mechanization which arises from the soil becoming drier and harder to plough because of frequent and acute drought. In fact, when a

farmer experiences soil which becomes drier and harder to plough, his behaviour can be rationally explained by the constraints faced in terms of the drudgery of farm work. Facing drudgery, farmers can benefit from an intensification of production with machines and equipment.

Figure 4. 1: Conceptual framework showing the links between drought and the use of machines



Source: author base on literature

In summary, in some cases of drought occurrences there is reduction in farm mechanization especially if agricultural workforce and farm mechanization are not really substitutable. But, in other cases, mechanization may lead to a time saving execution of various agricultural operations, reduction of drudgery in farming operations, and it can address labour and bullocks' loss. Thus, this framework showed the link between drought and farm mechanization in arid and semi-arid regions like Mali.

The rest of this paper is organized as follows: Section 2 presents a summary of mechanization in agricultural sectors in Mali. Section 3 describes the empirical model. It also presents data and empirical specification of model and variables. Section 4 discusses the main model results. Conclusions are made in section 5.

2 Farm mechanization in Mali

In Mali, when looking at farm mechanization, there is very marked regional variation, indeed, Fonteh (2010) indicated that in the Ségou region, for example, less than 4 % of farmers still use human power for primary cultivation while in Sikasso it is about 13 %. On the other hand, in the regions of Gao and Tombouctou, most farmers still use human power for primary cultivation. There is also marked variation of farm mechanization according to type of crops. Dembele, R (2001) indicated that about 70 % of the tractors were used for cotton and rice cultivation. Mechanization is used less for cultivation of dry cereals.

However, one can see that in Mali the government is making important efforts to extend the use of mechanization in farm operations. For instance, the Mali' government gave 1000 tractors to producers in 2016 (Maiga, 2016). Earlier, an agreement was signed in January 2001 between FAO and the Malian Government for US\$145,000. The aim was to define a national mechanization policy and to formulate a strategy in a participatory manner (Fonteh, 2010). The project ended on 31 December 2002 with the elaboration of a national mechanization strategy and a plan of action. Another important initiative is that the Malian government offered partial subsidies to producers for horsepower Mahindra tractors at costs of 10–13.5 million CFA (US\$17,100–23,000) in 2016 (Ollenburger et al., 2016). In this project, Government subsidies covered half the cost of those horsepower Mahindra tractors, 30% was covered by a bank loan, and farmers were required to pay 20% upfront. The need to mechanize agriculture in Mali is also noticeable in some events such as the Malian International Fair of Agriculture (Salon Internationale de l'Agriculture SIAGRI-2016), where the Head of State of Mali clearly displayed his willingness to switch to the use of machines in place of the hand hoe and animal. (Peter Chua, 2016). Out of the government subsidies and support from other organizations, farm mechanization seems to be sparse in Mali. Some study like that of Aune and Bationo (2008) state that one of the main reasons is that small Malian farmers are financially limited as they do not have access to credit. Indeed, Aune and Bationo

(2008) described agricultural intensification in Mali as climbing a ladder and they emphasize the first step on this ladder is to make better use of agricultural technologies that are without any costs to the farmers who are already facing financial constraints.

3 Empirical model

3.1 Methodology issues

In this study, the main dependent variable is the intensity of farm mechanization measured as the proportion of land area under mechanization and thereby this dependent variable is truncated at zero, thus yielding a corner solution which means that some farmers are either unwilling or unable to mechanize their farm operations. In this case, the Ordinary Least Square estimator (OLS) is inefficient and can lead to erroneous conclusions because statistical analyses will be based on non-randomly selected samples. In other words, the sample selection bias appears as an important problem. It should be noted that sample selection bias refers to problems where the dependent variable is observed only for restricted non-random samples. The Heckman correction model offers a means of correcting non-randomly selected samples. In fact, the intensity of mechanization for farmers who use machines does not estimate the intensity of mechanization that farmers who do not use machines would have realized, if they had opted for farm mechanization. So Heckman's correction model is used to deal with truncation. In other words, the intensity of farm mechanization not being observed for those farmers in the sample who had not mechanized their farm operations (the value of the selection variable is zero).

The suggestion of Heckman is a two-stage estimation method to correct the bias. Heckman studies the labor market. The starting point of his study is that he wants to estimate the determinants of wage offers, but he has access to wage observations for only those who work. In the first stage, he formulates a model for the probability of working. In the second stage, he corrects for self-selection by incorporating a transformation of these predicted individual probabilities as an additional explanatory variable in the wage equation. According to Heckman (1979), for the coefficients estimated to be efficient, there should be no correlation between the errors terms of the first and the second stage. If there is selection bias, that is, if there is nonzero correlation between errors terms of the first and the second stage, the Heckman model corrects it. To correct this selection bias, the Heckman model estimates the

first stage and obtains a sample selection indicator called Inverse Mills Ratio (IMR). The IMR measures the covariance between the two errors and is an indicator of whether there is significant sample selection bias or not. The IMR is then incorporated into the estimation of the second stage.

Here we have made the theoretical justification of the use of Heckman selection model for this study. Furthermore, we have checked empirically that the Heckman model is relevant. First, we have tested for the presence of the sample selection bias by assessing the correlation between the errors terms of stage one and stage two estimations⁴⁷. Statistical tests in Table 4.1 provide justification that the Heckman selection model with these data is appropriate for this study and better than standard OLS estimation. Indeed, results reported in Table 4.1 show that the Inverse of Mill's Ratio is significant at 1% and negatively signed. It indicates that the error terms in the first and second regressions are negatively correlated which is enough to infer that there is selection bias. This reveals that unobserved factors that influence the decision to adopt mechanization tend to be associated with a lower proportion of land area allocated to mechanization. The implication is that if OLS estimation had been applied to the equation of outcome that would have yields biased results⁴⁸. Therefore, we use a two-step Heckman selection model (Heckman 1979) as it provides more consistent and more efficient estimates for a given set of parameters.

Table 4. 1: Test for the appropriate model to be used (statistics from regression of adoption and intensity of farm mechanization) ⁺⁺⁺

Heckman selection model -- two-step estimates (regression model with sample selection)	
Number of observations	= 8830
Censored observations	= 3,152
Uncensored observations	= 5,678
Wald Chi-square	= 58.4***
Inverse Mills Ratio (IMR)	= - 0.095***
Rho	= -0.44387
Sigma	= 0.21403624

***, **, * Significant at 1%, 5%, and 10% probability level, respectively.

+++ The full results of the regression are given below.

⁴⁷ In the literature, study of Kuwornu et al. 2017 use the double hurdle model to study the intensity of mechanization which assume that sample selection bias is absent.

⁴⁸ The OLS estimation is reported in appendix.

3.2 Econometric specification of the two-step Heckman selection model

Our sampling is based on two groups of farmers: adopters and non-adopters of farm mechanization. This categorization can yield a non-random sample. As we stated earlier, in such a case, the two-step Heckman selection model treats the censored sample problem as a specification error and it yields consistent parameter estimates.

The first stage of our model, which relates to the decision of a farmer whether to mechanize farming operation or not, is a model using the latent variable approach. Farmers will mechanize if it maximizes the returns. Expected benefits from adoption are represented by the unobserved (latent variable) A_i^* for farmer i defined as:

$$A_i^* = Z_i\alpha + \varepsilon_i \quad (\text{eq.1})$$

where Z_i is a $1 \times K$ vector (with first element equal to unity) of potential factors that influence the expected benefits of mechanization, α is a $1 \times K$ vector of parameters to be estimated, ε_i is a normally distributed error term making the estimation of the probability possible using a Probit model. We only observe an indicator variable A_i^* that represents farmer i 's decision to adopt mechanization, that is to say $A_i = 1$ if $A_i^* > 1$ (A_i takes one if farmers adopt mechanization and zero otherwise). This equation 1 specifies what is generally called the selection equation.

The second stage of the model involves the estimation of the intensity of farm mechanization once the decision is made to mechanize by the i farm household.

Note that in this study, the intensity of farm mechanization is measured as the proportion of land area that is under mechanization. Given that $A_i=1$, we have the following equation:

$$Y_i = X_i\beta + \mu_i \quad (\text{eq.2})$$

Y_i is the intensity of mechanization, X_i is a $1 \times K$ vector (with first element equal to unity) of determinants of intensity of farm mechanization, β is a $1 \times K$ vector of parameters to be estimated, and μ_i is error terms.

According to Heckman (1979), for the β to be efficient there should be no correlation between ε_i of eq.1 and μ_i of eq.2. However, sample selection bias results in a nonzero correlation between these two errors terms. To correct for this selection bias, the Heckman model estimates the first stage (eq.1) to obtain a sample Inverse of Mill's Ratio (IMR), being mindful that the IMR measures the covariance between the two errors (ε_i and μ_i) and is an indicator of whether there is significant sample selection bias or not. The predicted errors and the IMR in the first stage are then entered into the second stage (2) as an additional regressor beside the X_i vector of regressors. This equation (eq.2) is therefore modified and specified as:

$$Y_i = X_i\beta + \theta \lambda_i + \eta_i \quad (\text{eq.3})$$

Where, Y_i , X_i , β are as previously defined, λ_i and θ are respectively IMR and its parameter estimated and η_i is a sample selection-corrected error term. Y_i is observed only when the household has decided to adopt mechanization (i.e. $Z_i = 1$).

Practically, each variable is introduced in the model in a clear specific place depending on what it relates to (decision to adopt i.e. selection equation or intensity of adoption i.e. outcome equation). One important thing is that the selection equation should contain at least one variable that is not in the outcome equation.

As indicated earlier, the IMR parameter estimate is used to test for sample selection bias. The null hypothesis is that $\theta = 0$, thus there is no sample selection bias. Therefore, when the IMR is significant, null hypothesis is rejected implying that sample selection bias is present. In this study, as mentioned earlier, fitting OLS model or double Hurdle model (Craggit)⁴⁹ like Kiwornu et al. (2017) would yield inefficient estimates. We estimated simultaneously the two-stage of Heckman selection model in one procedure using Stata software Version 14.

⁴⁹ In practice, double hurdle model sometimes called "two-stage" or Cragg's "two-tier" incorporates the Probit model in the first tier and truncated normal regression in the second tier.

3.3 Data sources, description of variables and empirical specification of model

- **Data bases**

This paper took advantage of two data sources⁵⁰. The first one is the general agricultural census (RGA)⁵¹ carried out in 2004 in Mali. It provides socio-demographic characteristics of farming households and information for each farm surveyed⁵². The second data source is the CRU TS3 climatic database, managed within the climate research unit of the University of East Anglia. CRU TS3 is a high-resolution gridded data of time-series of several climate variables such as the average rainfall by month, frequency of rain, daily and monthly temperatures, evapotranspiration and cloud cover. We merged the agricultural and climatic data using the geolocation data of Mali districts where the RGA was conducted. Hence, data of each farm, including household information, is associated with climatic data of the district where this farm is located.

We then use this data to achieve the goal of this study that is to identify the factors which explain access and intensity of farm mechanization. Hereafter we present explanatory variables and explained variables used in this study.

- **Variables**

As for two explained variables, which are decision and intensity of farm mechanization, the farms households surveyed were asked questions about their practice of tillage. According to their responses, the soil tillage systems adopted include the following: manual (the use of hand hoes), using animals, using machinery, combining manual and animals, combining manual and machinery, and combining animals and machinery. In this study, adopters of farm mechanization are farmers who used machinery either exclusively or in combination with another system to plough their plot. Subsequently, non-adopters are farmers who plough their land manually, using animals or those who combine manual ploughing with animals. In

⁵⁰ More details on these two data sources are given in chapter 1 of this dissertation

⁵¹ in french called “Recensement General. de l’Agriculture” (RGA)

⁵² A major locust crisis hit Mali during the 2004/05 agricultural campaign. Thus this database does not contain data on production.

In addition, to the question on tillage practices, farmers were asked on which cultivated plots they used each ploughing system. Given the answers on these questions, we have considered the proportion of farms allocated to farm mechanization in terms of acreage. Thus, intensity of adoption of farm mechanization in this study is the cultivated acreage with machines in relation to the total acreage for each agricultural household. This intensity of adoption is observed only for farmers who plough their farm with machinery.

Regarding the explanatory variables, several covariates have been found in the literature to explain the probability of access to farm mechanization and its intensity. This study uses a set of explanatory variables based on data availability and prior literature, for example, Kiwornu et al. (2017) and Firouzi et al. (2017). The variables used include household characteristics such as gender, age, education of the head of the farming household and family labour. The second group of variables is related to farm characteristics and household endowment: farm size, hired labour, land owned and access to credit. Another group of variables used are institutional and social capital factors which include supervision that farmer households received from NGOs and other specialized structures, and having household head membership of farmer groups. The last group of variables is agro climatic characteristics of farms: the region where it is located, slope of the farm and the severity of drought to which it is exposed. In this study drought is measured by the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) devised by Vicente-Serrano et al. (2010). More details about empirical identification of drought severity and more precisely, information about the SPEI can be consulted in the appendix.

- **Empirical specification of model: description of covariates used to explain access and intensity of farm mechanization**

An overview of previous studies highlights various factors that can determine access and/or intensity of farm mechanization (see Table 4.2).

The first variable is the age of the household's head in years. By referring to the literature the effect of age on farm mechanization could either be positive or negative. Mrema et al. (2008) and Ghosh (2010) found that older farmers are more likely to access and intensify machinery. With these findings, they stated that older farmers are more likely to have saved enough over the years compared to younger farmers and this enables them to purchase machines needed

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

for farming. This suggests older farmers are more able to afford investment in mechanization. Contradictory results were found by Owombo et al. (2012) and Kuwornu et al. (2017) who showed that age has an inverse relationship with the adoption status. Moreover, in the studies by Houssou et al. (2015) and Debertin et al. (1978) the age variable appears non-significant. According to these authors, the non-significance of age variable may mean that increase in age does not necessarily guarantee availability of resources that will enable the farmer to access machinery. In this study we hypothesize that older farmers are more likely to have saved enough, thus age increases the probability of farm mechanization.

Gender of the household head is a dummy variable which took one if the farm is headed by a male and zero if a female. Some studies argued that the introduction of modern agricultural technologies seems to replace female farming systems with male ones, despite women's active roles. According to Adekunle et al. (2016), scholars observed that the introduction of modern technologies appear to influence the traditional division of labour which, as in most African societies, goes along gender lines. They argue that men are the household's head and are, therefore, the major decision makers for productive resources. These authors also stated that tasks performed by men, such as land preparation, harvesting, and processing, are the easiest to mechanize. In the same line, Kuwornu et al. (2017) indicated that machinery operation is dominated by males because skills sets used in operating the machinery require physical strength possessed by males. Earlier in the literature, Kramer (1988) indicated that, more often than not, those female tasks which are often mechanized eventually become male tasks. Given these previous studies and the anthropological context of Mali, we hypothesized that male household heads are more likely to use machinery.

The education of the household head can be a factor, whether they attended primary school or not. According to Ngwira et al. (2014), educated farmers are better able to process information and search for appropriate innovations in their quest to mitigate their production constraints. Alene et al. (2000), in their study in Ethiopia, reported that farmers with higher levels of education had a higher probability of adopting improved technology. Owombo et al. (2012) and Debertin et al. (1982) found strong positive relationship between education and farm mechanization. In this study, making the hypothesis that years in school may have exposed the farmer to modernized agricultural technology, we expect that education correlates positively to higher access to mechanization.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

Access to credit is another factor that has been put forward to explain the use of machines for farming operations. Aunt and Bationo (2008) state that, because Malian small farmers do not have access to credit, the first step of agricultural intensification is to make better use of agricultural technologies that are without any costs to the farmers. Thus we hypothesized that access to credit correlates positively with farm mechanization. In this study, access to credit is a dummy variable which takes one if the household head has access to credit for the agricultural campaign and zero otherwise.

Availability of family labour in this study is assessed by the number of household members working on the farm instead of using household size like most studies on farm mechanization. We think that use of this variable avoids the potential endogeneity that a household size variable can induce. Family labour is a continuous variable. Given that most studies use household size as a proxy of family labour, we take a look at these previous studies to get an idea of the relationship that may remain between farm mechanization and our family labour variable. According to Kuwornu et al. (2017), since mechanization is a labour-replacing activity, larger family means abundant labour, therefore, with fewer activities for machinery and hence, decreased intensity of mechanization. The same type of study by Verma (2006) shows that intensification of mechanization decreases the amount of family labour used. Given this literature, we therefore anticipated that households with few family labourers are more likely to adopt and extend their adoption of farm mechanization practice.

Hired labour is a continuous variable given by the amount spend by each farmer to take on labour. In labour-abundant economies, farm mechanization has often been at the centre of controversy because of its impacts on human labour. Houssou et al. (2015) found that increased farm mechanization is associated with a decrease in labour expenditure. Similar result were found by Binswanger (1978) who previously stated that, as long as wage rates remain low, there is little reason to expect tractors to gain comparative advantages in labour-intensive operations. In contrast, studies by Balishter et al. (1991) and Kuwornu et al. (2017) found that increase in labour expenditure is positively related to access to farm mechanization. They explained that this may be because skilled labour is hired to operate the farm machinery. Another reason is that relatively higher wages are paid for skilled labour usage; hence, labour expenditure complements access to mechanization. Similarly, a study by Ollenburger et al. (2016) indicates that widespread mechanization could result in additional labour demand for semi-skilled repair work, as well as for hired labour in non-mechanized

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

farming activities such as the harvest of cotton. Pingali (2007) also argues that the adoption of labour-saving technology does not necessarily imply labour displacement. Indeed, this author observes that the mechanization of power-intensive operations had yield minimal equity effects even in the labour-surplus economics of Asia. Verma (2006) also show that a relatively low level of displacement of farm labour was observed in India. As for intensity of farm mechanization, research by Verma (2006) suggests there was an increase in hired labour expenditure. With respect to Mali, where skilled labourers operating farm machinery are costly, we hypothesized that access and intensity of mechanization are associated with a higher intensity of hired labour.

Farm size (in hectares) is a continuous variable which is measured as the size of land which is suitable for crop production. According to economic theory, farming households holding more land tend to cultivate more land, which can be achieved through farm mechanization. Byerlee et al. (2014) indicated that when it does occur in land-abundant areas, intensification tends to lead to cropland expansion. Larger cultivated areas will cause a farmer to invest in mechanization as compared to smaller cultivated areas (Sims et al., 2006). Also, Cunguara and Darnhofer (2011) indicated that tractor use may be more attractive to farmers with larger areas to plough. This reaffirms the findings of Kuwornu, (2017), Ghosh et al. (2010) and Debertin et al. (1978) which suggest that large farms are more efficient and, as a result, were more able to access mechanization services than smaller farms. Households with larger acreage under crop production are more likely to mechanize farms operation. As for the intensity of mechanization, the more land, the more drudgery is found so drudgery can constrain farmers to use more equipment, which increases the proportion of land under mechanization practice. Therefore, in this study, farm size is hypothesized to positively influence adoption and intensity of farm mechanization.

Each region of Mali is coded as a dummy variable where it takes the value of one if a farm is located in the region considered and zero otherwise. This variable gives an idea of regional specificities in terms of farm mechanization. In Mali, southern regions are more productive than northern regions and, therefore, they are more attractive to investment from Government, NGOs and others institutions. For instance, mechanization programmes are going on in Segou, Sikasso and Mopti with the presence of NGOs and CMDT (for Compagnie Malienne pour le Développement du textile). With regard to these, we predicted that probability to

mechanize farm operations would be higher among farmers with farms located in the south of the country.

The social and institutional capital which are owned by farmer households are among the critical factors most likely affecting adoption of farm mechanization. In this study, social and institutional capital of farmer households is represented by three variables. The first variable specifies if a farmer belonged to a farmers' association, hereafter called "Membership of farmer group". Indeed, farmer groups play important roles in adoption of agricultural technologies because they act as conduits for information about agricultural practices. Rogers (2003) argues that, as people interact and socialize at gatherings, they may share information about new innovations which may influence their adoption. The two other variables are "NGO" and "CMDT⁵³" specifying if the farmer has connected with such two organizations. These variables are all coded one if the farmer holds the social capital considered and zero otherwise. According to literature on technology adoption, the nature of the social system affects individuals' innovativeness, which is the primary criterion for categorizing adopters. In this study, we hypothesize that a farmer's behaviour will depend on the agricultural policy advocated by the group/institution with which he is in relation. Therefore, social and institutional capital variables are anticipated to positively or negatively influence farm mechanization.

With respect to land tenure security, Houssou et al. (2014) found that land owned displays a positive and significant relationship with tractor use and area ploughed. The larger the landholding size, the higher the odds of the household using a tractor for ploughing, and the larger the area ploughed. This means farmers who rent land for their activities may not be motivated to invest in capital machinery but farmers owning title deeds to lands may invest more in machinery. Having a property right on a farm is expected to be positively related to farm mechanization.

Another key variable is the importance of the relief of the farmland, whether it is found on steep slopes, on a plateau, on a plain, or in the bottom of a valley. Firouzi et al. (2016) found that the most important inhibiting factor of farm mechanization is slope. Previous studies have found that when a farm is located within regions of steep slopes and erodible soils, farmer have a greater tendency to adopt soil conservation practices (Uri, 1997; Fuglie, 1999; Soule et al., 2000), in which case, farm mechanization is not preferable. Keeping in mind that

⁵³ Compagnie Malienne pour le Développement du Textile

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

conservation agriculture refers to less (or no) mechanization, these results mean that steep sloping farmland and erodible soil discourage access and intensity of farm mechanization. In this study, this variable is the share of farm located on each type of slope mentioned above. It is a continuous variable. We anticipated that the higher the hectare of farm on a plain, on plateau or on a slight slope, the higher the probability to use and extend the share of land under mechanization.

With respect to climate stress influence on farm mechanization, this study focused on the occurrence of drought. Previous studies introduce rainfall as a variable for assessing the relationship between climate and minimum soil disturbing (i.e. low level of farm mechanization). Mixed results have been found. Some studies have found a positive correlation with conservation agriculture adoption (Carlson et al., 1994; Uri, 1997) while others have revealed insignificant (Clay et al., 1998) and even negative correlations (Fuglie, 1999). Considering this, we hypothesize a negative correlation between the occurrence of drought and the decision to adopt farm mechanization. To better understand this hypothesis, we make a conceptual framework to display the links between mechanization and drought in Mali.

Table 4. 2: Description of variables used in the regression model and expected signs

Explanatory variable		Expected sign	
		Decision to adopt	Intensity level
HH Age	Continuous	+	
HH Gender	Dummy, 1 if male and 0 otherwise	+	
HH Education	Dummy, 1 if primary school attended and 0 if not	+	
HH membership to farmer group	Dummy, 1 if this applies and 0 otherwise	+/-	
CMDT	Dummy, 1 if this applies and 0 otherwise	+/-	
ONG	Dummy, 1 if this applies and 0 otherwise	+/-	
Access to credit	Dummy, 1 if this applies and 0 otherwise	+	
Tenure (hectares under property right)	Continuous	+	
Drought (base on SPEI index)	Continuous	+	
Family labour	Continuous	+	+
Hired labour (x 10000 FCFA) ⁺⁺	Continuous	+	+
Farm size in hectares	Continuous	+	+
Hectares of farm on very steep slope ⁺	Continuous	+	+
Hectares of farm on steep slope ⁺	Continuous	+	+
Hectares of farm on plateau ⁺	Continuous	+	+
Hectares of farm on plain ⁺	Continuous	+	+
Region ⁺⁺	Dummy, 1 if farm is in region considered and 0 otherwise		+/-

Note: + this relief is in comparison with plot which is located in the valley bottom

++ The wages of Hired labour were divided by 10000 to scale down the coefficient from the econometric estimation. FCFA is the local currency of Mali.

+++ Regions are Kayes, Koulikoro, Sikasso, Segou, Mopti, Tombouctou, Gao and Bamako. Mopti was chosen as a reference while running the regression. The sign associated with each region depends on its specificity.

4 Results and discussion

The first parts of this section provide a descriptive analysis of explained and explanatory variables used in the Two-step Heckman selection model. We then interpret and discuss the driving factors and the barriers of access and intensity of farm mechanization.

1.

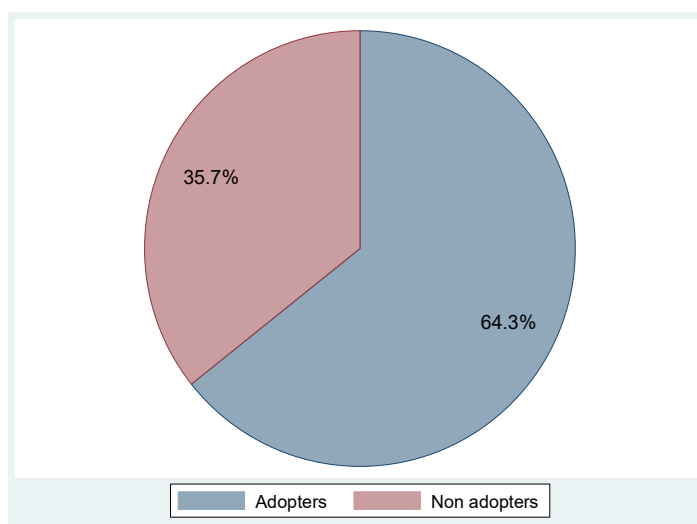
1.1. Descriptive statistics of variables

- **Descriptive statistics of explained variables**

This study is based on the cross-sectional household survey data

collected from 8830 households⁵⁴ during the general agricultural census carried out in the 2003/2004 production season. Farmers who had used machines were categorized as adopters while those who did not were non-adopters. From the sample studied, we note that 5678 of the surveyed farmers have adopted farm mechanization, whereas 3152 of them did not (Figure 4.2). Detailed descriptions of the sample of farms household studied are given below.

Figure 4. 2: Adopters and non-adopters of farm mechanization



- **Descriptive analysis of explanatory variables**

Descriptive statistics of explanatory variables are shown in Table 4.3 and Table 4.4. As far as socio-demographic characteristics of household are concerned, data shows that most of the households are headed by men, with a higher percentage among adopters (62,81%) than that

⁵⁴ Sample used in this study does not include households of the Kidal region. In fact, among 1036 households investigated in Kidal, only 8 said they had cultivated plots. The remaining 1028 were households with farms dedicated to livestock. In addition, during the data cleaning process, the remaining 8 households were removed because of missing data.

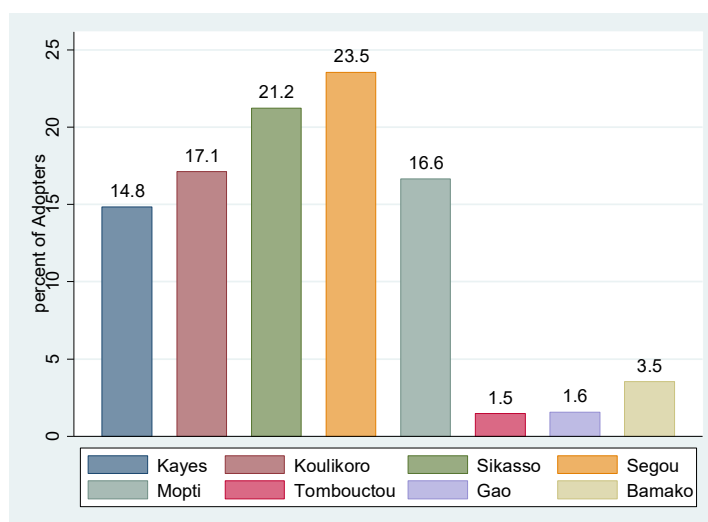
Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

of non-adopters (33,81%). This may imply that having a male-headed household may have a positive association with farm mechanization. The average age of the head of household is almost the same between adopters and non-adopters (52 years). This may mean that age has little influence on adoption of mechanization. As for education, the farming head of household are relatively less educated, with 1.86 % of adopters and 1.19 % of non-adopters having attended the second cycle of primary school. This suggests that non-educated farmers are potentially less involved with farm mechanization practices. On average, households which adopt farm mechanization are composed of approximately 9 persons working on the farm against 7 among non-adopters, and the majority live in rural areas. These statistics may imply a heavy reliance between farm mechanization and family labour. Moreover, the statistics shows that on average, adopters and non-adopters used respectively 24480 FCFA and 9010 FCFA for hiring seasonal labour for their farming activities. These statistics may suggest that, adopters of farm mechanisation are more likely to hire labour. Descriptive analysis of the database also shows that 18.26 % of the adopters have access to credit versus 3.1% of non-adopters. Access to credit seems to support farm mechanization.

Regarding farm characteristics, the statistics show that the average farm size for adopters is 6.5 ha while for non-adopters it is 3.2 ha. Moreover, on average, about 3.71 ha for adopters and 1.99 ha for non-adopters are the property of farmers. The difference between the two sub-samples regarding these farm characteristics may suggest that households which are in a better position to adopt mechanization may be those with large farmland area with property rights for a large part of their cultivated land.

Figure 4.3 shows that in the northern regions of Mali, the number of adopters is lower than the number of adopters in the central and southern regions. In fact, the majority of adopters are located in Segou, Sikasso, Koulikoro and Mopti with 15.15%, 13.66%, 11.02% and 10.7% respectively. This may imply that farming households located in these regions seem to

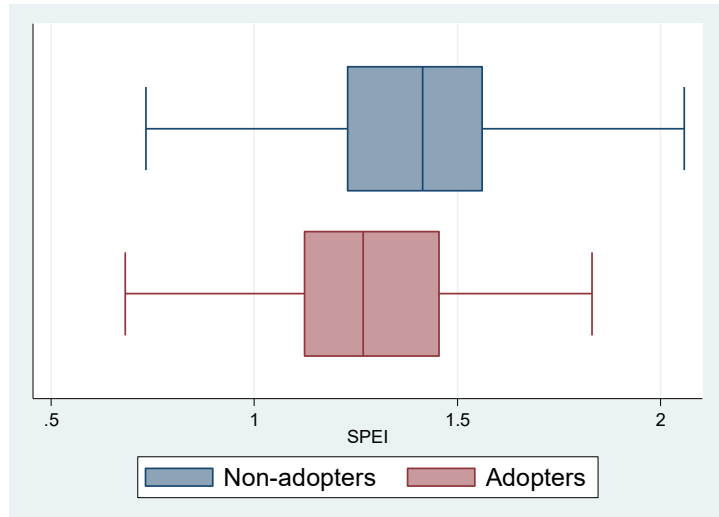
Figure 4. 3: Percent of adopters of farm mechanization by region



be in a better position to adopt farm mechanization. This remark can also suggest a correlation between the level of drought and the decision to adopt as the northern regions are more subject to drought. Table 4.4 shows

that the mean of SPEI index among adopters is 1.255 and that of non-adopters is 1.395. Keeping in mind that the lower value of SPEI means an important level of drought, these statistics indicate that the higher level of drought (that is, the lower level of SPEI) seems to be correlated with farm mechanization. There would, therefore, be a positive relationship between climate stresses and farm mechanization practice. This

Figure 4. 4: 6-month SPEI index among adopters and non-adopters of farm mechanization (Decision to adopt according to occurrence of drought)



relationship is confirmed when looking at Figure 4.4 which shows how users and non-users of mechanization are distributed according to the occurrence of drought. We see that the 6-month SPEI index is higher for farmers who adopt mechanization. This suggests those farmers operating in an environment where drought occurs are more likely to adopt mechanization practice. This tends to indicate that most of farmers are highly mechanization proactive when droughts occur. It seems that conventional agriculture plays as a factor in mitigating climatic stress and improving agricultural productivity.

As for the variables that reflect the social capital of farmers, the study shows that about 2215 adopters versus 666 non-adopters are members of farmer groups. About 207 adopters and 105 non-adopters belonged to NGO groups while 1252 adopters and 88 non-adopters belonged to a CMDT' company. For all three variables which represent the social capital of farmers, the figures for adopters are greater than those for non-adopters. This may suggest that the relationship between farmers and structures that can provide advice and/or technical support to farmers can lead to farm mechanization.

Table 4. 3: Descriptive statistics of Dichotomous variables

	Adopters	Non-Adopters
Total of farmers	5678	3152
	(%)	(%)
HHH Gender (male)	97.7	94.7
HHH Education (attended primary school)	2.9	3.3
HHH membership of group	39.0	21.1
CMDT	22.1	2.8
NGO	3.6	3.3
Access to credit	28.4	8.7
Kayes	14.8	17.8
Koulikoro	17.1	15.4
Sikasso	21.2	4.9
Segou	23.5	3.7
Mopti	16.6	23.7
Tombouctou	1.5	16.8
Gao	1.6	8.4
Bamako	3.5	9.2

Note: Apart from the “Total of farmers”, all the figures in this table are the percentage of the total of each category (adopters and non-adopters). To save space, we have reported in this table the complementary of each covariate. For example, among the adopters for HHH gender, 97. 7% are male and 12. 3% are women. So to save space, the 12. 3% of HHH women who have adopted farm mechanization is not reported in this table.

Table 4. 4: Descriptive statistics of continuous variables

Variables	Adopters (5 678)				Non-Adopters (3152)			
	mean	SD	min	max	mean	SD	min	max
HHH Age	52.7	14.6	16	99	51.2	14.2	16	99
Family labour	9	6.8	1	75	7.3	6	1	75
Farm size	6.5	8	0.007	96.1	3.2	4.8	0	61.6
Tenure (size under property right)	3.7	4.1	0	85	2	2.9	0	37.6
Drought indicator (SPEI) ⁺	1.3	0.3	0.5	2.2	1.4	0.3	0.472	2.2
Hired labour (x1/10000)	2.5	13.2	0	534	0.9	5.1	0	150
ha_plain	2.7	4.9	0	79.4	1.4	3.1	0	43.5
ha_plateau	1.5	3.8	0	48.5	0.4	1.9	0	61.6
ha_on the bottom	0.3	1.7	0	41.9	0.2	1.2	0	42.6
ha_low_slope	0.9	3.1	0	78.4	0.5	1.8	0	24.6
ha_steep_slope	0.05	0.6	0	29.5	0.1	0.8	0	24.3

The descriptive statistics presented in this paragraph have suggested potential relationships between the explanatory variables and adoption of mechanization. The succeeding paragraph shows the regression result and allows us to assess if the econometric analysis corroborates the descriptive statistical analysis.

1.2. Factors affecting adoption and intensity of mechanization

As mentioned above, the econometric analysis is based on Heckman's Two-Step Selection Model which allows us control for potential selection issues. The results are presented in Table 4.5. Overall, the model was highly significant as indicated by the test of the Wald Chi-Square statistic. Indeed, the small p-value from the test ($p < 0.0001$) leads us to conclude that at least one of the regression coefficients in the model is not equal to zero. We can see in Table 4.5 that the lambda term which stands for Inverse Mills Ratio is significant at 1% and negatively signed, which suggests that the error terms in the second step (output equation) and selection equation are negatively correlated. That confirms that there was significant sample selection bias. So (unobserved) factors that make a decision to adopt more likely tend to be associated with lower proportion of land area allocated to mechanization by farmers. Compared to the double hurdle model, Heckman's Two-Step Selection Model is therefore the appropriate model to use for this study.

- ***Factors of decision to adopt mechanization***

The upper part of Table 4.5 presents the results of the mechanization adoption. It appears that many variables are significant and positively correlated with the adoption of mechanization.

The results suggest that the likelihood of adoption of farm mechanization increases when the farming household is headed by a male. Indeed, the gender of the head of household is statically significant at 5% and positively correlated with the probability that farmers would adopt mechanization. Being a male household head increases the probability of adopting farm mechanization by 0.162 on average, compared with being a female household head.

This result suggests that machinery operation is dominated by males because the skill sets used in operating the machinery require the physical strength possessed by males. Another

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

reason is that more men are involved in farm operations and are most likely to be controlling and operating the machines. This finding is in line with those of researchers like Kuwornu et al. (2017) and Adekunle et al. (2016) who found that farming households headed by males are more likely to use machinery.

With regard to the level of education of the household head, the higher the educational level of the household head, the higher the likelihood of using machines. Educated household heads may be more capable of accessing and assimilating information regarding the use of farm mechanization. This result is consistent with Alene et al. (2000), Debartin et al. (1982) and Owombo et al. (2012), who reported that farmers with higher levels of education had a higher probability of adopting improved technology. Our results suggest that years in school may have exposed the farmer to modernized agricultural technology. Education of the household head increases the probability of adoption of farm mechanization.

We expected that the probability of farm mechanization would decrease with family labour. We found that a decrease in availability of family labour leads to a decrease in the likelihood to adopt mechanization. This result is in contradiction with that of Kuwornu et al. (2017) and Verma (2006) who found that a larger family means abundant labour, therefore, fewer activities for machinery and hence, decreased intensity of mechanization.

We anticipated that the probability of farm mechanization would increase as hired labour increases. The results show that the household which spends a lot on hired labour was more likely to adopt conservation tillage. Indeed, the use of hired labour was positive and significant with a 1% significance level. Mechanization seems to be associated with a higher intensity of hired labour. This pattern points to the absence of a labour substitution effect resulting from machine use as suspected, based on the data presented in Table 4.4 of descriptive statistics. This result is in contradiction with that of Houssou et al. (2015) but is consistent with Research from Balishter et al. (1991) and Kuwornu et al. (2017) who suggested that increased mechanization is associated with increase in labour expenditure. They explained that this could be attributed to the fact that skilled labour is hired to operate the farm machinery. Relatively higher wages are paid for skilled labour usage, hence labour expenditure complements access to mechanization. Also, according to Ollenburger et al. (2016), widespread mechanization could result in additional labour demand for semi-skilled repair work, as well as for hired labour in non-mechanized farming activities such as the harvest of cotton. Likewise, Binswanger (1978) previously stated that as long as wage rates

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

remain low, there is little reason to expect tractors to gain comparative advantages in labour-intensive operations.

Tenure statute is positive and statically significant at 1%. This indicates that holding the right to property is a driving factor which encourages landholders to adopt farm mechanization. The larger the landholding size, the higher the odds of the farmer using machines and equipment. This result is consistent with that of Houssou et al. (2014) who reported that having a property right on a farm will positively affect the use and intensification of using mechanization by farmers. This means that under strong or guaranteed land tenure, farmers tend to use machines and equipment more than under a system with weak tenure.

The effect of 0.192 for access to credit suggests that farm mechanization is not predominantly suitable for farmers lacking access to credit. This result suggests that, with access to capital, farmers would use capital-intensive adaptation methods. This implies that lack of access to credit is a significant constraint preventing some farmers from using machines and equipment. With respect to variables which stand for social capital like belonging in farmer groups or having assistance from agricultural organization and NGOs, we found that coefficients associated with the three social capital variables are highly significant and positively correlated with the probability that farmers would adopt mechanization. In other words, the results suggest that the farmers who are members of farmer groups or those who received assistance from CMDT⁵⁵ or NGOs are more likely to adopt mechanization. In fact, this may be because inside the groups, farmers interact and influence each other over time through socialization processes. These results seem to indicate that farmers' groups allow informal sharing of knowledge and experiences on agricultural practices including the adoption of mechanization. CMDT is in charge of organizing the production and marketing of cotton throughout Mali and serves to educate farmers about the marketing and cultivation of cotton crops. It seems that CMDT and NGO support and advocate the use of mechanization. So, the social capital of a farmer would expose him to information which can eventually stimulate adoption. These results are in line with assertions from Rogers (2003) who argues that, as people interact and socialize at gatherings, they may share information about new innovations which may influence its adoption. We can also use the same corridor of explanation made by Sahin (2006) who found that, since diffusion of innovations takes place in the social system, it is

⁵⁵ “Compagnie Malienne pour le Développement du Textile”

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

influenced by the social structure (including norms, shared social experience, and perceptions) of the social system.

With regard to regional-level effects, results show that probability to mechanize farming operations seems to be higher among farmers whose farms are located in the south of the country. We took the region of Mopti (the central region of Mali) as a reference point with which to compare the results of other regions. We found that farmers of Ségou, Sikasso, Koulikoro and Kayes are more likely to use machines and equipment. Conversely, farmers in the northern regions (Gao, Tombouctou, Bamako) are less likely to adopt farm mechanization compared to those in Mopti. Factors such as productivity may explain the difference in farm mechanization between regions. Indeed, in the southern regions, agriculture is more productive than elsewhere, and because of productivity in these regions, many NGOs and institutions usually implement projects there, including mechanization projects. Moreover, this result may be explained by mechanization subsidy programmes made by the CMDT, NGOs and government. For example, a mechanization programme is going on in Segou, Sikasso and Mopti with the presence of NGOs and CMDT (for *Compagnie Malienne pour le Développement du textile*). So farm mechanization is location specific.

The results also reveal that being located on plain relief increases the likelihood of farm mechanization, compared to those located in the bottom relief. Conversely, it appears that the steeper the farm slope, the lesser the probability to mechanize farm operations. This finding appears to be consistent with the finding from Uri (1997), Fuglie (1999) and Soule et al. (2000).

With respect to drought variable, we found that SPEI Index (inverse of drought) displays a positive and significant relationship with farm mechanization. This suggests that a higher value of SPEI increases the probability to adopt mechanization. Findings are that farmers who experienced less incidence of drought have a 2.59 % higher probability of mechanizing their farm operation. Results are in contradiction with our hypothesis. Based on the framework we drew, which shows the relationship between drought and mechanization and we postulated that occurrence of drought induces farm mechanization.

After analysis of factors that influence mechanization adoption, hereafter we assess the determinants of the intensity of farm mechanization. The lower part of the Table 4.5 presents the results from the second step of the Heckman selection model employed, showing that

intensity of adoption is measured by the amount of cultivated land under mechanization relative to total cultivated land per farming household.

- ***Factors of intensity of adoption of mechanization practices***

Agricultural mechanization, especially the use of tractors for ploughing, is inversely correlated with family labour intensification. Although farm size was not significant in correlating with adoption decisions, our results indicate that total cultivated land is significant with a 1% significance level and negatively correlated with farmers' decisions to extend their land to mechanization practice. This finding suggests that the more available land in total, the lower share of land is allocated to farm mechanization. The coefficients show that all those dummies variables which stand for the relief of farm are positives and significant (almost all at 10% significance level) except variable "ha_steep_slope". This suggests that having an important part of the land located on plateau, plain or low slopes increases the likelihood of raising the intensity of farm mechanization in comparison to farm located in the bottom relief. Thus, households that face moderate soil constraints are more likely to devote significantly higher shares of their land to mechanization.

Table 4. 5: Adoption and intensity of adoption of farm mechanization

<u>Determinants of decision of farm mechanization</u>		
	<u>Coefficients</u>	<u>Standard errors</u>
HH Age	0.000991	0.00115
HH Gender	0.162**	0.0804
HH Education	0.278***	0.0863
Family Labour	0.00873***	0.00284
Hired labour	0.0170***	0.00286
Farm size (ha)	0.000988	0.00659
Tenure (hectares under property right)	0.0293***	0.00703
Access to credit	0.192***	0.0528
HH membership to farmer group	0.105***	0.0382
CMDT	0.491***	0.0722
NGO	0.331***	0.0813
Bamako	-0.245***	0.0720
Gao	-0.788***	0.0851
Tombouctou	-1.205***	0.0753
Ségou	1.190***	0.0643
Sikasso	0.660***	0.0678

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

Koulikoro	0.226***	0.0522
Kayes	0.187***	0.0482
ha_plateau	0.0116	0.00955
ha_plain	0.0235***	0.00824
ha_low slope	0.0110	0.00970
ha_steep slope	-0.0836***	0.0217
Invers of Drought indicator (SPEI) ⁺	0.259***	0.0728
Constant	-0.738***	0.146

Determinants of intensity of farm mechanization

Family labour	-0.00141***	0.000448
Hired labour	0.000155	0.000216
Farm size (ha)	-0.00326***	0.000786
ha_plateau	0.00486***	0.00117
ha_plain	0.00414***	0.00114
ha_low slope	0.00247*	0.00130
ha_steep slope	0.00609	0.00446
Constant	0.974***	0.00759

***, **, * Significant at 1%, 5%, and 10% probability level, respectively.

n = 8836. Wald Chi-square = 58.40. Inverse Mills Ratio (IMR) = -0.0866***

Note: ⁺ this variable represents the absence of drought. Indeed, interpretation is in the opposite direction of the sign of coefficient.

5 Conclusion

The formulation of an agricultural mechanization strategy has been a key activity of the FAO for several decades (FAO, 2013). This strategy advocated by FAO suggests that, in order to guarantee food self-sufficiency and poverty reduction, agricultural intensification interventions with farm mechanization should be considered. This could be very suitable for a country like Mali where agriculture is subject to the hazards of rainfall and drought which makes the soil drier and difficult to plough. In that context, the question that can emerge is: why does the country fall behind regarding farmers' access and intensity of mechanization?

This study identifies the driving factors and the barriers of adoption and intensity of farm mechanization in Mali. Our work contributes to the literature by estimating a two-step Heckman selection model to achieve the objective. Unlike many studies on farm mechanization, we look at the extent of adoption. Modelling mechanization adoption and its intensity as a two-step process allows a better understanding of key determinants of those two hurdles. Hence, better conclusions and recommendations can be drawn. The discussion of our

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

findings, in light of previous studies' results, reveals that drought and various household and farm characteristics have effects on adoption and intensity of farm mechanization.

Results from the two-step Heckman selection model employed indicate that, when drought occurs, farmers are less likely to adopt and extend their adoption by increasing the proportion of land area that is under mechanization technology. The gender of the household head, availability of family labour, hired labour, access to credit, social capital like having membership to farmers' groups, and having property rights of farmland all influenced farmers' choices. The relief and the region where a farm is located also appear important for the decision of adoption. The second stage of Heckman model results suggested that the intensity of farm mechanization is positively influenced by farm size, a good relief of farmland and it negatively correlates with family size.

Given these results, promotion of mechanization can be accomplished through addressing the main factors underlying non-adoption such as granting farmers the right of land ownership. Additionally, one thing to take into account is the fact that mechanization increases capital expenses for machinery and equipment. In Mali, as farmers are generally too poor to be able to buy expensive machines, mechanization of farming often appears to them too costly to implement. Therefore, the government could promote the use of machines through custom hiring of various expensive farm machines. The task of coordination can be entrusted to NGOs. Necessary steps may be taken in this regard, so that mechanization could spread across the farming community. Moreover, some less expensive machines like power sprayers and thresher machines could be subsidized. The subsidies should be granted not to individual farmers, but to clusters of farms, for example, of 10 hectares. This is particularly necessary at the time of harvest, when even less expensive machines like threshers are not readily available to farmers. Forming small clusters of farms could resolve this problem. Policy incentives such as providing technical supervision to farmers to encourage extensive adoption of mechanization should also be considered. To increase farm mechanization, programmes like the "Pret Premier Equipment", described by Sangaré and Traoré (1990), should be implemented to allow a wider subset of farmers to acquire and use machinery and equipment and expand their area under farm mechanization. In fact, this kind of initiative assisted farmers in the purchase of their first draft team. In the specific case of Mali, CMDT and NGOs which provide supervision to farmers should make strategic interventions by pointing out and promoting the use of machines and equipment. In summary, to promote farm

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

mechanization, and this on a large scale, there is a need to design policies that increase access to farmer capacities to hire or to buy machines and equipment. To encourage mechanization, financial institutions such as banks, savings and credit cooperative societies and village community banks are therefore potentially effective institutions to develop in order to empower farmers to adopt mechanization. In the same way, this also suggests the importance of informal networks, including relatives, friends, and neighbours, in credit provision for agricultural investments.

In addition to our recommendations, it is interesting to suggest that farm mechanization should be implemented with a caveat in mind: that agricultural mechanization in the twenty-first century should be simultaneously, environmentally compatible; economically viable; affordable and adapted to local condition and also, in view of current developments in weather patterns, be climate-smart. This is important when taking into account the study by Napier et al. (1991) which points out that the successes of mechanization of agriculture have not been accomplished without environmental and social costs. Eroded land and water pollution are amongst the costs associated with this agricultural practice. So the new patterns of mechanization of agriculture advocated by FAO aim to ensure environmental conservation practices and safety measures while increasing agricultural production (Fonteh, 2010).

References

- Adekunle, A., Osazuwa, P., & Raghavan, V. (2016). Socio-economic determinants of agricultural mechanisation in Africa: A research note based on cassava cultivation mechanisation. *Technological Forecasting and Social Change*, 112, 313-319.
- Alene, A. D., Poonyth, D., & Hassan, R. M. (2000). Determinants of adoption and intensity of use of improved maize varieties in the Central Highlands of Ethiopia: A Tobit analysis. *Agrekon*, 39(4), 633-643.
- Almoustapha Coulibaly (2006) Country Pasture/Forage Resource Profiles. FAO 2006.
- Aune, J. B., & Bationo, A. (2008). Agricultural intensification in the Sahel – The ladder approach. *Agricultural Systems*, 98(2), 119-125.
- Aune, J. B (2008). Adapting dryland agriculture in Mali to climate change. Department of international Environment and Development Studies (Noragric), Norwegian University of Life Sciences
- Balishter, G. V., & Singh, R. (1991). Impact of Mechanisation on Employment and Farm Productivity. *Productivity*, 32(3), 484-489.
- Byerlee, D., Stevenson, J., Villoria, N., 2014. Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? *Glob. Food Sec.* 3, 92–98.
- Clarke, L. J. (2000). Strategies for Agricultural Mechanization Development: The Roles of the Private Sector and the Government. Rome: Agricultural Engineering Branch, Agricultural Support Systems Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Central Research Institute for Dryland Agriculture and BAIF Institute for Rural Development-K. Institutionalization of farm mechanization: Innovative Promotional Methods for Successful Implementation in Rural Areas and Policy Support. Policy brief II. DFID-NRSP R8192
- Improved NRM for Better Livelihoods.
<http://www.crida.in/DFID/Crida%20Technical.%20Report%202002-05PDF.pdf>
- Cunguara, B., Darhofer, I., 2011. Assessing the impact of improved agricultural technologies on household income in rural Mozambique, *Food Policy* 36, 378-390.
- Debertin, D. L., Pagoulatos, A., & Aoun, A. (1982). Determinants of Farm Mechanization in Kentucky: An Econometric Analysis. *North Central Journal of Agricultural Economics*, 73-80.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

- De la Croix, K., Marie, J., Ferry, L., & Landy, F. (2011). New Dynamics of Agricultural Mechanization: Trade, uses and spatialization in the Ségou Region (Mali). In *Annales de géographie* (No. 2, pp. 174-192). Armand Colin.
- de Ridder, N., Breman, H., van Keulen, H., & Stomph, T. J. (2004). Revisiting a ‘cure against land hunger’: soil fertility management and farming systems dynamics in the West African Sahel. *Agricultural systems*, 80(2), 109-131.
- Deressa, T. T., Hassan, R. M., Ringler, C., Alemu, T., & Yesuf, M. (2009). Determinants of farmers’ choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global environmental change*, 19(2), 248-255.
- Dembele, R. (2001). Rapport phase diagnostique : mécanisation, version finale. Projet d’Appui à la définition d’une politique nationale de mécanisation agricole au Mali (TCP/MLI/0165). Bamako-Mali, FAO /D.N.A.E.R, 69 pp.
- Di Falco, S., & Veronesi, M. (2013). How can African agriculture adapt to climate change? A counterfactual analysis from Ethiopia. *Land Economics*, 89(4), 743-766.
- FAO, I. (2016). WFP (2015), *The State of Food Insecurity in the World 2015. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress*. Food and Agriculture Organization Publications, Rome.
- Falconnier, G. N., Descheemaeker, K., Traore, B., & Giller, K. E, 2017. Agricultural intensification and policy interventions: exploring plausible futures for smallholder farmers in Southern Mali. *Trajectories of agricultural change in southern Mali*, 111.
- Feder, G., Just, R. E., & Zilberman, D. (1985). Adoption of agricultural innovations in developing countries: A survey. *Economic development and cultural change*, 33(2), 255-298.
- Firouzi, S., Allahyari, M. S., Hadizadeh, F., & Koundinya, V. (2017). Factors Affecting the Development of Hazelnut Harvesting Mechanization in Guilan Province of Iran. *Journal of Nuts*, 8(1), 1-10.
- Fonteh, F. M. (2010). *Agricultural mechanization in Mali and Ghana: Strategies, experiences and lessons for sustained impacts*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Fuglie, K.O., 1999. Conservation tillage and pesticide use in the cornbelt. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 31 (1), 133–147.
- Garcia, B. (2013). Implementation of a double-hurdle model. *Stata*, 13 (4), 776-794.
- Ghosh, B. K. (2010). Determinants of farm mechanization in modern agriculture: A case study of Burdwan districts of west Bengal. *International Journal of Agricultural Research*, 5(12), 1107-1115.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

- Headey, D.D., Jayne, T.S., 2014. Adaptation to land constraints: is Africa different? *Food Policy* 48, 18–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.005>.
- Heckman, J.J. 1979. Sample selection bias as a specification error. *Econometrica*, 47(1):153-161.
- Heckman, J. (2013). Sample selection bias as a specification error. *Applied Econometrics*, 31(3), 129-137.
- Houssou, N., & Chapoto, A. (2015). Adoption of Farm Mechanization, Cropland Expansion, and Intensification in Ghana. In 2015 Conference, August 9-14, 2015, Milan, Italy (No. 211744). International Association of Agricultural Economists.
- Kramerae, C. (Ed.), 1988. *Technology and Women's Voices: Keeping in Touch*. Routledge & Kegan Paul, London.
- Kuwornu, J. K., Apiors, E. K., & Kwadzo, G. (2017). Access and Intensity of Mechanization: Empirical Evidence of Rice Farmers in Southern Ghana. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60.
- Loi d'Orientation Agricole (LOA) (<http://www.pcda-Mali.org/site/index.php/29-mediatheque/31-la-loi-D-orientation-agricole-du-Maliloa>, last accessed 25/02/2018).
- Maiga, (2016). Mali: The mechanization of agriculture is not for tomorrow. *News, Les nouvelles du Mali*, July 2016. <http://Malisnews.com/en/Mali-mecanisation-de-lagriculture-nest-demain-2/>, last accessed (25/02/2018)
- Mrema, G. C., Baker, D., & Kahan, D. (2008). *Agricultural mechanization in sub-Saharan Africa: time for a new look*. FAO.
- Ngwira, A., Johnsen, F. H., Aune, J. B., Mekuria, M., & Thierfelder, C. (2014). Adoption and extent of conservation agriculture practices among smallholder farmers in Malawi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(2), 107-119. doi:10.2489/jswc.69.2.107
- Napier, Ted L. 1991. "Factors affecting acceptance and continued use of soil conservation practices in developing societies: A diffusion perspective." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 36: 127-140.
- Ollenburger, M. H., Descheemaeker, K., Crane, T. A., Sanogo, O. M., & Giller, K. E. (2016). Waking the Sleeping Giant: Agricultural intensification, extensification or stagnation in Mali's Guinea Savannah. *Agricultural Systems*, 148, 58-70.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

- Owombo, P. T., Akinola, A. A., Ayodele, O. O., & Koledoye, G. F. (2012). Economic impact of agricultural mechanization adoption: Evidence from maize farmers in Ondo State, Nigeria. *Journal of Agriculture and Biodiversity Research*, 1(2), 25-32.
- Sims, B. G., & Kienzle, J. (2006). Farm power and mechanization for small farmers in sub-Saharan Africa. Agricultural and Food Engineering Technical Report. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Sissoko, K. (1998). Et demain l'agriculture? Options techniques et mesures politiques pour un développement agricole durable en Afrique subsaharienne: Cas du Cercle de Koutiala en zone sud du Mali (p. 184).
- Sims, B. G., Kienzle, J., & Hilmi, M. (2016). Agricultural Mechanization: A Key Input for Sub-Saharan African Smallholders. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Rapport national sur le développement durable au Mali. Dans la perspective de Rio+20. (Juin, 2012)
- Renard, J. (2002). Les mutations des campagnes: paysages et structures agraires dans le monde. Armand Colin.
- Rogers, E.M. 2003. Diffusion of innovations, 5th ed. New York: Free Press.
- Sangaré, M.I., Traoré, A., (1990). L'impact de la traction animale: cas des prêts "Premier Equipement" dans la région Mali Sud. Animal Traction for Agricultural Development: Proceedings of the Third Workshop of the West Africa Animal Traction Network. Published on behalf of the West Africa Animal Traction Network by the Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA). Ede-Wageningen, The Netherlands, pp. 1-7.
- Santoni O. (2016), Base de données Climat au niveau pays 1901-2014, mimeo, Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International, Clermont-Ferrand, France.
- Sarkar, D., Roy, D., & Chattopadhyay, K. S. (2013). Effect of farm mechanization on agricultural growth and comparative economics of labour and machinery in West Bengal.
- Soule, M.J., A. Tegene, and K.D.Wiebe. (2000). Land tenure and the adoption of conservation practices. *American Journal of Agricultural Economics* 82(4):993-1005.
- Verma, S. R. (2006). Impact of agricultural mechanization on production, productivity, cropping intensity income generation and employment of labour. Status of farm mechanization in India, 133-153.

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Appendix 4

Table 4. 6: OLS estimation of the intensity of farm mechanization

	OLS specification
Family labour	-0.00109** (0.000453)
Hired labour	0.000386*** (0.000116)
Farm size (ha)	-0.00303*** (0.000862)
ha_plateau	0.00718*** (0.00113)
ha_plain	0.00529*** (0.00114)
ha_low slope	0.00385*** (0.00117)
ha_steep slope	0.00220 (0.00334)
Constant	0.923*** (0.00483)
Observations	5,678
R-squared	0.009

Note: This table reports estimation of farm mechanization using OLS model. The dependent variable is truncated at zero and therefore it yields a corner solution. So the OLS is inefficient and it can lead to erroneous conclusions because statistical analyses will be based on non-randomly selected samples. All coefficients are not interpretable. Robust estimator is used for regression.

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Table 4. 7: Double hurdle model

VARIABLES	(1) Tier 1	(2) Tier 2
age_chef	0.000991 (0.00115)	
sex_chef	0.162** (0.0804)	
etud_sec	0.278*** (0.0863)	
total_actif_agri	0.00873*** (0.00284)	-0.00109** (0.000440)
hi_mo	0.0170*** (0.00286)	0.000386* (0.000209)
sup_tot_expl	0.000988 (0.00659)	-0.00303*** (0.000769)
ha_ppte	0.0293*** (0.00703)	
credit_expl	0.192*** (0.0528)	
memborg_chef	0.105*** (0.0382)	
CMDT	0.491*** (0.0722)	
ONG	0.331*** (0.0813)	
region8	-0.245*** (0.0720)	
region7	-0.788*** (0.0851)	
region6	-1.205*** (0.0753)	
region4	1.190*** (0.0643)	
region3	0.660*** (0.0678)	
region2	0.226*** (0.0522)	
region1	0.187*** (0.0482)	
ha_plateau	0.0116 (0.00955)	0.00719*** (0.00111)
ha_plain	0.0235*** (0.00824)	0.00529*** (0.00111)
ha_pentefaible	0.0110 (0.00970)	0.00385*** (0.00126)
ha_penteforte	-0.0836***	0.00220

Chapter 4: Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter?

	(0.0217)	(0.00440)
spei_6_11_2003	0.259***	
	(0.0728)	
Constant	-0.738***	0.923***
	(0.146)	(0.00477)
Observations	8,830	8,830
Sigma	0.206***	
	(0.00194)	

In this study, as mentioned earlier, fitting double Hurdle model yields inefficient estimates. The selection bias remains the problem as far as the dependent variable is truncated at zero.

Standard errors in parentheses

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Conclusion générale et Perspectives

A travers les chapitres qui la constituent, cette thèse a tenté d'apporter des réponses à quelques questions contemporaines en économie agricole. L'objectif de cette thèse était double : (i) d'abord, contribuer à une meilleure compréhension de la relation complexe et multiforme qui existe entre le changement climatique et la production agricole au Mali; (ii) et ensuite, mieux identifier les pratiques susceptibles d'aider les agriculteurs maliens à s'adapter aux changements climatiques. Pour le Mali qui est un pays sahélien véritablement en proie aux aléas climatiques, il nous est apparu intéressant de recentrer l'analyse sur la sécheresse. Le choix de cet angle d'analyse est parti du constat que la sécheresse au Mali est, parmi les manifestations du changement climatique, le phénomène le plus silencieux, le moins impressionnant et dont l'enjeu sociétal est énorme à l'instar des graves conséquences sur la disponibilité de la nourriture. C'est dans ce cadre bien spécifique du Mali que s'inscrivent les quatre chapitres qui composent cette thèse.

Les chapitres 1 et 2 traitent de l'impact des changements climatiques respectivement sur la production agricole et sur la performance managériale des agriculteurs. Les chapitres 3 et 4 analysent les procédés qui pourraient garantir une bonne production agricole dans un contexte de changement climatique : l'adaptation au changement climatique et la mécanisation sont donc étudiées.

Principaux résultats

Le premier chapitre analyse les manifestations du changement climatique et leurs impacts sur l'agriculture au Mali. D'abord, nous passons en revue les signes du changement climatique. L'analyse se recentre ensuite sur la sécheresse. Nous faisons un exposé général sur la notion de sécheresse en la définissant et en présentant les indices qui permettent de l'appréhender. Puis, nous présentons le Mali du point de vue de sa géographie (climat, l'hydrographie, les types de sol) et du point de vue de son secteur agricole. En outre, nous utilisons un large éventail de mesures statistiques et d'outils graphiques pour réaliser une analyse exploratoire et descriptive de données climatiques et agricoles du Mali. Les tendances et les spécificités dans les séries de données sont identifiées et les corrélations entre les variables de productions agricoles et celles de changements climatiques sont mises en évidence. Comme on pouvait le prévoir, nos résultats révèlent une forte corrélation entre l'agriculture et les variables climatiques telles la sécheresse, les températures, les précipitations et l'évapotranspiration.

Le chapitre 2 examine dans quelle mesure le changement climatique affecte la performance managériale des agriculteurs maliens. Le point de départ de l'analyse est que les différences de conditions climatiques entre les localités géographiques peuvent entraîner des variations systématiques sur les performances des agriculteurs. Ainsi, nous estimons d'abord une frontière de production qui tient explicitement compte de l'influence du changement climatique. Les résultats révèlent que l'instabilité climatique explique une partie de l'écart à la frontière de production. Autrement dit, le changement climatique diminue l'efficacité technique des agriculteurs d'une part. Et d'autre part, il modifie le classement des agriculteurs qu'on aurait obtenu si l'instabilité climatique n'avait pas été prise en compte lors de l'estimation des scores d'efficacité. Notre étude souligne l'importance de renforcer les capacités des agriculteurs en termes de choix de la composition des intrants, car l'inefficacité technique réelle représente la plus grande partie de l'inefficacité alors que l'inefficacité climatique est faible.

Le chapitre 3 a pour objectif d'identifier les facteurs qui influencent la décision de l'agriculteur d'adopter des pratiques agricoles qui réduisent la vulnérabilité au changement climatique. Nous nous sommes intéressés à des pratiques agricoles qui en plus de permettre l'adaptation au changement climatique, favorisent la préservation de l'environnement : l'utilisation des semences améliorées, la diversification de culture sur une parcelle et le choix de la date de mise sous terre des semences. Les résultats indiquent que les déterminants de l'adaptation au changement climatique varient selon la pratique agricole. L'adoption de l'utilisation des semences améliorées semble être favorisée par l'accès au crédit, et l'accès aux équipements agricole. Par contre les autres variables semblent avoir une influence significative et négative sur cette pratique agricole (l'âge du chef de ménage, la surface de la parcelle, la possession du droit de propriété de la parcelle, la pratique de l'élevage, l'emplacement de la parcelle sur un relief de plateau. Concernant la diversification des cultures sur la parcelle, nous trouvons l'âge, le niveau d'étude du chef de ménage, la détention du droit de propriété sur la parcelle, la superficie de la parcelle, l'accès aux équipements agricoles et aux moyens de transport, la fréquentation d'une organisation paysanne. Et le fait que la parcelle soit située sur des reliefs de plateau et des pentes faibles au lieu d'être sur une plaine, présente des coefficients significatifs et positifs. Cependant, les freins à l'adoption de cette stratégie semblent être l'accès au crédit et le fait que la parcelle soit située sur un relief de bas-fonds au lieu d'être sur un relief de plaine. Pour ce qui est du choix de modifier la date

de mise sous terre des semences pour s'adapter au changement climatique, nous trouvons que les facteurs qui influencent positivement la modification de la date de mise sous terre des semences sont : la pratique de l'élevage, l'accès au crédit, la distance entre le domicile et la parcelle, la fréquentation d'une organisation paysanne, l'accès aux équipements agricoles et le fait que la parcelle soit située sur un relief de bas-fonds au lieu d'être sur un relief de plaine. Les résultats indiquent également que la survenue d'un épisode de sécheresse pendant la saison des pluies précédente est un facteur déterminant pour l'agriculteur et ce, quelle que soit la stratégie qu'il projette de mettre en œuvre pour s'adapter au changement climatique.

Le quatrième chapitre cherche à comprendre pourquoi le Mali est en retard en ce qui concerne la mécanisation agricole. Cette étude identifie les déterminants de la mécanisation agricole au Mali. Les résultats indiquent qu'en cas de sécheresse, les agriculteurs sont moins enclins à utiliser les machines. Le sexe du chef de ménage, la disponibilité de la main-d'œuvre familiale, la main-d'œuvre, l'accès au crédit, le capital social comme l'appartenance à des groupements d'agriculteurs et les droits de propriété des terres agricoles ont tous influencé les choix des agriculteurs. Le relief et la région où se trouve la parcelle étudiée semblent également être d'importants déterminants de la décision d'adoption de la mécanisation. Les résultats suggèrent aussi que l'intensité de la mécanisation agricole est influencée positivement par la taille de la ferme, et négativement par la taille de la famille.

Implications politiques

Au Mali, les effets négatifs de l'instabilité climatique vont en s'amplifiant. Des actions adéquates pourraient être entreprises par les agriculteurs, les agences gouvernementales et les acteurs du développement rural afin de garantir une bonne production agricole. Ceci étant, sur la base des résultats obtenus dans les chapitres qui la composent, cette thèse suggère certaines recommandations.

En ce qui concerne l'adaptation au changement climatique, nous suggérons que les interventions considèrent le rôle important de la sensibilisation et de la formation des agriculteurs sur les pratiques agricoles adéquates. De ce fait, le développement des réseaux d'agriculteurs comme les organisations paysannes est à encourager. Ceci passe par un suivi de

leurs activités, des aides techniques de formation et d'information et l'apport de subventions. Aussi, étant donné que certaines stratégies d'adaptation au changement climatique sont coûteuses, les politiques pourraient favoriser l'accès au crédit et promouvoir le développement des activités génératrices. D'autres actions des décideurs pourraient aussi être des actions orientées vers l'éducation des populations et les actions qui facilitent l'accès à la propriété foncière. Les conclusions de la Stratégie Nationale sur les Changements Climatiques au Mali (SNCC) sont toutes aussi édifiantes pour connaître les facteurs de l'adaptation au changement climatique.

Pour ce qui est de la mécanisation agricole, il serait important de faciliter l'accès à la propriété foncière. En outre, une chose importante à prendre en compte est que les agriculteurs maliens rencontrent des contraintes financières alors que la mécanisation requiert des capitaux relativement importants. Les institutions financières telles que les banques, les coopératives d'épargne et de crédit et les banques communautaires villageoises sont donc des institutions potentiellement efficaces pour développer les capacités des agriculteurs à adopter la mécanisation. Aussi, au lieu de l'achat, la location des machines agricoles coûteuses pourrait être privilégiée. De plus, certaines machines moins coûteuses, telles que les pulvérisateurs et les batteuses, pourraient être subventionnées. Les subventions pourraient être accordées non pas aux agriculteurs individuels, mais à des groupes d'exploitants agricoles. Pour accroître la mécanisation agricole, des programmes tels que le «Prêt Premier Equipement», décrit par Sangaré et Traoré (1990), est une initiative à perpétuer afin d'aider les agriculteurs à acheter leur premier équipement. Outre nos recommandations, il est intéressant de suggérer que la mécanisation agricole soit mise en œuvre en gardant à l'esprit que la mécanisation agricole au XXI^e siècle devrait être simultanément compatible avec l'environnement, économiquement viable, abordable et adaptée aux conditions locales.

Limites et perspectives des recherches

Afin que les recommandations soient plus précises et qu'elles tiennent leurs promesses, il s'avère nécessaire d'approfondir les recherches sur les questions fondamentales liées au changement climatique et à l'agriculture.

L'analyse exploratoire et descriptive de l'impact du changement climatique sur la production agricole (chapitre 1) pourrait être remplacée par une analyse économétrique, notamment la méthode Ricardienne. L'approche Ricardienne est un modèle hédonique qui permet de mesurer l'impact du climat sur l'agriculture à travers la variation de la valeur des terres agricoles. Envisager l'utilisation de cette méthode suppose que nous obtenions la valeur foncière des exploitations agricoles. En ce qui concerne la performance managériale des agriculteurs, des recherches supplémentaires pourraient également être menées. Il serait intéressant d'identifier les facteurs socioéconomiques et démographiques qui expliquent l'inefficience nette des agriculteurs. Sur l'aspect de la mécanisation, on pourrait pousser l'analyse en catégorisant les machines agricoles par exemple en petits, moyens et gros équipements. Des estimations économétriques sur chacune des catégories d'équipements pourraient révéler des différences en termes de facteurs explicatifs de l'adoption.

Contribution pour les co-écritures

Contribution pour les co-écritures

Cette thèse n'est pas entièrement le résultat d'une réflexion unilatérale et d'efforts individuels. Pour cette thèse, un chapitre a été co-écrit et les trois autres chapitres ont bénéficié des contributions scientifiques d'autres auteurs. De façon détaillée, nos contributions sont les suivantes:

- Le Chapitre 2 a été co-écrit avec Michel Tenikué, chercheur à Luxembourg Institute of Socio-Economic Research (LISER). Notre contribution à cette co-écriture se trouve à trois niveaux:
 - la revue de la littérature;
 - le toilettage des bases de données agricoles,
 - La proposition d'une nouvelle méthodologie économétrique pour prendre en compte le changement climatique lors l'évaluation de l'efficacité technique
 - les estimations et une partie de l'interprétation des résultats.
- Les chapitres 1, 3 et 4 sont des œuvres individuelles avec une importante contribution de ma Directrice de thèse aussi bien sur le fond que sur la forme.
- A noter que Monsieur Olivier Santoni, ingénieur d'études – Géomaticien au CERDI, a préparé toutes les bases de données climatiques qui ont servi dans le cadre du travail devant aboutir aux quatre chapitres de cette thèse.

Appendice A

Sources des données sur l'agriculture, et le climat du Mali

1. Sources des données sur l'agriculture du Mali

Les données sur l'agriculture utilisées dans les chapitres de cette thèse proviennent de diverses bases de données. Le Recensement Général Agricole du Mali 2004/2005 (RGA), les Enquêtes Agricoles de Conjoncture (EAC), le site de la FAO et celui de la Banque Mondiale en sont les principales sources. Cet appendice est essentiellement consacré à la présentation des données provenant du RGA et de l'EAC. Le RGA collecte les mêmes données que l'EAC. Les principales différences entre les deux enquêtes résident dans la fréquence de réalisation et l'importance de l'échantillon enquêté. S'agissant de la première différence, l'EAC est annuel tandis que le RGA ne l'est pas. La deuxième différence réside dans le fait que le RGA couvre beaucoup plus d'exploitations agricoles, alors que l'EAC enquête sur un nombre plus restreint d'exploitations agricoles.

1.1. Le Recensement Général Agricole 2004/2005: méthodologie d'enquêtes et contenu de la base

Selon le Volume II : Rapport détaillé du Recensement Général Agricole 2004/2005, les objectifs du RGA consistent à :

- Obtenir les données fondamentales sur les caractéristiques structurelles (démographie, facteurs de production, accès aux services, etc.) des exploitations agricoles;
- Fournir des informations sur la participation des femmes dans l'économie rurale ;
- Fournir des indicateurs actualisés pour accompagner le suivi de la pauvreté et des programmes de développement rural ;
- Mettre en place une banque des données sur le secteur rural.

Le RGA 2004/2005 a ciblé 3 types d'exploitation agricole : les exploitations traditionnelles individuelles qui sont généralement constituées d'un ou de plusieurs ménages associés, les exploitations traditionnelles collectives qui sont des formes d'organisations villageoises de production dont les membres peuvent appartenir à d'autres exploitations individuelles, et les grandes exploitations ou celles modernes qui ont une capacité de production assez élevée, compte tenu de leur taille ou de leur niveau d'équipement. Les données collectées lors du RGA concernent l'environnement rural, les efforts de production, les techniques de production et les performances du secteur.

Le RGA a couvert l'ensemble du territoire national. Ce qui a permis de disposer des données par région, par cercle et au niveau national. Il a été mené sous forme d'enquête par sondage de grande envergure avec un échantillon d'exploitations agricoles représentatif au niveau du cercle. Pour réaliser la collecte des données auprès des exploitations individuelles, le RGA adopte un plan de sondage qui consiste à diviser le Mali en strates et sous-strates. Les différents cercles des régions administratives et les communes du District de Bamako ont été répartis en sous-ensemble selon les régions naturelles. De cette façon, 69 strates ont été identifiées. Ensuite, à l'intérieur de chaque strate, 1 à 3 sous-strates ont été constituées sur la base de l'importance de la population active par type d'activité d'agricole. Dans une deuxième étape, le recensement a utilisé comme base de sondage la liste des Sections d'Énumération (Entités géographiques d'environ 800 habitants en milieu rural et 1500 en milieu urbain) issues du Recensement Général de la Population et de l'Habitat réalisé en 1998. Pour chaque sous-strate, un sondage à 2 degrés a été utilisé : 1^{er} degré: tirage des Sections d'Énumération (SE), avec probabilité proportionnelle à la taille en nombre de ménages en 1998. 2^{ème} degré : tirage aléatoire simple de 5 exploitations agricoles dans chaque SE sélectionnée.

Dans chaque SE sélectionnée, le RGA a recensé de façon exhaustive toutes les exploitations collectives qui y ont été rencontrées. Cette approche équivaut à la construction d'un échantillon aléatoire, au niveau des sous-strates, des exploitations collectives. Concernant les grandes exploitations ou les exploitations modernes, un dénombrement complet à l'échelle nationale a été réalisé.

Basé sur ces lignes directrices, le document méthodologique du RGA 2004/2005 a fourni les formules d'estimation suivantes.

Pour une sous-strate donnée, soient:

y = la variable d'étude à estimer (superficie, production, etc.)

P = le nombre de ménages de la sous-strate en 1998

n = le nombre de SE, échantillon de la sous-strate

D = le nombre total d'exploitations collectives de la sous-strate

i = le numéro d'identification de la SE, $i = 1, 2 \dots n$

E_i = le nombre d'exploitations individuelles de la SE i

D_i = le nombre total d'exploitations collectives de la SE i

P_i = le nombre de ménages de la SE i en 1998

e_i = le nombre d'exploitations individuelles, échantillon de la SE i

- j = le numéro d'identification des exploitations individuelles
- y_{ij} = la valeur de la variable y pour l'exploitation j de la SE i
- y'_i = la somme des valeurs de la variable y des exploitations de la SE i
- \hat{Y} = le total de la variable y dans la sous-strate.

Pour les exploitations individuelles, l'estimateur \hat{Y} du total de Y dans la sous-strate est :

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i P}{n P_i e_i} \sum_{j=1}^{e_i} y'_{ij} = \sum_{i=1}^n C_i y'_i$$

avec $C_i = \frac{E_i P}{n P_i e_i}$;

C_i correspondant au coefficient d'extrapolation.

S'agissant des exploitations collectives, l'estimateur \hat{Y} du total de Y pour la sous-strate est :

$$\hat{Y} = \frac{D}{\sum_{i=1}^n D_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{D_i} y_{ij}$$

L'estimation du total pour les grandes ou modernes exploitations revient à une simple addition des valeurs observées.

A noter que dans la base de lors la campagne agricole 2004/2005, une grande invasion acridienne a considérablement détruite les récoltes. Par conséquent dans la base de données du RGA de cette campagne les données sur les récoltes ne sont pas disponibles (ce qui dans notre cas à limiter nos élans de recherche).

Figure i. 5 : Calendrier saisonnier (campagne agricole 2004/2005)



Source : Rapport mensuel sur la sécurité alimentaire au Mali (février 2005)

1.2. Les enquêtes agricoles de conjoncture: méthodologie d'enquêtes et contenu de la base

L'Enquête Agricole de Conjoncture (EAC) est une enquête par sondage réalisée au Mali chaque année. Elle a pour objectifs majeurs l'estimation de la production des principales cultures pluviales et en sus, le renseignement des autres indicateurs du secteur agricole malien. La couverture géographique de l'EAC est nationale. En effet, elle est réalisée en milieu rural sédentaire et nomade d'une part, et en milieu urbain d'autre part. Les unités d'observation qui sont en fait les unités secondaires sont des exploitations agricoles de culture et d'élevage. Elles sont sélectionnées parmi l'ensemble plus vaste de toutes les exploitations. Il faut savoir que l'unité primaire est la section d'énumération qui se définit comme une aire géographique de 800 à 1000 habitants en milieu rural et de 1000 à 1500 habitants en milieu urbain. La détermination de la taille de l'échantillon est telle qu'au niveau de chaque section d'énumération échantillonnée, un tirage aléatoire simple de 5 exploitations agricoles est effectué. L'échantillonnage est constitué de façon à respecter le découpage administratif (Région, Cercle) et le découpage en zone naturelle (Zones saharienne, sahélienne, soudanienne, soudano-guinéenne et Delta du Niger). C'est dire que l'échantillon tiré pour l'EAC est représentatif. Les données sur l'échantillon sont multipliées par des coefficients d'extrapolation afin d'obtenir des données valables aux niveaux régional et/ou national.

La collecte se fait généralement pendant l'hivernage⁵⁶ à travers plusieurs passages auprès des exploitations échantillonnées. Les données sont collectées à travers plusieurs modules. Un module consacré à la collecte des caractéristiques des parcelles et des facteurs de production telles que les mesures des superficies cultivées par spéculation, les quantités d'intrants et les équipements utilisés par les Exploitations. On y retrouve aussi les mesures des rendements des cultures, la production de la campagne agricole précédente, les stocks détenus par les paysans et les informations sur le cheptel ainsi que l'accès des exploitations aux marchés, les crédits agricoles et les dépenses caractéristiques socio démographiques des ménages.

Bien qu'elles soient difficiles à obtenir, les bases de données des EACs existent depuis la campagne agricole 1994-1995 jusqu'à celle de 2015-2016. Nous n'avons eu accès qu'aux données d'enquêtes collectées entre 1998 et 2002.

⁵⁶ L'hivernage au Mali commence généralement en juin d'une année N pour s'achever en février de l'année N+1.

2. La base des données climatiques : la base CRU TS

Les chapitres de cette thèse utilisent les données climatiques du Mali issues de la version 3.21 de la base Climatic Research Unit Times Series (CRU TS3. 21). Cette base est disponible grâce aux travaux de Mitchell et Jones (2005), Harris et al. (2014) entre autres. CRU est une unité de recherche rattachée à l'Université d'East Anglia en Angleterre. La base CRU TS3.21 contient les données de précipitation, température, couverture nuageuse, fourchette de température diurne, fréquence des jours de gel, température journalière et moyenne mensuelle, pression atmosphérique, fréquence des jours de pluie, l'évapotranspiration potentielle sur la période janvier 1901 - décembre 2012.

La base CRU TS3.21 est développée en utilisant plus de 4 000 observations de stations météorologiques à travers le monde entier, selon une grille de précision de 0,5° de longitude/latitude. Cela équivaut au niveau de l'Equateur à l'estimation d'une donnée climatique tous les 50 x 50 Km environ. La grille est composée de cellules dont chacune a une donnée climatique mensuelle générée par interpolation. La donnée de chaque cellule résulte du calcul des moyennes pondérées des observations provenant de l'ensemble des stations météorologiques situées à l'intérieur de la cellule et des observations provenant des stations extérieures mais proches à la cellule concernée. Les poids dans la moyenne des données de stations sont fonctions de la corrélation observée en général entre les données des stations. Cette corrélation est une fonction inverse de la distance entre ces stations. Lorsqu'une station est très éloignée de la cellule, la corrélation de ses données avec celles des stations de la cellule n'est pas significative et par conséquent la station n'est pas prise en compte dans le calcul de la moyenne pondérée. Autrement dit, les auteurs ont défini un seuil (la corrélation decay distance) au-delà duquel le poids de la station est nul. Ce seuil est de 450 km pour les précipitations et de 1200 km lorsqu'il s'agit des températures.

À partir des données par cellule, des moyennes pondérées sont calculées pour obtenir des données par territoire (région, arrondissement). Une double pondération est appliquée : (i) la surface des quadrillages diminuant à mesure que l'on s'éloigne de l'Equateur, les données brutes sont pondérées par le cosinus de la latitude, (ii) pour tenir compte précisément des frontières des pays, les données sont également pondérées par la proportion occupée par le territoire de l'île au sein de chaque cellule.

$$\Delta T_k = \frac{\sum_{i=1}^N \cos(\text{lat } i) \Delta T_{ik}}{\sum_{i=1}^N \cos(\text{lat } i)}$$

Plusieurs raisons motivent le choix de la base CRU TS3.21 pour analyser les problématiques exposées dans cette thèse. Elle est l'une des rares bases de grilles mondiales et en plus la résolution (0,5° de longitude/latitude) des quadrillages est fine⁵⁷. Ainsi, la base CRU peut être utilisée aux niveaux mondial, régional, national et même pour des unités géographiques à un niveau plus fin (voir par exemple les travaux des économistes Burke et al. 2009, Barrios et al. 2010). Elle bénéficie de l'expertise reconnue de l'Unité CRU dans le domaine et cela se traduit par une importante utilisation^{58,59} des bases CRU notamment dans plusieurs rapports du GIEC Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Changement climatique (Folland et al. 2001) et dans les travaux sur le changement climatique et ses conséquences sur la santé (Han et al, 2015), l'agriculture (Vicento–Serrano et al 2012 ; Schlenker et al 2010), l'économie (Dell et al 2014). La base CRU a également été associée aux travaux du centre de recherche Tyndall sur le changement climatique qui fournit un modèle de projection de changement climatique à horizon 2100 à partir des données historiques de la base CRU sur la période 1901-2000 (Mitchell et al. 2004). En plus, les couvertures spatiales et temporelles évoluant avec le temps, les nouvelles stations sont rajoutées et les éventuelles erreurs sont corrigées d'une version à une autre. Notons à cet effet que même si cette thèse utilise une version 3, les versions de bases CRU les plus récentes, actuellement disponibles, sont celles de la 4^e génération (CRU TS4). Elles contiennent les mêmes variables que CRU TS3, mais pour une période plus longue (1901-2015) et la résolution du quadrillage est aussi de 0, 5 x 0, 5°, à partir de plus de 4 000 observations de stations météorologiques à travers le monde entier.

Les données sur les précipitations, les températures et l'évapotranspiration issues de la base CRU, ont été utilisées pour dériver l'indice de sécheresse, Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI), que nous avons amplement utilisé dans cette thèse.

⁵⁷ Par exemple, la CRUTEMP utilise les mêmes données brutes que CRU TS mais la résolution est de 5*5° (i.e 500*500 Km).

⁵⁸ L'occurrence de Climate Research Unit version 3 _ University of east Anglia est d'environ 5 830 résultats dans Google scholar au 28 septembre 2017.

⁵⁹ D'autres bases de données climatiques importantes existent, même si elles n'ont pas la réputation de la CRU. On peut citer par exemple la base Variability Analysis of Surface Climate Observations (VasClim0) et la base l'université de Delaware (Udel) produite respectivement au sein des universités allemande et américaine.

Appendix B

Empirical identification of drought: The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)

Appendix B: empirical identification of drought: The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)

As far as agriculture is concerned in Mali, drought is a fundamental climatic parameter to consider because, like other Sahel countries, it faces rising temperature issues resulting from climate change. Drought is an abnormal water deficit with respect to average conditions. As pointed by Vicente-Serrano et al. (2010), there is some scientific debate about which parameters are the most important in determining drought severity. Through the literature, a number of indices were developed to determine the drought, and the most frequently cited are PDSI for Palmer Drought Severity Index developed by Palmer (1965), SPI for Standardized Precipitation Index established by McKee et al. (1993) and the SPEI for Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index devised by Vicente-Serrano et al. (2010). According to Vicente et al. (2010) the SPEI index is particularly suited to detecting, monitoring and exploring the consequences of global warming on drought conditions. This allegation is based on advantages of SPEI compared to the two other indexes. On the one hand, unlike SPI which is calculated only on precipitation data, SPEI is based on precipitation and evapotranspiration PET. The SPI does not consider other variables that can influence droughts, such as temperature, evapotranspiration, wind speed and soil water holding capacity. On the other hand, contrary to SC-PDSI (variant of PDSI), SPEI has the advantage of simplicity, lower data requirements, and multi-scalar properties (Vicente et al., 2010). The SPEI combines the sensitivity of PDSI to changes in evaporation demand (caused by temperature fluctuations and trends) with the simplicity of calculation and the multi-temporal nature of the SPI. Like the sc-PDSI and the SPI, the SPEI can measure drought severity according to its intensity and duration, and it can identify the onset and end of drought episodes. The SPEI can account for the possible effects of temperature variability and temperature extremes beyond the context of global warming. The SPEI allows for comparison of drought severity through time and space, since it can be calculated over a wide range of climates. Another advantage of this indicator is to allow for the identification of the beginning and the end of droughts and for the comparison of changes in droughts severity across time and space. This is particularly important, since droughts are complex and dynamic phenomena. A crucial advantage of the SPEI is that its multiscale characteristics enable identification of different drought types and effects in the context of global warming. Therefore, this study uses the SPEI, in particular, the 6 month SPEI.

We describe here a simple multi-scalar drought index (the SPEI). As for the procedure for calculating the SPEI, it uses the monthly (or weekly) difference between precipitation and

Appendix B: empirical identification of drought: The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)

PET. This represents a simple climatic water balance that is calculated at different time scales to obtain the SPEI. Vicente-Serrano et al. (2010) choose the log-logistic distribution to model D (P-PET) values, and the resulting cumulative probabilities were transformed into a standardized variable. The distribution adapted very well to climate regions with different characteristics, independently of the time scale used to compute the deficits. In this article, we use the 6-month time scale SPEI as a benchmark indicator. This time scale is more suited for capturing any climatic water deficiency and excess in agricultural seasons. Software has been created to automatically calculate the SPEI and is freely available in the Web repository of the Spanish National.

Research Council (available online at <http://digital.csic.es/handle/10261/10002>). Packages on R software are also available for computing SPEI.

References of Appendix A and B

- CRU - University of East Anglia Climatic Research Unit. [Phil Jones, Ian Harris]. CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901 - Dec. 2012), [Internet]. NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013.
- Dell M., Jones B. F. and Olken B. A. (2014), What Do We Learn from the Weather? The New Climate–Economy Literature, *Journal of Economic Literature*, 52(3), pp.740–798, <http://dx.doi.org/10.1257/jel.52.3.740>
- GIEC (2007), Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- Goujon Michael, Olivier Santoni, Sosso FEINDOUNO. Tendances et chocs climatiques a La Reunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.. 2015.10. 2015.<halshs-01150853>
- Guillaumont P et Simonet C. (2011b), To What Extent Are African Countries Vulnerable to Climate Change? Lessons from a New Indicator of Physical Vulnerability to Climate Change. FERDI Working Paper / I08 Revised Version -November 2011
- Mitchell, T.D. and Jones, P.D. (2005), An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693-712
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Santoni O. (2016), Base de données Climat au niveau pays 1901-2014, mimeo, Centre d'Etudes et de Recherches sur le Développement International, Clermont-Ferrand, France.

Table des matières

<i>Résumé de la thèse</i> -----	VII
<i>Summary of the thesis</i> -----	VIII
<i>Sommaire</i> -----	IX
<i>Liste des figures</i> -----	X
<i>Liste des tableaux</i> -----	XII
<i>Acronymes et abréviations</i> -----	XIV
<i>Introduction générale</i> -----	1
1. <i>Contexte général de la thèse</i> -----	2
2. <i>Cadre théorique et conceptuel de la thèse</i> -----	3
3. <i>Définition de mots ou expression clés (climat, changement climatique, adaptation, atténuation)</i> -----	4
3.1. <i>Le climat</i> -----	4
3.2. <i>Le changement climatique</i> -----	5
3.3. <i>Cause du changement climatique : quelle est la part de responsabilité de l'Homme?</i> -----	6
3.4. <i>Impact du changement climatique</i> -----	7
3.5. <i>Vulnérabilité et résilience au changement climatique</i> -----	10
3.6. <i>Adaptation, atténuation et résilience au changement climatique</i> -----	11
4. <i>Le changement climatique et l'agriculture au Mali : l'impact prépondérant de la sécheresse</i> -----	13
5. <i>Contribution de la thèse</i> -----	16
6. <i>Plan de la thèse</i> -----	17
<i>Références</i> -----	21
<i>Chapitre 1 Changements climatiques et production agricole au Mali</i> -----	25
1. <i>Introduction</i> -----	26
2. <i>Zone d'étude : le Mali un pays chaud et sec où l'agriculture est pilier économique</i> --	27
2.1. <i>Le climat et les zones agro-écologiques</i> -----	28
2.2. <i>L'hydrographie</i> -----	29
2.3. <i>Le changement climatique au Mali</i> -----	29

2.4.	<i>L'agriculture au Mali</i>	30
3.	<i>Les manifestations du changement climatique au Mali</i>	35
3.1.	<i>La sécheresse, un phénomène climatique extrême : définition de la sécheresse</i>	36
3.2.	<i>Caractérisation de la sécheresse : les indices qui permettent de l'appréhender</i>	37
4.	<i>Méthodes d'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture et bases de données utilisées</i>	43
4.1.	<i>Méthodologie adoptée dans ce chapitre pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture au Mali</i>	43
4.2.	<i>Les modèles biophysiques de simulation de croissance des plantes</i>	44
4.3.	<i>Le modèle hédonique ou approche ricardienne</i>	45
4.4.	<i>Approche statistique</i>	46
4.5.	<i>Bases de données utilisées</i>	47
5.	<i>Résultats</i>	47
6.	<i>Conclusion</i>	53
	<i>Référence</i>	55
	<i>Chapter 2 Technical efficiency among cereals farmers in Mali: Accounting for climate conditions influences in Stochastic Frontier Models</i>	57
1.	<i>Introduction</i>	58
2.	<i>Concept issues</i>	60
2.1.	<i>Definition of the concept of TE</i>	60
2.2.	<i>Methods of measuring Technical Efficiency</i>	62
3.	<i>Literature review</i>	63
3.1.	<i>Taking into account the environmental effect on farmers': existing method</i>	64
3.2.	<i>Taking into account the climate instability on farmer TE: literature review</i>	65
4.	<i>Data and methodology</i>	66
4.1.	<i>Data</i>	66
4.2.	<i>Empirical model: a new approach provided to account for environmental influences in agriculture stochastic frontier model</i>	69
4.3.	<i>Summary statistics of plots studied</i>	74
5.	<i>Econometric results</i>	75
6.	<i>Conclusion</i>	82
	<i>References</i>	84

Appendix 4 -----	86
Chapitre 3 Adapter l'agriculture au changement climatique tout en préservant l'environnement au Mali : les déterminants de quelques stratégies durables. -----	89
1. Introduction -----	90
2. Revue de la littérature -----	93
3. Initiatives engagées en termes d'adaptation au changement climatique au Mali -----	94
4. Caractérisation de la sécheresse : le SPEI, un indice qui permet d'appréhender les extrêmes climatiques -----	97
5. Modèle empirique et données-----	100
5.1. Modèle empirique : le modèle Logit multinomial-----	100
5.2. Bases de données et statistiques descriptives des variables descriptives-----	101
5.3. Faits stylisés : la relation entre la sécheresse et la décision de mettre en œuvre une pratique d'adaptation aux changements climatiques-----	105
6. Résultats et discussions-----	106
7. Conclusion -----	114
Références-----	116
Appendice 3 -----	119
Chapter 4 Determinants of access and intensity of farm mechanization in Mali: does drought matter? -----	121
1. Introduction -----	122
2. Farm mechanization in Mali-----	126
3. Empirical model-----	127
3.1. Methodology issues-----	127
3.2. Econometric specification of the two-step Heckman selection model-----	129
3.3. Data sources, description of variables and empirical specification of model ---	131
4. Results and discussion-----	139
4.1. Descriptive statistics of variables -----	139
4.2. Factors affecting adoption and intensity of mechanization-----	143
5. Conclusion -----	148
References-----	151
Appendix 4 -----	156
Conclusion générale et Perspectives -----	159

<i>Contribution pour les co-écritures</i> -----	165
<i>Appendice A</i> -----	167
<i>Sources des données sur l'agriculture, et le climat du Mali</i> -----	167
1. <i>Sources des données sur l'agriculture du Mali</i> -----	168
1.1. <i>Le Recensement Général Agricole 2004/2005: méthodologie d'enquêtes et contenu de la base</i> -----	168
1.2. <i>Les enquêtes agricoles de conjoncture: méthodologie d'enquêtes et contenu de la base</i>	171
2. <i>La base des données climatiques : la base CRU TS</i> -----	172
<i>Appendix B</i> -----	174
<i>Empirical identification of drought: The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)</i> -----	174
<i>References of Appendix A and B</i> -----	177
<i>Table des matières</i> -----	XVI