

Effet du changement climatique sur le rendement du mil, du sorgho et du maïs au Sahel : un modèle ARDL

Effect of Climate Change on Millet, Sorghum, and Maize Yields in the Sahel:
An ARDL Model.

Auteur 1 : Nacanabo Amadé.

Nacanabo Amadé Docteur en sciences économiques
Université virtuelle du Burkina Faso
Laboratoire d'Economie Appliquée (LABEA, Burkina Faso) et Laboratoire d'Economie de Poitier (Lép, France)

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : Nacanabo Amadé (2025) « Effet du changement climatique sur le rendement du mil, du sorgho et du maïs au Sahel : un modèle ARDL », African Scientific Journal « Volume 03, Num 28 » pp: 0818 – 0843.

Date de soumission : Décembre 2024

Date de publication : Février 2025



DOI : 10.5281/zenodo.14957127
Copyright © 2025 – ASJ



Résumé

Souvent utilisé de manière métaphorique pour désigner les franges méridionales du Sahara, le Sahel est, en raison de sa position géographique, une région particulièrement vulnérable au changement climatique. Son agriculture, principalement pluviale, dépend fortement des conditions climatiques.

Cet article analyse l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles au Sahel à l'aide d'un modèle ARDL. Les résultats révèlent que la température est le facteur climatique ayant l'effet le plus significatif sur les rendements agricoles. En effet, une augmentation de 1% entraîne une diminution des rendements d'environ 35%. Toutefois, cette baisse est partiellement compensée par une augmentation des précipitations.

Mots clés : changement climatique, Sahel, rendement agricole, modèle ARDL

Abstract

Often used metaphorically to describe to the southern fringes of the Sahara, the Sahel is a region particularly vulnerable to climate change due to its geographical location. Its agriculture, primarily rainfed, is highly dependent on climatic conditions.

This article examines the impact of climate change on agricultural yields in the Sahel using an ARDL model. The results reveal that temperature is the climatic factor with the most significant effect on agricultural yields. Indeed, a 1% increase leads to a decrease in yields of about 35%. However, this decline is partially offset by an increase in precipitation.

Keywords: Climate change, Sahel, agricultural yield, ARDL model

Introduction

Le changement climatique représente une perturbation majeure et continue en Afrique, menaçant les moyens de subsistance des petits agriculteurs en raison de la baisse des rendements agricoles (GIEC, 2021). Ses impacts se manifestent notamment par une fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes, qui ont des effets néfastes sur l'agriculture à petite échelle ainsi que sur la production végétale et animale (Clark et al., 2022 ; Nelson et al., 2013 ; Stige et al., 2006 ; Wollburg et al., 2024). En Afrique de l'Ouest, il devrait entraîner des variations des rendements allant de -50 % à +90 %, avec une perte moyenne projetée de -18 % (Radieu et al., 2011). Par ailleurs, l'augmentation des températures accentue le stress hydrique des cultures et des prairies, perturbant ainsi les processus métaboliques essentiels à la croissance des plantes (Kemp et al., 2022). Dans ce contexte, la relation entre le changement climatique et les rendements agricoles au Sahel mérite une attention particulière.

Le **Sahel** est l'une des régions les plus pauvres du monde, avec une économie fortement dépendante du secteur primaire. Il est particulièrement vulnérable au changement climatique et a connu plusieurs épisodes de sécheresse, dont les plus sévères ont eu lieu dans les années **1970 et 1980**. Ces sécheresses ont entraîné un raccourcissement de la saison des pluies (**Toupet, 1992**). En plus de cette vulnérabilité climatique, le Sahel connaît une **forte croissance démographique** et fait face à une insécurité persistante depuis **2012**. Le Sahel se caractérise par un climat aride et des températures relativement élevées par rapport aux autres régions d'Afrique. La production céréalière, fortement influencée par les aléas climatiques, demeure insuffisante pour satisfaire une demande alimentaire en constante augmentation, renforçant ainsi la dépendance alimentaire de la région. Le changement climatique entraîne une altération du régime des précipitations, affectant particulièrement le secteur agricole. Au regard de ce qui précède, la question de recherche fondamentale est de savoir quels sont les effets du changement climatique sur les rendements agricoles au Sahel ?

Cette recherche vise principalement à analyser l'impact du changement climatique sur les rendements du sorgho, du maïs et du mil. Ce choix se justifie par l'influence directe des variations climatiques sur la productivité agricole. Plus précisément, l'étude examine la relation entre les facteurs climatiques, notamment la température et les précipitations, et les rendements de ces trois cultures dans la région sahélienne.

Notre étude repose sur un échantillon de huit pays sahéliens, avec des données couvrant la période 1965-2021. Étant donné que la dimension temporelle de notre échantillon est plus importante que sa dimension transversale, nous utilisons un modèle ARDL (Autoregressive

Distributed Lag) avec l'estimateur PMG (Pooled Mean Group), qui est particulièrement adapté à la structure de notre base de données. Ce modèle permet d'estimer simultanément les effets à court et à long terme.

Les résultats montrent que la température est le facteur climatique ayant l'impact le plus significatif sur les rendements agricoles au Sahel. Une augmentation d'1°C entraîne une diminution des rendements d'environ 35 %. En plus de la hausse des températures, les phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations ont également un effet négatif sur les rendements agricoles. Cette recherche apporte une triple contribution. Premièrement, elle met en évidence que la température est le facteur climatique ayant l'impact le plus significatif sur les rendements agricoles au Sahel. Deuxièmement, elle constitue une base de référence pour l'élaboration de politiques d'adaptation aux effets du changement climatique sur l'agriculture dans cette région. Enfin, à notre connaissance, il s'agit de la première étude dédiée spécifiquement à l'analyse des effets du changement climatique sur les rendements agricoles dans la région sahélienne.

Le reste de l'article est structuré comme suit : dans un premier temps, nous proposons une brève revue de la littérature sur l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles. Ensuite, nous présentons le modèle économétrique utilisé. Enfin, nous discutons et analysons les résultats obtenus.

1. Revue de la littérature sur le lien entre changement climatique et rendement agricole

Ces dernières années, le lien entre le changement climatique et la production agricole a suscité un vif intérêt en Afrique, mais aussi dans d'autres régions du monde. La relation entre le réchauffement climatique et la sécurité alimentaire repose essentiellement sur la production agricole (GIEC, 2014). Ainsi, une revue de la littérature sur ce sujet est essentielle pour mieux comprendre l'impact de la variabilité climatique sur la sécurité alimentaire.

Deux approches principales sont utilisées dans la littérature pour étudier l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles. La première évalue directement les effets du réchauffement climatique sur la production des cultures, tandis que la seconde analyse son incidence sur le revenu des agriculteurs. Cette étude se concentre sur la relation entre le réchauffement climatique et la production agricole.

L'analyse des effets du réchauffement climatique sur la production agricole repose sur deux méthodes principales. La première utilise des modèles de croissance des cultures pour évaluer l'impact du changement climatique sur les rendements. Ces modèles, largement adoptés,

permettent d'estimer les rendements agricoles en fonction des conditions météorologiques (Fiedler et Reilly, 1994 ; Rosenzweig et Iglesias, 1994 ; Rosenzweig et Parry, 1994). Toutefois, ils nécessitent des données météorologiques quotidiennes et sont calibrés dans des conditions expérimentales qui ne prennent pas en compte l'adaptation des cultures. Pour pallier cette limite, la seconde méthode repose sur des modèles économétriques de régression afin d'analyser l'impact du changement climatique sur la production agricole. C'est cette approche qui est adoptée dans la présente étude.

Le climat est un facteur déterminant de la production agricole. Toute variation des paramètres climatiques influence directement les rendements et, indirectement, le revenu des agriculteurs ainsi que les prix alimentaires (FAO, 2018). Cependant, l'impact du changement climatique varie selon les régions du monde. Dans les zones tropicales, la hausse des températures peut avoir des effets négatifs significatifs sur la croissance des plantes, entraînant une réduction des rendements (Devereux et Edwards, 2004), comme c'est le cas dans les pays du Sahel. De plus, des températures extrêmes peuvent endommager les cellules des plantes et, au stade de la floraison, accroître le taux de stérilité (FAO, 2018).

À l'inverse, certaines régions tempérées pourraient bénéficier d'une augmentation des températures. Par exemple, des conditions climatiques plus chaudes pourraient favoriser certaines cultures céréalières en Finlande (Purola et al., 2018). De plus, certaines cultures comme le blé, le riz et la pomme de terre pourraient voir leurs rendements augmenter grâce à une plus forte concentration en dioxyde de carbone dans l'air. Toutefois, cet effet positif ne se manifeste pas sous les climats tropicaux (Sekhar, 2018). Rosenzweig et Parry (1994) confirment que l'augmentation du CO₂ atmosphérique pourrait améliorer les rendements agricoles dans l'hémisphère Nord tout en les réduisant dans l'hémisphère Sud. Wheeler et Von Braun (2013) soulignent que les régions tropicales sont les plus exposées à ces baisses de rendements, ce qui accentue le risque d'insécurité alimentaire.

Certains chercheurs, comme Gbetibouo et al. (2010), estiment que le changement climatique aura un impact négatif sur la production agricole, perturbant l'équilibre entre l'offre et la demande et entraînant une hausse des prix alimentaires. Toutefois, ces effets pourraient être atténués par une croissance économique soutenue et des améliorations de la productivité agricole. Lee et al. (2012) confirment ces conclusions pour les pays asiatiques.

En Afrique, les cultures principales seront fortement affectées par le changement climatique. D'ici 2050, le rendement du blé pourrait baisser de 17 %, celui du maïs de 5 %, celui du sorgho de 15 % et celui du mil de 10 % (Knox et al., 2012). Des études menées en Afrique orientale et

australe indiquent que certains pays de haute altitude, comme le Kenya, l'Éthiopie et l'Ouganda, pourraient voir leurs précipitations augmenter et leurs températures se réchauffer, ce qui pourrait avoir des effets positifs sur l'agriculture. En revanche, les projections pour le Rwanda et la Tanzanie restent incertaines (Field et al., 2014).

Au niveau mondial, les déficits de production dans l'hémisphère Sud pourraient être compensés par des excédents dans l'hémisphère Nord (Parry et al., 1999). Lobell et al. (2011) ont analysé l'impact du changement climatique sur les rendements mondiaux du riz, du blé, du maïs et du soja entre 1980 et 2008. Leurs résultats montrent que la variabilité climatique a entraîné une baisse des rendements du maïs (-3,8 %) et du blé (-5,5 %), tandis que ceux du riz et du soja ont légèrement augmenté (+0,1 % et +1,7 %, respectivement), avec des disparités régionales. Des études similaires menées en Asie (Liu et al., 2015) et en Chine (Fare et al., 2009) confirment les effets négatifs du changement climatique sur la production agricole.

Lobell et al. (2007) ont également évalué l'impact du changement climatique sur six cultures majeures (riz, sorgho, blé, maïs, orge et soja) entre 1961 et 2002. Leurs analyses indiquent que la variabilité climatique explique environ 30 % des fluctuations annuelles des rendements mondiaux et que le réchauffement climatique depuis 1981 a entraîné des pertes annuelles équivalentes à 40 millions de tonnes pour ces cultures, soit une perte économique estimée à 5 milliards de dollars par an.

Par ailleurs, le changement climatique pourrait exacerber les inégalités d'accès aux marchés et aux technologies agricoles, accentuant ainsi l'écart entre les pays en développement et les pays développés (Sánchez, 2018 ; Islam et al., 2016). Dans l'ensemble, cette revue de la littérature confirme que le changement climatique exerce un impact globalement négatif sur les rendements agricoles.

2. Approche méthodologique et description des données

Dans cette section, nous analysons l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles (kg/ha). Les variables retenues dans cette étude s'appuient sur la littérature, notamment les travaux de Janjua et al. (2014), Mahrous (2018), Chandio et al. (2020), Assumadu-Sarkodie et Owusu-Asantewa Phebe (2016), Lobell et Asner (2003) ainsi que Blanc (2012). Les variables explicatives incluent des paramètres météorologiques classiques, tels que la température moyenne (en degrés Celsius) et le cumul annuel des précipitations (en millimètres). Afin de capturer d'éventuels effets non linéaires du climat sur les rendements, nous introduisons les termes quadratiques de ces variables. De plus, une variable d'interaction

entre la température et les précipitations est intégrée afin d'examiner si l'effet des précipitations sur les rendements dépend d'un seuil de température donné et inversement.

En complément de ces variables standards, nous utilisons une mesure avancée de la sécheresse : le Standardized Precipitation Index (SPI), développé par McKee et al. (1993) et Hayes et al. (1999). Le SPI quantifie l'écart des précipitations par rapport à une période de référence (1, 2, 3, 6, 9, 24 ou 48 mois) et repose sur des données mensuelles. Cette méthode consiste à calculer la différence entre les précipitations observées et la moyenne historique pour une période donnée, puis à la diviser par l'écart type de cette période, conformément à la formule suivante :

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

Où P représente les précipitations totales d'une période (mm), P_m représente les précipitations moyennes historiques de la période (mm) qui représente la période de référence et σ_p , représente l'écart type historique des précipitations de la période (mm). Une valeur du SPI inférieure à zéro indique des précipitations inférieures à la normale, tandis que des valeurs positives du SPI suggèrent des précipitations supérieures à la normale. Pour notre étude, nous avons calculé un SPI sur une période de 12 mois (de janvier à décembre) en utilisant la période de référence historique 1901-2021. La période de référence doit durer au moins 30 ans. Grâce à l'indice SPI, nous pouvons identifier les périodes de sécheresse et d'inondations (McKee et al., 1993 ; Hayes et al., 1999).

Après calcul de cet indicateur les résultats s'interprètent comme suit :

Tableau N° 1 : Sévérité du SPI

SPI	Catégories de sécheresse
2,00 et plus	Extrêmement humide
1,50 à 1,99	Très humide
1,00 à 1,49	Humide
-0,99 à 0,99	Normal
-1,00 à -1,49	Modérément sec
-1,50 à -1,99	Sévèrement sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Source : McKee et al, 1993

Dans le cadre de notre étude, nous considérons qu'une sécheresse ou une inondation commence lorsque le SPI atteint respectivement les valeurs de -1,5 et +1,5, et se termine lorsque l'indice revient respectivement à une valeur positive ou négative. Ce choix repose sur la définition de

la sécheresse établie par McKee et al. (1993). Plusieurs chercheurs, tels que Quiroguá et A. Iglesias (2007), E. Strobl et R.O. Strobl (2010), ainsi que Blanc (2012), ont utilisé l'indice SPI dans des modèles de régression pour analyser l'impact des précipitations extrêmes sur les rendements agricoles. Nous introduisons deux variables indicatrices de sécheresse et d'inondation. La première variable prend la valeur 1 si le SPI est inférieur à -1,5 et 0 sinon. La seconde variable prend la valeur 1 si le SPI est supérieur à +1,5 et 0 sinon.

Nous avons également pris en compte des variables non climatiques susceptibles d'influencer le rendement des cultures. La main-d'œuvre, qui joue un rôle crucial dans l'explication des rendements agricoles, est particulièrement importante en Afrique subsaharienne, où 89 % des terres, principalement cultivées par des exploitations familiales, sont cultivées manuellement (Blanc, 2012). Pour notre étude, nous utilisons la population rurale, qui constitue cette main-d'œuvre dans les exploitations agricoles des pays sahéliens. Ce choix est justifié par le fait que la majorité de la population rurale travaille dans le secteur agricole en Afrique.

Nous prenons également en compte la superficie des terres cultivables en hectares, car, dans les pays sahéliens, les agriculteurs cultivent d'abord les terres les plus fertiles, qui offrent des rendements plus élevés, avant de s'étendre sur les terres moins fertiles. Cela s'explique par le faible usage des pesticides par rapport au reste du monde. Par exemple, la consommation moyenne d'engrais en Afrique est d'environ 22 kg par hectare, soit 15 % de la moyenne mondiale (FAO, 2018). La principale raison de cette faible utilisation d'engrais est la pauvreté des agriculteurs, liée à l'inefficacité des marchés agricoles, qui ne garantissent pas des revenus suffisants pour l'achat d'engrais (M. Morris et al., 2007). Il existe ainsi une relation positive entre la superficie des terres cultivables et le rendement des cultures.

L'utilisation des engrais et des pesticides n'est pas prise en compte dans notre étude en raison de l'indisponibilité des données concernant les quantités appliquées à chaque culture. Par ailleurs, d'autres variables susceptibles d'affecter les rendements, telles que la pratique de l'irrigation, ne sont pas intégrées faute de données disponibles. L'irrigation est également peu pratiquée en Afrique subsaharienne, et les pays sahéliens ne font pas exception, car l'eau devient une ressource de plus en plus rare. Selon Faurès et Santini (2008), l'irrigation n'est utilisée que sur 3 % des surfaces cultivées en Afrique subsaharienne, et cette situation devrait perdurer en raison de la mauvaise qualité des sols et de la topographie, d'une part, et des marchés défavorables, d'autre part.

Enfin, la gestion des cultures, la sélection des variétés et le niveau de formation des agriculteurs sont absents de notre analyse en raison de l'indisponibilité des données. Le dioxyde de carbone

n'est pas inclus parmi les variables explicatives, car il est fortement corrélé aux variables météorologiques (Blanc, 2012).

2.1. Source et description des données

Nous avons utilisé des données secondaires pour notre analyse. Les informations concernant les rendements, les superficies cultivables et la population rurale proviennent de la FAO, tandis que les données sur les températures et les précipitations annuelles moyennes sont issues de la Banque Mondiale. Les données relatives au SPI ont été calculées par l'auteur. Notre échantillon couvre la période de 1965 à 2021 et comprend huit pays sahéliens : le Burkina Faso, le Mali, le Niger, le Tchad, le Sénégal, la Mauritanie, l'Éthiopie et le Nigéria. Le choix de ces pays repose d'abord sur des similarités climatiques, notamment des températures élevées et des précipitations faibles, en particulier pour les pays enclavés, en raison de leur position géographique. Par ailleurs, ces pays partagent des caractéristiques économiques similaires, à l'exception du Nigéria. Enfin, la disponibilité des données sur l'ensemble de la période d'étude justifie également leur inclusion.

Les statistiques descriptives de toutes les variables ont été calculées afin d'évaluer la normalité et la pertinence des données. Ces analyses montrent que le maïs présente le rendement moyen le plus élevé de l'échantillon, avec 11 466 kg/ha, suivi du sorgho (7 776 kg/ha) et du mil (6 434 kg/ha) sur la période étudiée. Les rendements du maïs varient entre un maximum de 3 733 kg/ha et un minimum de 655 kg/ha (voir tableau 2). En outre, les rendements du maïs enregistrent également les plus grandes fluctuations parmi les trois cultures analysées. Les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 545 mm, avec un minimum de 47 mm et un maximum de 1 348 mm. En ce qui concerne les températures, elles sont relativement élevées dans les pays sahéliens, atteignant une moyenne de 29°C, ce qui est plus élevé que dans d'autres régions de l'Afrique subsaharienne.

Tableau N° 2 : Statistiques descriptives de l'ensemble des pays sahéliens

Variabes	Obs	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Rendement sorgho (kg/ha)	448	7795,98	3696,04	1257	25695
Rendement maïs (kg/ha)	448	11466,31	5546,91	2500	37331
Rendement mils (kg/ha)	448	6434,44	3265,47	655	22296
Précipitations annuelle (mm)	448	545,82	352,92	47,88	1346,97
Température moyenne annuelle (°c)	448	27,21	1,83	21,91	29,54
Population rurale (millier)	448	18345,4	24313,02	817,55	95443,46
Superficie des terres cultivables (ha)	448	24,91	16,61	0,49	54,96
SPI	448	0,005	1,01	-2,76	3,03

Source : construit par l'auteur avec les données de la base

Tableau N° 3 : Statistiques des variables sècheresses et inondations

Sècheresses		Inondations	
1=SPI< -1,5	0	1=SPI>1,5	0
5,36%	94,64%	10%	90%

Note : 5,36% représente le pourcentage des années qui ont connu un SPI< -1,5, ce sont des années de sècheresses, 10% représente le pourcentage des années qui ont connu 1=SPI>1,5, ce sont des années d'inondations,

Source : construit par l'auteur avec les données de la base

2.2. Modèle économétrique

La dimension temporelle de notre base de données est beaucoup plus importante que la dimension spatiale ou transversale, Pour cette raison, le modèle GMM n'est donc pas adapté, Nous utilisons le modèle ARDL (Autoregressive Distributed Lag) avec l'estimateur du Pooled Mean Group (PMG), L'utilisation de cet estimateur est confirmée par le test de Hausmann, Cet estimateur est le plus adapté à la structure des données de panel dynamique dont la dimension T est plus grande que N (Pesaran et al., 1999), Il permet d'étudier l'homogénéité à long terme des variables mais les coefficients de court terme et les variances des erreurs peuvent différer entre les individus, Selon la littérature les effets du changement climatique sur la production agricole peuvent être exprimés avec une forme Cobb-Douglas (Ouoba, 2018, Blanc, 2012), Elle s'exprime comme suit :

$$Y_t = \alpha A_t^{\varphi_a} K_t^{\varphi_k} L_t^{\varphi_l} e^{\mu t} \quad (1)$$

Où Y_t représente le rendement agricole ou (output) ; A_t la superficie des terres cultivables ; K_t l'ensemble du capital investit pour la production ; L_t le facteur travail ; α représente la productivité totale des facteurs ; φ_a , φ_k et φ_l représente l'élasticité de la production (rendement agricole) respectivement à la superficie des terres cultivables, du capital et du facteur travail, $e^{\mu t}$ représente le terme d'erreur,

Le modèle général ARDL s'écrit :

$$Y_{it} = \sum_{j=1}^p \delta_{ij} Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \beta_{ij} X_{i,t-j} + \varphi_i + e_{it} \quad (2)$$

Où Y_{it} est la variable dépendante et X_{it} est le vecteur de l'ensemble variables explicatives ; δ_{ij} , le coefficient des valeurs retardées de la variable dépendante ; β_{ij} les coefficients des variables explicatives, φ_i capte l'effet fixe individuel, ; $i = 1, \dots, N$; $t = 1, 2, \dots, T$; p, q représentent le nombre optimal des retards respectivement de la variable expliquée et des variables explicatives ; e_{it} est le terme d'erreur, En cas de cointégration des variables, le terme d'erreur

est stationnaire, En reparamétrant l'équation (1), on obtient le modèle à correction d'erreurs donné par l'équation (2) :

$$\Delta Y_{it} = \theta_i [Y_{i,t-1} - \lambda'_i X_{i,t}] + \sum_{j=1}^{p-1} \xi_{ij} \Delta Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta'_{ij} \Delta X_{i,t-j} + \varphi_i + e_{it} \quad (3)$$

Où θ_i est la vitesse d'ajustement et λ'_i mesure la relation de long terme (coefficients de long terme) et $[Y_{i,t-1} - \lambda'_i X_{i,t}]$ est le terme de correction d'erreurs, Pour valider l'hypothèse de cointégration, il faudrait que λ'_i soit négatif et significatif, Dans ce cas on peut conclure qu'il existe une relation de long terme entre la variable expliquée et les variables explicatives,

L'estimateur PMG contraint λ'_i à être identique pour chaque individu du panel mais la constante, les coefficients de court terme et la variance des erreurs sont différents pour chaque individu du panel, ξ_{ij} Et β'_{ij} sont les coefficients de court terme, Δ est la différence première, Les variables sont transformées en logarithme pour améliorer leur distribution, Le modèle estime donc des élasticités, Cependant, cette transformation ne concerne pas les variables météorologiques (températures et précipitations), ce qui nous permet par exemple de déterminer l'impact d'une augmentation de 1°C ou d'une augmentation d'1 millimètre d'eau sur les rendements,

Le modèle ARDL a plusieurs avantages, Le modèle permet de faire la distinction entre les variables dépendantes et explicatives lorsqu'il existe une relation de long terme et cette relation de long terme est unique, En outre, le modèle à correction d'erreurs peut être dérivé du modèle ARDL via une simple modification linéaire qui intègre des ajustements à court terme avec un équilibre à long terme sans perdre d'information, Ce modèle ne nécessite pas que toutes les variables soient intégrées de même ordre, il suffit qu'elles soient intégrées d'ordre 1 ou d'ordre 0, Enfin, il permet d'avoir des estimations non biaisées à long terme (Harris et Sollis, 2003 ; Kalai et Zghidi, 2017).

2.3. Spécification du modèle

Après une linéarisation, l'équation à estimer peut-être spécifiée de la façon suivante :

$$\Delta Ren_{it} = \theta_i [Ren_{i,t-1} - \lambda'_i X_{i,t}] + \sum_{j=1}^{p-1} \xi_{ij} \Delta Ren_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta'_{ij} \Delta X_{i,t-j} + \varphi_i + e_{it} \quad (4)$$

Où :

- Ren_{it} : Représente la variable dépendante qui est le rendement (du sorgho ou du maïs ou du mil) du pays i à la période t ,
- $X_{i,t}$: Représente le vecteur des variables explicatives qui sont la température moyenne annuelle, les précipitations annuelles, la superficie des terres cultivables, la population rurale, les variables d'interaction, le SPI, les variables dichotomiques d'inondation et de sécheresse,

Tableau N°4 : Résumé des variables

Variables	Description	Source
Rendement de sorgho en Kg/ha	Rendements calculés par la FAO	FAO
Rendement de maïs en Kg/ha	Rendements calculés par la FAO	FAO
Rendement de mil en Kg/ha	Rendements calculés par la FAO	FAO
Superficie des terres cultivables en hectare	Calculés par la FAO	FAO
Populations rurales en milliers	Calculés par la FAO	FAO
Températures en °C	Température moyenne annuelle en degré Celsius	WDI
Précipitations en mm	Précipitation cumul annuelle en millimètre	WDI
SPI	Calculer par l'auteur à partir des données de la Banque Mondiale	Calculé par l'auteur
Inondations	Variable dichotomique obtenue à partir du SPI, Inondation =1 si $SPI > 1,5$ et 0 sinon	Calculer par l'auteur
Sècheresses	Variable dichotomique obtenue à partir du SPI, Sécheresse=1 si $SPI < -1,5$ et 0 sinon	Calculer par l'auteur

Source : Construit par l'auteur

2.4 Estimation du modèle et analyse des résultats

2.4.1 Estimations

Les données en panel possèdent deux dimensions : la dimension individuelle et la dimension temporelle. Le modèle ARDL suppose que les variables sont intégrées au plus d'ordre un, c'est-à-dire qu'elles sont soit de type I (0), soit de type I (1). Par conséquent, nous avons effectué les tests de non-stationnarité d'Im-Pesaran-Shin et de Levin, Lin et Chu sur l'ensemble des variables. L'ordre d'intégration des variables est compris entre 0 et 1 (cf. annexes 1), ce qui signifie que les variables sont toutes stationnaires en première différence. Nous avons également déterminé la matrice de corrélation ainsi que le facteur d'inflation de la variance

(VIF). Étant donné que le VIF est inférieur à 2, nous pouvons conclure à l'absence de multicolinéarité dans le modèle. Pour identifier le nombre optimal de retards, nous avons utilisé des critères d'information, notamment le critère AIC. Pour notre étude, le retard maximal a été fixé à 2.

Afin de vérifier si les variables partagent une tendance stochastique commune, nous avons réalisé un test de cointégration. Les résultats montrent que les variables sont intégrées. Le retard optimal pour la variable dépendante est de 1, et de 0 pour les variables explicatives. Le test de Hausman (1978) a été utilisé pour choisir entre l'estimateur PMG (Pooled Mean Group), qui suppose une certaine homogénéité entre les pays, et l'estimateur MG (Mean Group), qui prend en compte l'hétérogénéité entre les pays. Les p-values des tests sont respectivement de 0,15, 0,79 et 0,14 pour les modèles de maïs, de mil et de sorgho. Ces résultats nous conduisent à accepter l'hypothèse nulle d'homogénéité entre les pays. L'estimateur PMG est donc le plus adapté pour l'estimation du modèle (cf. annexes 2, 3 et 4). Une limite de l'estimation en panel avec l'estimateur PMG est que les paramètres sont supposés homogènes entre les pays à long terme.

Avant de procéder à l'estimation du modèle, nous avons effectué un test de corrélation entre les variables afin d'éviter d'introduire des variables explicatives fortement corrélées entre elles. Les résultats montrent qu'il n'existe pas de forte corrélation entre les variables, quelle que soit la région (cf. annexes 5, 6 et 7).

Les termes de correction d'erreur (représentant la vitesse d'ajustement ou la force de rappel vers l'équilibre) sont négatifs et significatifs pour les trois régressions, ce qui confirme les résultats des tests de cointégration et l'existence d'une relation à long terme entre les variables. Ces termes sont presque identiques pour les régressions du maïs et du sorgho (0,52), ce qui signifie qu'environ 52 % des erreurs sont corrigées chaque année pour ces deux cultures. Le terme de correction d'erreur est légèrement plus élevé pour le mil (0,59), ce qui indique un ajustement plus rapide vers l'équilibre.

2.4.2 Analyse des résultats

Nos résultats montrent que l'augmentation des températures réduit les rendements des trois cultures à long terme. La variable des températures au carré est significative et négative pour toutes les cultures, ce qui indique que la relation n'est pas linéaire. L'impact négatif des températures sur les rendements s'aggrave à mesure que les températures augmentent. Ainsi, une hausse de la température de 1% dans cette région entraîne une baisse des rendements de 32,6 %, 36,4 % et 37,5 % respectivement pour le maïs, le sorgho et le mil à long terme, toutes

choses égales par ailleurs. Nos résultats montrent également que l'effet des températures sur les rendements varie selon les cultures, ce qui pourrait être dû au fait que chaque culture possède des conditions de croissance optimales différentes et qu'une température élevée peut dépasser leurs limites de tolérance (Maddison, 2007).

Ces résultats négatifs sur l'impact des températures sur les rendements sont corroborés par ceux de Devereux et Edwards (2004), qui concluent que l'augmentation des températures aura un effet très défavorable sur la production agricole dans les régions tropicales. Selon ces chercheurs, dans ces régions, des températures plus élevées peuvent affecter de manière significative la croissance des plantes, entraînant une réduction des rendements. C'est également le cas pour les pays du Sahel, comme le montre Ouoba (2018) dans son étude sur l'impact des variables climatiques sur les rendements agricoles, où il constate que le rendement céréalier est sensible tant à la température qu'aux précipitations.

Nos résultats sur l'impact des températures s'alignent également avec ceux de la FAO (2018). Selon ce rapport, les températures extrêmes peuvent provoquer des dommages cellulaires dans les plantes. En particulier, pendant le stade de floraison, elles peuvent augmenter le taux de stérilité. Nos conclusions confirment également les travaux de Blanc (2012), Lobell et al. (2007), Odjugo (2008), et Chen et al. (2000), entre autres.

En ce qui concerne les précipitations, nos résultats montrent qu'elles ont un effet positif sur les rendements de sorgho, de mil et de maïs à long terme. Cependant, la variable des précipitations au carré est négative et significative, ce qui indique une réponse non linéaire des rendements aux variations des précipitations, avec une relation plutôt concave. De plus, les coefficients des termes d'interaction entre les températures et les précipitations révèlent que l'impact des précipitations dépend des températures et vice versa. L'effet est plus marqué sur les rendements du maïs et du sorgho que sur ceux du mil. Par exemple, une augmentation de 1% des précipitations entraîne respectivement une hausse des rendements de 3,6 %, 1,8 % et 1,3 % pour le maïs, le sorgho et le mil à long terme, toutes choses égales par ailleurs.

Nos résultats suggèrent que l'impact négatif du changement climatique sur les rendements dans la région du Sahel peut être principalement attribué à l'augmentation des températures, bien que les précipitations puissent soit atténuer soit renforcer cet impact. L'effet des précipitations est moins marqué sur les rendements du maïs comparativement aux deux autres cultures, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le maïs est une culture particulièrement exigeante en eau et cultivée principalement dans les zones où les précipitations sont abondantes. Le maïs est donc très sensible à la variabilité et aux extrêmes climatiques (Sarr et al., 2011). Selon certains

chercheurs, les besoins en eau du maïs varient selon la longueur du cycle de culture et le type de climat. En fonction des climats, le maïs a besoin de 400 mm à 800 mm de pluie bien répartie pour compléter son cycle, avec une somme de température comprise entre 1500 et 1800 degrés-jours (Doorenbos et Kassam, 1980). Le sorgho, quant à lui, est particulièrement sensible au stress hydrique et est souvent cultivé dans des bas-fonds plus humides. Le mil, en revanche, est plus résistant à la sécheresse que les deux autres cultures. Ces résultats sont en phase avec ceux de Blanc (2012), qui trouve également que les précipitations ont un effet positif sur les rendements du sorgho, du mil et du maïs en Afrique subsaharienne.

Cette situation rend nécessaire une adaptation des populations rurales africaines, et notamment sahéliennes, à l'irrigation à petite échelle afin de réduire leur vulnérabilité à la sécheresse et au réchauffement climatique. En effet, ce sont généralement les petits exploitants qui sont les plus touchés. Ces résultats confirment les effets négatifs de la sécheresse sur la production agricole (CRED, 2018 et FAO, 2018). Il est donc impératif de promouvoir une agriculture résiliente face au changement climatique et de soutenir des systèmes agricoles et alimentaires durables.

Nos résultats sur l'effet des précipitations sont également confirmés par l'impact du SPI sur les rendements du mil et du sorgho. Les coefficients du SPI pour ces deux cultures sont positifs, ce qui signifie que des précipitations supérieures à la normale sont bénéfiques pour leurs rendements. En d'autres termes, une variation d'un écart-type par rapport aux précipitations médianes augmente respectivement de 29 % et 23 % les rendements du sorgho et du mil.

En revanche, les inondations réduisent les rendements du maïs. Les rendements du maïs pendant les périodes de crue sont inférieurs de 6 % à ceux des conditions normales. L'excès d'eau peut entraîner la pourriture des racines et asphyxier les plants de maïs (Sarr et al., 2011). En plus du cumul des précipitations, le rendement du maïs dépend également de la disponibilité en eau pendant les phases critiques de son développement (Robelin, 1963). Nos résultats montrent que la pluviométrie joue un rôle moins important que la température, contrairement à ce que l'on pourrait attendre dans une agriculture dépendant de la pluie. À long terme, les pertes dues à l'augmentation de 1°C sont bien plus importantes que les gains liés à une augmentation d'un millimètre de pluie. Les inondations ont également un impact négatif sur l'agriculture au Sahel, car elles entraînent une érosion des sols (Taylor et al., 2017).

Enfin, l'augmentation de la superficie des terres cultivables a un effet positif et significatif sur les rendements du mil et du sorgho, ce qui indique une hausse de la productivité marginale des terres pour ces deux cultures. Une augmentation de 1 % de la superficie cultivée entraîne une

hausse de 3,6 % et 1,9 % des rendements du sorgho et du mil, respectivement, toutes choses égales par ailleurs.

La productivité marginale des terres cultivables est plus élevée pour la culture du sorgho (3,6 %) que pour celle du mil (1,9 %), toutes choses égales par ailleurs. Dans cette région, les effets du changement climatique semblent être partiellement compensés par l'expansion des terres arables. Cependant, il existe un risque que la superficie des terres cultivables diminue dans les années à venir dans plusieurs pays sahéliens, en raison du changement climatique, mais aussi de l'occupation par des groupes armés terroristes de certaines régions de pays comme le Burkina Faso, le Mali, le Niger, le Tchad et la Mauritanie. Les attaques de ces groupes armés provoquent une migration des populations rurales, qui dépendent principalement de l'agriculture pour leur subsistance. Ces agriculteurs sont forcés d'abandonner leurs terres pour se réfugier dans des zones relativement sécurisées. Cela pourrait entraîner une pression, voire des conflits pour l'accès aux terres cultivables dans ces zones plus sûres.

Le facteur capital est relativement absent dans les exploitations agricoles des pays sahéliens, en raison de l'insuffisance des moyens financiers des agriculteurs et de l'inefficacité du marché. Le facteur travail, quant à lui, est constitué principalement par la population rurale. Cette population, dont le taux de scolarisation est très faible, utilise des méthodes agricoles rudimentaires pour cultiver ses parcelles. Nos résultats montrent qu'une augmentation de la population rurale entraîne une hausse des rendements pour les trois cultures, sans exception, ce qui se traduit par une productivité marginale positive de la main-d'œuvre. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la quasi-absence du facteur capital. En effet, l'ensemble du travail agricole est réalisé exclusivement par la force humaine, de la préparation du sol à la récolte.

Tableau N°5 : : Résultats à long terme pour le maïs

Variable	(1)	(2)	(3)	(4)
Ln_Précipitations	3,66*** (0,036)	2,57*** (0,045)	1,79** (0,076)	1,28** (0,056)
Ln_Températures	-32,66*** (0,034)	-32,98** (0,675)	-36,44*** (0,043)	-37,58*** (0,098)
Ln_Terres_cultivables	0,18*** (0,009)	0,16** (0,076)	0,36*** (0,076)	0,19*** (0,065)
Sècheresse	-0,29 (0,098)	-0,32 (0,086)	-0,08*** (0,08)	-0,006**
Inondation	-0,07** (0,075)	-0,09* (0,043)	0,15 (0,065)	0,03 (0,034)
SPI	0,07 (0,038)	0,34** (0,45)	0,29** (0,87)	0,23* (0,06)

Ln_Population_rurale	0,68*** (0,034)	0,43** (0,056)	0,19** (0,032)	0,41*** (0,054)
Ln_Température_au_carré		-0,02*** (0,026)		
Ln_Précipitation_au_carré			-0,03*** (0,56)	
Ln_Température*Ln_précipitation				-0,002** (0,087)
Constant	-46,63***		-52,26***	-61,66***
ECT	-0,52***		-0,52***	-0,59***
Observations	440		440	440

Source : Construit par l'auteur

Tableau N°6 : : Résultats à long terme pour le sorgho

Variable	(1)	(2)	(3)	(4)
Ln_Précipitations	1,79** (0,056)	1,97*** (0,095)	1,79** (0,076)	1,28** (0,056)
Ln_Températures	-36,44*** (0,31)	-33,18** (0,25)	-36,44*** (0,43)	-37,58*** (0,88)
Ln_Terres_cultivables	0,36*** (0,049)	0,16** (0,076)	0,36*** (0,036)	0,19*** (0,095)
Sècheresse	-0,29 (0,098)	-0,32 (0,086)	-0,08*** (0,08)	-0,006** (0,012)
Inondation	-0,07** (0,075)	-0,09* (0,053)	0,15 (0,045)	0,03 (0,094)
SPI	0,29** (0,038)	0,44** (0,45)	0,69** (0,87)	0,33* (0,16)
Ln_Population_rurale	0,68*** (0,034)	0,43** (0,056)	0,19** (0,032)	0,28*** (0,054)
Ln_Température_au_carré		-0,03*** (0,026)		
Ln_Précipitation_au_carré			-0,001*** (0,46)	
Ln_Température*Ln_précipitation				-0,002** (0,087)
Constant	-26,63*** (0,098)		-32,26*** (0,074)	-21,66*** (0,13)
ECT	-0,52***		-0,52***	-0,59***
Observations	440		440	440

Note *, **, *** indiquent respectivement la significativité des coefficients à 10%, 5% et 1%,

Source : Construit par l'auteur

Tableau 7 : : Résultats à long terme pour le mil

Variable	(1)	(2)	(3)	(4)
Ln_Précipitations	1,28** (0,036)	1,07*** (0,031)	1,09** (0,076)	1,23** (0,056)
Ln_Températures	-37,58*** (0,61)	-34,18** (0,25)	-38,34*** (0,43)	-34,18*** (0,28)
Ln_Terres_cultivables	0,29*** (0,079)	0,36** (0,076)	0,32*** (0,036)	0,14*** (0,095)
Sècheresse	-0,29 (0,038)	-0,32 (0,056)	-0,08*** (0,08)	-0,006** (0,012)
Inondation	-0,07** (0,065)	-0,09* (0,063)	0,18 (0,065)	0,09 (0,054)
SPI	0,23* (0,034)	0,44** (0,45)	0,69** (0,87)	0,33* (0,16)
Ln_Population_rurale	0,68*** (0,034)	0,43** (0,036)	0,19** (0,022)	0,28*** (0,024)
Ln_Température_au_carré		-0,02** (0,071)		
Ln_Précipitation_au_carré			-0,004*** (0,26)	
Ln_Température*Ln_précipitation				-0,0006* (0,047)
Constant	-41,63*** (0,098)		-32,26*** (0,074)	-41,66*** (0,13)
ECT	-0,52***		-0,52***	-0,59***
Observations	440		440	440

Note *, **, *** indiquent respectivement la significativité des coefficients à 10%, 5% et 1%,

Source : Construit par l'auteur

Conclusion

Cet article avait pour objectif principal d'étudier la relation entre le changement climatique, approximé ici par les variables météorologiques standards (températures et précipitations) ainsi que par l'indice SPI calculé sur 12 mois, et les rendements du mil, du sorgho et du maïs. En plus des variables climatiques, nous avons introduit des variables non climatiques susceptibles d'influencer les rendements des cultures, à savoir la superficie des terres cultivables et la population rurale. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle ARDL (Autoregressive Distributed Lag) proposé par Pesaran, Shin et Smith (2001), qui permet de prendre en compte à la fois les effets à court et à long terme.

Nos résultats indiquent un lien négatif entre l'augmentation des températures et les rendements du mil, du maïs et du sorgho. Une augmentation de 1% de la température entraîne une baisse d'environ 35 % des rendements de ces céréales. Cette relation n'est pas linéaire. En revanche, l'augmentation des précipitations a un effet positif sur les rendements des cultures étudiées, avec un impact plus prononcé sur les rendements du maïs à long terme. Une augmentation de 1% des précipitations booste les rendements du maïs de 3,65 %, soit deux fois plus qu'elle n'augmente ceux du mil (1,78 %) et du sorgho (1,28 %). L'effet positif des précipitations est confirmé par l'impact du SPI sur les rendements, le SPI ayant un effet bénéfique sur les rendements du mil et du sorgho à long terme. Nos résultats montrent également que les événements extrêmes de pluviométrie, tels que la sécheresse et les inondations, ont un effet négatif sur les rendements des cultures. Ainsi, le changement climatique exerce une influence défavorable sur la production agricole, ce qui pourrait entraîner des conséquences sur la sécurité alimentaire.

BIBLIOGRAPHIE

- ASUMADU-SARKODIE, S., & OWUSU, P, A, (2016), The relationship between carbon dioxide and agriculture in Ghana : A comparison of VECM and ARDL model, *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10968-10982,
- BLANC, E, (2012), The impact of climate change on crop yields in Sub-Saharan Africa,
- CHANDIO, A, A., JIANG, Y., REHMAN, A., & RAUF, A, (2020), Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*,
- CHANDIO, A, A., JIANG, Y., REHMAN, A., & RAUF, A, (2020), Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*,
- CLARKE, B., OTTO, F., STUART-SMITH, R., & HARRINGTON, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001.
- DEVEREUX, S., & EDWARDS, J, (2004), Climate change and food security,
- DOORENBOS J, KASSAN AH, 1980, Réponse des rendements à l'eau, FAO, Bulletin d'irrigation et de Drainage 33, Rome,
- FIEDLER, P, C., & REILLY, S, B, (1994), Interannual variability of dolphin habitats in the eastern tropical Pacific, II: Effects on abundances estimated from tuna vessel sightings, 1975-1990, *Fishery Bulletin*, 92(2), 451-463,
- FIELD, C. B., BARROS, V., MACH, K., MASTRANDREA, M., VAN AALST, M., ADGER, N., ... & WONG, P. P. (2014). Climate Change 2014: Technical Summary. OUBA, Y, (2018), Industrial mining land use and poverty in regions of Burkina Faso, *Agricultural Economics*, 49(4), 511-520,
- GBETIBOUO, G, A., RINGLER, C., & HASSAN, R, (2010, August), Vulnerability of the South African farming sector to climate change and variability: An indicator approach, In *Natural Resources Forum* (Vol, 34, No, 3, pp, 175-187), Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd,
- GIEC, 2014, Climate change 2014, synthesis report,
- HARRIS R, SOLLIS, R, (2003), Applied time series modeling and forecasting », West Sussex: Wiley,
- HARRIS R., SOLLIS, R, (2003), « Applied time series modeling and forecasting », West Sussex: Wiley,

- HAYES, M, J., SVOBODA, M, D., WIIHITE, D, A., & VANYARKHO, O, V, (1999), Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index, *Bulletin of the American meteorological society*, 80(3), 429-438,
- ISLAM, S., CENACCHI, N., SULSER, T. B., GBEGBELEGBE, S., HAREAU, G., KLEINWECHTER, U., ... & WIEBE, K. (2016). Structural approaches to modeling the impact of climate change and adaptation technologies on crop yields and food security. *Global Food Security*, 10, 63-70.
- J, -M, Faurès and G, Santini, "Water and the Rural Poor— Interventions for Improving Livelihoods in Sub-Saharan Africa," FAO, Land and Water Division, Rome, 2008
- JANJUA, P, Z., SAMAD, G., & KHAN, N, (2014), Climate change and wheat production in Pakistan: an autoregressive distributed lag approach, *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 68, 13-19,
- KALAI M., ZGHIDI N, (2017), « Foreign direct investment, trade, and economic growth in MENA countries: empirical analysis using ARDL bounds testing approach », *Journal of the Knowledge Economy*, 1-25,
- KEMP, L., XU, C., DEPLEGGE, J., EBI, K. L., GIBBINS, G., KOHLER, T. A., ... & LENTON, T. M. (2022). Climate endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(34), e2108146119.
- KNOX, J., HESS, T., DACCACHE, A., & WHEELER, T, (2012), Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia, *Environmental Research Letters*, 7(3), 034032,
- LEE, J., D, A, NADOLNYAKAND V, M, HARTARSKA (2012), "Impact of climate change on agricultural production in Asian countries: Evidence from panel study", Annual Meeting, February 4-7, 2012, Birmingham, Alabama, Southern Agricultural Economics Association,
- LIU, S., ZHANG, P., HE, X., & LI, J, (2015), Efficiency change in North-East China agricultural sector: A DEA approach, *Agricultural Economics*, 61(11), 522,
- LOBELL, D, B, (2007), Changes in diurnal temperature range and national cereal yields, *Agricultural and forest meteorology*, 145(3-4), 229-238,
- 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
- LOBELL, D, B., & ASNER, G, P, (2003), Climate and management contributions to recent trends in U, S, agricultural yields, *Science*, 299(5609), 1032-1032,
- LOBELL, D, B., & FIELD, C, B, (2007), Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environmental research letters*, 2(1), 014002,

- LOBELL, D, B., BURKE, M, B., TEBALDI, C., MASTRANDREA, M, D., FALCON, W, P., & NAYLOR, R, L, (2008), Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030, *Science*, 319(5863), 607-610,
- LOBELL, D, B., SCHLENKER, W., & COSTA-ROBERTS, J, (2011), Climate trends and global crop production since 1980, *Science*, 333(6042), 616-620,
- MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S. L., PEAN, C., BERGER, S., ... & ZHOU, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2(1), 2391.
- MCKEE, T, B., DOESKEN, N, J., & KLEIST, J, (1993, January), The relationship of drought frequency and duration to time scales, In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol, 17, No, 22, pp, 179-183), Boston, MA : American Meteorological Society,
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., & KLEIST, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. *proceedings of the conference on applied climatology*.
- MORRIS, M., KELLY, V. A., KOPICKI, R. J., & BYERLEE, D. (2007). *Fertilizer use in African agriculture: Lessons learned and good practice guidelines*. The World Bank.
- Mahrous, W, (2018), Dynamic impacts of climate change on cereal yield in Egypt: An ARDL model, *Journal of Economic and Financial Research*, 5(1), 886-908,
- NELSON, G. C., VALIN, H., SANDS, R. D., HAVLÍK, P., AHAMMAD, H., DERYNG, D., ... & WILLENBOCKEL, D. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 111(9), 3274-3279.
- PESARAN, M, H., SHIN, Y., & SMITH, R, P, (1999), Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels, *Journal of the American statistical Association*, 94(446), 621-634,
- PUROLA T., LEHTONEN, H., LIU, X., ET PALOSUO, T, (2018) Production of Cereals in Northern Marginal Areas: An Integrated Assessment of Climate Change Impacts at the Farm Level, *Agricultural Systems*, 162(c) : 191-204
- QUIROGUA, S., & IGLESIAS, A. (2007). Methods for drought risk analysis in agriculture. *Options Méditerranéennes*, 58, 103-113.
- Robelin M, 1963, Contribution à l'étude du comportement du maïs grain vis-à-vis de la sécheresse, In Journée internationale de l'irrigation, AGPM, Agen,
- ROSENZWEIG, C, AND PARRY, M, L, (1994), Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367(6459):133-138,

- ROSENZWEIG, C., & IGLESIAS, A. (1994), Implications of climate change for international agriculture,
- ROUDIER, P., SULTAN, B., QUIRION, P., & BERG, A. (2011). The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say?. *Global environmental change*, 21(3), 1073-1083.
- SÁNCHEZ, M, V, (2018), Climate impact assessments with a lens on inequality, *The Journal of Environment & Development*, 27(3), 267-298,
- SARR, B., KAFANDO, L., & ATTA, S. (2011), Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(4), 1659-1675,
- SEKHAR, C, S, C, (2018), Climate change and rice economy in Asia: Implications for trade policy, *The State of Agricultural Commodity Markets (SOCO)(Rome, FAO)*, 62,
- STIGE, L. C., STAVE, J., CHAN, K. S., CIANNELLI, L., PETTORELLI, N., GLANTZ, M., ... & STENSETH, N. C. (2006). The effect of climate variation on agro-pastoral production in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(9), 3049-3053.
- TAYLOR, C. M., BELUŠIĆ, D., GUICHARD, F., PARKER, D. J., VISCHEL, T., BOCK, O., ... & PANTHOU, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), 475-478.
- Toupet, C. (1992), *The Sahel*, Nathan,
- VICENTE-SERRANO, S. M., LÓPEZ-MORENO, J. I., GIMENO, L., NIETO, R., MORÁN-TEJEDA, E., LORENZO-LACRUZ, J., ... & AZORIN-MOLINA, C. (2011). A multiscalar global evaluation of the impact of ENSO on droughts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20).
- Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013), Climate change impacts on global food security, *Science*, 341(6145), 508-513.
- WOLLBURG, P., MARKHOF, Y., BENTZE, T., & PONZINI, G. (2024). Substantial impacts of climate shocks in African smallholder agriculture. *Nature sustainability*, 7(11), 1525-1534.

ANNEXES

Annexe 1 : Test de stationnarité pour l'ensemble des pays sahéliens

Variables	Im-Pesaran-Shin		Levin, Lin and Chu	
	En Niveau I (0)	En différence première I (1)	En Niveau I (0)	En différence première I (1)
	p, Value	p, Value	p, Value	p, Value
Ln_Sorgho	0,0000	0,0000	0,0030	0,0000
Ln_Maïs	0,0000	0,0000	0,0017	0,0000
Ln_Mil	0,0000	0,0000	0,0200	0,0000
Ln_Precipitations	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ln_Température	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ln_Terres_cultivables	0,0517	0,0000	0,9871	0,0000
SPI	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Source : Construit par l'auteur

Annexe 2 : Test de Hausmann pour l'ensemble de l'échantillon pour le mil

Coefficients

	(b)	(B)	(b-B)	Sqrt (Diag(V_b-V_B))
	Mg	Pmg	Différence	S.E.
Ln_Précipitations	-30.15	1.27	-31.42	35.58
Ln_Températures	-8361.58	37.57	-11998.43	115109.62
Ln_Terres_cultivables	0.07	0.19	-0.12	0.41
SPI	0.94	0.072	1.17	2.37
Sécheresse	0.14	-0.006	0.14	0.15
Inondation	-0.009	0.03	-0.039	0.25
Ln_Population rurale	0.33	0.41	-0.081	0.19

b= consistent Under H0 and Ha ; obtained from xtpmg

B= inconsistent under Ha, efficient under H0 ; obtained from xtpmg

Test : H0 : différence in coefficients nonsystematic

Chi2(4) =(b-B)'[(V_b-V_B) ^ (-1)] (b-B) =1,68

Prob> chi2=0,79

(V_b-V_B is not positive definite)

Source : construit par l'auteur

Annexe 3 : Test de Hausmann pour le sorgho

Coefficients

	(b) Mg	(B) Pmg	(b-B) Différence	Sqrt (Diag(V_b-V_B)) S.E.
Ln_Précipitations	-28.71	1.79	-30.5	29.09
Ln_Températures	-8361.5	36.44	-8398.021	6430.47
Ln_Terres_cultivables	0.271	0.36	-0.088	0.45
SPI	1.34	-0.29	1.63	2.001
Sécheresse	-0.061	0.078	-0.14	0.26
Inondation	0.004	0.15	-0.14	0.21
Ln_Population rurale	0.32	0.19	0.13	0.13

b= consistent Under H0 and Ha ; obtained from xtpmg

B= inconsistent under Ha, efficient under H0 ; obtained from xtpmg

Test : H0 : différence in coefficients nonsystematic

Chi2(4) =(b-B)'[(V_b-V_B) ^ (-1)] (b-B)=6,87

Prob> chi2=0,14

(V_b-V_B is not positive definite)

Source : construit par l'auteur

Annexe 4 : Test de Hausmann pour le maïs

Coefficients

	(b) mg	(B) pmg	(b-B) Différence	Sqrt (Diag(V_b-V_B)) S.E.
Ln_Précipitations	53.21	0.66	52.55	43.32
Ln_Températures	14.93	32.66	-17.73	10.49
Ln_Terres_cultivables	0.088	-0.18	0.27	0.43
SPI	-13.45	0.072	13.52	11.39
Sécheresse	0.103	-0.28	0.17	0.21
Inondation	-0.42	-0.07	0.49	0.25
Ln_Population_rurale	0.58	0.68	-0.10	0.28

b= consistent Under H0 and Ha ; obtained from xtpmg

B= inconsistent under Ha, efficient under H0 ; obtained from xtpmg

Test : H0 : différence in coefficients nonsystematic

Chi2(4) =(b-B)'[(V_b-V_B) ^ (-1)] (b-B)=9,47

Prob> chi2=0,15

(V_b-V_B is not positive definite)

Source : construit par l'auteur

Annexe 5: Corrélation pour le rendement de sorgho

	Ln_sorgho	Ln_Précipitation	Ln_Température	Ln_Terres_cult	SPI
Ln_sorgho	1,0000				
Ln_Précipitation	0,5944	1,0000			
Ln_Température	-0,418	-0,321	1,0000		
Ln_Terres_culti	0,3508	0,7131	-0,080	1,0000	
SPI	0,0493	0,1873	-0,031	0,0338	1,0

Source : Construit par l'auteur

Annexe 6 : Corrélation pour le rendement de mil

	Ln_mil	Ln_Précipitations	Ln_Température	Ln_Terres_cult	SPI
Ln_mil	1,0000				
Ln_Précipitations	0,5804	1,0000			
Ln_Température	-0,306	-0,321	1,0000		
Ln_Terres_culti	0,4373	0,7131	-0,080	1,0000	
SPI	0,0597	0,1873	-0,031	0,0338	1,0

Source : Construit par l'auteur

Annexe 7 : Corrélation pour le rendement de maïs

	Ln_maïs	Ln_Précipitations	Ln_Température	Ln_Terres_culti	SPI
Ln_maïs	1,0000				
Ln_Précipitations	0,3787	1,0000			
Ln_Température	-0,218	-0,321	1,0000		
Ln_Terres_culti	0,272	0,7131	-0,080	1,0000	
SPI	0,106	0,1873	-0,031	0,0338	1,0

Source : Construit par l'auteur

Annexe 8 : Test de cointégration

		1965-2021 sorgho	1965-2021 Maïs	1965-2021 Mil
		P-value	P-value	P-value
Kao	Modifier Dickey-Fuller t	0,0000	0,0000	0,0000
	Dickey-Fuller t	0,0000	0,0000	0,0000
	Augmenter Dickey-Fuller t	0,0006	0,0000	0,0000
	Unadjusted Modified Dickey-Fuller t	0,0000	0,0000	0,0000
	Unadjusted Dickey-Fuller t	0,0000	0,0000	0,0000
Westerland	Variance ratio	0,0000	0,0010	0,0007