



HAL
open science

Trois essais sur l'impact socio-économique du changement climatique en Afrique subsaharienne

Beguerang Topeur

► **To cite this version:**

Beguerang Topeur. Trois essais sur l'impact socio-économique du changement climatique en Afrique subsaharienne. Economies et finances. Université Clermont Auvergne, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0002 . tel-04165005

HAL Id: tel-04165005

<https://theses.hal.science/tel-04165005v1>

Submitted on 18 Jul 2023

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

École Doctorale des Sciences Économiques, Juridiques, Politiques et de
gestion
Centre d'Études et de Recherche sur le Développement International
(CERDI)

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

**Trois essais sur l'impact socio-économique des changements
climatiques en Afrique subsaharienne**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 26 janvier 2023
pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences Economiques

par

Beguerang Topeur

sous la direction de Pascale Combes-Motel et Jean-Francois Brun

Membres du Jury

Pascale PHELINAS	Directrice de Recherche, IRD	Présidente
Arnaud BOURGAIN	Professeur associé, Université du Luxembourg	Rapporteur
Gervasio SEMEDO	MCF HDR, Université de Tours	Rapporteur
Jeevendranath Vimal THAKOOR	Economiste principal, FMI	Invité
Fouzi MOURJI	Professeur, Université de Casablanca	Suffragant
Pascale COMBES MOTEL	Professeure, Université Clermont Auvergne	Directrice thèse
Jean-François BRUN	MCF HDR, Université Clermont Auvergne	Directeur thèse

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

Dédicace

Je dédie ce travail à mon Dieu à qui je dois l'être et le mouvement, à mes parents qui m'ont donné la vie et se sont occupés de mon éducation, à mon épouse et mes enfants qui m'ont apporté tout le soutien nécessaire, à mes frères et sœurs, à mes oncles et cousins à mes amis et connaissances qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre.

Remerciements

Prov16.7: « *Quand l'Éternel approuve les voies d'un homme, Il dispose favorablement à son égard même ses ennemis* »

Je voudrais avant toute chose rendre mes actions de grâce à Dieu qui, dans son omnipotence, a non seulement veillé à la succession des circonstances, mais aussi a donné un cœur généreux aux personnes qui ont contribué à faciliter mon parcours tant académique et professionnel aboutissant à la soutenance de cette thèse. Né dans un village pauvre du Tchad et ayant fréquenté des écoles primaires à même le sol ou sur des accessoires en briques ou en bois sans table, dans une précarité presque totale, rien ne présageait d'un parcours pouvant m'emmener à une thèse. Cette situation s'est assombrie quand en 1^e année d'université, j'ai perdu mon père, principal soutien financier alors que ma mère était déjà décédée quatre années plus tôt. Mais Dieu n'a pas dit son dernier mot voilà pourquoi, aujourd'hui, je présente ce travail qui marque probablement la fin d'un parcours académique avec l'un des diplômes universitaires les plus élevés parallèlement à une carrière professionnelle sans difficulté majeure.

Je voudrais aussi remercier mes directeurs de thèse, les professeurs Pascale Motel-Combes et Jean-Francois Brun, qui ont accepté sans hésitation de superviser mes travaux de recherches et de

iii

m'encadrer. Sans leur coaching, leur patience et leur disponibilité sans commune mesure, je ne serais probablement pas à mesure de conduire à terme ces travaux de recherche que je présente aujourd'hui. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes profondes gratitude.

Je voudrais également exprimer mes reconnaissances à mon épouse et à mes enfants qui m'ont soutenu malgré le fait que concilier une vie professionnelle pleine et des travaux de recherches doctorales me privait inéluctablement d'une vie de famille active. J'étends ces remerciements à mes parents biologiques à titre posthume, à mes oncles et cousins à l'exemple de Laoukoura Dokalyo, feu oncle Couralao Kan Beyo et Ndjérassem Ngabo Luc, mes frères et sœurs, les amis et camarades qui ont contribué, chacun à sa façon, à mon parcours académique mais surtout à la finalisation des travaux de thèse. Je pense particulièrement à :

- Gildasse Bopahbé Deudibé avec qui j'ai corédigé le chapitre 3 de ma thèse ;
- Olivier Santoni qui m'a aidé dans la construction de la carte d'Afrique par zone climatique ;
- Dr. Aristide Mabali qui a lu et corrigé mon premier Chapitre ;

- Dr. Alfred Ramadji qui a lu et corrigé mes deux premiers chapitres ;
- Saleh Goukouni qui a contribué à la confection des graphiques pour le chapitre 2 ;
- Dr Canton Kessely qui m'a beaucoup encouragé à ne pas baisser les bras pendant mes périodes de questionnement et de baisse de productivité.
- Dr Bertrand Hounkannounon, mon ancien Délégué de classe à l'école nationale de statistique et d'économie appliquée, qui, par son sens élevé de confraternité, s'est régulièrement enquêri de ma progression professionnelle et académique et qui tant de temps à autre m'a beaucoup encouragé dans mes travaux de thèse.

Je voudrais également être reconnaissant à la coopération française qui a assuré, à travers Campus France, le financement partiel mais déterminant à l'acceptation de ma candidature à l'École doctorale d'Économie de l'Université d'Auvergne. Ce financement a été possible grâce à Madame Françoise Genviti qui a accepté sans hésitation à défendre ma demande de bourse à la coopération. Qu'elle trouve à travers ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude. C'est aussi l'occasion d'être doublement reconnaissant à la coopération française qui m'avait aussi accordé une bourse pour mes études de statistiques à l'École Nationale d'Économie Appliquée (ENEA) de Dakar devenue il y a quelques années

l'École Nationale de la Statistique et d'Analyse Économique (ENSAE).

Je voudrais aussi exprimer mes gratitude à mes responsables directs au niveau professionnel à savoir Jean-Claude Nachege et Joseph Ntamungiro, Représentants résidents successifs du FMI au Tchad qui ont été tolérants et bienveillants en me permettant de mener de front mes travaux de recherche et mes tâches d'Économiste à la Représentation du FMI au Tchad. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes profondes gratitude. Je n'oublierai pas la communauté des chantres unis du Tchad qui m'a souvenu spirituellement durant cette période de recherche qui m'a éloigné d'elle.

Je remercie également l'Agence nationale de la météorologie (ANM) et le Programme alimentaire mondiale qui ont accepté de mettre à ma disposition leurs bases de données sans lesquelles le chapitre 3 de cette thèse ne pourrait être rédigé.

Je voudrais enfin être reconnaissant à Claude N'Kodia, Économiste principal à la BAD qui m'a non seulement encouragé à faire la thèse, durant son passage au Tchad, mais m'a introduit auprès de Jean-Francois Brun et plaidé pour qu'il accepte d'être mon Directeur de thèse, première étape importante pour

vi

l'acceptation d'une candidature à une thèse à mon sens. Qu'il trouve
ici toutes mes reconnaissances.

Résumé

Les changements climatiques entraînent diverses manifestations climatiques (températures extrêmes, précipitations aléatoires, sécheresses, inondations, tornades, etc.). Le sixième rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) souligne les conséquences généralisées et souvent irréversibles des changements climatiques. En particulier, le rapport souligne les effets potentiels des changements climatiques sur les prix des denrées alimentaires. Si l'industrialisation, l'une des sources des changements climatiques, a permis à beaucoup de pays de se développer, l'Afrique subsaharienne (ASS) n'en a pas profité. Comment donc pourrait-elle concilier ses objectifs légitimes de développement et ses engagements de limitation des émissions de gaz à effets de serre dans le cadre des accords de Paris ? En plus, les revenus de la grande majorité de sa population reposent sur les activités agricoles pluviales fortement impactées par les changements climatiques. La thèse porte sur les conséquences socio-économiques des changements climatiques dans les pays d'Afrique subsaharienne. Existe-il une disparité selon les grandes zones géographiques de la région ? Comment l'importance des zones climatiques intérieures aux économies permet-elle d'amortir ou rend vulnérables les pays aux conséquences socio-économiques des changements climatiques ? Ces questions sont au cœur du

présent travail de thèse qui comprend trois essais. Ils portent notamment sur la croissance du PIB réel par habitant et les changements climatiques en Afrique subsaharienne, les déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne et l'impact des changements climatiques sur la sécurité alimentaire dans le Sahel à travers le cas du Tchad.

Le premier essai analyse les effets des changements climatiques sur la croissance du PIB réel par habitant. Il couvre 47 pays sur la période de 1980 à 2017. L'accent est mis sur d'éventuelles disparités géographiques en ASS. A l'échelle régionale, la température agit positivement sur la croissance par habitant par ses moyennes (avec un effet de seuil) et négativement par sa variabilité. La pluviométrie agit négativement par sa variance. Il existe cependant une disparité nette lorsqu'on considère les zones géographiques. Dans la zone sahélienne, la variable climatique synthétique s'est révélée d'impact positif sur la croissance par habitant (mais pas dans les autres zones) alors que la température et la pluviométrie, prises isolément, n'ont pas eu d'effets significatifs ni par leurs moyennes ni par leurs variances. Dans la zone tropicale, la température agit positivement avec un effet de seuil par son évolution moyenne et négativement par sa variance. La pluviométrie y affecte négativement la croissance par sa variance. Les proportions des zones climatiques intérieures

d'isohyètes supérieur à 600 mm se sont révélées d'effets positifs. Dans la zone équatoriale, seule la température agit significativement sur la croissance par habitant (négativement par ses moyennes et positivement par sa variance). Dans la zone australe, la pluviométrie impacte positivement la croissance par habitant par ses moyennes et négativement par sa variance. Les zones climatiques quant à elles agissent positivement sur la croissance. Il est donc important que les politiques d'adaptation et de lutte contre les changements climatiques ou de promotion de la croissance tiennent compte des spécificités géographiques tant dans leur conception que dans leur mise en œuvre.

Le second essai porte sur les déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne. Il donne aussi une vue régionale et géographique de la relation entre le climat et l'inflation en Afrique subsaharienne. Elle a pour objectif de guider les décisions en matière de ciblage de l'inflation. Il apparaît de manière claire qu'en Afrique subsaharienne, la pluviométrie et la température ont un effet statistiquement significatif sur l'inflation surtout par leur évolution tendancielle. La pluviométrie affecte positivement l'inflation par l'effet revenu qu'elle procure aux ménages agricoles qui représentent 60% de la population totale. La température affecte positivement l'inflation par son impact négatif sur la production c'est-à-dire par un effet d'offre. Il existe

cependant une disparité nette selon les zones géographiques. Dans la zone sahélienne, la température est la seule variable climatique qui affecte de façon significative l'inflation par sa moyenne et ce de manière positive. C'est l'effet inflationniste qu'on lui reconnaît habituellement dans la littérature. Dans la zone tropicale, ce sont la température et la pluviométrie à la fois par leurs évolutions tendancielle et par leurs variances qui impactent l'inflation. La température agit négativement à la fois par son évolution tendancielle et par sa variance. C'est un résultat contre-intuitif qui traduit un effet non linéaire de cette variable climatique. La pluviométrie cependant agit positivement par son évolution tendancielle et négativement par sa variance. Ce résultat peut s'expliquer par un effet revenu des ménages agricoles. Dans la zone équatoriale, ce sont la pluviométrie par son évolution moyenne et la température par sa moyenne et sa variance qui agissent sur l'inflation. Lorsque la pluviométrie augmente, l'inflation diminue. Lorsque la moyenne de la température augmente, l'inflation augmente aussi. C'est un résultat intuitif. Lorsque la variance de température augmente cependant, l'inflation diminue. Dans la zone australe, la pluviométrie a un effet inflationniste. Ces résultats montrent que les politiques de ciblage de l'inflation qui sont généralement monétaires ou budgétaires devraient désormais intégrer les aléas climatiques. Elles devraient non seulement être sensibles aux conjonctures climatiques

défavorables qui créent des chocs d'offre. Cependant les décideurs devraient faire attention à l'évolution pluviométrique favorable qui peut être source d'inflation dans le contexte d'Afrique subsaharienne compte tenu de revenus qu'elle procure à la population agricole majoritaire.

Le dernier essai exploite une base des données collectées au Tchad par le Programme Alimentaire Mondial. Il met en évidence l'effet des facteurs climatiques sur la sécurité alimentaire. Sur la base d'un appariement de données météorologiques avec les données de l'enquête auprès des ménages, une estimation économétrique de cette relation en considérant l'évolution des précipitations et la perception des ménages des chocs climatiques (sécheresse et inondations) a été effectuée. Elle montre que, les variables climatiques, notamment les précipitations, la sécheresse et les inondations, ont clairement une influence sur la sécurité alimentaire. Un niveau élevé de précipitations est associé à un statut de sécurité alimentaire plus élevé. La sécheresse, d'autre part, est associée à une insécurité alimentaire plus élevée. Cependant, les inondations peuvent être importantes certaines années et non significatives d'autres années. Vivre dans une zone climatique défavorable (recevant moins de 600 mm de précipitations comme le sahel) expose également à l'insécurité alimentaire. Ces résultats montrent qu'il y a des zones où l'insécurité alimentaire est

prévalente et qui doivent recevoir prioritairement l'assistance humanitaire. Dans un contexte tchadien, les politiques publiques de développement du secteur agricole ou d'assistance à la population vulnérable devraient privilégier les zones recevant moins de 600mm de pluviométrie. L'essai fournit également des éléments qualitatifs d'identification de la population la plus exposée pour des actions ciblées. Les politiques nationales d'atténuation ou d'adaptation à l'insécurité alimentaire aussi doivent être orientées en particulier dans ces zones.

Summary

Climate change leads to various climatic manifestations (extreme temperatures, random rainfall, drought, flooding, tornadoes, etc.). The IPCC's sixth report highlights the widespread and often irreversible consequences of climate change. In particular, the report highlights the potential effects of climate change on food prices. While industrialization – one of the sources of climate change – has allowed many countries to develop, sub-Saharan Africa (SSA) has not benefited. How, then, could it reconcile its legitimate development objectives with its commitments to limit greenhouse gas emissions under the Paris agreements? In addition, the incomes of the vast majority of its population are from rainfed agricultural activities strongly impacted by climate change.

The thesis focuses on the socio-economic consequences of climate change in sub-Saharan African countries. Is there a disparity between the major geographical areas of the region? How does the importance of inland climate zones dampen or make countries vulnerable to the socio-economic consequences of climate change? These questions are at the heart of this thesis, which comprises three essays. They focus on real GDP per capita growth and climate change in sub-Saharan Africa, the climate determinants of inflation in sub-Saharan Africa and the impact of

climate change on food security in the Sahel region through the case of Chad.

The first essay analyses the effects of climate change on real GDP per capita growth. It covers 47 countries over the period from 1980 to 2017. The focus is on possible geographical disparities in SSA. At the regional level, average temperature has a positive effect on per capita growth (with a threshold effect), while its variability (as well as the variability of rainfall) has a negative effect. There is, however, a clear disparity between geographical areas. In the Sahelian zone, the synthetic climate variable was found to have a positive impact on growth per capita (but not in the other zones) while temperature and rainfall, taken in isolation, did not have significant effects either in terms of their averages, or variances. In the tropical zone, the average temperature affects growth positively (with a threshold effect), while its variability has a negative effect. Variability of rainfall also has a negative effect on growth. Climatic zones of isohyets greater than 600mm have proven to have positive effects. In the equatorial zone, only temperature has a significant effect on growth per capita (negatively by its average and positively by its variance). In the southern zone, rainfall has a positive impact on per capita growth by its averages and negatively by its variance. Climate zones, on the other hand, have a positive effect on growth. It is therefore

important that policies to adapt to and combat climate change or to promote growth take into account geographical specificities both in their design and in their implementation.

The second essay focuses on the climate determinants of inflation in sub-Saharan Africa. It also provides a regional and geographical view of the relationship between climate and inflation in sub-Saharan Africa. Its objective is to guide inflation-targeting decisions. It is clear that in sub-Saharan Africa, rainfall and temperature have a statistically significant effect on inflation, especially through their averages. Rainfall positively affects inflation by the income effect it provides to agricultural households, which represent 60% of the total population. Temperature positively affects inflation by its negative impact on production, i.e. by a supply effect. There is, however, a clear disparity between geographical areas. In the Sahelian zone, temperature is the only climate variable that significantly affects inflation by its average and in a positive way. This is the inflationary effect that is usually recognized in the literature. In the tropical zone, it is temperature and rainfall both by their trend trends and by their variances that impact inflation. Temperature acts negatively both by its trend evolution and by its variance. This is a counterintuitive result that reflects a non-linear effect of this climate variable. Rainfall, however, acts positively by its average

and negatively by its variance. This result can be explained by an income effect of agricultural households. In the equatorial zone, it is the evolution of average rainfall and the temperature by its average and variance that act on inflation. When rainfall increases, inflation decreases. When the average temperature rises, so does inflation. It is an intuitive result. When temperature variance increases, however, inflation decreases. In the southern zone, rainfall has an inflationary effect. These results show that inflation-targeting policies that are generally monetary or fiscal should now incorporate climate hazards. They should not only be sensitive to adverse climatic conditions that create supply shocks. However, policymakers should pay attention to the favorable rainfall trend that can be a source of inflation in the context of sub-Saharan Africa given the income it provides to the majority agricultural population.

The latest essay uses a database of data collected in Chad by the World Food Program. It highlights the effect of climate factors on food security. Based on a matching of meteorological data with household survey data, it presents econometric estimation of this relationship by considering changes in rainfall and household perceptions of climate shocks (drought and flooding). It shows that climate variables – including rainfall, drought and floods – have a clear influence on food security. A high level of rainfall is

associated with a higher food security status. Drought, on the other hand, is associated with higher food insecurity. However, flooding can be significant in some years and insignificant in other years. Living in an adverse climate zone (receiving less than 600 mm of rainfall like the Sahel) also exposes to food insecurity. These results show that there are areas where food insecurity is prevalent, and which must have priority for humanitarian assistance. In a Chadian context, public policies for the development of the agricultural sector or assistance to the vulnerable population should give priority to areas receiving less than 600mm of rainfall. The essay also provides qualitative elements for identifying the population most at risk for targeted actions. National policies to mitigate or adapt to food insecurity must also be directed, particularly in these areas.

Table de matières

Introduction générale.....	1
1- Introduction.....	1
2- Changements climatiques en Afrique subsaharienne.....	3
3- Impact socio-économique sur les changements climatiques (en ASS ?).....	6
4- Contribution de la thèse.....	8
4. Bibliographie.....	13
Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne.....	15
1- Introduction.....	15
2- Relation entre Conditions climatiques et croissance économique.....	17
3- Cadre théorique et empirique.....	21
3.1- Cadre théorique.....	21
3.2- Base de données et description des variables.....	22
4- Résultats et Analyses.....	34
4.1- Résultats des estimations.....	34
4.2- Effets de l'Indice standard des précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) sur la croissance par habitant. 47	
5. Conclusion.....	50
6. Bibliographie.....	52
7. Annexes.....	55
6.1- Liste et description des variables de l'étude.....	55
6.2- Zones géographiques.....	55
6.3- Croissance par habitant et zones climatiques.....	56
6.4- Croissance par habitant versus température et pluviométrie.....	57

6.5-	Interaction entre la variance de la température et de la pluviométrie et les zones climatiques sur la Croissance par habitant.....	59
6.6-	Interaction entre les zones climatiques et les autres variables climatiques (température, pluviométrie et leurs variances) ²	59
6.7-	Interaction entre les zones climatiques et les autres variables climatiques (température, pluviométrie et leurs variances) ⁽³⁾	60
Chapitre 2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne		63
1.	Introduction	63
2.	Inflation en Afrique subsaharienne : quelques faits stylisés 66	
2.1-	Les évènements socio-économique, politique et climatique affectent l'inflation en Afrique subsaharienne...	66
2.2-	Les produits alimentaires sont prépondérants dans la détermination de l'indice de prix à la consommation en Afrique subsaharienne.....	68
3.	Cadre théorique	71
3.1	- Formulation de la relation entre l'inflation et les variables explicatives	72
4.	Cadre empirique	73
4.1	- Bases de données.....	73
4.2-	Corrélation entre les variables	80
4.3-	Démarche technique et contrôle qualité.....	81
5.	Résultats des estimations et analyse.....	83
5.1-	Résultats sur l'ensemble de l'échantillon	84
5.2-	Analyse selon les zones géographiques.....	87
6.	Conclusion	96
7.	Bibliographie	98
8.	Annexes	101

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad.....	110
1. Introduction.....	110
2. Food security and Chadian specificities.....	111
2.1- Definitions and measurement of food security.	111
2.2- Main determinants of food security	114
2.3- Chadian agroclimatic context and food security vulnerability risk.....	116
3. Overview of data and stylized facts.....	118
3.1- Description of the database.....	119
3.2- Determinants of Food security in the database....	123
4. Econometric Strategy	132
5. Estimation results and robustness analysis.....	133
5.1- Marginal effect of climatic and control variables .	133
5.2- Robustness and consistency analysis.....	138
6. Conclusion	142
7. Bibliographie.....	143
8. Annexes	147
Annexe 1 : Food consumption determination.....	147
Annexe 2: Livelihood coping strategies master list	148
Conclusion générale	154

Introduction générale

1- Introduction

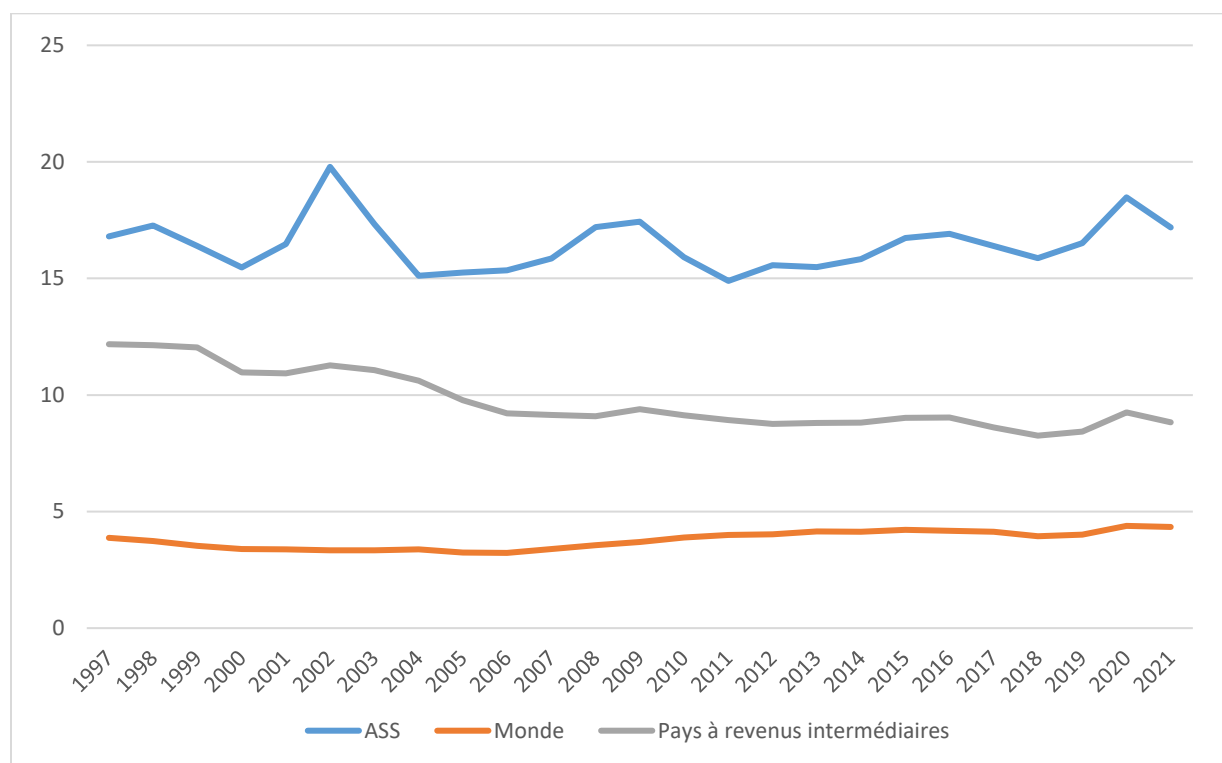
Les changements climatiques sont synonymes de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère en général et de celle du dioxyde de carbone en particulier ayant pour conséquence l'augmentation inédite et continue de la température mondiale. Cette situation entraîne diverses manifestations climatiques (températures extrêmes, précipitations aléatoires, sécheresses, inondations, tornades, etc.). Selon le rapport du GIEC 2022, avec la progression du réchauffement climatique, ses effets sont désormais généralisés et souvent irréversibles. Le rapport atteste que les effets actuels du réchauffement climatique sur les populations et les écosystèmes sont la réduction de la disponibilité des ressources en eau et en nourriture (en Afrique, en Asie et dans les petites îles notamment), l'impact sur la santé dans toutes les régions du monde (plus grande mortalité, émergence de nouvelles maladies, développement du choléra), l'augmentation du stress thermique, la dégradation de la qualité de l'air et la baisse de moitié des aires de répartition des espèces animales et végétales. Le rapport du GIEC 2022 évoque aussi les conséquences des catastrophes naturelles de plus en plus rapprochées sur la production alimentaire, la hausse du prix des aliments ou encore la malnutrition.

Conséquence de la première révolution industrielle du milieu du 18^e siècle et de forte industrialisation au 19^e et 20^e siècles, les changements climatiques constituent une menace planétaire majeure pour la survie des êtres vivants pour les siècles à venir si rien n'est fait pour infléchir son évolution. La mobilisation mondiale des décideurs politiques, des institutions de développement, des scientifiques de tout bord ayant abouti à un cadre harmonisé de suivi-évaluation des engagements volontaires des pays à la Conférence de Paris constitue un pas important. Si l'industrialisation a permis à beaucoup de pays de se développer, l'Afrique subsaharienne (ASS) est en queue du peloton. Comment donc pourrait-elle concilier ses objectifs légitimes de développement et ses engagements de limitation des émissions de gaz à effets de serre ? En effet, les revenus de la grande majorité de sa population reposent sur les activités agricoles pluviales fortement impactées par les changements climatiques. Et même les économies de la plupart des pays africains dépendent essentiellement de la dynamique climatique (Abidoye & Odusola, 2015). Comme le montre le graphique 1, l'Agriculture en Afrique subsaharienne (essentiellement pluviale) contribue plus à la création de richesse que l'Agriculture dans

Introduction générale

les pays à revenus intermédiaires ou dans le monde. Ainsi, l'ASS est plus vulnérable des conséquences du climat en termes de production agricole que les autres groupes de pays.

Graphique1 : Valeur ajoutée de l'Agriculture en pourcentage du PIB



Source : World Development Indicators, Banque mondiale

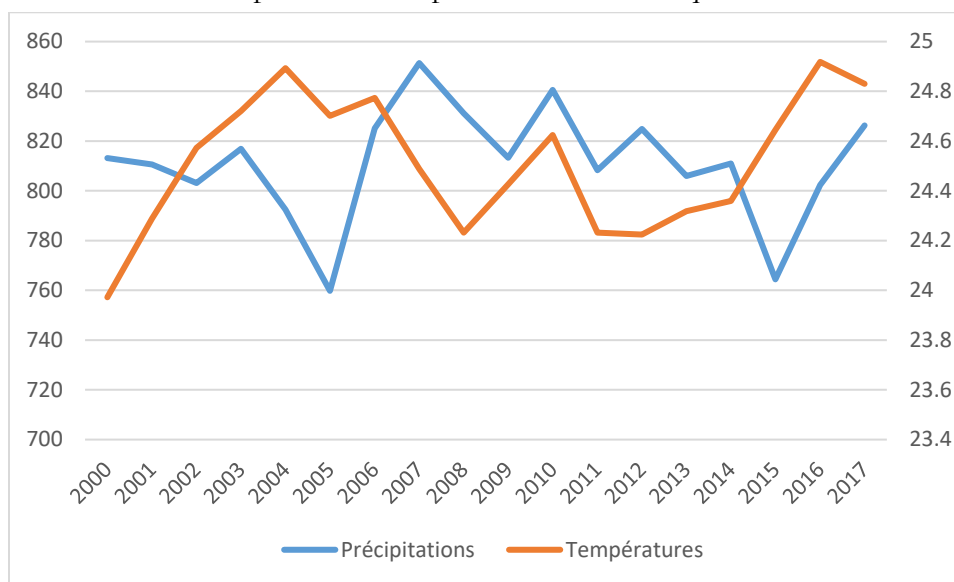
Les secteurs clés qui stimulent les performances économiques et les moyens de subsistance tels que l'agriculture, la foresterie, l'énergie, le tourisme, les ressources côtières et les ressources en eau sont très vulnérables aux changements climatiques. Comment donc les conséquences des changements climatiques sur ces secteurs économiques se reflètent-elles sur la situation socio-économique des pays d'Afrique subsaharienne ? Existe-il une disparité selon les grandes zones géographiques de la région ? Comment l'importance des zones climatiques intérieures aux économies rend vulnérable ou non aux effets socio-économiques des changements climatiques ? Ces questions sont au cœur du présent travail de thèse. Les connaissances de l'impact socioéconomique des changements climatiques sur l'Afrique subsaharienne restent toujours d'actualité pour orienter les politiques dans un contexte global de limitations des émissions de gaz à effets de serre.

Introduction générale

Dans cette introduction générale, nous aborderons les faits stylisés des changements climatiques observés en Afrique subsaharienne, ses conséquences socio-économiques intuitives et la contribution de la thèse à la compréhension de certaines de ses conséquences sur la croissance, la dynamique des prix et la sécurité alimentaire.

2- Changements climatiques en Afrique subsaharienne

Graphique 2: Evolution de température et de pluviométrie en Afrique subsaharienne de 2000 à 2017



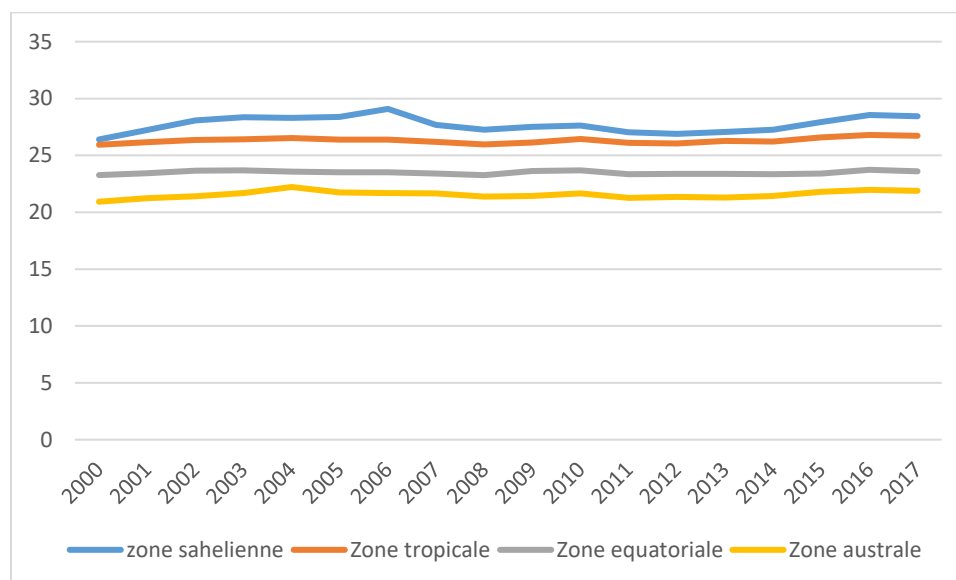
Source : Country-level Climate database 1901-2017, CERDI CNRS-Université de Clermont Auvergne

Les manifestations des changements climatiques en l'Afrique subsaharienne sont particulières. Reconnue comme faible contributrice aux dérèglements climatiques, l'Afrique subsaharienne se trouve être l'une des régions où les conséquences des changements climatiques sont importantes et disparates (Jacquemot, 2013). Les chocs y sont plus fréquents et l'évolution de la pluviométrie est quasiment liée à celle de la température (voir graphique 2). Au cours de l'année 2020 par exemple, les indicateurs climatiques en Afrique ont été caractérisés par une augmentation continue des températures, une accélération de l'élévation du niveau de la mer, des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, tels que les inondations, les glissements de terrain et les sécheresses, et les impacts dévastateurs associés (Taalas, 2020). Cette situation de 2020 est illustrative de l'importance et de la disparité du phénomène au cours des dernières décennies dans la région d'Afrique subsaharienne.

Introduction générale

L'Afrique se réchauffe plus rapidement que la température moyenne mondiale (OMM, 2020) (GIEC, 2019). À l'échelle sous-régionale, l'analyse des températures montre que la tendance au réchauffement au cours de la période entre 1991 et 2020 était supérieure à celle de la période entre 1961 et 1990 dans toutes les sous-régions africaines et nettement supérieure à celle de la période entre 1931 et 1960 sur les terres et les océans combinés (OMM, 2020). L'élévation du niveau de la mer n'est pas la même dans les côtes : conforme à la moyenne mondiale dans les côtes atlantiques, légèrement plus élevée du côté de l'océan Indien et nettement plus élevée que la moyenne mondiale dans les côtes tropicales et d'atlantiques sud (OMM, 2020). Cette situation n'est pas sans conséquence sur la pêche et la vie tout long des côtes. L'observation de la température sur la période de 2000 à 2017 montre qu'il existe quatre zones distinctes des températures en Afrique subsahariennes à savoir la zone sahélienne la plus chaude, suivie de la zone tropicale, ensuite vient la zone équatoriale et enfin vient la zone australe, la moins chaude (voir graphique 3 ci-dessous).

Graphique 3 : évolution des températures dans les quatre grandes zones d'Afrique subsaharienne de 2000 à 2017.



Source : Country-level Climate database 1901-2017, CERDI CNRS-Université de Clermont Auvergne

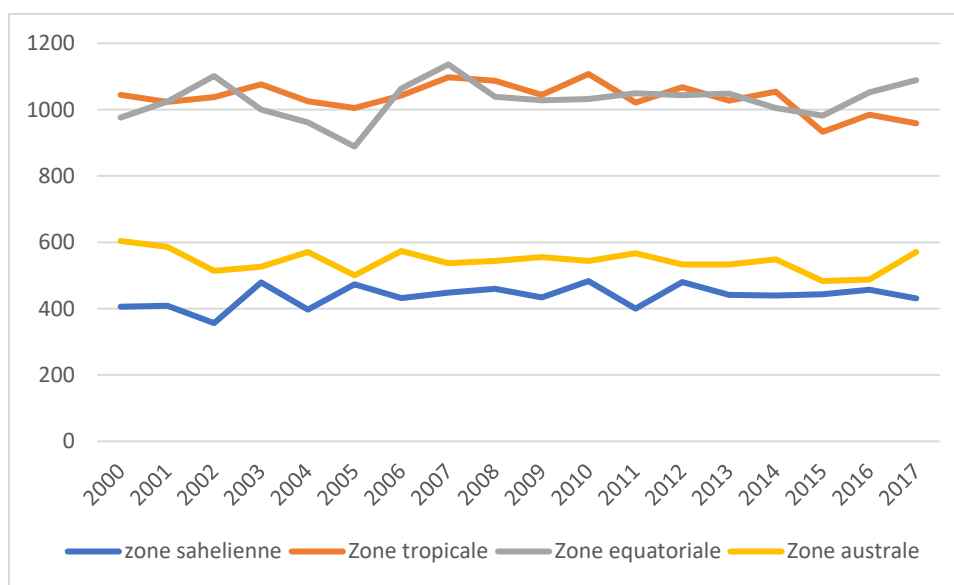
Du côté des glaciers, actuellement, seules trois montagnes d'Afrique sont recouvertes de glaciers : le massif du mont Kenya (Kenya), les monts Rwenzori (Ouganda) et le mont Kilimandjaro (Tanzanie). Les taux de retrait des glaciers africains sont les plus élevés au monde (Zemp, et al., 2019) et si ce taux

Introduction générale

se maintient, les glaciers africains disparaîtront d'ici 2040. Bien que ces glaciers soient trop petits pour servir de réservoirs d'eau importants pour renforcer les fleuves et rivières, ils ont une importance touristique et scientifique considérable (OMM, 2020).

Les précipitations en Afrique subsaharienne sont très variables dans l'espace et dans le temps en raison de caractéristiques topographiques, de régimes de circulation divers et complexes, de divers facteurs climatiques à grande échelle tel que les phénomènes El-niño ainsi que de la variabilité interne des territoires nationaux. Le graphique 4 montre que deux grandes zones de pluviométrie subsistent en Afrique subsaharienne. Il s'agit de la zone plus arrosée constituée des pays de la zone tropicale et ceux de la zone équatoriale et la zone la moins arrosée constituée des pays du sahel et de la zone australe. Les zones sahélienne et tropicale semblent subir plus de chocs que les autres zones.

Graphique 4: Evolution des précipitations dans quatre grandes zones géographiques de 2000 à 2017.



Source : Country-level Climate database 1901-2017, CERDI CNRS-Université de Clermont Auvergne

En termes d'évolution de la pluviométrie sur une période relativement plus large, on note qu'en 2020 par exemple, les totaux des précipitations comparés à la période de 1951 et 2010 indiquent des quantités élevées de précipitations (dans les 10 % supérieurs des valeurs) dans le nord de la région du Sahel, la vallée du Rift, le bassin central du Nil et le nord-est de l'Afrique, le bassin du Kalahari et le cours inférieur du fleuve Congo (OMM, 2020). En revanche, des quantités de précipitations anormalement faibles (dans les 10 % des valeurs les plus basses de la répartition des pluies) ont été relevées entre le

Introduction générale

Kalahari et le bassin du Congo, au centre et dans le sud de Madagascar, à l'ouest du canal de Mozambique et sur la côte nord du golfe de Guinée (OMM, 2020) . Dans la région des Grands Lacs, Taithe (2019) montre que les changements climatiques pourraient être bénéfiques globalement pour cette sous-région même-si les événements climatiques seront plus marqués (à la fois inondation et sécheresse) et l'aridité des zones sèches pourrait s'arrêter. Il avance que même si les conséquences des changements climatiques sont multisectorielles (l'agriculture, la production d'énergie, les infrastructures, la santé, les ressources en eau, avec des impacts sociaux, économiques et politiques), la sécurité alimentaire et la production d'électricité apparaissent comme les deux domaines les plus impactés par les changements climatiques en Afrique de l'Est. Le Lac Tchad, ce réservoir d'eau qui fait vivre environ 40 millions de personnes dans le Sahel, a perdu 90% de sa superficie à cause de sa surexploitation exacerbée par les effets des changements climatiques. Quelles sont donc les conséquences socio-économiques prévisibles de manifestations climatiques ?

3- Impact socio-économique sur les changements climatiques (en ASS ?)

Les changements climatiques touchent plusieurs secteurs économiques et sociaux. L'un des secteurs et non des moindres est celui de la production agricole qui pèse environ 2% du PIB aux Seychelles, 62,7% du PIB au Somalie (les deux valeurs extrêmes) et en moyenne régionale environ 20% du PIB en 2020. L'impact direct des changements climatiques sur les populations à travers ce secteur laisse entrevoir de larges conséquences sociales. En effet, la production agricole familiale représente 90% de la production agricole et fait vivre plus de 60% de la population africaine au sud du Sahara (Jacquemot, 2013). Les risques auxquels les populations africaines sont exposées par l'incertitude causée par les changements climatiques laissent entrevoir un large spectre de conséquences sociales. Les activités agricoles fournissent des ressources financières à la plus grande partie de la population d'Afrique subsaharienne. Ces ressources servent à financer entre autres la santé, l'éducation et les besoins non alimentaires. Etant une agriculture de subsistance, elle contribue à la sécurité alimentaire et joue un rôle important dans la lutte contre la pauvreté. En Afrique de l'Ouest, les changements climatiques font baisser par exemple la productivité des céréales. Cette baisse des rendements est particulièrement marquée dans l'ouest du Sahel où se combinent les effets d'une baisse des pluies et d'une hausse des températures à l'horizon 2050 (Sultan, Roudier, & Traore, 2015). Les manifestations climatiques qui compromettent la production dans le sahel sont entre autres la hausse des températures minimales et maximales, la forte variabilité pluviométrique, les sécheresses intenses et les inondations. Dans les Grands Lacs, on note la dégradation des sols et des zones marécageuses, les précipitations parfois

Introduction générale

moyennes ou abondantes, des températures plus élevées, la présence permanente d'une frange de la population en insécurité alimentaire, les sécheresses, les inondations ou glissements de terrains et les maladies touchant à la fois les humains et le bétail. (Taithe, 2014). L'Afrique australe également fait face à l'augmentation de la température qui a pour conséquence plus de pestes, plus de maladies et de paludisme dans des endroits où le paludisme n'est pas endémique. L'augmentation des températures signifie également détérioration des écosystèmes naturels et des cultures agricoles et risque d'avoir des effets négatifs sur la productivité et les pâturages et la production alimentaire (Lesolle, 2012). En termes de précipitations, l'Afrique australe connaît des périodes de hausses et de baisses de précipitations avec une tendance baissière mais aussi des activités cycloniques. La présence des cyclones dans la sous-région entraîne l'existence des inondations ayant comme conséquence des pertes économiques et la destruction des infrastructures, des cultures et des moyens de subsistance dans les pays de la sous-région d'Afrique australe (Lesolle, 2012). La sous-région d'Afrique australe est aussi touchée par la baisse de production agricole qui entraîne dans son sillage l'insécurité alimentaire et la hausse de prix des produits alimentaires. Avec une augmentation de 2°C de la température et une réduction de 10% de précipitations le rendement du maïs pour l'Afrique australe, par exemple, devrait connaître une réduction de 0.5 t/ha (Lesolle, 2012). L'agriculture c'est aussi la production animale. Les effets directs des changements climatiques pour la production animale comprennent la qualité et la quantité des fourrages et de l'eau, la réduction de la production animale par l'excès accru de seuils de température supérieurs à la zone de confort thermique du bétail, l'augmentation de la prévalence de nouvelles maladies animales, le stress du bétail mettant en mal son état de santé et sa productivité, les exigences énergétiques pour l'alimentation des animaux dans des installations chauffées (Lesolle, 2012).

Les pêches continentales africaines représentent un tiers de la production du poisson du continent et jouent un rôle très important pour soutenir les moyens d'existence des millions de personnes. Le poisson assure 21% de la prise quotidienne de protéines pour les pays africains (FAO, 2010). Le poisson venant des eaux continentales est particulièrement important pour la consommation humaine dans les pays comme le Tchad, l'Ouganda, le Mali, le Congo, le Gabon et la Tanzanie. Les pêches continentales constituent un apport important aux économies locales et régionales dans tous les principaux bassins hydrographiques en Afrique, et pour plusieurs pays y compris le Tchad, le Mali et l'Ouganda, les pêches continentales contribuent jusqu'à cinq à dix pourcents au PNB. Compte tenu des changements climatiques, les zones humides, plaines d'inondation et les lacs et les rivières peu

Introduction générale

profonds tels que le Lac Tchad, le delta intérieur du Niger, le Sudd, le Lac Chilwa, le Lac Turkana, les marais de Kafue et le delta d'Okavango sont tous susceptibles de variations de température et de précipitations, et de longues périodes de sécheresses qui diminueront les habitats des poissons disponibles et risquent de s'assécher complètement (Watson, Zinyoera, & Moss, 1998) (Allison, Andrew, & Oliver, 2007).

Les changements climatiques entraînent aussi le mouvement des personnes ou la migration environnementale. Il est parfois à l'origine des déplacements d'urgence des personnes suite aux événements extrêmes tels que les inondations, les tornades, glissement de terrain (Lesolle, 2012) (Taithe, 2014). Il est aussi à l'origine des mouvements lents tels que l'exode rural compte tenu de phénomènes de sécheresse récurrents qu'il occasionne (Taithe, 2014). Les changements climatiques affectent aussi la disponibilité de l'eau utile par la grande évapotranspiration causée par les hausses de température mais aussi la production de l'énergie hydroélectrique par la complication de l'exploitation et du fonctionnement optimal des barrages hydroélectriques (Taithe, 2014). Les conséquences des changements climatiques incluent aussi les conflits sur les ressources (Lesolle, 2012) (Burke, Hsiang, & Miguel, 2015) (Koubi, 2019) (USAID, 2015). C'est donc à juste titre que Mbiyozo et Maunganidze (2021) qualifient les changements climatiques comme étant un multiplicateur de risques, un amplificateur de fragilité ou un Catalyseur de conflits.

4- Contribution de la thèse

Les sections ci-dessus ont montré les faits et les conséquences des changements climatiques sur les secteurs économiques et sociaux en Afrique subsaharienne. Cependant son impact empirique global sur les économies des pays d'Afrique subsaharienne reste à documenter. A travers cette thèse, trois aspects des impacts socio-économiques des changements climatiques en Afrique subsaharienne ont été abordés dont deux sujets macroéconomiques et un sujet microéconomique. Il s'agit de la croissance du PIB réel par habitant et les changements climatiques en Afrique subsaharienne, les déterminants météorologiques de l'inflation en Afrique subsaharienne et l'impact des changements climatiques sur la sécurité alimentaire dans le sahel à travers le cas du Tchad.

Le premier essai a porté sur la croissance du PIB réel par habitant et les changements climatiques. Parmi les études déjà réalisées, notons d'emblée que Artadi et Sala i Martin (2004) ont identifié les facteurs de la faible croissance économique en Afrique subsaharienne (« tragédie du 20^e siècle ») sans toutefois faire allusion explicitement aux facteurs climatiques. Notre thèse vise justement à démontrer

Introduction générale

comme quelques autres travaux que les facteurs climatiques affectent aussi les performances économiques en Afrique subsaharienne. Si on paraphrase les auteurs, un climat dégradé est potentiellement facteur d'une autre « tragédie » de la croissance en Afrique au 21^{ème} siècle alors que Rodrik (2014) identifie des éléments qui peuvent soutenir la croissance en ASS. En effet, Maino et Emrullahu (2022) ont montré l'impact des changements climatiques sur la croissance du revenu par habitant dans les Etats fragiles d'Afrique subsaharienne à travers la température. Ils ont considéré la température comme Proxi des changements climatiques et ont couvert que les Etats fragiles. Alegidee et al. (2016) ont étudié l'effet des changements climatiques sur la croissance économique en Afrique subsaharienne en considérant à la fois la température et les précipitations (en évolution moyenne) comme variables climatiques. Ils ont couvert la période de 1970 à 2009 sur un échantillon de 18 pays. Brown et al. (2011) ont aussi analysé l'impact du climat sur la croissance économique par habitant en Afrique subsaharienne sur la période de 1961 à 2005 couvrant 34-42 pays en considérant la température et les précipitations comme variables climatiques. Ils ont trouvé que les épisodes de sécheresse impactent négativement la croissance par habitant mais l'évolution des températures et des précipitations n'affectent pas dans tous les coups la croissance par habitants. Le présent travail couvre 47 pays sur la période de 1980 à 2017 en analysant l'impact des changements climatiques sur la croissance du PIB réel par habitant sur un échantillon global mais également en considérant les disparités selon les regroupements géographiques et économiques. En termes de variables climatiques, il a non seulement considéré la température et la pluviométrie en évolution moyenne et en variance durant la période de production agricole pour tenir compte de la variabilité climatique mais également en considérant l'importance des zones climatiques intérieures aux pays. Les présents travaux peuvent constituer une actualisation de l'étude Brown et al. (2011) avec des données plus disponibles couvrant plus de pays. Il ressort de notre travail qu'à l'échelle régionale, la température agit positivement sur la croissance par habitant par ses moyennes (avec un effet de seuil) et négativement par sa variabilité. La pluviométrie agit négativement par sa variance. Il existe cependant une disparité nette lorsqu'on considère les zones géographiques. Dans la zone sahélienne, la variable climatique synthétique s'est révélée d'impact positif sur la croissance par habitant (mais pas dans les autres zones) alors que la température et la pluviométrie, prises isolément, n'ont pas eu d'effets significatifs ni par leurs moyennes ni par leurs variances. Dans la zone tropicale, la température agit positivement avec un effet de seuil par son évolution moyenne et négativement par sa variance. La pluviométrie y affecte négativement la croissance par sa variance. Les zones climatiques d'isohyètes supérieures à 600 mm se sont révélées d'effets positifs. Dans la zone équatoriale, seule la température agit significativement sur

Introduction générale

la croissance par habitant (négativement par ses moyennes et positivement par sa variance). Dans la zone australe, la pluviométrie impacte positivement la croissance par habitant par ses moyennes et négativement par sa variance. Les zones climatiques quant à elles agissent positivement sur la croissance. Il est donc important que les politiques d'adaptation et de lutte contre les changements climatiques ou de promotion de la croissance tiennent compte des spécificités géographiques tant dans leur conception que dans leur mise en œuvre

Le second essai porte sur les déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne. Il existe plusieurs études analysant la relation entre les changements climatiques et les prix dans certains pays pris isolément. Diouf (2007) en modélisant l'inflation au Mali a pris en compte la dimension climatique par les précipitations. Kinda (2011) en analysant les déterminants de l'inflation au Tchad aussi considère les facteurs climatiques par les précipitations. Les deux études ont montré l'effet négatif de la pluviométrie sur l'inflation. Les études de portée régionale sur l'inflation et les changements climatiques restent rares. La présente étude donne une vue régionale et géographique de la relation entre le climat et l'inflation en Afrique subsaharienne. Elle a pour objectif de guider les décisions en matière de ciblage de l'inflation. Il apparaît de manière claire qu'en Afrique subsaharienne, la pluviométrie et la température ont un effet statistiquement significatif sur l'inflation surtout par leur évolution moyenne. La pluviométrie affecte positivement l'inflation par l'effet revenu qu'elle procure aux ménages agricoles. Et la température affecte l'inflation par son impact négatif sur la production et donc par l'effet offre. Il existe cependant une disparité nette selon les zones géographiques. Dans la zone sahélienne, c'est la température qui est la variable climatique qui affecte de façon statistiquement significative l'inflation par sa moyenne. Lorsqu'elle augmente, l'inflation augmente aussi. C'est l'effet inflationniste qu'on lui reconnaît. Dans la zone tropicale, les variables climatiques impactent de manière statistiquement significative l'inflation par la température et la pluviométrie à la fois par leurs évolutions moyennes et par leurs variances. La température agit négativement à la fois par son évolution moyenne et par sa variance. C'est un résultat contre-intuitif et traduit sans nul doute un effet non linéaire de cette variable climatique. La pluviométrie cependant agit positivement par son évolution moyenne et négativement par sa variance. Ce fait peut être expliqué par l'effet revenu des ménages agricoles comme expliqué précédemment. Dans la zone équatoriale, les variables climatiques qui agissent de manière significative sur l'inflation sont la pluviométrie par son évolution moyenne, la température par sa moyenne et sa variance. Lorsque la pluviométrie varie de 1%, l'inflation diminue de 9,2% au seuil de confiance de 5%. C'est un résultat

Introduction générale

intuitif. Lorsque la moyenne de la température augmente de 1%, l'inflation augmente de 26,1% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Lorsque la variance de température augmente de 1%, l'inflation diminue de 11,2% au seuil de confiance de 10%. Dans la zone australe, la pluviométrie a un effet inflationniste. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 6% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs.

Le dernier essai exploite une base de données du Programme Alimentaire Mondiale collectées au Tchad pour mettre en évidence l'effet des facteurs climatiques sur la sécurité alimentaire. La littérature sur sécurité alimentaire et climat en ASS est abondante (Connolly-Boutin & Smit, 2016) (Zewdie, 2014) (Thompson, Berrang-Ford, & Ford, 2010) (Kotir, 2011; Ringler, Zhu, Cai, Koo, & Wang, 2010). Elle atteste de l'existence de l'impact négatif des changements climatiques sur la sécurité alimentaire à travers toutes ses composantes qui sont la disponibilité, l'accessibilité, l'utilisation et la stabilité. Cette relation est plus évidente pour la disponibilité alimentaire compte tenu du fait qu'elle est fortement liée à la production agricole. Si l'existence de l'impact négatif des changements climatiques sur la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne est ainsi avérée, la situation au Sahel devrait être encore alarmante compte tenu de son exposition naturelle aux facteurs climatiques (désertification, température extrême, faible pluviométrie) et à une instabilité socio-politique. Dans le Sahel, les relations entre les changements climatiques, l'agriculture et la sécurité alimentaire ont fait l'objet d'une thèse de Yobom (2020). Dans son travail, pour traiter de l'impact des changements climatiques sur la sécurité alimentaire, il a adopté un modèle macroéconomique appliqué sur des données de panel ou les pays du sahel (y compris le Tchad) constituent une dimension individuelle et les variables ont été observées dans le temps. Il établit une relation négative entre les changements climatiques (sécheresse et inondation) et la sécurité alimentaire. Dans notre travail, nous avons adopté une approche micro en appariant les données météorologiques aux données d'enquêtes auprès des ménages pour estimer empiriquement cette relation en considérant l'évolution objective des variables climatiques (températures et précipitations) et la perception des ménages des chocs climatiques (sécheresse et inondation). Notre travail enrichit la littérature empirique par son approche et son originalité. Il montre que, les variables climatiques, notamment les précipitations, la sécheresse et les inondations, ont clairement d'influences sur la sécurité alimentaire. Les précipitations sont associées à un statut de sécurité alimentaire plus élevé. En fait, le ménage est moins susceptible d'être en situation d'insécurité alimentaire à mesure que les précipitations augmentent. La sécheresse, d'autre part, est associée à une probabilité plus élevée d'insécurité alimentaire. Cependant, les inondations peuvent être importantes

Introduction générale

certaines années et non significatives d'autres. Vivre dans une zone climatique défavorable (recevant moins de 600 mm de précipitations comme le sahel) expose également à l'insécurité alimentaire.

Les chapitres ci-après abordent avec profondeur et détails les sujets de l'impact socio-économique des changements climatiques objet de la thèse.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

4. Bibliographie

- Abidoye, B. O., & Odusola, A. F. (2015). Climate Change and Economic Growth: an econometric analysis. *Journal of African Economies*, 1-25.
- Alagidede, P., Adu, G., & Frimpong, P. B. (2016). The effect of climate change on economic growth: evidence from Sub-Saharan Africa. *Environmental Economics and Policy Studies volume*, pp. 18:417–436.
- Allison, E., Andrew, N., & Oliver, J. (2007). Enhancing the resilience of inland fisheries and aquaculture systems to climate change. *Journal of SAT Agricultural Research*, p. http://dspace.icrisat.ac.in/dspace/bitstream/123456789/1006/1/Enhancing_the_resilience.pdf.
- Artadi, E. V., & Sala-i-Martin, X. (2004). The economic tragedy of the twentieth century: Growth in Africa. *World Economic Forum*, pp1-17.
- Brown, C., Meeks, R., Hunu, K., & Yu, W. (2011). Hydroclimate risk to economic growth in sub-Saharan Africa. *Climatic Change*, pp. 106:621–647.
- Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Climate and conflict. *Annual Review of Economics*.
- Connolly-Boutin, L., & Smit, B. (2016). Climate change, food security, and livelihoods in sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change*, 16, pages385–399 .
- Diouf, M. A. (2007, December). Modeling Inflation for Mali. *IMF Working paper*.
- FAO. (2010). Changement climatique, peches continentales et aquacultures en Afrique. *Comité des pêches et de l'aquaculture en Afrique* (p. 9). Maputo: <https://www.fao.org/3/al373f/al373f.pdf>.
- GIEC. (2019). *Changement climatique et terres émergées: Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes...* Retrieved from <https://www.ipcc.ch>: <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jacquemot, P. (2013). Perspectives économiques pour l'Afrique subsaharienne: Questions et scénarios. *L'Économie politique*, pp. 6-33.
- Kinda, T. (2011, March). Modeling Inflation in Chad. *International Monetary Fund Working paper*.
- Kotir, J. H. (2011). Climate change and variability in Sub-Saharan Africa: a review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 13, pages587–605.
- Koubi, V. (2019). Climate Change and Conflict. *Annual Review of Political Science*.
- Lesolle, D. (2012). *Document politique de la SADC sur le changement climatique: évaluation des options de politique pour les Etats membres de la SADC*. Gaborone: SADC Policy analysis and dialogue programme.
- Maino, R., & Emrullahu, D. (2022, March). Climate Change in Sub-Saharan Africa Fragile States: Evidence from Panel Estimations. *IMF Working paper WP/22/54*.
- Mbiyozo, A.-N., & Maunganidze, O. A. (2021, Mai 21). *Changement climatique et violence en Afrique : pas de temps à perdre*. Retrieved from Institut d'études de sécurité: <https://issafrica.org/fr/iss-today/changement-climatique-et-violence-en-afrique-pas-de-temps-a-perdre>
- OMM, O. M. (2020). *Etat du climat en Afrique 2020*. Genève, Suisse: Organisation Météorologique mondiale.
- Ringler, C., Zhu, T., Cai, X., Koo, J., & Wang, D. (2010). Climate Change Impacts on Food Security in Sub-Saharan Africa: Insights from Comprehensive Climate Change Scenarios. *International Food Policy Research Institute*.
- Rodrik, D. (2014). An African Growth Miracle? *Working paper 20188, National Bureau of Economic research*.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Sultan, B., Roudier, P., & Traore, S. (2015). Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In B. Sultan, R. Lalou, S. M. Amadou, A. Oumarou, & M. Soumaré, *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (pp. 209-225). Marseille: IRD.
- Taalas, P. (2020, 10 19). *Organisation meteorologique mondiale de la : temps, climat, eau*. Retrieved from <https://public.wmo.int/>: <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/le-changement-climatique-entra%C3%AEne-une-augmentation-de-l%E2%80%99ins%C3%A9curit%C3%A9>
- Taithe, A. (2014). Le changement climatique dans la région des Grands Lacs. *Les cahiers d'Afrique de l'Est*, pp. 37-50.
- Taithe, A. (2019). Le changement climatique dans la région des Grands Lacs. *Les Cahiers d'Afrique de l'Est/The East African Review*, <https://journals.openedition.org/estafrica/383?lang=en>.
- Thompson, H. E., Berrang-Ford, L., & Ford, J. D. (2010). Climate Change and Food Security in Sub-Saharan Africa: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 2, no. 8: 2719-2733, <https://doi.org/10.3390/su2082719>.
- USAID. (2015). Climate change and conflict. *Technical Report*.
- Watson, R., Zinyoera, M., & Moss, R. (1998). *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge: Cambridge: Cambridge University Press.
- Yobom, O. (2020, September 5). *Climate Change, Agriculture and Food Security in Sahel*. Retrieved from HAL theses: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02928098/>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., . . . Cogley, J. G. (2019, April 8). *Nature*. Retrieved from www.nature.com: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1071-0>
- Zewdie, A. (2014). Impact of climate change on food security: literature review in Sub-Saharan Africa. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, Vol.5 No.8 pp.225.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

1- Introduction

L'évolution erratique des conditions climatiques, conséquence d'un réchauffement climatique inédit, est l'une des préoccupations majeures de notre siècle. La fonte des glaciers, les inondations, les catastrophes climatiques (accélération des fréquences des ouragans et tornades, sécheresse et grande variabilité de la pluviométrie) préoccupent aussi bien les populations, les gouvernements que les organisations internationales. La mobilisation planétaire à travers les grands forums pour la lutte contre le réchauffement du climat en est une parfaite illustration.

Au-delà d'une préoccupation existentielle, les conditions climatiques ou géographiques constituent les facteurs non négligeables des performances économiques (Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2004) ; (Olsson, Douglas, & Hibbs, 2005) (Nordhaus, 2006). C'est à juste titre que plusieurs recherches se sont intéressées non seulement aux conséquences socio-économiques de ces phénomènes climatiques, mais aussi à la relation entre l'économie et ceux-ci. En effet, la destruction d'infrastructures socio-économiques et les pertes en vies humaines ne sont pas sans conséquences sur l'économie (Chhibber & Nayyar, 2008). L'évolution des conditions climatiques ou météorologiques se traduisant par la variabilité non maîtrisée de la pluviométrie et des températures affecte la production agricole (Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010) et par ricochet impacte la croissance économique.

La présente étude s'inscrit en ligne des analyses des liens entre la géographie et la croissance, en général ; et le climat, en particulier ; ((Brenner & Lee, 2014) (Dell, Jones, & Olken, 2009) (Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999)). Elle cherche à comprendre au-delà de l'impact global des conditions climatiques sur la croissance, comment celle-ci réagit en fonction de de l'importance des zones climatiques intra-territoriales aux pays. Et comment ces influences se présentent lorsqu'on tient compte des regroupements géographiques (zone sahélienne, tropicale, équatoriale et australe). Contrairement aux données climatiques annuelles utilisées dans les études antérieures ((Brenner & Lee, 2014) (Bruckner & Ciccone, 2011)), comment la prise en compte des variables climatiques, dans les zones productives (arrosées et propices à la production et non désertiques) intérieures des

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

pays et pendant la période de croissance végétale, impacte-t-elle la relation entre climat et la croissance par habitant ? L'utilisation d'une variable climatique synthétique en lieu et place de la température et de la pluviométrie apporte-t-elle des enseignements nouveaux ? Pour répondre à ces interrogations, l'étude a couvert la quasi-totalité des pays d'Afrique subsaharienne et de la corne de l'Afrique (47 pays y compris de ceux de la corne de l'Afrique) sur la période de 1980 à 2017. Les résultats de cette étude pourraient être utiles dans le cadre de la recherche des nouvelles trajectoires de développements propices à la transformation structurelle des économies d'Afrique subsaharienne en vue d'une croissance économique future robuste, durable et inclusive telle que voulue par les Objectifs de Développement Durable.

Le présent travail a été articulé autour de six (6) sections. Après la section 1 consacrée à l'introduction de l'étude, la section 2 fait une synthèse de la revue de littérature relative au lien climat-économie. Dans la section 3, le cadre théorique et empirique de l'étude a été présenté. La section 4 a été consacrée aux résultats et analyses et la section 5 a été réservée à la conclusion.

2- Relation entre Conditions climatiques et croissance économique

Au cours de ces dernières années, beaucoup d'études empiriques sur la croissance vont au-delà de ce que North et Thomas (1973) appellent les causes immédiates de la croissance à savoir l'accumulation des facteurs et l'innovation qui sont les fondements des modèles néo-classiques de croissance (Solow, 1956) ; (Cass, 1965); (Koopmans, 1963)). La qualité des institutions et la géographie et/ou la biogéographie sont aussi identifiées comme facteurs fondamentaux de la différence de croissance par habitant entre pays (Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2004) ; (Olsson, Douglas, & Hibbs, 2005)). La présente étude s'inscrit en ligne de celles recherchant les déterminants géographiques et climatiques de la croissance (Brenner & Lee, 2014) (Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999). Elle repose sur l'hypothèse de l'impact positif ou négatif des variables climatiques sur la croissance par habitant selon que les zones climatiques (zones d'isohyètes plus ou moins homogènes) sont favorables ou non. Elle met un accent sur l'impact de la diversité et de la spécificité des zones climatiques nationales sur la croissance. Elle recherche également l'effet de l'interaction entre climat et regroupements géographiques (Sahel, zones tropicale, équatoriale et australe) sur la croissance par habitant.

La relation entre le climat et la croissance a été évoquée dès le 14^e siècle et reprise dans les récits de Ibn Khaldun (Gates, 1967). La température relativement élevée était identifiée comme la cause d'un faible niveau de revenu. Montesquieu (1748) et Huntington (1915) ont montré plus tard que les hautes températures réduisent la productivité du facteur travail. Ainsi, le climat tempéré était considéré plus favorable au succès économique (Jones, 1981) (Crosby, 1986) (Diamond, 1997)). Il était donc reconnu que les économies plus exposées à des hautes températures sont défavorisées que les autres. Plusieurs études empiriques contemporaines ont confirmé la relation négative solide entre les températures élevées et le revenu par habitant (Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999) (Hsiang, 2010) (Khawar, 2014)). La variation de la température affecte particulièrement le revenu par habitant dans les pays pauvres (Dell, Jones, & Olken, 2012). Ils ont trouvé cependant que ce n'est pas le cas des précipitations (Burke & Leigh, 2010).

La relation entre les variables climatiques et l'économie ne se limite pas seulement à la température et à la pluviométrie. En effet, 20% de la différence de revenu entre l'Afrique et les régions industrialisées peut s'expliquer par les variables géographiques qui incluent l'altitude, la qualité du sol et la distance par rapport aux côtes (Nordhaus, 2006). Cette relation est vraie même à

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

l'intérieur d'un même pays, d'une même région ou d'un même continent (Dell, Jones, & Olken, 2009). Barrios et al. (2010) ont montré que les hausses de précipitations sont associées aux croissances rapides dans les pays d'Afrique Subsaharienne alors que cela n'est pas le cas des autres pays. Ceci montre que les chocs négatifs de précipitations réduisent le revenu par habitant dans les pays au Sud du Sahara (Bruckner & Ciccone, 2011).

De ce qui précède, il ressort une relation négative entre la température et la croissance (Khawar, 2014) alors qu'il n'en est pas de même des précipitations. Même si l'impact des précipitations paraît peu évident dans la plupart des études, il convient cependant de s'interroger sur le cas des économies africaines dont la plupart dépend en grande partie de l'agriculture pluviale qui est elle-même tributaire des aléas climatiques. En effet, les variables climatiques agissent sur la croissance économique à travers la production agricole (Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010; Marbury, 1934). Cette influence est plus évidente pour les pays dont la contribution de l'agriculture au produit intérieur brut (PIB) est non négligeable comme c'est le cas de la plupart des pays africains au sud du Sahara (Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010). Au cours de leur recherche sur les causes des conflits civils en Afrique, Miguel et al. (2004) ont trouvé que la croissance annuelle du revenu par habitant est positivement impactée par l'augmentation des précipitations de l'année courante et retardée. C'est le même constat dans l'étude de Bruckner et Ciccone (2011) sur « pluviométrie et fenêtre démocratique d'opportunité ».

Les conditions climatiques peuvent aussi influencer la croissance de manière indirecte. Lorsqu'elles sont favorables à la santé des habitants (comme le climat tempéré) (Khawar, 2014), elles peuvent accroître la productivité de l'économie (Brenner & Lee, 2014). Compte tenu du fait que l'agriculture occupe une frange importante de la population active en Afrique, une bonne production agricole peut améliorer le revenu des ménages, réduire l'inflation et accroître leur pouvoir d'achat. Elle peut propulser les autres secteurs de l'économie. Seppanen, Fisk et Faulkner (2003) ont trouvé qu'il y a perte de productivité de 2% par degré élevé de températures au-delà de 25 °C pour une variété de tâches cognitives. Graff et Neidell (2014) ont montré aussi qu'il y a une baisse de travail dans les industries exposées à la température telles que l'agriculture, la foresterie, les mines, la construction etc.

La variation de climat peut aussi affecter la croissance économique à travers les secteurs non-agricoles. En effet, Hsiang (2010) a trouvé que les fortes chaleurs affectent négativement trois à

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

six secteurs non-agricoles dans les Caraïbes qui sont entre autres les ventes (en gros et en détails), les restaurants et hôtels, les services et le transport et la communication. Dell, Jones et Olken (2012) ont montré qu'il y a des pertes industrielles de 2% par degré de température élevé dans les pays pauvres. Jones et Olken (2010) ont aussi trouvé que l'accroissement de température affecte négativement les exportations. C'est aussi le cas dans le secteur de l'automobile aux Etats-Unis (Cachon, Gallino, & Olivares, 2012). L'augmentation de la température peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie qui peut être bénéfique ou non à l'économie (Auffhammer & Mansur, 2012) ; (Dechenes & Greenstone, 2011). Les variations climatiques affectent aussi les conflits et la stabilité politique qui ne sont pas sans conséquence sur l'économie (Miguel, Satyanath, & Sergenti, 2004) (Burke, Miguel, Satyanath, Dykema, & Lobell, 2009). Ces études ont mis en évidence l'impact de la température sur les divers secteurs économiques (Lanzafame, 2016) alors que l'impact des précipitations n'est pas assez documenté dans la littérature.

Dans la plupart de la littérature, la relation entre les conditions climatiques et l'économie est étudiée à travers la température et les précipitations. Lorsque l'irrigation devient de plus en plus importante dans la production agricole, la prise en compte de ces deux variables peut paraître limitatif lorsqu'on étudie le lien entre la croissance économique et les variables climatiques ou météorologiques. La littérature empirique sur la relation entre climat et économie, l'impact des variances de la température et de précipitations n'a pas souvent été prise en compte. Dans la présente étude, ces variances ont été intégrées dans l'analyse. En guise de synthèse, le tableau 1 ci-dessous présente quelques études empiriques sur la relation climat et croissance économique.

Tableau 1 : Synthèse des effets des variables climatiques et géographiques sur l'économie

Variables dépendantes	Variables climatiques/géographiques	Période	Nature de l'effet	Auteur(s)
Taux de Croissance économique	Appartenance au Tropic (PT)	2003	PT (-)	Artadi E. V. et Sala-i-Martin X.
Production agricole	Variations de température (T) et de précipitations (P)	1960-2000	P (+) et T (-)	Barrios S., Ouattara B. et Strobl E.
Taux de croissance annuelle	Moyennes pondérées de température et de précipitations	1900-2006	T (+) pays développés et T	Brenner, T., & Lee, D.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

			et P (pas clair) pays pauvres	
PIB par habitant	Moyenne de précipitations (P)	1979-2010	P (+)	Bruckner, M., & Ciccione, A.
Croissance économique	Moyennes de Température (T) et de Précipitations (P)	1950-2006	Haute T (-) pays pauvre et P (pas clair)	Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A.
PIB	Proportion du pays dans le Tropic (PPT) et Statut de pays côtier (SPC)	1965-1990	PPT (-) et SPC (+)	Gallup, J. L., Sachs, J. D., & Mellinger, A. D.
Production (globale, secteurs manufacturier, agricole, services, miniers...)	Température moyenne annuelle (T)	1970-2006	T (-) sauf secteur manufacturier	Salomon M. Hsiang
PIB par habitant	Moyenne journalière de température (T) et température extrême (minimum et maximum) et précipitations (P) moyennes mensuelles et totaux annuels	1965-1990	Haute T (-) et P (+)	Mariam Khawar
PIB par habitant	Mesure de Température et précipitations non spécifiées	1962-2000	T (-) et P (+) effet de long terme	Matteo Lanza fame

Au regard du tableau ci-dessus, plusieurs études ont ressorti l'effet négatif des hautes températures sur la croissance économique. Quelques-unes ont évoqué l'effet positif de la température. La température peut donc avoir un effet positif sur la croissance à un faible degré mais nuisible lorsqu'elle atteint un certain niveau. L'effet de la pluviométrie est en général positif sur la croissance. Les unités de mesures n'ont pas été les mêmes que ce soit pour la température ou la pluviométrie. Il en est de même des modèles et des estimateurs ayant servi à l'analyse du phénomène.

3- Cadre théorique et empirique

3.1- Cadre théorique

Les modèles d'analyse de la croissance économique ont connu beaucoup d'évolution au cours de ces dernières années. Il y a des modèles qui ont une spécification ad-hoc (mettant en relation la croissance et les variables pertinentes) et ceux qui ont une spécification basée sur la théorie (Rao, 2009). Pour construire la relation entre la croissance par habitant et les variables climatiques, nous combinons les modèles dynamiques de production (spécification ad-hoc) et le modèle de Solow ajusté. Cette approche se justifie par le fait que nos variables d'intérêt (variables climatiques) ne sont pas considérées, à la base, par la théorie comme facteurs affectant la croissance et par notre souci de prendre en compte la littérature récente sur la croissance endogène. Le modèle de Solow ajusté qui identifie le capital physique et le capital humain comme source de croissance mais également, le progrès technique résultant des deux facteurs nous fournira certaines variables de contrôle (Rao, 2009) et d'autres variables de contrôle seront considérées conformément à la littérature. Le recours à ce modèle mixte se fait sous l'hypothèse d'un état-régulier ou d'un état stationnaire des économies des pays retenus pour l'étude. Ainsi, nous anticipons une relative homogénéité de réaction de ces économies quel que soit leur niveau de technologie et d'accumulation de capital. L'équation du modèle est construite comme suit :

$$y_{it} = a + \sum_k \beta_k x_{itk} + \sum_j \theta_j z_{itj} + \rho y_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Où y_{it} est le log de la variable du PIB par habitant du pays i , a la constante de l'équation, β_k est le coefficient de la variable x_{itk} , θ_j est le coefficient d'une de nos variables d'intérêt z_{itj} , ρ le coefficient liant la production au temps t à son retard d'autre $t-1$ ($0 < \rho < 1$ étant donné l'hypothèse de l'état-régulier ou stationnaire) et ε_{it} est le terme d'erreur.

En soustrayant y_{it-1} au chaque terme de l'équation (1), on obtient l'équation (2) ci-après.

$$y_{it} - y_{it-1} = a + \sum_k \beta_k x_{itk} + \sum_j \theta_j z_{itj} + \rho y_{it-1} - y_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

On obtient donc :

$$\Delta y_{it} = a + \sum_k \beta_k x_{itk} + \sum_j \theta_j z_{itj} + (\rho - 1)y_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

3.2- Base de données et description des variables

La base de données de l'étude a été construite à partir de trois principales sources à savoir « World Economic Outlook (WEO) database » produit par le Fonds monétaire international sur la période de 1980 à 2017 pour les variables économiques, « World Development Indicators (WDI) » de la Banque mondiale pour les variables socio-démographiques et « Country-level Climate database 1901-2017 » du CERDI CNRS-Université de Clermont Auvergne pour les variables climatiques complétées par les variables climatiques synthétiques de « Global SPEI database.¹ » .

La compilation des différentes données a permis de disposer d'un panel de données annuelles de 47 pays d'Afrique sur une période de 37 ans. Cependant le panel est non cylindré par manque de données de certains pays comme le Sud-Soudan, ayant une existence récente (à partir 2011) et le Liberia, avec la guerre civile sur plusieurs années. Nous disposons donc d'un panel constitué de 47 pays sur 37 périodes temporelles mais dans l'analyse économétrique certains pays ont été exclus pour insuffisance de données.

3.2.1- Variables climatiques : température, précipitations, leurs variances, indice de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) et les zones climatiques

A l'exemple de Barrios et al. (2010), la température et les précipitations ont été utilisées comme variables climatiques. Alors que Barrios et al. (2010) les ont utilisées comme variables explicatives de la production agricole, dans cet article, elles sont utilisées pour expliquer la variation de la croissance par habitant. Dans la plupart des études, ces variables sont déterminées comme moyennes ou totaux nationaux représentatifs de tous les territoires et ce sur les 12 mois de l'année ((Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010) (Brenner & Lee, 2014)). Dans ce travail, nous avons choisi de considérer les variables de température et de pluviométrie dans les zones de production (zones arrosées des territoires nationaux) et pendant les périodes de croissance végétale (pendant les saisons de pluie) compte tenu de leur lien plus avéré à l'activité de production. C'est une approche qui a été déjà utilisée par Burke et al. (2009) dans leur étude sur l'impact des changements climatiques sur le risque de guerre civile en Afrique. Si l'impact de la température sur la croissance est régulièrement prouvé, il convient cependant de se demander comment en Afrique subsaharienne où la valeur ajoutée du secteur agricole reste importante dans la détermination du

¹ <http://spei.csic.es/database.html>

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

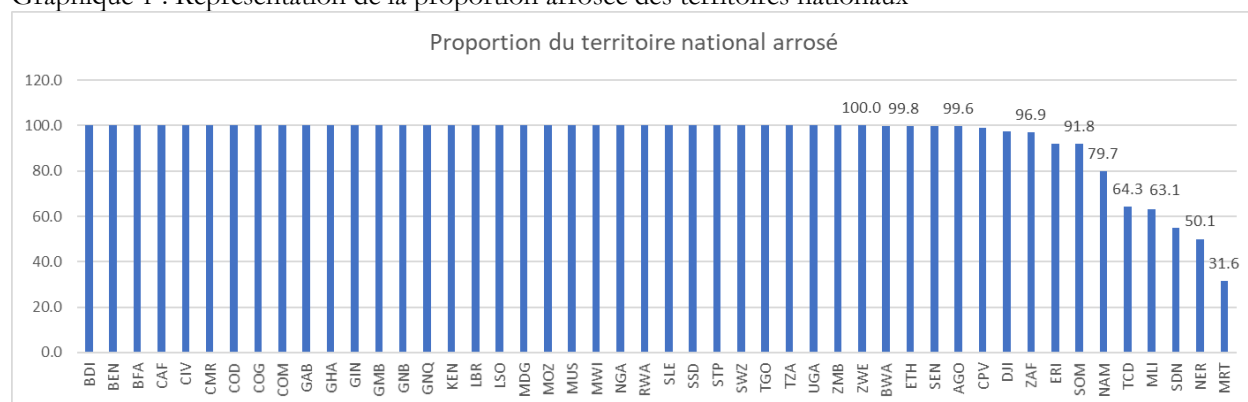
produit intérieur brut, la relation entre pluviométrie et croissance par habitant n'est pas avérée ? Aussi, cette nouvelle détermination de la variable pluviométrique permettra-t-elle de rendre cette relation plus évidente. En guise d'élargissement aux autres phénomènes climatiques ayant un impact sur la production, nous substituons à la température et aux précipitations l'Indice standardisé de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI).

3.2.1.1- La pluviométrie

La base « Country-level Climate database 1901-2017 » présente les données climatiques de tous les pays du monde. Nous y avons extrait les données de 47 pays concernés par l'étude. Chaque pays de la base est composé de zones homogènes ayant des coordonnées GPS et les données mensuelles de variables climatiques. Pour obtenir les valeurs annuelles de la variable pluviométrique, nous avons calculé pour chacune de ces zones le cumul annuel de précipitations dans un premier temps. Sur la base de la valeur des précipitations de plus de 100mm dans les zones homogènes que nous avons calculé la surface arrosée des pays en faisant la somme des surfaces de ces zones homogènes. La variable pluviométrie retenue est alors la valeur des précipitations annuelles totales des zones productives rapportée à la superficie arrosée du pays. Sur la base d'une moyenne de long terme (moyenne de 37 années), il ressort que treize (13) des quarante-sept (47) pays retenus pour l'étude ne sont pas totalement arrosés. Les pays les plus concernés sont les pays situés dans la bande sahélienne à savoir le Tchad, le Mali, le Soudan, le Niger et la Mauritanie dont les zones arrosées varient de 64.3% à 31.6% (voir la figure ci-dessous). Il y a également dans cette catégorie les pays hors bande sahélienne à savoir la Namibie (79.7%), la Somalie (91.8) et l'Afrique du Sud (96,9%).

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Graphique 1 : Représentation de la proportion arrosée des territoires nationaux

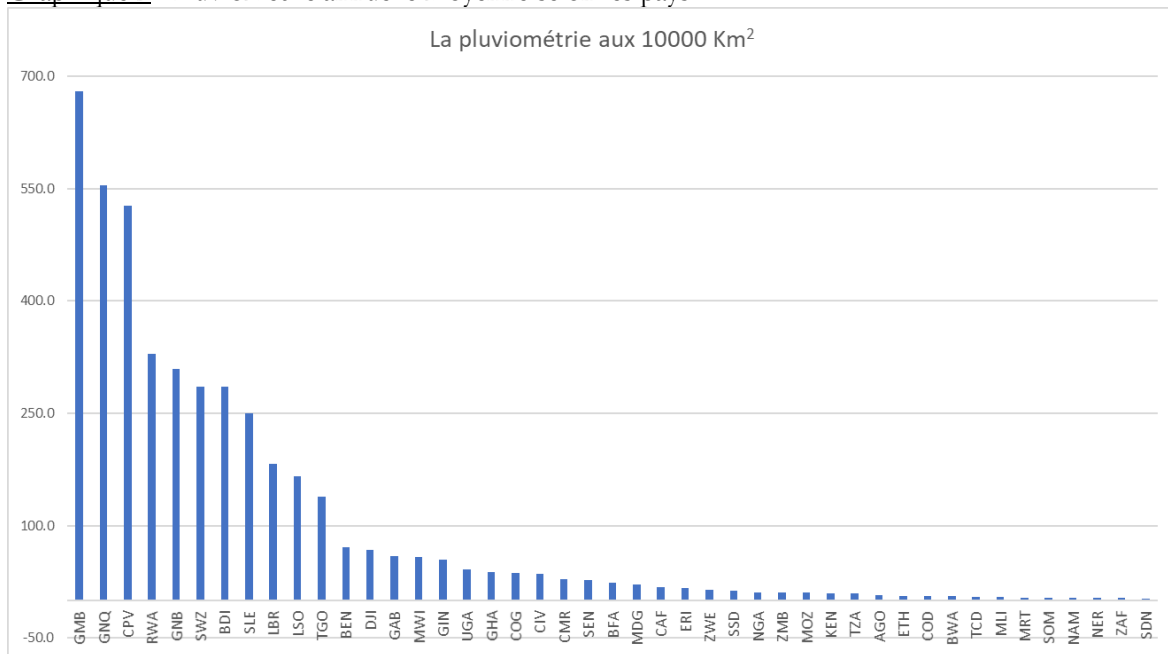


Source : Calcul de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1901-2017 »

Les îles (Comores, Maurice et Madagascar) sont de loin les plus arrosées (elles ont été omises dans le graphique ci-dessous pour permettre aux autres pays d'apparaître). La Gambie, la Guinée équatoriale et le Cap-Vert constituent le 2^e groupe de pays les plus arrosés. Le 3^e groupe est constitué du Rwanda, de la Guinée Bissau, du Swaziland, du Burundi, de la Sierra Leone, du Liberia, du Lesotho et du Togo. Le 4^e groupe de pays le plus arrosé sont constitués des pays sur le graphique allant du Benin, à l'Erythrée. Le 5^e groupe de pays est constitué largement des pays pas totalement arrosés.

La variable pluviométrie retenue pour l'analyse est le ratio pluviométrie (précipitations) sur la superficie exprimée en millimètre au 10000km² de surface.

Graphique 2 : Pluviométrie annuelle moyenne selon les pays



Source : Calcul de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1901-2017 »

3.2.1.2- Zones climatiques

L'analyse des effets des zones climatiques spécifiques aux économies a été rendue possible par l'existence des données climatiques géoréférencées (GIS) répondant ainsi à l'appel de Khawar (2014). Pour apprécier la disparité entre les pays en fonction du niveau de pluviométrie, trois zones pluviométriques ont été créées en plus de la zone de moins de 100 mm de pluviométrie. Dans la littérature, on peut identifier trois zones qui sont la zone de pluviométrie comprise entre 100 et 600 mm, la zone de pluviométrie comprise entre le 600 et 1200 mm et la zone de pluviométrie au-delà de 1200 mm (Keay, 1959), (Rodier, 1964) (Sivakumar, 1989)). Cette délimitation tient compte non seulement de l'homogénéité des conditions climatiques (température, pluviométrie, persistance et extrême variabilité de pluie, vitesse de vent, évapotranspiration, etc.) mais également de leur niveau de contribution à l'évaluation des ressources climatiques pour le développement des cultures et les risques auxquels elles sont exposées (Sivakumar, 1989).

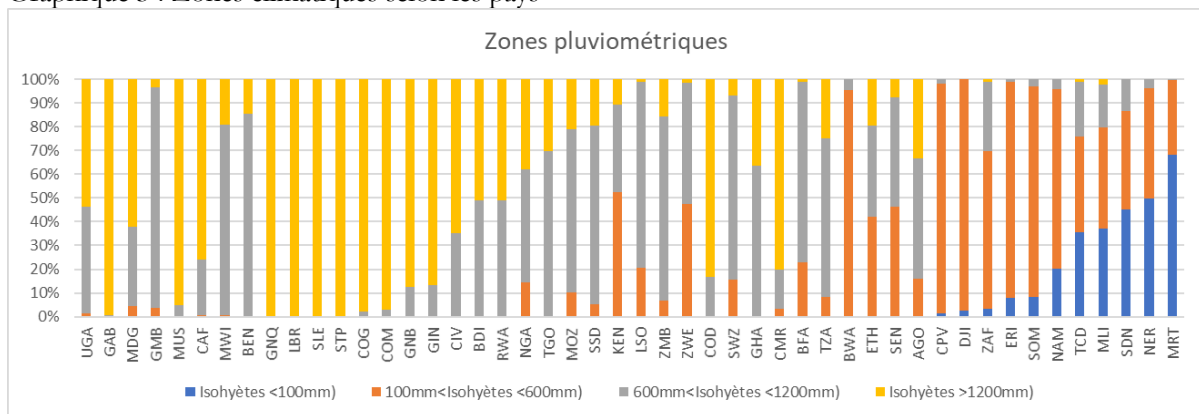
Un pays peut avoir plusieurs zones climatiques (y compris celle d'isohyète <100 mm). Les pays tels que l'Afrique du Sud, le Tchad, le Mali, le Soudan, la Namibie, le Niger, la Somalie et le Cap-Vert, qui disposent des zones d'isohyète 100-600 mm, sont traversés par la zone pluviométrique

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

d'isohyètes comprise entre 600 et 1200 mn ayant les proportions respectives de 29.4%, 23.1%, 18,2%, 13,4, 4%, 3,6%,2,3% et 1%. Le Mali, le Tchad et l'Afrique du Sud sont en plus finement traversés par la zone d'isohyète de plus de 1200 mm (respectivement de 2,3%, 1% et 0,9%).

Parmi les pays totalement arrosés, il y a le Botswana qui est quasi-totalement couvert (>95%) par la zone pluviométrique d'isohyète comprise entre 100 et 600 mm suivi du Kenya dont un peu plus de 50% du sol est traversé par cette isohyète. Les autres pays sont pour la plupart largement couverts par les isohyètes supérieures à 600 mm. Le fait d'être totalement couvert ne garantit donc pas une bonne pluviométrie.

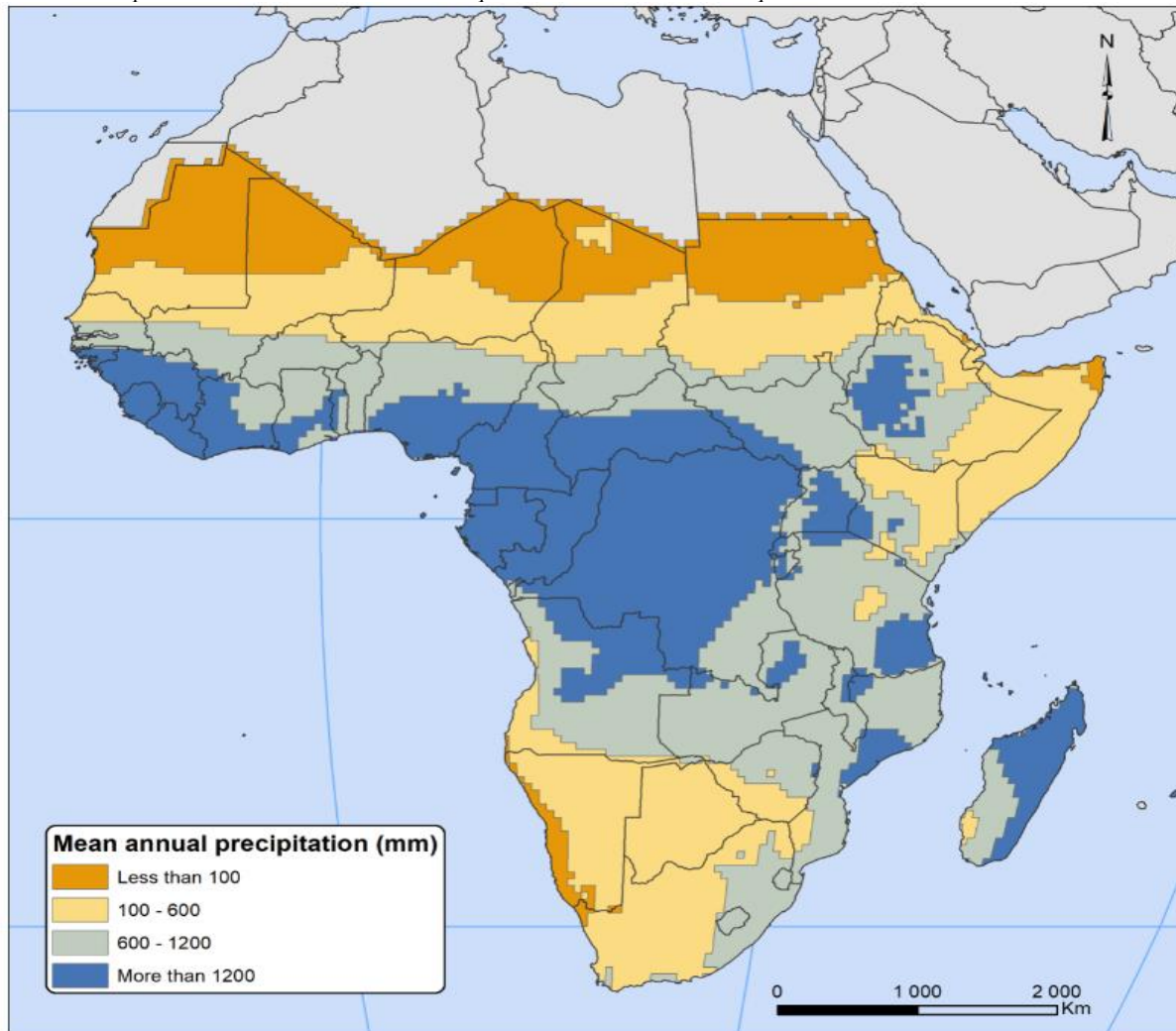
Graphique 3 : Zones climatiques selon les pays



Source : Calcul de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1901-2017 »

Les variables représentant les trois zones climatiques sont les proportions de ces zones climatiques dans les territoires nationaux ou surface du pays. En fonction du niveau de précipitations, de répartition spatio-temporelle au cours d'une année et ce dans chaque pays, ces variables varient dans le temps. Ainsi, les zones climatiques ne correspondent pas forcément aux frontières politiques. La carte 1 ci-après présente la représentation visuelle des zones climatiques en Afrique subsaharienne.

Carte 1 : Représentation des zones climatiques sur la carte de l'Afrique



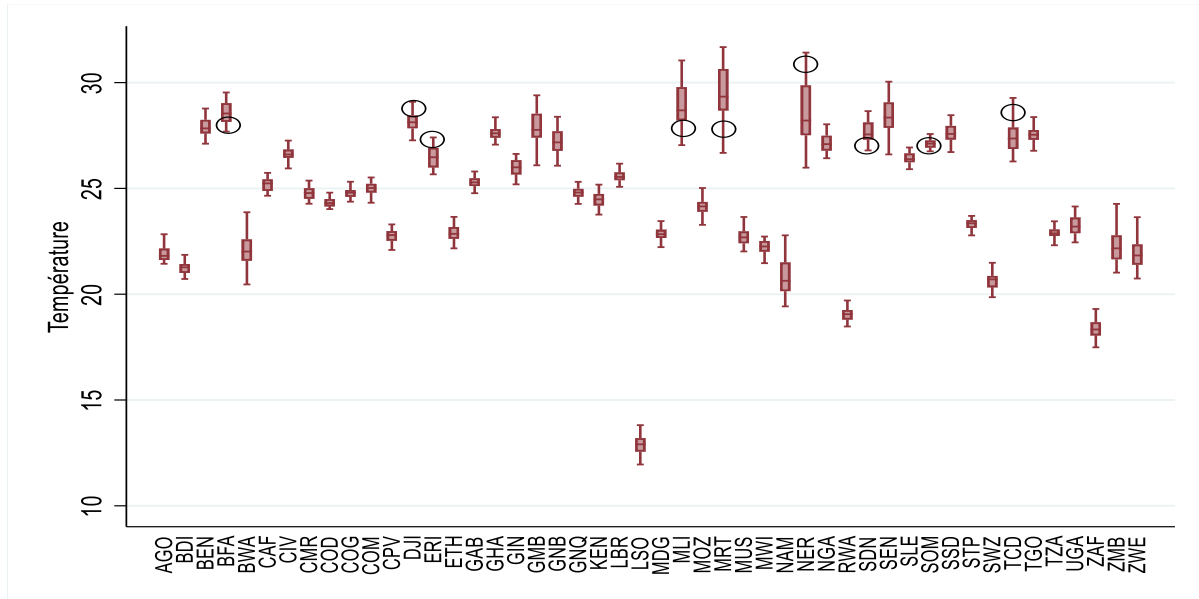
Source: Conception de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1901-2017 » avec l'appui de Olivier Santoni, cartographe au CERDI.

3.2.1.3- La température

La variable température est déterminée de la même manière que la variable pluviométrie c'est -à-dire sur la base des zones homogènes ayant enregistré au moins une pluviométrie annuelle de 100mm. Les températures annuelles sont donc les moyennes des températures dans les zones homogènes durant les mois de pluviométrie non nulle. Il ressort donc que les pays ayant les températures les plus élevées sont ceux du Sahel (en petits cercles sur le graphique ci-dessous).

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Graphique 4 : La température selon les pays



Source : Calcul de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1901-2017 »

Au regard de l'analyse exploratoire ci-dessus, il est difficile de constituer des groupes homogènes de pays en fonction de la pluviométrie et de la position géographique en dehors des pays non totalement arrosés. Les spécificités des pays sont nombreuses et méritent d'être prises en compte. La prise en compte des zones climatiques indépendamment des caractéristiques géographiques spécifiques facilitera donc l'analyse.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 2 : Statistiques descriptives des variables climatiques

Variables	Obs.	Unité	Moyenne	Variance	Min	Max
Température	1,824	Degré Celsius	24.65	3.26	11.95	31.42
Précipitations	1,824	Mm/ 100km ²	5.10	17.26	0.02	128.22
Zone d'isohyète 100-600mm	1,824	%	23.62	32.42	0.00	100.00
Zone d'isohyète 600-1200mm	1,824	%	33.42	32.17	0.00	100.00
Zone d'isohyète de plus de 1200mm	1,824	%	37.73	39.37	0.00	100.00
Variance de la température	1786	Degré Celsius	0.70	1.65	0.01	9.07
Variance de la pluviométrie	1786	Mm/ 100km ²	48.2	145.3	0.213	1118.6

Source : Calcul de l'auteur à partir de « Country-level Climate database 1980-2017 » Note : La température moyenne selon la définition retenue est de 24,7°C pour un minimum de 11.95°C et un maximum de 31.4°C. Les précipitations aux 100km² sont de 5.1mm avec une variance de 17mm et un maximum de 128.2mm. Les zones d'isohyètes 100-600mm, 600-1200mm et de plus 1200mm représentent en moyenne respectivement 23.6%, 33.4% et 37.7% des territoires nationaux avec très fortes variances démontrant la disparité entre pays.

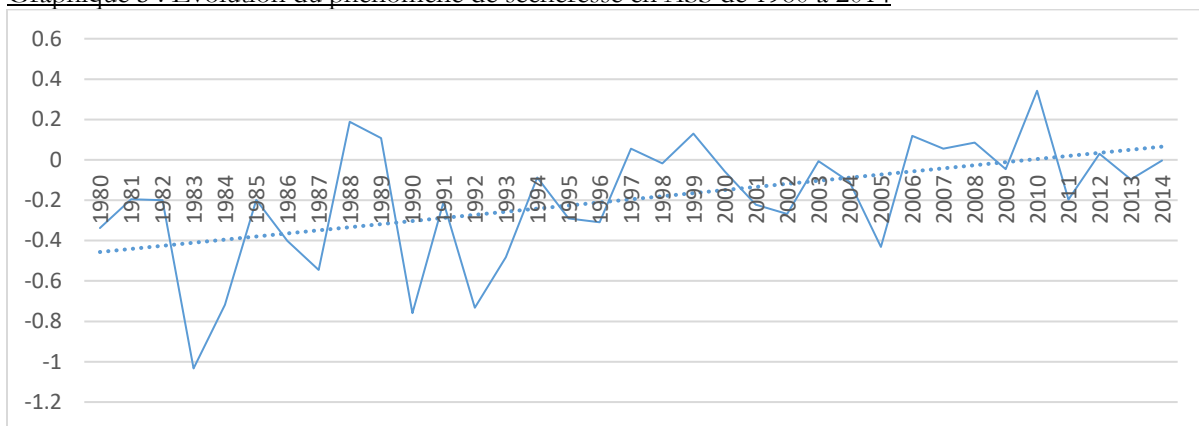
3.2.1.4- Indice d'évapotranspiration et de précipitations standardisé (SPEI)

Le SPEI ou « Standardized Précipitations Evapotranspiration Index » est le tout-dernier indice d'analyse et de suivi de la sécheresse après l'indice de Palmer (PDSI) et le « Standardized Précipitations Index » (SPI). Alors que les autres indices n'accordent pas de poids à l'évapotranspiration, le SPEI lui donne plus de considération. Il prend aussi en compte l'évolution tendancielle et erratique de la température. Cet indice lisse la disparité entre les zones climatiques afin de permettre la comparabilité des pays vis-à-vis du phénomène de sécheresse. Nous estimons qu'il peut être une alternative à l'utilisation de la température et de la pluviométrie comme seules variables climatiques. Dans cette étude, les deux dernières variables sont retenues pour assurer la comparaison des résultats par rapport aux études passées. Compte tenu de sa prise en compte des conditions climatiques plus large, le SPEI peut donner une idée de l'effet non seulement des phénomènes de sécheresse mais climatiques plus large sur la croissance du PIB réel par habitant. Cet indice est glissant de mois en mois et existe sous trois formes, l'indice des variations des trois derniers mois, celui des 6 derniers mois et celui de 12 derniers mois. Nous retenons, à l'exemple

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

de Chhibber et al. (2008), les indices de décembre qui rendent compte des variations sur les 12 mois de l'année. Nous ne disposons malheureusement pas des SPEI par zones homogènes intérieures aux pays considérés dans notre étude comme zones climatiques correspondant à la base « Country-level Climate database 1901-2017 » pouvant permettre de calculer ces indices dans les trois zones d'isohyètes retenues dans l'analyse. Les valeurs négatives de l'indice identifient les périodes de sécheresse et les valeurs positives et les périodes de bonne pluviométrie. Le graphique ci-dessous montre une évolution tendancielle positive des conditions générales de sécheresse en Afrique subsaharienne (variation de faibles amplitudes et tendance croissance de l'indice).

Graphique 5 : Evolution du phénomène de sécheresse en ASS de 1980 à 2014



3.2.2- Variables de contrôle

Sur la base du modèle présenté dans l'équation (3), les variables de contrôle considérées dans ce travail sont les suivantes : Investissement en pourcentage du PIB, taux de croissance de la population, taux brut de scolarisation ((Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010) (Noy, 2009); (Skidmore & H., 2002) ; et (Loayza, Eduardo, & Jamele, 2012)). Ces variables sont définies conformément au modèle de Solow augmenté du capital humain ((Mankiw, Romer, & Weil, 1992); (Artadi & Sala-i-Martin, 2003)). Nous avons intégré dans l'équation 3 les variables pertinentes au regard de la revue de littérature comme variable de contrôle dans l'analyse de la croissance par habitant. Il s'agit de l'ouverture au commerce international (Arabiyat, Mdanat, & Samawi, 2019), la valeur ajoutée de l'agriculture [] (Asom & Ijirshar, 2016), les ressources naturelles en pourcentage des exportations (Isham, Woolcock, Pritchett, & Busby, 2005) et la période post-introduction de la TVA ((Musa & Sanusi, 2013).

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 3 : Synthèse des variables dépendantes et de contrôle du modèle

Variables	Obs.	Unités	Moyenne	Variance	Min	Max
PIB réel par Habitant	1,693	Dollar PPP	3.830,2	4.986,8	276,2	40.015,8
Croissance démographique	1,664	%	2,6	1,3	-020,6	11,9
Investissement	1,603	% PIB	23,0	13,0	0,0	115,1
Taux brut de scolarité	1,743	%	67,0	21,9	3,0	121,16
Exportation des ressources naturelles	1,824	% totale exportation	20.78	31.10	0.00	100
Log Valeur ajoutée du secteur agricole	1,555	% PIB	25.10	14.67	0.89	79.04
Ouverture au commerce international	1,710	% PIB	7.17	24.04	-52.64	465.89
Variable indicative période post-introduction de la TVA	1,486	% période de l'étude	0.58	0.49	0.00	1.00

Source : Calcul de l'auteur à partir des données de « World economic outlook (WEO) database 1980-2017 »

La moyenne de PIB réel par habitant (PIB/Hab) de 1980 à 2017 est de 3.830 dollars par personne en Afrique Subsaharienne avec un minimum de 276,2 dollars et un maximum de 40.015,5 dollars. Le Taux de croissance démographique au cours de cette période est de 2,5%. Le taux d'investissement moyen en pourcentage du PIB réel est de 23% avec une variance relativement élevée (13%) traduisant la diversité de politique d'investissements des pays étudiés. Le taux brut de scolarisation est de 67% et une variance relativement élevée (21.9%) traduisant l'inégale répartition entre pays.

La valeur ajoutée agricole est en moyenne de 25% du PIB mais elle varie de 0,9% à 79% du PIB traduisant une disparité relativement élevée (14.7%). Les ressources naturelles en pourcentage des exportations sont de 20.78% en moyenne et varient entre 0 à 100 % avec une variance de 31%. L'ouverture au commerce international (somme des variations des exportations et des importations divisées par 2 en % du PIB) présente un faible ratio. Sur la période de l'étude, on note que l'Afrique subsaharienne a connu l'introduction de la TVA relativement sur la majeure partie de la période avec une forte variabilité entre les pays. En effet, une proportion de 58% de la période en moyenne connaît l'introduction de la TVA avec un minimum de 0% (il y a des pays qui n'appliquent pas la TVA) et maximum 100% et une variance 49%.

3.2.3- Corrélation Croissance par habitant et variables climatiques

La situation de corrélation entre la croissance par habitant et les variables climatiques, d'une part ; et celles des variables climatiques entre elles, d'autre part ; est résumée dans le tableau 4. Elle rend compte de comment ou dans quel sens chacune des variables climatiques étudiées [peut] est corrélée à la croissance. Il ressort de ce tableau que la température est négativement corrélée à la croissance réelle par habitant (seuil de significativité de 5%) alors que la proportion d'isohyète 100-600mm sur le territoire national, la variance de la pluviométrie et celle de la température et l'indice de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) sont positivement corrélés à la croissance du PIB réel par habitant (au seuil de significativité respectif de 5%, de 7%, 6% et 5%). La pluviométrie, la zone d'isohyètes de plus 600mm ne sont pas corrélées (au seuil de 5%) à la croissance réelle par habitant. La température est négativement corrélée à sa variance, à la pluviométrie et sa variance et à l'isohyète 600-1200mm et au SPEI (au seuil de 1%). La température est positivement corrélée à l'isohyète supérieure à l'isohyète de 1200mm (au seuil de 10%). La pluviométrie est négativement corrélée (au seuil de 1%) à la proportion de la zone d'isohyète 100-600mm et de celle de la zone d'isohyète 600-1200mm (au seuil de 10%) et positivement corrélée (au seuil de 1%) à sa variance (avec un coefficient de 99%), à la variance de la température et la proportion de la zone d'isohyète de plus 1200mm. La variance de la pluviométrie est positivement corrélée à la variance de la température (au seuil de 1%) et à l'isohyète de plus de 1200mm. Elle est cependant négativement corrélée à l'isohyète 100-600mm (au seuil de 1%). La variance de la température est négativement corrélée aux isohyètes 100-600mm et 600-1200mm et positivement corrélée à l'isohyète de plus de 1200mm. La proportion de la zone d'isohyète 100-600mm est négativement corrélée (au seuil de 1%) aux proportions des zones de plus de 600mm et à l'Indice de précipitations et d'évapotranspiration. On peut dire que lorsque les proportions des zones d'isohyètes de plus de 600 mm augmentent, celle d'isohyète de 100-600 mm diminue et inversement. La zone d'isohyète 600-1200 mm est négativement corrélée (au seuil de 1%) à la zone d'isohyète de plus de 1200 mm. L'Indice de précipitation et d'évapotranspiration est positivement corrélé à la zone d'isohyète de plus de 1200 mm.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 4 : Matrice de corrélation du PIB réel par habitant et les variables climatiques.

	Croissance réelle /hab	Température	Pluviométrie	Variance pluviométric	Variance température	Iso 100-600mm	Iso 600-1200mm	Iso > 1200mm	SPEI
Croissance réelle/hab	1								
Température	-0.05 (0.04)	1							
Pluviométrie	0.003 (0.16)	-0.15 (0.00)	1						
Variance pluviométric	0.05 (0.07)	-0.15 (0.00)	0.99 (0.00)	1					
Variance de température	0.05 (0.063)	-0.08 (0.00)	0.95 (0.00)	0.95 (0.00)	1				
Iso 100-600mm	0.05 (0.05)	-0.003 (0.90)	-0.40 (0.00)	-0.39 (0.00)	-0.18 (0.00)	1			
Iso 600-1200mm	-0.05 (0.23)	-0.19 (0.00)	-0.04 (0.10)	-0.037 (0.12)	-0.06 (0.01)	-0.35 (0.00)	1		
Isop1200mm	-0.01 (0.67)	0.04 (0.087)	0.53 (0.00)	0.53 (0.00)	0.33 (0.00)	-0.63 (0.00)	-0.42 (0.00)	1	
SPEI	0.085 (0.002)	-0.125 (0.00)	0.028 (0.27)	0.032 (0.21)	-0.0279 (0.27)	-0.08 (0.00)	-0.04 (0.125)	0.14 (0.00)	1

NB : les chiffres entre parenthèses sont les probabilités de rejet de l'hypothèse de corrélation entre les variables

Source : Calcul de l'auteur

4- Résultats et Analyses

4.1- Résultats des estimations

Dans l'équation 3, la variable investissement est endogène à la croissance par habitant. Il faut noter que le PIB par habitant retardée n'est pas endogène à la croissance par habitant au temps t. Il en est de même des autres variables de contrôle ainsi que des variables qui sont exogènes à la croissance par habitant et des variables climatiques qui lui sont strictement exogènes. Pour l'estimer, nous avons utilisé l'estimateur de doubles moindres carrés pour une prise en compte de l'endogénéité de l'investissement. La base de données utilisée a été transformée en moyennes quinquennales. Elle comporte donc 40 pays sur une période de 17 périodes quinquennales. Les coefficients de variables ouverture au commerce international, la valeur ajoutée agricole, les exportations des ressources naturelles et l'introduction de la TVA doivent être positifs.

Variables	Temp.	Pluvio.	Var temp	Var pluvio	Iso100-600	Iso6001200	Iso>1200
Effets	-	+	Ind.	Ind.	recherché	recherché	recherché

4.1.1- Résultats sur l'échantillon global

Le tableau 5 présente les résultats des estimations de l'équation (3). Nous avons pour mémoire, présenté dans la première colonne les résultats du modèle (sans prise en compte des variables climatiques). On note que le coefficient de PIB par habitant (en log) retardé est négatif et fortement significatif (degré de confiance 99%) traduisant la convergence des économies d'Afrique subsaharienne. L'investissement (%PIB), l'ouverture au commerce international, les exportations des ressources naturelles en pourcentage des exportations totales ont des coefficients positive et fortement significatif (à 99%) traduisant leur caractère déterminant dans l'évolution de la croissance. La période post-TVA présente un coefficient positif et significatif à 5% montrant l'impact positif de l'introduction de la TVA dans les économies africaines comme l'ont montré Musa et al. (2013) dans leur étude portant sur le Nigeria. La valeur ajoutée agricole en pourcentage du PIB présente paradoxalement un coefficient négatif et significatif à 10% de seuil de significativité. Ceci peut traduire une relation non linéaire entre la valeur ajoutée agricole et la croissance. Asom et al. (2016) ont montré pour le Nigeria que la valeur ajoutée agricole n'a pas d'effet significatif sur la croissance. La croissance démographique présente un coefficient positif non significatif.

La colonne (2) présente les résultats des estimations de l'équation (3) avec prise en compte des variables climatiques. Les résultats des estimations de variables de contrôles sont quasi-identiques aux résultats

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

précédents traduisant l'indépendance de ces variables par rapport aux variables climatiques. Le coefficient de la valeur ajoutée agricole est resté négatif sans être significatif.

S'agissant de la relation entre les conditions climatiques et la croissance par habitant, on note que la température présente un effet positif et significatif sur la croissance (au seuil de 99%) alors que sa variance et celle de la pluviométrie ont un effet négatif sur la croissance par habitant (aux seuils respectifs de 99% et 95%). Lorsque la température augmente de 1%, la croissance par habitant augmente de 0.74%. Ce résultat confirme l'effet significatif dans la température sur la croissance mis en évidence par Khawar (2014). Cependant dans son étude, l'effet de la température est négatif alors qu'il est positif dans le nôtre. La divergence de nos résultats pourrait provenir de la définition de nos variables températures. Dans son étude, la température est une moyenne annuelle (relativement plus élevée) alors que dans le présent chapitre, elle est une moyenne de la période de production agricole. Compte tenu de son importance dans la photosynthèse des plantes, la température à un certain degré reste bénéfique pour la croissance végétale et donc bénéfique à la production agricole, l'un des canaux par lequel elle agit sur la croissance par habitant (Barrios, Bazoumana, & Strobl, 2010). La pluviométrie et les zones climatiques ne présentent pas d'effet significatif sur la croissance par habitant. Le résultat de la pluviométrie est en ligne avec celui trouvé par Khawar (2014).

La colonne 3 présente les résultats de l'équation avec prise en compte de l'effet quadratique de la température. Le coefficient du terme quadratique étant négatif et significatif, on en déduit que l'effet de la température est positif jusqu'à une certaine limite avant de devenir négatif. Les résultats pour les autres variables d'intérêt et de contrôle sont restés quasiment identiques à ceux de la colonne 2 mais la scolarisation se révèle d'effet positif et significatif lorsqu'on prend en compte le terme quadratique de la température. La colonne MCO présente les résultats des estimations du modèle en utilisant l'estimateur des moindres carrés ordinaires. Dans ces estimations le terme retardé de la croissance n'est pas significatif. Il en est de la variable démographique et des exportations des ressources naturelles. Les variables d'investissement, de scolarisation, de commerce, la valeur ajoutée agricole, et la TVA sont significatives. Pour les variables de climatiques, on note que la pluviométrie et sa variable sont significatives d'effets respectivement négatif et positif. La température et sa variance et les zones climatiques n'ont pas d'effets significatifs. Ces résultats permettent de comprendre que la prise en compte de l'endogénéité de l'investissement a permis d'affiner les résultats des variables climatiques.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau5 : résultats des estimations du modèle de base

Variables	Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant			
	(1)	(2)	(3)	MCO
Log PIB/Habitant retardé	-0,060*** (0,016)	-0,061*** (0,016)	-0,053*** (0,015)	-0,004 (0,004)
Δ (Log de la population)	0,149 (0,259)	0,120 (0,266)	0,156 (0,269)	-0,069 (0,119)
Log (Invest en %PIB)	0,033*** (0,009)	0,034*** (0,009)	0,037*** (0,010)	0,046*** (0,100)
Log taux de scolarisation brut	0,012 (0,015)	0,008 (0,016)	0,027** (0,037)	0,029*** (0,009)
Ouverture au commerce ((Log Export/PIB+Log Import/PIB)/2)	0,002*** (0,0004)	0,002*** (0,0004)	0,002*** (0,0004)	0,0023*** (0,0002)
Log (Valeur ajoutée de l'agriculture en % PIB)	-0,028* (0,017)	-0,026 (0,017)	-0,004** (0,016)	0,018*** (0,005)
Ressources Naturelles en % exportations	0,0006*** (0,0002)	0,0006*** (0,0002)	0,0006*** (0,0002)	0,00005 (0,00009)
Période post-introduction de la TVA	0,074** (0,034)	0,077** (0,040)	0,008 (0,07)	0,18*** (0,005)
Log(température)		0,736*** (0,255)	5,195** (2,044)	0,0066 (0,023)
Log(température)^2			-0,699** (0,307)	
Log Pluviométrie		0,109 (0,103)	0,153 (0,112)	-0,018** (0,008)
Log Variance pluviométrie		-0,182** (0,088)	-0,186** (0,093)	0,021* (0,012)
Log Variance température		-0,604*** (0,186)	-0,541*** (0,197)	-0,006 (0,010)
Iso 100-600mm en % du territoire		-0,002 (0,0015)	-0,0014 (0,017)	0,00006 (0,0003)
Iso 600-1200mm en % du territoire		-0,0007 (0,002)	-0,000009 (0,002)	0,00011 (0,00023)
Iso > 1200mm en % du territoire		-0,0004 (0,002)	0,0005 (0,0022)	-0,00042 (0,0006)
Observations	531	531	531	533
Pays	40	40	40	...
Instruments	22	29	29	...
Temps (moyenne de)	5ans	5ans	5ans	...
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	...
	KPF=743	KPF=738.8	KPF=815.	R2=0.43
Weak identification test			4	
Hansen Test/Fisher test	0	0	0	F(16,516)=26

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable endogène : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Source : estimations de l'auteur

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

4.1.2- Disparité géographique de la relation entre croissance par habitant et conditions climatiques.

L'importance du déterminant géographique de la croissance économique a été mise en évidence par Gallup and al. (1999) et Khawar (2014) dans l'analyse de l'effet particulier du Tropic sur la croissance économique. Cette étude teste l'importance des quatre zones géographiques en Afrique subsaharienne (zones sahélienne, tropicale, équatoriale et australe). Les résultats des estimations du modèle se trouvent dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Résultats des estimations par zone géographique.²

Variables	Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant					
	(Ensemble)	(Sahel)	(Tropical)	(Equateur)	(Australe1)	(Australe2)
Log PIB/Habitant retardé	-0.061*** (0.016)	-0.122** (0.055)	-0.054* (0.031)	-0.032 (0.058)	-0.054*** (0.015)	-0.057*** (0.013)
Δ (Log de la population)	0.120 (0.266)	-0.246 (0.592)	0.809 (0.939)	0.291** (0.146)	-0.054 (0.338)	0.067 (0.308)
Log (Invest en %PIB)	0.034*** (0.009)	0.039** (0.019)	0.048*** (0.014)	0.023 (0.039)	-0.002 (0.014)	-0.010 (0.016)
Log taux de scolarisation brut	0.008 (0.016)	0.079** (0.035)	0.010 (0.039)	0.012 (0.023)	0.030* (0.017)	0.040* (0.023)
Ouverture au commerce	0.002*** (0.0004)	0.0006*** (0.0002)	0.002** (0.0007)	0.003*** (0.0005)	0.003*** (0.0009)	0.003*** (0.0010)
Log (Valeur ajoutée de l'agriculture en % PIB)	-0.026 (0.017)	-0.004 (0.057)	-0.005 (0.070)	0.004 (0.032)	-0.016 (0.021)	-0.016 (0.020)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0006*** (0.0002)	0.0008 (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0006 (0.0004)	0.0004 (0.0003)	0.0004 (0.0003)
Période post-introduction de la TVA	0.077** (0.040)	0.003 (0.030)	0.066 (0.065)	0.129 (0.092)	0.016 (0.043)	0.018** (0.009)
Log(température)	0.736*** (0.255)	0.529 (0.411)	5.486** (2.305)	-7.984*** (2.821)	0.356 (0.566)	0.048 (0.530)
Log Pluviométrie	0.109 (0.103)	-0.198 (0.292)	0.454* (0.263)	0.118 (0.422)	0.131 (0.097)	0.175* (0.091)
Log Variance pluviométrie	-0.182** (0.088)	-0.026 (0.171)	-0.480* (0.250)	-0.013 (0.296)	-0.225*** (0.097)	-0.215** (0.085)
Log Variance température	-0.604*** (0.186)	-0.698 (0.532)	-4.765** (2.401)	8.049*** (3.114)	-0.228 (0.475)	0.128 (0.486)
Iso 100-600mm en % du territoire	-0.002 (0.0015)	-0.002 (0.0034)	0.014 (0.010)	-0.0019 (0.0034)	0.003 (0.0022)	0.005** (0.0024)
Iso 600-1200mm en % du territoire	-0.0007 (0.002)	0.0012 (0.004)	0.020** (0.010)	-0.0007 (0.0009)	0.004* (0.0023)	0.005** (0.0024)
Iso > 1200mm en % du territoire	-0.0004 (0.002)	0.003 (0.005)	0.020** (0.010)	0.004 (0.002)	0.004 (0.002)	0.006** (0.0025)
Observations	531	84	164	116	167	167
Pays	40	6	13	9	12	12
Instruments	29	29	29	28	29	15
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Weak identification test	KPF=738.8	KPF=137.5	KPF=299.7	KPF=50.3	KPF=358.4	KPF=408.3
Hansen Test	0	0	0	0	0	0

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable endogène : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Source : estimations de l'auteur

Le tableau 6 montre qu'au-delà du phénomène étudié, il existe plusieurs réalités économiques en Afrique subsaharienne selon les zones géographiques :

- Au sahel

² Le terme quadratique de la température n'a pas été utilisé dans ces estimations

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

La convergence des économies des pays du Sahel est plus forte que dans les autres zones géographiques sans nul doute à cause des réalités socio-climatiques plus ou moins partagées. Le coefficient de convergence (coefficient du log du PIB par habitant retardé) est négatif et significatif. Il est plus grand en valeur absolue dans le Sahel par rapport aux autres zones géographiques. La croissance de la population présente un coefficient négatif et non significatif. L'investissement affecte positivement et de manière statistiquement significative la croissance dans le Sahel. Il en est de même du capital humain. En effet, les coefficients de ces variables sont positifs et significatifs au seuil de 5%. L'ouverture au commerce international affecte également positivement et de manière significative la croissance par habitant. Cependant, elle impacte de manière plus faible la croissance par habitant que dans les autres zones géographiques résultat explicable par le caractère continental (pays enclavés) de la plupart de ces pays. Les exportations des ressources naturelles en pourcentage des exportations totales présentent un coefficient non significatif. Il en est de même de la valeur ajoutée du secteur agricole et de l'introduction de la TVA.

S'agissant de la relation entre les variables climatiques (température, pluviométrie et leurs variances) et la croissance par habitant dans cette zone géographique, aucune ne s'est révélée ayant un effet significatif sur la croissance par habitant. Il en est de même des zones climatiques. En effet, le coefficient de chacune de ces variables pris isolement n'est pas significatif.

L'interaction entre la température, la pluviométrie et leurs variances et les zones climatiques d'une part et celle entre les zones climatiques elles-mêmes d'autre part (voir tableau 7) révèle quelques effets statistiquement significatifs. Les zones climatiques agissent sur la croissance par habitant à travers la pluviométrie et sa variance. L'interaction entre la zone d'isohyète de 100-600 mm et la variance de la pluviométrie affecte négativement et de manière statistiquement significative la croissance par habitant. Il en est de même de l'interaction entre cette zone climatique et la variance de la température (voir annexe...). L'interaction entre la zone d'isohyète 600-1200 mm et la pluviométrie impacte négativement et statistiquement significatif la croissance. L'expression quadratique de cette interaction présente un coefficient de signe positif et statistiquement significatif traduisant un effet de seuil de cette interaction. Cette dernière est donc négative jusqu'à un certain seuil et devient positive par la suite. L'interaction entre la température et les zones climatiques ne présente pas d'effet significatif. Il en est de même de l'interaction (additive) entre les zones climatiques elles-mêmes.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 7 Résultats des interactions entre les zones climatiques et autres variables climatiques (1) dans la zone sahélienne :

Variables	Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant								
	Zone Sahélienne								
	(Iso6001200)	(Iso600&>1200)	(Iso>1200)	(Var. Pluvio.1.)	(Var. Pluvio.2.)	(Var. Pluvio.3.)	(Pluviométrie1.)	(Pluviométrie.2)	(Pluviométrie3.)
Log PIB/Habitant retardé	-0,127** (0,056)	-0,127** (0,056)	-0,127*** (0,056)	-0,163*** (0,046)	-0,122** (0,054)	-0,153*** (0,066)	-0,142*** (0,053)	-0,133** (0,053)	-0,128** (0,057)
Log (Invest en %PIB)	0,039** (0,018)	0,039** (0,018)	0,039*** (0,018)	0,049*** (0,016)	0,040*** (0,018)	0,039** (0,017)	0,040** (0,017)	0,047*** (0,017)	0,049** (0,019)
Log taux de scolarisation brut	0,080** (0,034)	0,081** (0,034)	0,081** (0,034)	0,097*** (0,033)	0,074** (0,032)	0,067** (0,034)	0,084*** (0,032)	0,095*** (0,034)	0,081** (0,034)
Ouverture au commerce	0,0005** (0,0002)	0,0005** (0,0002)	0,0006 (0,0002)	-0,0001 (0,0003)	0,0005** (0,0002)	0,0007*** (0,0002)	0,0008 (0,0005)	0,0003 (0,0003)	0,0005** (0,0002)
Ressources Naturelles en % exportations	0,008 (0,0006)	0,008 (0,0006)	0,008 (0,0006)	0,0011** (0,0005)	0,001 (0,0006)	0,009 (0,0006)	0,008 (0,059)	0,0009* (0,0005)	0,008 (0,0006)
Période post-introduction de la TVA	0,009 (0,055)	0,009 (0,052)	0,009 (0,052)	0,081* (0,049)	0,008 (0,032)	0,058 (0,067)	0,014 (0,032)	-0,053 (0,038)	0,0067 (0,031)
Log(température)	0,281 (0,333)	0,515 (0,428)	0,515 (0,428)	0,394 (0,492)	0,503 (0,430)	0,503 (0,420)	0,567 (0,366)	0,644* (0,341)	0,504 (0,438)
Log Pluviométrie	-0,281 (0,334)	-0,281 (0,334)	-0,281 (0,334)	-0,096 (0,361)	-0,251 (0,353)	-346 (0,305)	-0,248 (0,310)	-0,037 (0,325)	-0,262 (0,310)
Log Variance pluviométrie	0,021 (0,198)	0,021 (0,198)	0,021 (0,198)	0,075 (0,222)	0,029 (0,199)	0,007 (0,200)	-0,027 (0,175)	-0,087 (0,183)	-0,0135 (0,191)
Log Variance température	-0,710 (0,528)	-0,710 (0,528)	-0,710 (0,462)	-0,580 (0,515)	-0,678 (0,541)	-0,694 (0,525)	-0,756 (0,471)	-0,868** (0,443)	-0,700 (0,538)
Iso 100-600mm en % du territoire	-0,0013 (0,0014)	-0,0013 (0,0014)	0,004 (0,0075)	-0,020*** (0,005)	-0,002 (0,003)	-0,003 (0,003)	-0,003 (0,003)	-0,003 (0,002)	-0,0025 (0,003)
Iso 600-1200mm en % du territoire	0,003 (0,005)	0,004 (0,003)	0,002 (0,002)	-0,006 (0,0040)	0,003 (0,008)	0,0002 (0,0036)	-0,0019 (0,0035)	-0,0028 (0,003)	-0,0012 (0,004)
Iso > 1200mm en % du territoire	0,003 (0,0014)	- (0,0014)	- (0,0014)	-0,004 (0,004)	0,0025 (0,005)	-0,006 (0,006)	-0,0032 (0,0049)	0,0037 (0,004)	0,0029 (0,005)
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne. ³	-0,0012 (0,004)	-0,0012 (0,004)		-0,002*** (0,0029)			0,001 (0,00006)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne			-0,0012 (0,004)		0,001 (0,001)			-0,0002** (0,0001)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne						-0,006 (0,006)			0,0001 (0,0014)
Observations	84	84	84	84	84	84	84	84	84
Pays	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Instruments	31	31	29	30	30	30	30	30	30
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=262	KPF=205	KPF=174	KPF=262	KPF=205	KPF=174	KPF=141	KPF=143	KPF=137
Hansen Test	0	0	0	0	0	0			

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Source : estimation de l'auteur

³ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Afrique tropicale

Dans cette zone également, le coefficient du PIB par habitant retardé est négatif et statistiquement significatif traduisant une convergence entre les économies de la zone. L'investissement affecte positivement et de manière significative la croissance par habitant. En effet, lorsque l'investissement en pourcentage du PIB augmente de 1%, la croissance par habitant augmente d'environ 0.05%. L'impact de l'investissement dans cette zone est plus important que dans le Sahel (l'élasticité investissement-croissance dans le Sahel est de 0.4%). L'ouverture au commerce international agit également positivement dans cette zone. Son effet est plus important que dans le Sahel. Cette situation se comprend dans la mesure où la plupart des pays de cette zone sont côtiers. Dans cette zone, les exportations des ressources naturelles en pourcentage des exportations totales impactent aussi positivement les économies. C'est la seule zone géographique où l'effet des exportations de ressources naturelles est positif et significatif comparé aux autres zones.

Dans cette zone, toutes les variables climatiques étudiées présentent des effets significatifs sur la croissance par habitant. La température a un effet positif et significatif sur la croissance par habitant. Lorsqu'elle augmente de 1%, la croissance augmente de 5,5% au seuil de 5% toute chose égale par ailleurs. L'effet de l'expression quadratique de la température étant négatif et significatif, on en déduit que la température agit positivement sur la croissance de manière non linéaire jusqu'à un seuil donné et son effet devient nuisible à la croissance à partir de ce seuil. Ce résultat est en ligne avec la plupart des études qui affirment que les hautes températures impactent négativement la croissance par habitant ((Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999) (Khawar, 2014) (Lanzafame, 2016)). Si la température agit positivement sur la croissance jusqu'à un seuil, sa variance impacte négativement et de manière significative la croissance par habitant. En effet, lorsque la variance de la température croît de 1%, la croissance par habitant diminue de près de 5% avec un degré de confiance de 95%. L'effet positif de la température est donc altéré par l'effet négatif de sa variance. La pluviométrie également impacte positivement et de manière statistiquement significative la croissance par habitant. Lorsque la pluviométrie augmente de 1%, la croissance par habitant augmente de 0,45% toute chose égale par ailleurs. Sa variance agit cependant de manière négative et statistiquement significative sur la croissance par habitant. L'importance de la proportion des zones climatiques d'isohyètes de 600-1200 mm et de plus de 1200 mm sur le territoire national pour la croissance par habitant est avérée et ce de manière identique. Lorsque la proportion de chacune de ces isohyètes augmente de 1% toute chose égale par ailleurs, la croissance par habitant augmente de 0.02% au seuil de 5%. L'importance de la proportion de l'isohyète 100-600 mm est sans conséquence sur la croissance. Cependant l'interaction entre cette isohyète et la pluviométrie et sa variance d'une part, l'interaction entre cette zone climatique et la

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

température et sa variance d'autre part⁴ est positive et significative à la croissance par habitant. L'interaction avec les autres zones climatiques est cependant négative à la croissance. L'interaction entre les deux isohyètes de plus de 600mm est positive et significative à la croissance.

⁴ Voir l'annexe 6.7 (page 57) pour cet effet

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 8 : Résultats des interactions entre les zones climatiques et les autres variables climatiques en Afrique tropicale

Variables	Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant								
	Zone Tropicale								
	(Iso6001200)	(Iso600&>1200)	(Iso>1200)	(Var. Pluvio.1.)	(Var. Pluvio.2.)	(Var. Pluvio.3.)	(Pluviométrie1.)	(Pluviométrie.2)	(Pluviométrie3.)
Log PIB/Habitant	-0.50 (0.031)	-0.51* (0.031)	-0.51* (0.031)	-0.097*** (0.022)	-0.051 (0.032)	-0.058* (0.030)	-0.052* (0.030)	-0.051*** (0.031)	-0.050 (0.031)
Log (Invest en %PIB)	0.048*** (0.015)	0.047*** (0.014)	0.047*** (0.014)	0.044*** (0.013)	0.046*** (0.016)	0.039** (0.016)	0.049*** (0.014)	0.047*** (0.015)	0.048*** (0.015)
Log taux de scolarisation brut	0.011 (0.041)	0.013** (0.041)	0.013** (0.041)	0.009 (0.033)	0.013 (0.042)	0.008 (0.044)	0.024 (0.042)	0.012 (0.041)	0.011 (0.041)
Ouverture au commerce	0.0018** (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0017*** (0.0006)	0.0017** (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0018 (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0018** (0.0007)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0014** (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0014** (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0012** (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0013** (0.0006)	0.0014** (0.0006)
Période post-introduction de la TVA	0.072 (0.066)	0.075 (0.065)	0.075 (0.065)	0.124** (0.053)	0.078 (0.068)	0.101 (0.068)	0.053 (0.065)	0.075 (0.065)	0.072 (0.066)
Log(température)	5.255** (2.347)	5.402** (2.319)	5.402** (2.319)	6.294*** (2.361)	5.443** (2.345)	5.774** (2.422)	5.723** (2.311)	5.345** (2.336)	5.255** (2.347)
Log Pluviométrie	0.282 (0.282)	0.304 (0.253)	0.304 (0.253)	-0.306 (0.332)	0.319 (0.270)	0.301 (0.266)	0.246 (0.279)	0.298 (0.250)	0.282 (0.248)
Log Variance pluviométrie	-0.309 (0.230)	-0.343 (0.233)	-0.343 (0.233)	-0.109 (0.270)	-0.362 (0.261)	-0.323 (0.256)	-0.293 (0.248)	-0.335 (0.230)	-0.309 (0.230)
Log Variance température	-4.555* (2.393)	-4.793** (2.377)	-4.793** (2.377)	-6.150** (2.409)	-4.835** (2.401)	-5.247** (2.463)	-5.029** (2.248)	-4.711** (2.391)	-4.555* (2.393)
Iso 100-600mm en % du territoire	0.013 (0.010)	-0.005 (0.039)	0.0134 (0.010)	-0.0049 (0.009)	0.014 (0.010)	0.016 (0.010)	0.014 (0.010)	0.014 (0.010)	0.013 (0.010)
Iso 600-1200mm en % du territoire				0.017* (0.009)	0.019* (0.010)	0.020** (0.010)	-0.019* (0.010)	0.019* (0.010)	0.018* (0.010)
Iso > 1200mm en % du territoire	0.018** (0.010)	0.019** (0.010)	0.00003 (0.010)	0.018** (0.009)	0.020* (0.010)	0.023** (0.010)	-0.019* (0.010)	0.019* (0.010)	0.018* (0.010)
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne 5	-0.00006 (0.00004)	-0.019** (0.010)		0.007*** (0.0015)			0.0004** (0.00016)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne			0.0019** (0.010)		0.00016 (0.0007)			-0.00002 (0.00003)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne						-0.0010 (0.0008)			-0.00005 (0.00003)
Observations	164	164	164	164	164	164	164	164	164
Pays	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Instruments	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=318	KPF=205	KPF=311	KPF=501	KPF=327	KPF=376	KPF=372	KPF=317	KPF=137
Hansen Test	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

⁵ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Afrique équatoriale

Au regard de nos variables de contrôle, les pays de l'équateur bénéficient de manière statistiquement significative de l'ouverture au commerce internationale et de la croissance démographique (aux seuils respectifs de 99% et 95%). L'effet de l'ouverture au commerce international est plus important que dans le sahel et la zone tropicale. Lorsque la population croît de 1%, la croissance par habitant croît d'environ 0,3%. Cependant du côté de la convergence de ses économies, de l'investissement, du capital humain, de la valeur ajoutée du secteur agricole et des exportations des ressources naturelles, les effets ne sont pas significatifs.

Du côté des variables climatiques, seule la température et sa variance agissent de manière statistiquement significative (au seuil de 99%) sur la croissance par habitant. La température a un effet négatif alors que sa variance a un effet positif sur la croissance. En effet, lorsque la température augmente de 1% toute chose égale par ailleurs, la croissance par habitant diminue de près de 8%. C'est la seule zone où l'effet négatif net de la température est observé. Cependant lorsque sa variance augmente de 1%, la croissance par habitant augmente d'un peu plus de 8%. Notons que la plupart des pays de cette zone sont totalement arrosés et se trouvent dans l'isohyète de plus de 1200mm. L'interaction entre l'isohyète 100-600 mm et la variance de la température impacte positivement et de manière significative à la croissance. Il en est de même de l'interaction entre l'isohyète 600-1200 mm et la pluviométrie (voir le tableau 9). Les interactions entre les isohyètes elles-mêmes d'une part et entre les isohyètes et la température et sa variance d'autre part n'ont pas d'effet significatif sur la croissance (voir annexe ...).

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 9 : Résultats des interactions entre les zones climatiques et les autres variables climatiques en Afrique équatoriale

Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant									
Afrique équatoriale									
Variables	(Iso6001200)	(Iso600&>1200)	(Iso>1200)	(Var. Pluvio.1.)	(Var. Pluvio.2.)	(Var. Pluvio.3.)	(Pluviométrie1.)	(Pluviométrie.2)	(Pluviométrie3.)
d.log(Pop)	0.287** (0.146)	0.295** (0.149)	0.287** (0.146)	0.286** (0.145)	0.287** (0.147)	0.287** (0.147)	0.281* (0.149)	0.288** (0.139)	0.292** (0.141)
Ouverture au commerce	0.0033*** (0.0006)	0.0033*** (0.0006)	0.0033*** (0.0006)	0.0033*** (0.0005)	0.0032*** (0.0006)	0.0032*** (0.0006)	0.0032*** (0.0006)	0.0032*** (0.0006)	0.0032*** (0.0006)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0007 (0.0004)	0.0006 (0.0004)	0.0007 (0.0004)	0.0007* (0.0004)	0.0008* (0.0005)	0.0009* (0.0005)	0.0007* (0.0004)	0.0007* (0.0004)	0.0007 (0.0004)
Log(température)	-8.214*** (3.048)	-8.175*** (3.061)	-8.214*** (3.048)	-7.514** (3.129)	-7.122** (3.480)	-6.560* (3.545)	-7.785** (3.235)	-7.785*** (3.027)	-8.257*** (3.125)
Log Pluviométrie	0.034 (0.388)	0.052 (0.388)	0.034 (0.388)	0.134 (0.354)	-0.014 (0.094)	-0.031 (0.370)	0.015 (0.388)	0.0032 (0.315)	0.037 (0.390)
Log Variance pluviométrie	0.034 (0.388)	0.036 (0.305)	0.047 (0.304)	-0.065 (0.272)	0.049 (0.296)	0.104 (0.283)	0.046 (0.299)	0.0032 (0.314)	0.014 (0.316)
Log Variance température	8.286** (3.325)	8.265** (3.347)	8.286** (3.325)	7.569** (3.348)	7.063* (3.924)	6.439 (4.003)	7.879** (3.532)	7.922** (3.254)	8.360** (3.365)
Iso 100-600mm en % du territoire	-0.015 (0.0025)	-0.0015 (0.0025)	-0.0014 (0.0025)	-0.0051* (0.003)	-0.0031 (0.003)	-0.004 (0.0035)	-0.0019 (0.0028)	-0.0027 (0.003)	-0.003 (0.0031)
Iso 600-1200mm en % du territoire				-0.0011 (0.0010)	-0.0022 (0.002)	0.0029 (0.0024)	-0.0008 (0.0009)	-0.012 (0.0011)	-0.0010 (0.0010)
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne 6	-	-2460.231 (2283.289)	-	0.010*** (0.004)			-0.00008 (0.00009)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne			-		0.0004 (0.0006)			0.00009* (0.00006)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne						-0.0006 (0.0006)			-0.00007 (0.00007)
Observations	164	164	164	116	116	116	116	116	116
Pays	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Instruments	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=50	KPF=49	KPF=50	KPF=54	KPF=54	KPF=48	KPF=48	KPF=50	KPF=49
Hansen Test	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

⁶ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Afrique australe

Dans cette zone géographique, les résultats ne sont pas les mêmes surtout du point de vue des conditions climatiques. La colonne australe¹ présente le modelé avec prise en compte de l'effet temporel et la colonne australe² présente les résultats sans pris en compte du temps. Le deuxième modèle présente les résultats qui montrent une certaine homogénéité plus forte entre les pays de la zone. En effet, sur le plan économique, on observe une convergence des économies. Le coefficient du PIB par habitant retardé est de signe négatif comme attendu et statistiquement significatif. L'effet du capital humain sur la croissance par habitant est positif et significatif. Il en est de même de l'effet de l'introduction de la TVA et de l'ouverture au commerce international. On note cependant que la croissance démographique, l'investissement, la valeur ajoutée du secteur agricole et les exportations des ressources naturelles n'ont pas d'effet statistiquement significatif sur la croissance du PIB par habitant.

Pour ce qui est des variables climatiques, la pluviométrie et sa variance présentent des effets statistiquement significatifs sur la croissance par habitant (aux seuils respectifs de 95 et 99%). La pluviométrie impacte positivement la croissance alors que sa variance agit négativement sur cette croissance. En effet lorsque la pluviométrie augmente de 1% toute chose égale par ailleurs, la croissance par habitant augmente de 0,175%. Mais lorsque la variance de la pluviométrie augmente de 1% toute chose égale par ailleurs, la croissance par habitant diminue de 0,215%. En Afrique australe, on note cependant que la température et sa variance n'ont pas d'effet significatif sur la croissance par habitant. Les interactions entre les isohyètes 100-600 et 600-1200, les isohyètes 600-1200 mm et supérieure à 1200mm ainsi qu'entre les trois isohyètes sont positives et statistiquement significatives pour la croissance. Il en est de même de l'interaction entre l'isohyètes 600-1200 mm et la température. L'interaction entre l'isohyète 100-600mm en revanche impacte négativement (statistiquement significative) sur la croissance par habitant. On peut donc dire que la coexistence de l'isohyète 100-600mm avec l'isohyète 600-1200mm, celle de l'isohyète 600-1200mm avec celle de plus de 1200mm ou celle des trois isohyètes est bénéfique à la croissance par habitant. En revanche l'existence unique de l'isohyète 100-600mm dans un pays est négative à la croissance par habitant. Les interactions entre les isohyètes et la pluviométrie, la variance de la pluviométrie et la variance de la température ne présentent pas de coefficients significatifs.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Tableau 10 : Résultats des interactions entre les zones climatiques et les autres variables climatiques en Afrique australe

Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant									
Afrique australe									
Variables	(Iso6001200)	(Iso600&>1200)	(Iso>1200)	(Var. Pluvio.1.)	(Var. Pluvio.2.)	(Var. Pluvio.3.)	(Pluviométrie1.)	(Pluviométrie.2)	(Pluviométrie3.)
Log PIB/Habitant	-0.54*** (0.015)	-0.54*** (0.015)	-0.54*** (0.015)	-0.054*** (0.015)	-0.053*** (0.015)	-0.052*** (0.015)	-0.055*** (0.015)	-0.054*** (0.015)	-0.055*** (0.015)
Log (Invest en %PIB)	-0.0009 (0.014)	-0.0009 (0.014)	-0.0009 (0.014)	-0.0010 (0.014)	-0.0008 (0.015)	-0.0008 (0.015)	0.0009 (0.014)	0.0009 (0.014)	0.0013 (0.014)
Log taux de scolarisation brut	0.031* (0.016)	0.031* (0.016)	0.031* (0.016)	0.032** (0.016)	0.028 (0.018)	0.028 (0.017)	0.030* (0.016)	0.031* (0.016)	0.029* (0.017)
Ouverture au commerce	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0030*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)	0.0029*** (0.0009)
Log(température)	0.225 (0.562)	0.325 (0.562)	0.325 (0.562)	0.414 (0.550)	0.278 (0.559)	0.471 (0.585)	0.329 (0.563)	0.322 (0.564)	0.305 (0.560)
Log Pluviométrie	0.146 (0.113)	0.146 (0.113)	0.146 (0.113)	0.162 (0.125)	0.129 (0.106)	0.155 (0.118)	0.134 (0.110)	0.149 (0.114)	0.138 (0.108)
Log Variance pluviométrie	-0.239** (0.099)	-0.239** (0.099)	-0.239** (0.099)	-0.241** (0.102)	-0.236** (0.098)	-0.270** (0.114)	-0.219** (0.095)	-0.242** (0.100)	-0.236** (0.095)
Log Variance température	-0.206 (0.476)	-0.206 (0.476)	-0.206 (0.476)	-0.294 (0.449)	-0.158 (0.474)	-0.349 (0.493)	-0.181 (0.484)	-0.203 (0.478)	-0.158 (0.489)
Iso 100-600mm en % du territoire	-0.011** (0.0005)	-0.011** (0.0005)	-0.0032 (0.0021)	0.003 (0.0021)	0.003 (0.0022)	0.003 (0.0022)	0.034 (0.022)	0.032 (0.021)	0.036* (0.022)
Iso 600-1200mm en % du territoire				0.004 (0.0024)	0.005** (0.0021)	0.004** (0.0021)	0.0043* (0.022)	0.0043* (0.022)	0.0048** (0.022)
Iso > 1200mm en % du territoire	0.004* (0.023)	-0.00025 (0.0007)	-0.0003 (0.0007)	0.0034 (0.0026)	0.0041* (0.0024)	0.0030 (0.0027)	0.004* (0.0004)	0.004* (0.0023)	0.0045** (0.0022)
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne.7	0.0042* (0.0022)	0.0042* (0.0022)		-0.00014 (0.0003)			-0.0004 (0.00004)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne			0.0042* (0.0022)		-0.0110 (0.0002)			-0.000007 (0.00002)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne						0.0003 (0.0003)			0.00006 (0.00003)
Observations	167	167	167	167	167	167	167	167	167
Pays	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Instruments	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=358	KPF=258	KPF=358	KPF=373	KPF=346	KPF=345	KPF=355	KPF=370	KPF=356
Hansen Test	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable : Log Investissement %PIB

Variables explicatives considérées exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

⁷ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

4.2- Effets de l'Indice standard des précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) sur la croissance par habitant.

Dans cette partie, nous cherchons à mettre en évidence l'effet éventuel de l'indice standard des précipitations et d'évapotranspiration (variable climatique synthétique) sur la croissance par habitant, en lieu et place de la température, de la pluviométrie et de leurs variances. Le tableau 11 présente les résultats des estimations pour l'ensemble de l'échantillon et par zone géographique. La colonne Sahel 1 est un rappel des résultats des estimations du modèle avec les variables températures, pluviométrie et leurs variances sur un même nombre d'observations que les résultats du modèle dans la colonne Sahel 2 où le SPEI remplace ces variables (les données de la SPEI s'arrêtent à 2014).

Pour les variables de contrôle, le remplacement de la température, des précipitations et de leurs variances par la SPEI ne fait pas apparaître pleinement les effets significatifs des variables de contrôles largement mis en évidence dans les résultats de base. En effet, les résultats statistiquement significatifs et stables (dans le modèle avec le SPEI) portent sur les coefficients de l'ouverture au commerce international. Cette dernière impacte positivement la croissance par habitant dans l'ensemble de l'échantillon et dans chaque zone géographique. Son effet est plus important dans la zone tropicale, et plus faible dans la zone sahélienne que dans les autres zones. Le coefficient de convergence des économies est significatif dans l'ensemble de l'échantillon et dans les zones sahéliennes et australes mais pas dans les zones tropicale et équatoriale. L'investissement présente un coefficient positif et significatif dans l'ensemble de l'échantillon et dans la zone tropicale mais son coefficient n'est pas significatif dans les zones sahéliennes, équatoriale et australe. La croissance démographique présente une relation positive et significative que dans la zone équatoriale. Le capital humain ne présente un coefficient significatif que dans le sahel. Les exportations des ressources naturelles en % des exportations totales présentent un coefficient significatif dans l'ensemble de l'échantillon et dans la zone tropicale. L'introduction de la TVA ne présente un effet positif sur la croissance que dans la zone tropicale. Et la valeur ajoutée agricole ne présente aucun effet significatif.

En tant que variable climatique, l'indice standard de précipitations et d'évapotranspiration ne présente pas d'effet significatif dans l'ensemble de l'échantillon et dans les zones autres que le Sahel. C'est donc dans le sahel que cette variable synthétique impacte positivement et de manière statistiquement significative la croissance par habitant alors que la température, la pluviométrie et leurs variances ne présentent pas d'effet significatif sur la croissance dans cette zone. On peut donc dire que les conditions climatiques dans le Sahel qui affectent la croissance par habitant recouvrent une réalité plus large qui ne se limite pas seulement à la température, à la pluviométrie et à leurs variables. L'évolution tendancielle positive (voir l'évolution de la

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

courbe dans la partie descriptive) de l'indice montre une amélioration de ces conditions qui ne peuvent être bénéfique à la croissance dans le futur.

En présence de l'indice synthétique climatique (SPEI), les zones climatiques présentent d'effet statistiquement significatif et positif que dans la zone tropicale.

Tableau 11 : Interaction entre SPEI et zones climatiques

Variables	Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant					
	(Ensemble)	(Sahel1)	(Sahel)	(Tropical)	(Equateur)	Australe
Log PIB/Habitant retardé	-0.063*** (0.020)	-0.144** (0.064)	-0.107** (0.052)	-0.015 (0.042)	-0.011 (0.042)	-0.079*** (0.022)
d.(Log de la population)	0.201 (0.256)	-0.699 (0.617)	-0.666 (0.538)	0.918 (0.937)	0.320** (0.153)	0.107 (0.450)
Log (Invest en %PIB)	0.031*** (0.0092)	0.030 (0.022)	0.017 (0.014)	0.041*** (0.013)	0.030 (0.029)	-0.015 (0.015)
Log taux de scolarisation brut	0.006 (0.019)	0.110*** (0.039)	0.069* (0.038)	-0.060 (0.059)	0.031 (0.031)	0.024 (0.023)
Ouverture au commerce	0.0018*** (0.0004)	0.00046** (0.00023)	0.0007*** (0.00015)	0.002*** (0.0007)	0.0034*** (0.0006)	0.0035*** (0.0010)
Croissance Valeur ajoutée de l'agriculture en % PIB	-0.028 (0.020)	0.0013 (0.057)	-0.023 (0.053)	0.033 (0.079)	0.0040 (0.0039)	-0.0076 (0.023)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0006*** (0.0002)	0.0009* (0.0005)	0.0005 (0.0005)	0.0013** (0.0006)	0.0009 (0.0006)	0.0005 (0.0004)
Période poste Introduction de la TVA	0.081 (0.038)	0.034 (0.027)	0.043 (0.028)	0.172** (0.072)	0.084 (0.072)	0.068 (0.060)
Log(température)	...	0.080 (0.581)	...	...	...	...
Log Pluviométrie	...	-0.474 (0.381)	...	...	...	...
Log Variance pluviométrie	...	0.202 (0.240)	...	...	...	...
Log Variance température	...	-0.267 (0.713)	...	...	...	...
SPEI	-0.010 (0.013)		0.098** (0.045)	-0.031 (0.024)	-0.0038 (0.028)	0.0009 (0.011)
Iso 100-600mm en % du territoire	0.0009 (0.0019)	-0.0002 (0.003)	-0.004 (0.0043)	0.129*** (0.044)	-0.0022 (0.0022)	0.0002 (0.0021)
Iso 600-1200mm en % du territoire	0.0013 (0.002)	0.002 (0.002)	-0.009 (0.006)	0.132*** (0.043)	-0.0010 (0.0010)	0.00015 (0.0023)
Iso > 1200mm en % du territoire	0.0015 (0.0025)	0.007 (0.005)	-0.007 (0.0069)	0.0132*** (0.043)		-0.0007 (0.0029)
Observations	442	79	79	131	92	140
Pays	35	6	6	10	8	11
Instruments	25	28	25	25	24	25
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	675	79	186	341	68	235
Hansen Test	0	0	0	0	0	0

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Variable endogène : Log Investissement %PIB instrumenté par son retard

Variables explicatives exogènes : toutes les autres variables

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

4.1.3- Test de contrôle

La croissance économique et l'investissement sont interdépendants dans l'analyse économique. Dans notre analyse également, l'investissement qui est l'une des variables explicatives est le seul à être endogène. Son expression retardée a été considérée comme son instrument ce qui rend l'équation parfaitement identifiée (nombre d'instruments égal au nombre de variables explicatives endogènes). Pour apprécier la qualité de la

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

variable instrumentale, nous ne nous sommes pas contentés que de la valeur de la statistique de Fisher (seuil de significativité $F > 10$) issue de la première estimation. Nous avons considéré aussi le test de faiblesse d'identification de Stock–Yogo (2005) construit sur la base la statistique Cragg–Donald qui est plus restrictive (KPF seuil de significativité à 10% > 16). Les statistiques rapportées dans les tableaux des résultats attestent bien de la qualité de l'instrument utilisé. Dans les équations estimées, l'option « robust » a été choisie pour contrôler l'hétéroscédasticité des variances des résidus. Comme proposé par Baum et al. (2005), nous avons ajouté l'option “bandwidth” (bw) pour rendre les résidus homoscédastiques et non autocorrélés (« HAC »). Pour apprécier les résultats donnés après utilisation des doubles moindres carrés, nous avons appliqué au modèle de base l'estimateur moindres carrés ordinaires. L'utilisation des doubles moindres carrés a permis une meilleure prise en compte de l'endogénéité de la variable investissement permettant ainsi d'affiner les effets de toutes les variables explicatives par rapport aux résultats avec utilisation des moindres carrés ordinaires (voir les résultats du tableau 5).

5. Conclusion

La présente étude confirme l'existence d'une relation de court terme entre les conditions climatiques et la croissance par habitant en Afrique subsaharienne mise en lumière dans la littérature. La prise en compte de plusieurs variables climatiques dans l'étude a permis de comprendre cette relation de manière plus élargie.

En Afrique subsaharienne la température agit sur la croissance par son évolution moyenne et sa variance. En évolution moyenne, elle affecte positivement la croissance jusqu'à un seuil et devient nuisible par la suite. L'effet positif de la température sur la croissance est avéré pour les pays développés mais son effet négatif est largement évoqué dans les pays en développement ? L'effet positif relevé dans cette étude peut provenir du fait que la température a été considérée sur la période de croissance végétale. L'étude a permis également de confirmer de manière empirique l'effet négatif de la variance de la température sur la croissance par habitant. La pluviométrie cependant n'impacte la croissance par habitant que par sa variance et ce négativement. C'est un résultat pas encore évoqué dans la littérature. On note également qu'au niveau global de l'Afrique subsaharienne, les zones climatiques en proportion des territoires n'affectent pas la croissance par habitant.

La déclinaison de l'analyse par zone géographique montre une disparité claire des effets de variables climatiques sur la croissance par habitant comme évoqué dans la littérature (Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999) (Khawar, 2014). Dans la zone sahélienne, les variables climatiques (température, pluviométrie ou zones climatiques) prises isolément n'affectent pas la croissance par habitant. Mais en termes d'indice synthétique avec prise en compte des réalités climatiques plus larges, elles se révèlent un déterminant positif de la croissance par habitant. Dans la zone tropicale, la température agit positivement sur la croissance par habitant jusqu'à un seuil et devient nuisible par la suite. Sa variance et celle de la pluviométrie affectent cependant négativement la croissance. L'effet des zones climatiques (d'isohyètes supérieures à 600 mm) dans cette zone est positif et significatif. Dans la zone équatoriale, seule la température et sa variance agissent de manière statistiquement significative (au seuil de 99%) sur la croissance par habitant. La température a un effet négatif significatif alors que sa variance a un effet positif et significatif. C'est la seule zone où l'effet négatif net de la température est observé. Dans la zone australe, ce sont les effets de la pluviométrie et des zones climatiques qui sont avérés. La pluviométrie impacte positivement la croissance alors que sa variance agit négativement sur celle-ci. Quant aux zones climatiques, elles agissent positivement et de manière statistiquement significative sur la croissance.

Au-delà de la relation entre les conditions climatiques et la croissance par habitant étudiée, il existe des réalités économiques diverses et variées en Afrique subsaharienne mises en évidence. Alors que la convergence des économies d'Afrique subsaharienne est fortement significative (degré de confiance 99%) dans l'ensemble de l'échantillon, la zone équatoriale ne présente pas de convergence des économies de ces

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

pays membres. L'investissement, l'ouverture au commerce international, les exportations des ressources naturelles ont des effets positifs et fortement significatifs (à 99%) sur la croissance. L'introduction de la TVA en Afrique subsaharienne a été également positive à la croissance.

Ces résultats montrent que les politiques publiques visant à redresser tant les problèmes économiques que climatiques ne devraient pas être conçues seulement sur la base des études régionales. Elles doivent tenir compte des spécificités de certaines économies. En effet, les politiques d'adaptation aux phénomènes climatiques ne devraient pas être les mêmes dans les zones géographiques. Dans le sahel, par exemple, où les conditions climatiques impactant la croissance par habitant sont multiples, les politiques d'adaptation devraient tenir compte de la multiplicité des conditions pour être plus efficaces. Les autres zones géographiques ont également chacune des spécificités à considérer dans la définition des politiques.

6. Bibliographie

- Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. (2004, May). Institutions as a fundamental cause of long-run growth. *NBER Working paper serie*.
- Arabiyat, T. S., Mdanat, M., & Samawi, G. (2019, May). Trade openness, inclusive growth, inequality: evidence from Jordan. *Journal Of Developing Areas*.
- Artadi, E. V., & Sala-i-Martin, X. (2003). *The Economic Tragedy of the XXth Century: Growth in Africa*. NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH.
- Asom, S. T., & Ijirshar, V. U. (2016, January). Impact of Agriculture Value Added on the Growth of Nigerian Economy. *Nigerian Journal of Management Sciences: A Multi-disciplinary Edition*.
- Auffhammer, M. S., & Mansur, E. T. (2012). *Measuring climatic impacts on Energy expenditure: A review of the Empirical Literature*. Dartmouth website.
- Barrios, S., Bazoumana, O., & Strobl, E. (2010). Impact on climatic change on agricultural production: is it different for Africa? *Science Direct*.
- Bond, S., Hoeffler, A., & Temple, J. (2001). *GMM Estimation of Empirical Growth Models*. UK.
- Brenner, T., & Lee, D. (2014). Weather conditions and economic growth: is productivity hampered by climate change? *Working paper on innovation and espace*.
- Bruckner, M., & Ciccone, A. (2011). *Rain and the Democratic Window of opportunity*. Econometrica.
- Burke, M. B., Miguel, E., Satyanath, S., Dykema, J. A., & Lobell, D. B. (2009). *Warming increases the risk of civil war in Africa*. Proceeding of the National Academy of Science.
- Burke, M. J., & Leigh, A. (2010). *Do output contractions triggers Democratic change*. American Economic Journal: Macroeconomics.
- Cachon, G., Gallino, S., & Olivares, M. (2012). *Severe weather and automobile assembly production*. Pennsylvania: The Wharton school website.
- Cass, D. (1965). Optimum growth in an aggregative model of Capital Accumulation . *Review of Economic studies*, pp. 233-240.
- Cavallo, E., Galiani, S., Noy, I., & Pantano, J. (2013). *CATASTROPHIC NATURAL DISASTERS AND ECONOMIC GROWTH*. The Review of Economics and Statistics.
- Chhibber, J., & Nayyar, G. (2008). *Pro - poor growth: explaining the cross - country variation in the growth elasticity of poverty*. International Journal of Development Issues.
- Crosby, A. (1986). *Ecological imperialism: The biological expansion of Europe*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Dechenes, O., & Greenstone, M. (2011). *Climate change, mortality and adaptation: evidence from annual fluctuations in weater in the US*. American Econmics Journal: applied Economics.
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2012). *Temperatures shocks and econmic growth: Evidence from the last half century*. American Economic journal: Macroeconomics.
- Dell, M., Jones, B., & Olken, B. A. (2009). *Temperature and Income: Reconciling New cross-sectional and Panel estimates*. American Economic Review.
- Diamond, J. (1997). *guns, germs, and Steel: The fates of Human Societies*. New York: W.W. Norton.
- Felbermayr, G., & Gröschl, J. (2014). *Naturally negative: The growth effects of natural disasters ☆*. Journal of Development Economics.

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Gallup, J. L., Sachs, J. D., & Mellinger, A. D. (1999). *Geography and Economics Development*. International Regional Science reviews.
- Gammans, M., Merel, P., & Ortiz-Bobea, a. (2017, Mars). Negative impacts of climate change on cereal yields: statistical evidence from France. *Environmental Research Letters*.
- Gates, W. (1967). *The spread of Ibn Khaldun's ideas on Climate and culture*. Journal of History and Ideas.
- Graff, Z., & Neidell, M. (2014). *Temperature and the allocation of time: implications for climate change*. Journal of Labor Economics.
- Hsiang, S. M. (2010). *Temperature and cyclones strongly associated with economic production in the Caribbean and central America*. Proceedings of the National academy of Science.
- Huntington, E. (1915). *Civilization and climate*. Yale University Press.
- Isham, J., Woolcock, M., Pritchett, L., & Busby, G. (2005, February). The Varieties of Resource Experience: Natural Resource Export Structures and the Political Economy of Economic Growth. *The World Bank Economic Review*.
- Jones, E. (1981). *The European miracle: environments, economies, and geopolitics in the history of Europe and Asia*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Keay, R. (1959). Vegetation map of the South of the Tropic of cancer-Explanatory notes. *Oxford University Press*.
- Khawar, K. (2014). Climate and Economic Development: Further Evidence in Support of “The Tropical. *Journal of Economics and Development Studies*.
- Koopmans, T. C. (1963, December). On the concept of optimal economic growth. *Cowles Foundation for Research in Economics*.
- Lanzafame, M. (2016, Fevrier). Climatic factors and economic growth in Africa. *Journal of Economic Literature*.
- Loayza, N. V., Eduardo, O., & Jamele, R. C. (2012). *Natural Disasters and Growth: Going Beyond the Averages*. World Development, Elsevier, vol. 40(7), pages 1317-1336. .
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., & Wanner, H. (2014). European seasonal and annual temperature variability, trend and extreme since 1500. *Science* 303, pp. 1499-1503.
- M., B. (2010). *Population size and civil conflict risk: is there a causal link?* Economic Journal.
- Mankiw, G., Romer, D., & Weil, D. N. (1992). *A Contribution to the Empirics of Economic Growth*. The Quarterly Journal of Economics .
- Marbury, J. (1934). *Relation of weather conditions to growth and development of cotton*. Technology&Engineering.
- Miguel, E., Satyanath, S., & Sergenti, E. (2004). *Economic shocks and civil conflict: An Instrumental variable approach*. Journal of Political Economy.
- Montesquieu, B. D. (1748). *The Spirit of the Laws*.
- Musa, Y., & Sanusi, J. A. (2013). Analyzing the Impact of Value Added Tax (VAT) on Economic growth in Nigeria. *Mathematical Theory and Modeling*.
- Nordhaus, W. D. (2006). *Geography and macroeconomics: New data and new findings*. Proceedings of national academy of Sciences of the United States of America.
- North, D. C., & Thomas, R. P. (1973). *The Rise of the Western World: A New Economic History*. New York: Cambridge University Press,.
- Noy, I. (2009). *Macroeconomics consequences of disasters*. Journal of Development Economics .

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

- Nyangena, O., & Ruigu, G. M. (2018). Linking weather variability and economic growth in the East African region. *The Journal of Scientific and Engineering Research*.
- Olsson, O., Douglas, A., & Hibbs, J. (2005). Biogeography and long-run economic Development. *European Economic Review*, pp. 109-138.
- Rao, B. B. (2009, Juillet). Estimates of the steady state growth rates for selected Asian countries with an extended Solow model. *Economic Modelling*, pp. 46-53.
- Rodier, J. (1964). Regimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'Ouest du Congo. *Orstom*.
- Schlenker, W., & Roberts, M. (2009, September). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Seppanen, O., Fisk, W. J., & Faulkner, D. (2003). *Cost benefit analysis of night-time ventilative cooling in office building*.
- Sivakumar, M. (1989). Agroclimatic Aspects of Rainfed Agriculture. *ICRISAT Conference Paper no. CP 410*.
- Skidmore, M., & H., T. (2002). *Do the natural disasters promote long run growth?*
- Solow, R. M. (1956, Feb.). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, pp. 65-94.
- Uctum, R. (2007). Econométrie des modèles à changements de régimes: un essai de synthèse. *HAL*.

7. Annexes

6.1- Liste et description des variables de l'étude

Nom	Libelle	Unité
Logtmp	Température	Degré Celsius
Logpluviosurf	Précipitations au 100 km ²	mm/km ²
Iso100600	Zone d'isohyète 100-600mm	%
Iso6001200	Zone d'isohyète 600-1200mn	%
Isop1200	Zone d'isohyète de plus de 1200mn	%
Logvartmp	Variance de la température	Degré Celsius
Logvarpluvio	Variance de la pluviométrie	mm
LogPIBPPPHAB	PIB réel par Habitant en dollar 2011	Dollar PPP
LogPop	Croissance démographique	%
LogInvestPIB	Investissement/PIB	%
LogScolarite	Taux de scolarité	%
Ouverture	Ouverture au commerce international	% du PIB
DateTVA	Période post-introduction de la TVA	-
AgriVA	Valeur ajoutée du secteur agricole	% PIB
RessnatVA	Exportation des ressources naturelles en % des exportations totales	%

6.2- Zones géographiques

Zone géographique				
Num	Sahel	Tropical	Equatoriale	Australe
1	Burkina	Benin	Burundi	Angola
2	Djibouti	Cameroun	Congo	Botswana

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

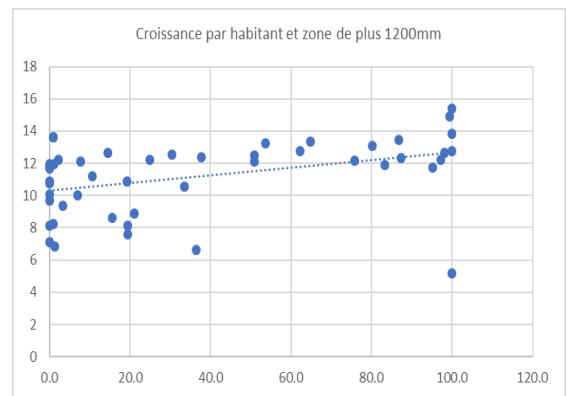
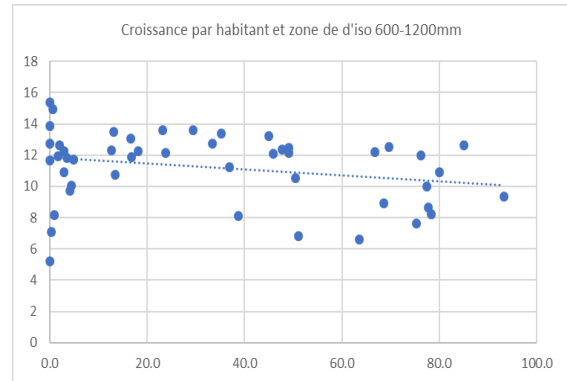
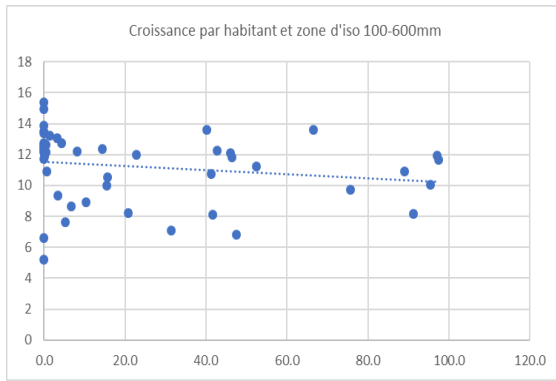
3	Erythrée	Cap vert	Gabon	Comores
4	Mali	Cote d'Ivoire	Guinée équatoriale	Ile Maurice
5	Mauritanie	Ethiopie	Kenya	Lesotho
6	Niger	Gambie	Ouganda	Madagascar
7	Sénégal	Ghana	RDC	Malawi
8	Soudan	Guinée	Rwanda	Mozambique
9	Tchad	Guinée Bissau	Tanzanie	Namibie
10		Liberia		Sud Afrique
11		Nigeria		Swaziland
12		RCA		Zambie
13		Sao Tome		Zimbabwe
14		Sierra Leone		
15		Soudan du Sud		
16		Togo		

6.3- Croissance par habitant et zones climatiques

Les zones d'isohyètes 100-600mm et 600-1200mm semblent négativement corrélées au PIB par habitant. La zone d'isohyète de plus de 1200mm cependant présente une corrélation positive. La linéarité de ces relations reste cependant à être prouvée.

Graphique 5 : Croissance par habitant et zones climatiques

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne



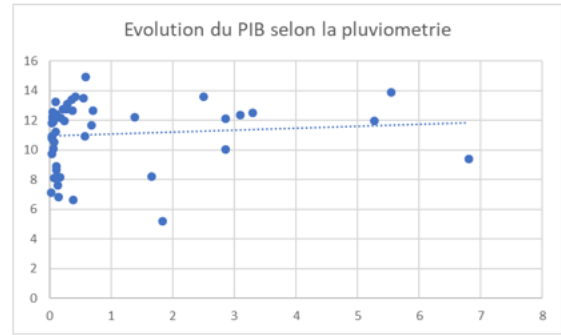
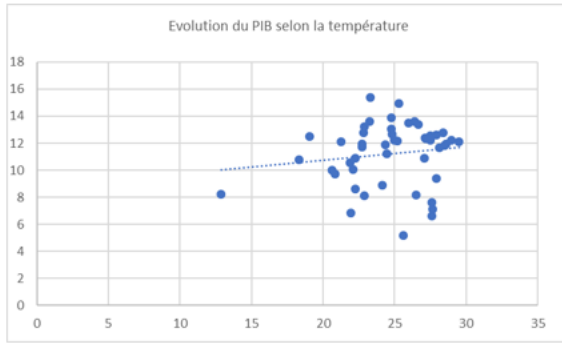
Source : l'auteur

6.4- Croissance par habitant versus température et pluviométrie

Il semble exister également une relation linéaire positive entre la température et le PIB d'une part et entre la pluviométrie et le PIB d'autre part. La linéarité de cette relation sera testée après estimation du modèle économétrique.

Graphique : Evolution du PIB par habitant selon la température et la pluviométrie

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne



Source : l'auteur

6.5- Interaction entre la variance de la température et de la pluviométrie et les zones climatiques sur la Croissance par habitant

Interaction des variances de la pluviométrie et de la température avec les zones climatiques 1

Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant						
Variables	Tropicale			(temp1.)	(temp.2)	(temp3.)
	(Var. temp.1.)	(Var. temp.2.)	(Var. temp.3.)			
Log PIB/Habitant	-0.087*** (0.026)	-0.051 (0.032)	-0.054* (0.031)	-0.073** (0.032)	-0.052* (0.030)	-0.067* (0.029)
Log (Invest en %PIB)	0.048*** (0.013)	0.046*** (0.016)	0.041*** (0.016)	0.050*** (0.013)	0.045*** (0.015)	0.045*** (0.015)
Log taux de scolarisation brut	0.022 (0.030)	0.011 (0.043)	0.005 (0.044)	0.023 (0.037)	0.0011 (0.044)	-0.0020 (0.042)
Ouverture au commerce	0.0017*** (0.0006)	0.0017** (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0014** (0.0007)	0.0017** (0.0007)	0.0015** (0.0007)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0013*** (0.0005)	0.0013** (0.0006)	0.0012** (0.0006)	0.0015*** (0.0006)	0.0014** (0.0006)	0.0015** (0.0006)
Période post-introduction de la TVA	0.111* (0.060)	0.079 (0.068)	0.100 (0.072)	0.096 (0.065)	0.101 (0.068)	0.116 (0.075)
Log(température)	6.385*** (2.107)	5.448** (2.349)	5.729** (2.433)	1.971 (2.708)	5.276** (2.297)	4.971** (2.351)
Log Pluviométrie	-0.042 (0.266)	0.318* (0.267)	0.312 (0.272)	0.487* (0.271)	0.225* (0.274)	0.277 (0.280)
Log Variance pluviométrie	0.040 (0.224)	-0.360 (0.257)	-0.361 (0.261)	-0.453* (0.253)	-0.279 (0.251)	-0.298 (0.255)
Log Variance température	-6.763*** (2.107)	-4.826** (2.461)	-5.272** (2.433)	-1.952 (2.502)	-5.281** (2.274)	-3.780 (2.441)
Iso 100-600mm en % du territoire	0.018** (0.009)	0.014 (0.010)	0.016 (0.010)	-0.105* (0.061)	0.017* (0.010)	0.009 (0.011)
Iso 600-1200mm en % du territoire	0.014* (0.009)	0.020** (0.010)	0.021** (0.010)	0.008* (0.010)	-0.015 (0.050)	0.014 (0.010)
Iso > 1200mm en % du territoire	0.014** (0.009)	0.020** (0.010)	0.019** (0.010)	0.014** (0.010)	0.022** (0.010)	0.085* (0.047)
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne. 8	0.007*** (0.0016)			0.033* (0.017)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne		0.0002 (0.0006)			0.011 (0.016)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne			-0.001 (0.0009)			-0.021 (0.015)
Observations	84	84	84	84	84	84
Pays	6	6	6	6	6	6
Instruments	30	30	30	30	30	30
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=262	KPF=328	KPF=394	KPF=36	KPF=324	KPF=379
Hansen Test	0	0	0	7		

6.6- Interaction entre les zones climatiques et les autres variables climatiques (température, pluviométrie et leurs variances)2

Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant						
Variables	Afrique équatoriale			(temp1.)	(temp.2)	(temp3.)
	(Var. temp.1.)	(Var. temp.2.)	(Var. temp.3.)			
Log PIB/Habitant	-0.030 (0.057)	-0.041 (0.061)	-0.042 (0.061)	-0.040 (0.052)	-0.028 (0.058)	-0.030 (0.056)
d.log(Pop)	0.291** (0.145)	0.293** (0.148)	0.294** (0.148)	0.312** (0.158)	0.312* (0.164)	0.332* (0.178)
Log (Invest en %PIB)	0.024 (0.039)	0.025 (0.040)	0.026 (0.040)	0.024 (0.036)	0.021 (0.039)	0.021 (0.038)
Log taux de scolarisation brut	0.017	0.010	0.010	0.018	0.0011	0.013

⁸ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

	(0.023)	(0.020)	(0.020)	(0.022)	(0.021)	(0.021)
Ouverture au commerce	0.0033***	0.0032***	0.0032***	0.0033***	0.0032***	0.0032***
	(0.0005)	(0.0006)	(0.0007)	(0.0006)	(0.0006)	(0.0006)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0006	0.0008*	0.0009**	0.0010	0.0004	0.0004
	(0.0004)	(0.0005)	(0.0005)	(0.0006)	(0.0004)	(0.0003)
Période post-introduction de la TVA	0.118	0.138	0.138	0.077	0.100	0.116
	(0.094)	(0.094)	(0.093)	(0.120)	(0.098)	(0.098)
Log(température)	-8.019***	-6.661*	-6.428*	-7.971***	-9.580***	-9.127**
	(3.057)	(3.432)	(3.448)	(2.988)	(3.731)	(3.352)
Log Pluviométrie	-0.012	-0.036	-0.052	-0.064	0.109	0.111
	(0.403)	(0.369)	(0.369)	(0.406)	(0.098)	(0.401)
Log Variance pluviométrie	0.099	0.067	0.077	0.094	-0.0013	-0.008
	(0.314)	(0.290)	(0.269)	(0.303)	(0.303)	(0.313)
Log Variance température	8.080**	6.532*	6.338*	7.930**	9.386**	9.897
	(3.328)	(3.890)	(3.883)	(3.267)	(3.922)	(4.032)
Iso 100-600mm en % du territoire	0.012	-0.0036	-0.0017	-0.104	-0.013	-0.036
	(0.016)	(0.0034)	(0.0029)	(0.095)	(0.003)	(0.029)
Iso 600-1200mm en % du territoire	-0.0008	-0.0005	-0.0005	-0.0009	-0.025	-0.034
	(0.0010)	(0.0009)	(0.0009)	(0.010)	(0.024)	(0.029)
Iso > 1200mm en % du territoire						
Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne.9	0.0045			0.031		
	(0.005)			(0.029)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne		0.0006			0.008	
		(0.0006)			(0.078)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne			-0.00065			-0.011
			(0.0006)			(0.009)
Observations	116	116	116	116	116	116
Pays	9	9	9	9	9	9
Instruments	29	29	29	29	29	29
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Weak identification test	KPF=50	KPF=48	KPF=48	KPF=55	KPF=50	KPF=52
Hansen Test	0	0	0			

6.7- Interaction entre les zones climatiques et les autres variables climatiques (température, pluviométrie et leurs variances)(3)

Variable dépendante : Δ Log du PIB par habitant						
Afrique australe						
Variables	(Var. temp.1.)	(Var. temp.2.)	(Var. temp.3.)	(temp1.)	(temp.2)	(temp3.)
Log PIB/Habitant	-0.054***	-0.054***	-0.054***	-0.052***	-0.052***	-0.057***
	(0.015)	(0.014)	(0.015)	(0.014)	(0.015)	(0.016)
Log (Invest en %PIB)	-0.0009	-0.0013	-0.0016	0.0037	0.0025	0.0021
	(0.014)	(0.014)	(0.014)	(0.014)	(0.014)	(0.014)
Log taux de scolarisation brut	0.032**	0.029*	0.030*	0.029*	0.029*	0.035*
	(0.016)	(0.018)	(0.017)	(0.017)	(0.017)	(0.018)
Ouverture au commerce	0.0029***	0.0029***	0.0029***	0.0028***	0.0028***	0.0029***
	(0.0009)	(0.0009)	(0.0009)	(0.0009)	(0.0009)	(0.0009)
Ressources Naturelles en % exportations	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0006
	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0004)
Période post-introduction de la TVA	0.00001	0.005	0.025	0.0031	0.0019	-0.0053
	(0.042)	(0.042)	(0.032)	(0.041)	(0.040)	(0.039)
Log(température)	0.356	0.325	0.292	0.054	0.075	-0.036
	(0.551)	(0.562)	(0.578)	(0.509)	(0.507)	(0.647)
Log Pluviométrie	0.155	0.140	0.159	0.129	0.148	0.110
	(0.126)	(0.108)	(0.124)	(0.110)	(0.111)	(0.114)
Log Variance pluviométrie	-0.244**	-0.243**	-0.255**	-0.232**	-0.246**	-0.202**
	(0.105)	(0.101)	(0.111)	(0.093)	(0.097)	(0.097)
Log Variance température	-0.231	-0.200	-0.269	-0.209	-0.021	0.058
	(0.454)	(0.475)	(0.486)	(0.439)	(0.431)	(0.500)
Iso 100-600mm en % du territoire	0.0029	0.003	0.0031	0.014**	0.0039*	0.0042**
	(0.0024)	(0.0022)	(0.0022)	(0.006)	(0.0022)	(0.0021)
Iso 600-1200mm en % du territoire	0.004*	0.004*	0.0042*	0.0007**	-0.0007	0.0054**
	(0.0024)	(0.0024)	(0.0022)	(0.0028)	(0.0034)	(0.0022)
Iso > 1200mm en % du territoire	0.0037	0.0039*	0.004*	0.006**	0.0055**	-0.015
	(0.0025)	(0.0024)	(0.0023)	(0.0029)	(0.0026)	(0.014)
	0.00008			-0.0031*		

⁹ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 1: Changements climatiques et croissance par habitant en Afrique subsaharienne

Iso 100-600mm -Interaction avec la colonne. ¹⁰	(0.0003)			(0.0017)		
Iso600-1200- Interaction avec la colonne		-0.00015 (0.0003)			0.0021* (0.013)	
Iso >1200- Interaction avec la colonne			0.0002 (0.0003)			-0.0065 (0.0047)
Observations	167	167	167	84	84	84
Pays	12	12	12	6	6	6
Instruments	30	30	30	30	30	30
Temps	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans	5ans
Dummies temporels	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	KPF=365	KPF=351	KPF=347	KPF=36	KPF=332	KPF=379
Weak identification test				7		
Hansen Test	0	0	0			

¹⁰ Additives pour les zones climatiques et multiplicatives pour les autres

Chapitre 2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

1. Introduction

L'inflation est l'un des sujets macroéconomiques dont l'intérêt et l'importance continuent de traverser les générations et les théories macroéconomiques. Une inflation maîtrisée contribue à la stabilité et à la compétitivité des économies, à la préservation de la valeur des actifs financiers et non financiers et à la stabilité du niveau de vie des populations. C'est ainsi que depuis les théories classiques monétaristes ((Bodin, 1568) ; (Ricardo, 1817); (Fisher I. , 1911) et (Friedman & Schwartz, 1963)) aux théories néoclassiques keynésiennes ((Keynes, 1936)), l'inflation a fait l'objet d'une abondante littérature. Les déterminants monétaires apparaissent ainsi dans plusieurs études empiriques ((Baldini & Paplawski_Ribeiro, 2011) (Chaudhary & Xiumin, 2018) (Eftekhari Mahabadi & Kiaee, 2015), (Chaudhary & Xiumin, 2018), (Okoye, Olokoyo, Ezeji, Okoh, & Evbuomwan, 2019) (Adjei, 2018)). Ils sont reconnus comme contribuant positivement à l'évolution de l'inflation. Les théories keynésiennes expliquent l'évolution de l'inflation par la théorie de la demande globale (« pull-demand ») (((Okoye, Olokoyo, Ezej, Okoh, & Evbuomwan, 2019) (Eftekhari Mahabadi & Kiaee, 2015) (Kinda, 2011), (Oulatta, 2018), (Madito & Odhiambo, 2018) et par la théorie de l'inflation induite par l'offre globale ((Totonchi, 2011) (Caceres, Poplawski-Ribeiro, & Tartari, 2012)). Ainsi, les chocs affectant les composantes de la demande et/ou de l'offre globale peuvent impacter l'inflation ((Kabundi, 2012) (Guyen, Jemma, Unsal, & Williams, 2017)).

Il y a également un ensemble d'autres facteurs y compris exogènes et parfois non économiques qui peuvent affecter le niveau général de prix. Beaucoup d'études ont mis en évidence l'impact du niveau de prix extérieurs en général et celui des principaux pays-partenaires sur l'inflation des pays étudiés (Chaudhary & Xiumin, 2018). Il faut ajouter également que certains évènements exceptionnels peuvent causer l'inflation. On peut noter entre autres, la dévaluation, l'introduction de nouvelles taxes (exemple TVA), des chocs de portée mondiale, etc. L'inertie causée par la dynamique inflationniste dans le cadre d'une spirale inflationniste peut être considérée comme des facteurs structurels.

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Depuis le développement de la macroéconomie politique, son champ d'étude s'est encore largement étendu. C'est ainsi que les facteurs institutionnels et structurels ont été identifiés comme étant aussi déterminants pour l'inflation ((Kirkpatrick & Nixon, 1976) (Fisher & Mayer, 1980) (Madito & Odhiambo, 2018) (Eftekhari Mahabadi & Kiaee, 2015) (Chaudhary & Xiumin, 2018) (Okoye, Olokoyo, Ezej, Okoh, & Evbuomwan, 2019)). La nouvelle macroéconomie politique de l'inflation identifie le timing des élections, la performance des décideurs politiques, l'instabilité politique, la crédibilité, la réputation des politiques et la faible indépendance des institutions d'émissions monétaires comme sources de l'inflation (Totonchi, 2011). Depuis ces dernières années, des travaux empiriques portant sur les déterminants de l'inflation prennent en compte aussi bien la dimension structurelle que climatique de l'inflation. La source climatique peut être considérée comme faisant partie de la théorie de l'inflation par l'offre ((Aron, Muellbauer, & Sebudde, 2015) (Behera, Wahi, & Kapur, 2018)). En effet, les conditions climatiques favorables ou non affectent la production agricole pluviale (contributeur important (40%) à l'évolution de l'inflation en Afrique subsaharienne) et peuvent impacter la capacité de l'offre globale à satisfaire la demande globale et ainsi perturber le niveau des prix. Cette nouvelle source de l'inflation est plus évidente dans les économies dont la consommation des ménages dépend largement des produits alimentaires agricoles notamment ceux produits localement. C'est le cas des pays en développement en général mais de ceux de l'Afrique en particulier.

Plusieurs études ont montré l'impact négatif de la pluviométrie sur l'inflation ((Diouf, 2007) (Kinda, 2011) (Behera, Wahi, & Kapur, 2018) (Mawejje & Lwanga, 2016) (Bawa, Abdullahi, & Adamu, 2016)). La plupart de ces études portent sur les pays, pris isolément et la variable climatique ou météorologique considérée est la pluviométrie (voir le tableau 1). Même s'il n'existe pas une inflation africaine (Frances & Janssens, 2018) compte tenu de la diversité des contextes socio-économique, politique et géographique, étant donné que les phénomènes climatiques ou météorologiques ne se limitent pas aux frontières nationales, nous nous intéressons aux déterminants climatiques en recherchant une dynamique d'ensemble dans les pays d'Afrique subsaharienne selon une certaine homogénéité géo-climatique et économique. Nous cherchons aussi à examiner la relation entre l'inflation et les facteurs météorologiques en considérant la météorologie comme une réalité plus large. Pour ce faire, nous considérons dans ce travail la pluviométrie et la température ainsi que leurs variances comme facteurs climatiques. Nous chercherons aussi à comprendre comment le niveau général de prix réagit en fonction des zones climatiques intérieures aux pays. Enfin, compte tenu du fait que les facteurs structurels et

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

politiques sont prépondérants en Afrique subsaharienne, ces facteurs ne peuvent être ignorés dans l'analyse des déterminants de l'inflation.

Pour traiter ces différents sujets évoqués ci-dessus, nous avons structuré le présent travail en cinq (5) sections. La première section est consacrée à la revue de la littérature sur les déterminants de l'inflation en Afrique sub-saharienne. La section 2 est dédiée à quelques faits stylisés liés à l'inflation en Afrique. La section 3 traite du cadre théorique, la section 4 présente le cadre empirique, la section 5 est consacrée aux différents résultats et analyses. La section présente les résultats et analyses. Enfin dans la section 6, une conclusion boucle le chapitre.

Tableau 1. Effets de la pluviométrie et de la température sur l'inflation dans la littérature

Zone d'étude	Variables explicatives	Effet pluviométrie et température	Période de l'étude	Auteurs
Tchad	Taux de change, Prix extérieurs, Masse monétaire, PIB réel, Pluviométrie, période d'instabilité politique, Dévaluation FCFA, Période exploitation du pétrole	négatif	1983-2009	(Kinda, 2011)
Mali	Inflation retardée, PIB réel, Masse monétaire, Taux de change réel, terme de l'échange, pluviométrie	négatif	1979-2006	(Diouf, 2007)
Tanzanie	Inflation retardée, Pluviométrie, taux d'intérêt, dépenses budgétaires, prix extérieurs	négatif		(Oulatta, 2018)
Nigeria	Inflation période antérieure, PIB, pluviométrie retardée, prix du pétrole, masse monétaire	négatif	1981 – 2015	(Bawa, Abdullahi, & Adamu, 2016)

Ouganda	Inflation retardée, PIB, Masse monétaire, pluviométrie.	négatif		(Aron, Muellbauer, & Sebudde, 2015)
Echantillon des pays développés et non	PIB, Dépenses gouvernementales, masse monétaire, température	Positif	1961–2014	(Mukherjee & Ouattara, 2021)

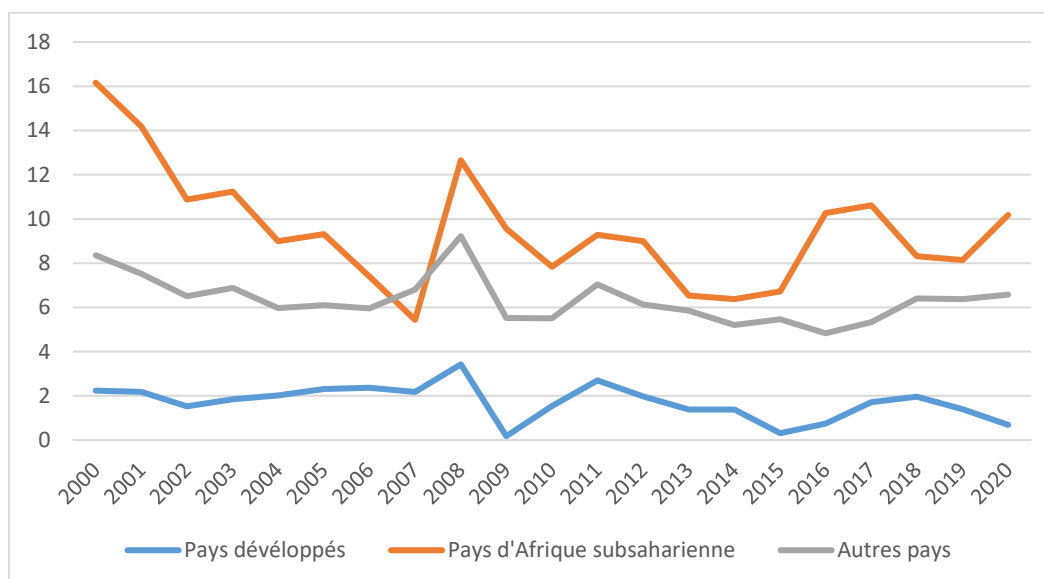
Source: auteur

2. Inflation en Afrique subsaharienne : quelques faits stylisés

Dans cette section, une analyse graphique est faite pour relever deux faits stylisés de l'inflation en Afrique sub-saharienne. Il s'agira dans un premier temps d'analyser l'évolution de l'inflation en Afrique subsaharienne au cours des deux dernières décennies en relation avec des faits socio-économiques et politiques qui ont marqué cette région et dans un deuxième temps de présenter l'importance de la contribution des produits alimentaires dans la détermination de l'inflation.

2.1- Les évènements socio-économiques, politiques et climatiques affectent l'inflation en Afrique subsaharienne

Graphique 1 : Evolution de l'inflation en Afrique subsaharienne vs autres groupes de pays



Source : Données « World economic output (WEO) » reproduits par l'auteur

Note : L'inflation représentée ici est la variation de l'indice moyen annuel de prix à la consommation (inflation en variation moyenne). Celle d'une zone donnée est la moyenne simple des taux d'inflation de ses pays membres. L'agrégation de l'inflation par zone économique est produite par le WEO.

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Au cours des deux (2) dernières décennies, l'inflation est plus forte et plus instable dans les pays en développement que dans les pays développés. Celle de l'Afrique subsaharienne est parmi les plus fortes (voir graphique1). L'évolution de l'inflation dans les différentes zones économiques montre que certains évènements comme la crise alimentaire de 2007/2008 ont créé l'inflation dans toutes ces zones. Il en est de même du boom pétrolier de 2011/2012. Dans la présente section, nous nous appesantirons sur l'inflation en Afrique subsaharienne pour y ressortir quelques faits saillants.

Sur la base de l'analyse des trois points remarquables (points de cassure) de l'évolution de la courbe de l'inflation en Afrique subsaharienne (en 2000, 2008 et 2016) mis en relation avec la situation de certains pays de cette zone, quelques informations intéressantes apparaissent.

Vers les années 2000, le niveau d'inflation en Afrique subsaharienne a été particulièrement élevé. Les pays ayant contribué fortement à ce niveau d'inflation sont entre autres, la République démocratique du Congo (RDC), le Malawi, le Ghana, la Zambie et Sao Tomé et Príncipe avec de taux de plus de 25 % et le Nigeria, le Mozambique, Madagascar, l'Erythrée, la Sierra Leone et le Burundi avec le taux variant entre 15 et 20%. En cette période la RDC, sortant de la guerre civile, a connu des niveaux d'inflation records compte tenu du dérèglement de la politique monétaire mise en œuvre et des problèmes structurels (cercle vicieux d'hyperinflation, dépréciation continue de la monnaie, dollarisation croissante et une désintermédiation financière, manque d'épargne), une baisse de production agricole et manufacturière, une détérioration des infrastructures économiques, une paupérisation généralisée de la population et une évolution alarmante des épidémies (FMI, 2001). Au Malawi, le niveau d'inflation s'expliquait par la dépréciation du taux de change (par rapport au dollar) et de l'augmentation des prix du pétrole (FMI, 2001). L'inflation ghanéenne s'expliquait aussi par la dépréciation du taux de change et par l'augmentation du crédit intérieur et le desserrement des politiques monétaires. L'inflation au Nigeria était causée par les dépenses gouvernementales non maîtrisées à la suite des réformes constitutionnelles donnant plein pouvoir aux autorités décentralisées d'utiliser les ressources pétrolières qui leur revenaient et aussi à la dévaluation du Naira. Il faut aussi noter qu'après 2000 (de 2000 à 2006), la Corne de l'Afrique a connu quatre grandes sécheresses aux conséquences humanitaires importantes touchant en particulier l'Ethiopie, le Kenya, la Somalie, l'Erythrée, l'Ouganda, Djibouti et le Soudan unifié qui ont contribué à maintenir le haut niveau d'inflation. En 2003, le Zimbabwe a enregistré le taux d'inflation atteignant 432% compte tenu de problèmes structurels liés à la réforme agraire et de la

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

sécheresse de cette année (FMI, 2004). Les pays au taux de change fixe ont connu une inflation relativement faible (FMI, 2002).

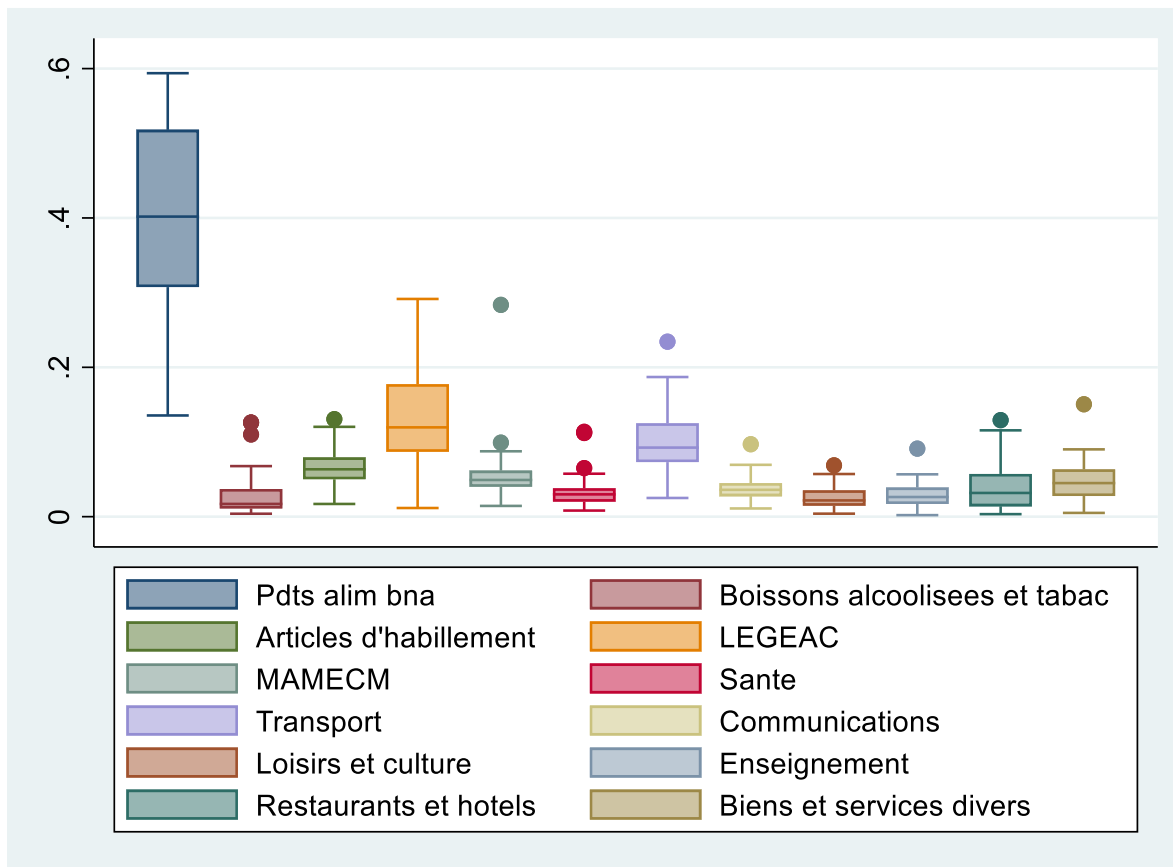
En 2008, la hausse des prix des produits alimentaires et des autres matières premières (métaux et pétrole) a eu des effets conjugués plus forts sur l'inflation dans les pays d'Afrique subsaharienne, principaux pourvoyeurs de matières premières, comme le montre le graphique 1. Les pays pétroliers ont enregistré des entrées importantes des devises qui ont positivement impacté leurs masses monétaires. Les pays pauvres en ressources naturelles ont subi les effets de la flambée des prix des matières premières minérales, fossiles et agricoles.

En 2016, l'inflation a été très forte dans toutes les sous-régions Africaines à l'exception de la zone de la CEEAC (2,7%) (Kapko, 2017). Dans la zone de l'UEMOA, l'inflation a atteint 12.8% compte tenu du niveau d'inflation au Ghana (17,5%) et au Nigeria (15,6%). Au Ghana, l'inflation avait à la fois des origines alimentaires et des causes structurelles touchant le transport, l'éducation, le tourisme, l'énergie, l'habitat et la santé. Au Nigeria, la flambée inflationniste serait expliquée par la raréfaction du dollar après la dévaluation du Naira en juin 2016 et la baisse de prix du pétrole. En Afrique de l'Est, l'inflation avait atteint de 13,2% soutenu principalement par l'inflation au Malawi (21.8), en Erythrée (8,9%), en Ethiopie (7,3%) et au Rwanda (7,1%) qui a une origine climatique (la sécheresse). En Afrique australe, le niveau de l'inflation est de 10,5% dû principalement à l'inflation en Angola (33%), au Mozambique (19,8%) et au la Zambie (18%). L'inflation en Angola s'expliquait par la détérioration du taux de change du Kwanza, de la hausse de prix intérieur du carburant et de la politique monétaire accommodante. Au Mozambique, elle s'expliquait par le taux de change et la politique budgétaire expansionniste notamment par l'augmentation de la masse salariale. En Zambie, l'inflation était causée par les contraintes climatiques.

2.2- Les produits alimentaires sont prépondérants dans la détermination de l'indice de prix à la consommation en Afrique subsaharienne

L'objectif de cette section est de montrer que les produits alimentaires en Afrique, tributaires de conditions climatiques, représentent une part importante dans la détermination de l'indice de prix à la consommation et affectent de ce fait l'évolution de l'inflation.

Graphique 2 : Contributions des fonctions de consommation au calcul l'indice de prix à la consommation



Source : Base de données des contributions à la détermination de l'Indice de prix collectées sur les bulletins de prix par l'auteur

(Pdto alim bna=Produits alimentaires et boissons non alcoolisées ; MAMECM=Meubles, article de ménages et entretien courant de la maison ; LEGEAC=Logements, eau, gaz, électricité et autres combustibles).

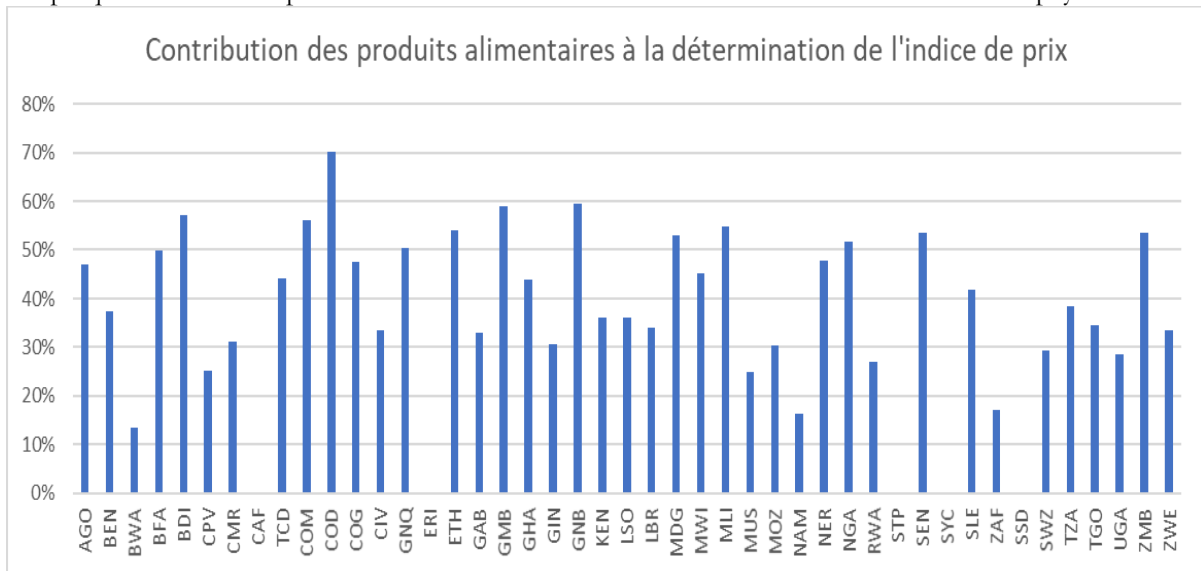
Note : Les statistiques de prix produits par les Instituts nationaux de statistiques sont publiées avec les pondérations des différentes fonctions de consommation entrant dans le calcul de l'indice de prix. Le graphique 2 est fait sur base de données compilées de ces pondérations pour 40 pays d'Afrique Subsaharienne. Dans le graphique, l'axe des ordonnées présentent le niveau de contributions (variant 0 à 1 et 1 correspond à la somme des contributions) différentes fonctions de consommation au calcul de l'indice.

Parmi les 12 fonctions ou postes de consommation qui contribuent à la détermination du niveau général de prix en Afrique subsaharienne, la fonction « Produits alimentaires et boissons non alcoolisées » est la plus importante (voir graphique 2). Elle contribue en moyenne à 40% à l'évolution du niveau général de prix. Les fonctions Logement, eau, gaz, électricité et Transports viennent respectivement de loin en deuxième et troisième positions. Les autres fonctions restantes prises isolément contribuent marginalement

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

à la détermination du niveau général de prix. Regroupées en produits non alimentaires, les fonctions non alimentaires de consommation contribuent en moyenne à 60% à l'évolution du niveau général de prix. Pour ce qui est de la fonction « Produits alimentaires », il y a une grande disparité entre pays (voir le graphique 3). Les pays dont les produits alimentaires contribuent à plus de 50% à la détermination du niveau général de prix sont le Burkina Faso, le Burundi, le Congo démocratique, les Comores, l'Éthiopie, la Guinée équatoriale, la Guinée Bissau, Madagascar, le Mali, le Nigeria, le Sénégal et le Zimbabwe. Les pays dont les produits alimentaires contribuent faiblement (moins de 20%) à l'évolution du niveau général de prix sont le Botswana, la Namibie et l'Afrique du Sud.

Graphique 3 : Poids des produits alimentaires dans la détermination de l'inflation selon les pays



Source : Base de données des contributions à la détermination de l'Indice de prix collectées sur les bulletins de prix par l'auteur

En résumé les chocs pétroliers et les crises alimentaires mondiales semblent affecter l'inflation en Afrique subsaharienne. Les guerres civiles et les situations d'instabilité socio-politique que connaissent certains pays ne sont pas sans conséquences sur l'inflation car elles touchent négativement les structures de production de ces pays. Les politiques monétaires et budgétaires accommodantes mises en place par certains pays impactent aussi l'inflation. Les phénomènes climatiques récurrents plus accentués dans certaines parties de cette région affectent vraisemblablement l'inflation en raison du poids des produits alimentaires (en grande partie issus de l'agriculture pluviale) dans la détermination de l'indice de prix à la consommation. Le présent travail viserait à examiner empiriquement cette relation entre les faits exposés et l'inflation.

3. Cadre théorique

La littérature théorique des déterminants de l'inflation montre plusieurs sources de l'inflation. La première source trouve son fondement dans la théorie monétariste de l'inflation. Les deuxième et troisième sources peuvent être expliquées par l'analyse keynésienne des chocs sur la demande globale et sur l'offre globale et leur impact sur le niveau général de prix à travers la courbe de Philips (Behera, Wahi, & Kapur, 2018), la quatrième source repose sur les théories de la macroéconomie politique et la cinquième source est liée aux caractéristiques spécifiques des pays (Totonchi, 2011) (Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2004). Les chocs provenant de différentes sources de l'inflation ont des effets variés et divers.

Il y a différents effets des chocs de politiques monétaires sur l'inflation induites par les chocs sur le taux d'intérêt (Ireland, 2007) (Cogley, Primiceri, & Sargent, 2010). En effet, une augmentation temporaire du taux d'intérêt à court terme, diminue incontestablement l'inflation à court terme, mais n'a pas d'effets à long terme. Aussi, à long terme, l'inflation se déplace dans le même sens des chocs du taux d'intérêt nominal. C'est l'effet Fisher. Les nouvelles études macroéconomiques montrent l'existence d'un effet néo-Fisher (Lukmanova & Rabitsch, 2022) (Uribe, 2021) (García-Schmidt & Woodford, 2019) qui identifie une relation entre les chocs permanents de taux d'intérêts sur l'inflation de même genre que celle de l'effet à long termes de chocs de taux d'intérêt. Les agents comprennent parfaitement quand une hausse du taux d'intérêt est permanente et, par conséquent, ajustent leurs anticipations d'inflation à la hausse (Lukmanova & Rabitsch, 2022).

Les chocs externes qui sont entre autres les chocs pétroliers, les chocs de taux de change et les chocs de prix à l'importation non pétroliers affectent l'inflation (Hahn, 2003). Zhao et al. (2016) montrent que les chocs d'offre du pétrole induits par les événements politiques ont un effet de courte durée sur l'inflation alors que les chocs de demande et d'autres de type de chocs d'offre du pétrole ont un effet relativement long sur l'inflation. En plus des chocs pétroliers, Galesi et Lombardi (2009) ont montré que les chocs sur les prix des produits alimentaires sur les marchés internationaux affectent aussi l'inflation. Les chocs sur le taux de change réel affectent également l'inflation et peuvent compromettre la compétitivité d'une économie (Ncube & Eliphias, 2011).

Les chocs de l'offre et ceux de la demande aussi affectent l'inflation (Svensson, 2000) (Caraballo & Carlos, 2009). Karras (1993) a montré que, contrairement à la théorie, l'inflation est positivement corrélée aux chocs de l'offre globale et négativement au choc de la demande globale. Leduc et Liu (2016) ont montré cependant que les chocs de demande globale font baisser

l'inflation. Il y a plusieurs autres sortes de chocs qui affectent l'inflation à travers l'offre globale. Les chocs politiques aussi agissent sur l'inflation à travers les chocs d'offre. Le parfait exemple est celui de la Guerre Russie-Ukraine avec des répercussions internationales importantes (Dräger, Gründler, & Potrafke, 2022). Les nombreuses guerres civiles et mouvements insurrectionnels qui ont eu lieu en Afrique ont sans nul doute eu des effets sur l'inflation. Les périodes électorales sont des occasions d'injection de forte liquidité dans les économies et affectent l'inflation par la masse monétaire.

Les chocs climatiques également impactent l'inflation à travers l'offre globale. Faccia et al. (2021) montrent que les températures extrêmes affectent l'inflation à court et moyen termes dans les économies émergentes. McKibbin et al. (2017) ont aussi montré que les changements climatiques par des phénomènes extrêmes qu'ils causent affectent négativement l'inflation à travers les chocs de l'offre globale. Mukerjee et Ouattara (2021) ont trouvé que les chocs températures agissent non seulement sur l'inflation mais leur impact perdure sur plusieurs années dans les économies en développement. Kunawotor et al. (2021) ont montré que les évènements climatiques extrêmes (sècheresse et inondations) affectent l'inflation à travers les chocs sur l'offre globale. Si l'impact de la température sur l'inflation est relativement documenté, la relation entre la pluviométrie et l'inflation reste relativement peu étudiée. Dans ce sillage, étant donné le lien étroit entre les changements climatiques et conditions météorologiques, ce travail vise à analyser l'influence des celles-ci sur l'inflation en combinant les variables météorologiques qui sont la température et la pluviométrie.

3.1 - Formulation de la relation entre l'inflation et les variables explicatives

L'équation générale de la relation entre l'inflation et ses facteurs peut donc être formulée en prenant en compte les variables de la politique monétaire, celles de l'offre et de la demande (y compris l'impact climatique ou météorologique), les facteurs extérieurs, les facteurs structurels ou politiques et les autres facteurs spécifiques ou ponctuels. Nous regroupons ces facteurs en deux groupes de variables explicatives à savoir les variables météorologiques (variables d'intérêt) et les variables de contrôle. Comme dans plusieurs littératures (Kunawotor, Bokpin, Asuming, & Amoateng, 2021) (Behera, Wahi, & Kapur, 2018) (Aron, Muellbauer, & Sebudde, 2015) (Nahousse, 2019), nous adoptons une formulation dynamique de la relation entre l'inflation et ses déterminants pour tenir compte de l'effet d'inertie de celle-ci comme recommande Trabelsi (1998).

$$\Delta \ln (IPC)_{it} = a + \varphi \Delta \ln (IPC)_{it-1} + \sum_{k=1}^K \sigma_k X_{kit} + \sum_{j=1}^J \theta_j Y_{jit} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Où les indices i et t représentent respectivement le pays et l'année. $\Delta \ln(IPC)$ est l'inflation ; φ , le coefficient de l'inflation au temps $t-1$; k est l'identifiant des variables climatiques (variables d'intérêt) ; σ_k , le coefficient du k -ième variable climatique ; X_{kit} est la k -ième variable climatique ; j est l'identifiant des variables de contrôle ; θ_j , le coefficient de la j -ième variable de contrôle ; Y_{jit} , la j -ième variable de contrôle et ε_{it} , le terme d'erreur.

4. Cadre empirique

Cette section présente dans un premier temps les bases données utilisées ainsi que les variables dépendantes et explicatives et ensuite les estimations et leurs analyses.

4.1 - Bases de données

La base de données de l'étude couvre 45 pays d'Afrique subsaharienne sur période de 2000 à 2018 (19 ans). La restriction de base des données sur la période susmentionnée s'explique par le souci de disposer d'une période qui couvre de la manière la plus large possible la disponibilité de tous les facteurs explicatifs du phénomène étudié. Elle est constituée en grande partie des variables issues de « World Economic Output » (WEO) du Fonds Monétaire international (FMI). La variable Proxi des facteurs structurels et politiques est le « Country Policy and Institutional assessment » (CPIA) de la Banque mondiale. Les données du CPIA sont récentes (2003). Elle a été importée du « World Development Indicateurs » (WDI). La variable sur le régime de change a été construite sur la base du rapport du FMI dénommé « Annual Report on Exchange Arrangements and Exchange Restrictions », (FMI, 2018). Les données climatiques proviennent de « Country-level Climate data base 1901-2017 » du CERDI CNRS-Université d'Auvergne publié en 2018 construit à partir de la base de données originelle de Climate Research Unit de l'Université East Anglia. La description des variables compilées pour cette étude se trouve dans à l'annexe 1. Pour apprécier la contribution de la fonction produits alimentaires dans l'évolution des pays en Afrique subsaharienne, nous avons aussi construit la base de données des pondérations des 12 fonctions de consommation entrant dans le calcul de l'Indice de prix à la consommation pour les 45 pays membres (voir l'annexe 2). Les variables reconstituées pour cette étude se présentent dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2 : Description des variables de l'équation (6)

Variable	Définition de variables	Unité	Source	Moyenne	Variance	Min	Max
$\Delta \ln IPC$	$\Delta \log$ (Moyenne annuelle de l'Indice de prix à la consommation)	%	WEO	7	11	-0.35	1.8
M2	Masse monétaire rapportée au PIB	%PIB	WEO	47	55	0	5.6
PIB/HAB	PIB par habitant	\$/Hab	WEO	1.71	2.77	0.01	24.3
CPIA	Evaluation pays de politiques et institutions	Indice	WDI	3.17	0.5	1.43	4.2
Tmp	Température	°C	CCD-CERDI 11	24.5	3.2	12.4	30.3
Pluvio	Précipitations/pluviométrie	mm	CCD-CERDI	811.2	469.1	24.2	2692.7
Varpluvio	Variance des précipitations	°C	CCD-CERDI	1.9	1.91	-1.19	7.0
Vartemp	Variance de la température	mm	CCD-CERDI	-1.99	1.77	-4.78	2.2
Consompub	Consommation publique en % du PIB	%PIB	WEO	15	10	0	0.8
G	Dépenses Gouvernementales en % du PIB	%PIB	WEO	26	49	0	900
Consompriv	Consommation privée en % du PIB	%PIB	WEO	68	24	0	1.6
Pubinvest	Investissement public en % du PIB	%PIB	WEO	11	47	0	9.4
PrivInvest	Investissement privé en % du PIB	%PIB	WEO	14	11	0	0.7
Import	Importations en % du PIB	%PIB	WEO	48	47	0.04	3.5
Export	Exportations en % du PIB	%PIB	WEO	37	47	0.02	5.3
Pbrent	Prix du Brent	Dollar	WEO	77.45	23.06	44.05	112.0
Tec	Taux de chance effectif	Monnaie locale/dollar	FMI	604.42	1138.35	0.54	9088

¹¹ Country-level Climate Database 1901-2017

4.1.1 - Inflation, variable dépendante.

Dans la base WEO deux indicateurs d'inflation sont publiés. Il s'agit de l'inflation en moyenne annuelle et de l'inflation en glissement annuel. L'inflation en moyenne est la variation de la moyenne annuelle des indices mensuels de prix à la consommation d'une année par rapport à celle de l'année antérieure. Alors que l'inflation en glissement annuel est la variation de l'indice de prix à la consommation du mois de décembre d'une année au mois de décembre de l'année antérieure. L'inflation considérée dans cette étude est celle en moyenne annuelle. Elle est exprimée en pourcentage (voir tableau 2). L'indice de prix à la consommation est construit à partir d'un panier de produits de consommation répartis en 12 fonctions de consommation. Dans la section 2.2 ci-dessus, nous avons présenté la dénomination de ces fonctions ainsi que leurs niveaux de contribution au calcul de l'indice de prix à la consommation et par ricochet leur degré de contribution à l'inflation. On note, pour le cas de l'Afrique subsaharienne, une prépondérance des produits alimentaires et boissons non alcoolisées (en moyenne 40%) dans le calcul de l'indice de prix à la consommation. Sur la base de la moyenne calculée sur la période de l'étude, au niveau de toute la région, l'inflation est de 7% (voir tableau 2) ce qui est relativement plus important. Selon les zones géographiques (voir tableau 3), il y a une grande disparité. La zone sahélienne, constituée essentiellement des pays situés dans des zones d'unité monétaire, a un niveau faible d'inflation (2%) à l'exception de l'Erythrée (8%). Dans la zone tropicale, plus de la moitié des pays ont un niveau d'inflation supérieur ou égal à 7% (essentiellement de taux d'inflation à deux chiffres). Dans la zone équatoriale, moins de la moitié des pays ont un niveau d'inflation supérieure ou égale à 7% (à l'exception de la RDC avec une inflation moyenne 17%). Dans la zone australe, plus de la moitié des pays (52%) ont une inflation supérieure ou égale à 7%.

4.1.2 Variables climatiques, variables d'intérêt

Les variables climatiques retenues dans cette étude comprennent la pluviométrie ou précipitations et la température (les deux en évolution moyenne et en variance) et l'importance des zones climatiques sur les territoires nationaux (proportions des différentes zones climatiques sur les territoires). La température est en degré Celsius et la pluviométrie est en millimètre. Pour l'importance des zones climatiques, il s'agit de la proportion de la zone de pluviométrie comprise entre 100 et 600 mm, de celle de pluviométrie comprise entre le 600 et 1200 mm et de celle de pluviométrie au-delà de 1200 mm en pourcentage des territoires nationaux ((Keay, 1959), (Rodier,

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

1964) (Sivakumar, 1989)). La délimitation des zones tient compte non seulement de l'homogénéité des conditions climatiques (température, pluviométrie, persistance et extrême variabilité de pluie, vitesse de vent, évapotranspiration, etc.) mais également de leur niveau de contribution à l'évaluation des ressources climatiques pour le développement des cultures et les risques auxquels elles sont exposées (Sivakumar, 1989). Dans la zone sahélienne, pour les paramètres climatiques (température élevée, faible niveau de précipitations, zone productive faiblement arrosée), la zone semble homogène (voir tableau 3). Ainsi, les facteurs climatiques pourraient jouer un rôle quant à l'évolution de l'inflation. Dans la zone tropicale, l'impact des facteurs climatiques sur l'inflation devrait y être mitigé compte tenu des conditions climatiques plus ou moins favorables. Dans la zone équatoriale, les facteurs climatiques y sont favorables (faible température et précipitations abondantes). Et dans la zone australe, la température y est favorable alors que les précipitations y sont faibles pour la plupart des pays. Cependant plus de la moitié des territoires arrosés se trouve dans la zone d'isohyète de 100 à 600mm montrant ainsi que les facteurs climatiques devraient impacter l'inflation. Ainsi, dans le modèle empirique on s'attend à ce que la température, sa variance et la variance de la pluviométrie impactent positivement l'inflation, alors et que la pluviométrie impacte négativement l'inflation. Les effets des zones climatiques devraient être positifs pour les proportions des zones climatiques austères à la production (zone où l'isohyète de 100-600 mm est de plus en plus importante) et négatives pour les zones favorables la production (zones où l'isohyètes supérieures à 600 mm est de plus en plus importante).

Tableau 3 : Moyennes annuelles des variables dépendante et climatiques sur la période 2000-2019.

Zone	Pays	$\Delta \ln IPC$	Tmp	Pluvio	varpluvio	vartmp
Sahélienne	Burkina Faso	0.02	28.85	645.85	3.60	0.11
	Erythree	0.08	27.05	247.61	3.65	0.27
	Mali	0.02	27.90	436.58	0.77	0.02
	Niger	0.02	26.41	276.36	0.39	0.02
	Senegal	0.02	28.72	552.26	5.08	0.17
	Chad	0.02	27.41	465.37	0.74	0.02
Tropicale	Benin	0.02	28.12	721.61	9.34	0.25
	Cameroun	0.02	24.95	1296.42	4.57	0.06
	Centrafrique	0.04	25.42	1166.63	2.48	0.04
	Cap-vert	0.02	22.89	31.74	25.70	1.44
	Côte d'Ivoire	0.02	26.81	1138.30	4.62	0.09
	Ethiopie	0.12	23.21	782.63	1.27	0.02
	Gambie	0.07	28.28	265.93	52.71	1.56
	Ghana	0.13	27.78	962.89	5.81	0.13
	Guinee	0.13	26.26	1265.78	8.27	0.12
	Guinee-Bissau	0.02	27.53	871.29	52.39	0.88
	Liberia	0.10	25.75	1721.72	32.32	0.32
	Nigeria	0.12	27.40	1004.12	1.82	0.03
	São Tomé et Príncipe	0.12	23.99	2143.05	825.03	8.99
	Sierra Leone	0.09	26.62	1798.35	40.47	0.43
	Soudan du Sud	0.55	27.96	828.77	1.77	0.04
Togo	0.02	27.63	742.95	24.11	0.55	
Equatoriale	Burundi	0.08	20.81	757.81	52.48	0.92
	Congo	0.17	24.45	1376.62	0.62	0.01
	RDC	0.03	24.94	1225.93	5.52	0.08
	Gabon	0.02	25.40	1486.47	7.65	0.10

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

	Guinee Equatoriale	0.04	24.71	1213.67	92.64	1.05	
	Kenya	0.07	25.25	611.91	2.02	0.05	
	Ouganda	0.06	23.62	1074.14	6.31	0.11	
	Rwanda	0.06	19.31	642.54	50.30	0.80	
	Tanzanie	0.07	22.94	871.41	1.29	0.02	
Australie	Angola	0.24	21.90	891.96	1.00	0.02	
	Botswana	0.07	22.25	322.73	0.75	0.04	
	Comores	0.03	25.71	188.32	325.83	4.32	
	Swaziland	0.07	20.55	394.37	55.90	1.33	
	Lesotho	0.06	13.21	431.99	25.61	0.45	
	Madagascar	0.08	22.80	1121.00	3.30	0.04	
	Malawi	0.14	22.48	688.12	11.17	0.23	
	Ile Maurice	0.04	23.44	226.85	498.34	6.36	
	Mozambique	0.09	24.37	787.55	1.51	0.03	
	Namibie	0.06	20.61	281.78	0.55	0.02	
	Afrique	0.06	18.50	348.68	0.55	0.01	
	Zambie	0.11	22.36	840.57	1.54	0.03	
	Zimbabwe	0.04	22.00	540.00	1.96	0.06	
		Total	0.07	24.51	811.15	51.22	0.72

Source: Calcul de l'auteur

$\Delta \ln IPC$ =Variation du log de IPC, Tmp=Température, Pluvio=pluviométrie, Varpluvio=variance de la pluviométrie, vartmp=Variance de la température

4.1.3 - Autres variables explicatives ou variables de contrôle

Les variables de contrôle ou autres variables explicatives que nous comptons utiliser représentent plusieurs groupes de déterminants. La politique monétaire sera approchée par la masse monétaire. La demande globale sera représentée par le PIB par habitant, la consommation (publique et privée), les dépenses gouvernementales (courantes et en capital), les investissements privés, les importations et les exportations. La qualité institutionnelle ou de politiques sera représenté par le CPIA. Les facteurs extérieurs comprendront le taux de change effectif réel et le prix du Brent. Au titre des caractéristiques spécifiques nous considérons l'appartenance à une union monétaire. La

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

consommation est constituée des dépenses autres que les investissements et le service de la dette. Les dépenses gouvernementales sont constituées des dépenses de consommation et d'investissement public. Toutes les variables macroéconomiques sont calculées en pourcentage du PIB à l'exception du PIB/Habitant. Le taux de change effectif est en monnaie locale rapportée au dollar. Le prix du Brent est en dollar. Le CPIA est un indice variant de 1 à 6. Plus le score est élevé plus les institutions sont bonnes et les politiques efficaces. Sur la base des moyennes générales, on peut observer les faits suivants. La demande privée (consommation et investissement privés) qui représente près de 80% du PIB pourrait être une des sources de l'inflation. La masse monétaire moyenne représente moins de la moitié du PIB moyen pourrait ne pas constituer un déterminant de l'inflation dans l'échantillon global. L'indice du développement institutionnel et de la qualité des politiques (CPIA) étant largement supérieure à la moyenne, au niveau continental, les faiblesses institutionnelles et structurelles ne devraient pas constituer une source de l'inflation.

Selon les zones géographiques (annexe4), il y a une grande disparité. La zone sahélienne, constituée essentiellement des pays à taux de change fixe, a un niveau faible d'inflation (2%) à l'exception de l'Erythrée (8%). Alors que la masse monétaire est relativement faible dans les pays de cette zone à l'exception de l'Erythrée, elle pourrait ne pas expliquer l'inflation. En revanche en Erythrée où elle représente 139% du PIB, l'inflation pourrait être d'origine monétaire. La disparité de l'indice CPIA à l'intérieur de la zone montre que cette zone n'est pas homogène pour ce qui est du développement institutionnel et de la qualité de politiques. L'effet de cette variable sur l'inflation n'est donc pas évident. La demande privée y est importante (au moins 80%PIB) et pourrait être un déterminant non négligeable de l'inflation. L'importance des facteurs extérieurs dans la détermination de l'inflation pourrait être limitée (situation des importations et exportations non homogènes dans la zone). Dans la zone tropicale, les pays à faible niveau d'inflation sont ceux qui ont des monnaies à taux de change fixe ou qui sont dans une unité monétaire. La masse monétaire pourrait expliquer l'inflation au Cap-Vert et au Soudan du Sud mais pas dans les autres pays de la zone. En effet, dans ces deux pays, elle représente respectivement 86% et 168% du PIB. Pour les facteurs institutionnels et de qualité de politiques, il y a deux groupes de pays. Il y a le Bénin, le Cameroun, le Cap-Vert, l'Éthiopie, la Gambie, le Ghana, le Nigeria, Sao-Tomé et Príncipe, la Sierra qui présentent un indice CPIA élevé et les pays tels que la Centrafrique, la Côte d'Ivoire, la Guinée Bissau et le Soudan du Sud qui présentent un indice faible de CPIA. L'impact des facteurs structurels sur l'inflation dans la zone géographique dépendra donc de ces deux groupes de pays. Dans cette zone également la demande privée est importante (>80%PIB à l'exception de la Côte

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

d'Ivoire et du Nigeria). Ce facteur pourrait être un déterminant de l'inflation. Pour les facteurs extérieurs, seuls les pays tels que le Cap-Vert, le Liberia, la Sierra Leone et le Togo pour lesquels l'inflation pourrait être affectée. Dans la zone équatoriale, les facteurs pouvant expliquer l'inflation sont les facteurs structurels et la demande privée. A l'exception de la RDC, la masse monétaire dans les autres pays est relativement faible. A l'exception du Kenya, les facteurs climatiques y sont favorables (faible température et précipitations abondantes). Dans la zone australe, la masse monétaire pourrait expliquer l'inflation en Angola, à Madagascar, à l'Ile Maurice, en Namibie et en Afrique du Sud. La demande privée pourrait constituer un déterminant de l'inflation. Aussi, l'inflation de la plupart des pays pourrait être exposée aux facteurs extérieurs compte tenu de l'importance des importations et des exportations dans ces pays. Dans le modèle empirique, les effets théoriques suivants devraient être observés pour les variables de contrôle. Le CPIA devrait avoir un impact négatif sur l'inflation. La masse monétaire, le revenu (PIB/habitant), le taux de change réel, l'appartenance à une unité monétaire et le prix du Brent doivent impacter positivement l'inflation. L'effet de l'investissement sur l'inflation dépend de la capacité d'absorption de l'économie. Si l'investissement est disproportionné à la capacité d'absorption de l'économie, il peut impacter positivement l'inflation. Lorsqu'il est adéquat, il ne devrait pas impacter de manière significative l'inflation ou son effet serait négatif.

4.2- Corrélation entre les variables

Cette partie analyse la corrélation entre les variables étudiées (voir annexe 5). Aussi, seules les corrélations ayant théoriquement un sens ont été considérées. On note donc que l'inflation est positivement corrélée à la pluviométrie mais négativement au PIB par habitant, à la politique pays et qualité institutionnelle, aux variances de la température et de la pluviométrie. Le premier sens de la corrélation est contre intuitif mais le second va dans le sens de la théorie. L'inflation ne présente pas de corrélation statistiquement significative avec la masse monétaire, la température, la consommation (publique et privée), les investissements, les exportations et les importations, avec le prix du Brent et le taux de change. La masse monétaire est corrélée positivement et de manière statistiquement significative avec la consommation publique, les investissements, la variance de la température, les exportations et les importations (résultats tout à fait logiques). Elle est négativement corrélée au PIB par habitant, à la température, à la pluviométrie et à la consommation privée (résultats explicables). Le PIB est corrélé de manière statistiquement significative et ce, positivement à la politique pays et qualité institutionnelle, aux variances de la

température et de la pluviométrie, à la consommation publique et aux investissements privés (résultat tout à fait logique). Il est négativement corrélé à la température et à la pluviométrie, à la consommation privée, aux importations et au taux de change (résultats curieux). La politique pays et la qualité institutionnelle sont corrélées de manière statistiquement significative et ce, positivement avec l'investissement privé (résultat allant dans le bon sens). Elles sont négativement corrélées avec la température et la pluviométrie, la consommation privée, les exportations et les importations. La température est positivement corrélée à la pluviométrie (résultat logique). Elle est négativement corrélée à la consommation publique, aux investissements, aux importations et aux exportations (résultats curieux en certains points). La pluviométrie est corrélée de manière statistiquement significative et ce, positivement avec les investissements publics et le taux de change (résultats logique). Elle est négativement corrélée avec la variance de la température, avec la consommation publique, avec les investissements privés et les importations. Les variances de la pluviométrie et de la température sont corrélées de manière statistiquement significative entre elles et avec les consommations (publiques et privées). Elles sont négativement corrélées aux investissements privés. La consommation publique est négativement corrélée à la consommation privée et au taux de change. Elle est cependant positivement corrélée aux investissements et aux exportations et importations. La consommation privée est négativement corrélée aux investissements et aux importations et exportations. Elle est positivement corrélée au taux de change. Les investissements (publics et privés) sont positivement corrélés entre eux et aux importations et exportations. Ils sont négativement corrélés au taux de change réel. Les importations sont positivement corrélées aux exportations mais pas aux prix du Brent et au taux de change. Les exportations sont négativement corrélées au taux de change mais elles ne sont pas corrélées au prix du Brent.

4.3- Démarche technique et contrôle qualité

Pour l'analyse de la relation entre l'inflation et ses déterminants, nous avons opté dans un premier temps pour un modèle de panel dynamique (voir équation (1)). Nous disposons d'un panel long incomplet de données dont la dimension individuelle est de taille 45 (<100) et la dimension temporelle moyenne est de 13 (Labra & Torrecillas, 2018). La dimension individuelle peut être inférieure à 45 pour un certain nombre de variables. Pour l'estimation de l'équation 1 dans l'échantillon global, nous avons utilisé GMM-système à deux étapes. Compte tenu des liens bidirectionnels entre l'inflation et la masse monétaire, cette dernière a été considérée comme

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

variable explicative prédéterminée. Les variables explicatives strictement exogènes sont les dépenses gouvernementales, la croissance du PIB réel, le prix du Brent sur les marchés internationaux, la pluviométrie, la température, les variances de la température et de la pluviométrie. Les variables binaires qui sont la crise alimentaire mondiale de 2007/2008 et l'Union monétaire ont été considérées seulement à niveau. Les variables ayant des coefficients non significatifs ont été éliminées successivement dans les équations. L'objectif de cette procédure est de trouver une meilleure équation pour l'analyse de l'inflation. Pour gérer la prolifération des instruments inhérente au panel long (Roodman, 2009), nous avons agi sur le nombre de retards des variables instrumentales et endogènes utilisées pour l'estimation du modèle (Labra & Torrecillas, 2018). Afin de tester la validité de nos résultats, nous avons utilisé le test de sur-identification de Hansen, pour nous assurer de la qualité des variables instrumentales. Nous avons également utilisé le test de corrélation sérielle de deuxième ordre AR(2) pour contrôler la non corrélation sérielle de deuxième ordre. L'option « robust » a été utilisée dans la routine de Roodman (2008) pour corriger les éventuelles hétéroscédasticités des termes d'erreurs. Les résultats des estimations de l'équation 1 par les GMM ont montré que les coefficients des termes retardés de l'inflation ne sont pas significatifs (voir Annexe 6). A l'échelle régionale, il n'y a donc pas une dynamique inflationniste imputable à l'inertie propre à l'inflation. Compte tenu de ces résultats, nous avons par la suite appliqué un modèle de panel à effet aléatoire pour l'estimation de l'équation 1. Le choix du panel à effet aléatoire au détriment du panel à effet fixe s'explique par l'existence des variables constantes dans le temps. Ce choix a été conforté par le test de Hausman (voir annexe7 Echantillon global) conforté par le test de Breusch et Pagan (choix du panel a effet aléatoire au détriment du MCO). Les résultats de ces estimations se trouvent dans le tableau 4.

L'équation 1 a aussi été estimée par zone géographique. Pour chacune des zones, un meilleur estimateur a été cherché. Ainsi dans la zone sahéenne, l'application du modèle de panel à effet fixe a montré qu'il n'y a pas d'effet fixe pays. Le test Hausman a été appliqué pour choisir le modèle de panel effet aléatoire au détriment du modèle à effet fixe. Nous avons par la suite appliqué le test de Breusch-Pagan Lagrange qui nous a montré que la variance entre les pays du sahel est nulle (pas d'effet panel) conduisant au choix des Moindres Carrés Ordinaires (MCO) pour les estimations (voir annexe 7 colonne zone sahéenne). Cette même démarche a été appliquée pour les estimations dans les zones tropicale, équatoriale et australe. Les MCO ont été appliqués pour les zones australe et équatoriale ; et le modèle de panel à effet aléatoire a été appliqué dans la zone tropicale (voir les annexes 7 colonnes zones tropicale, équatoriale et australe).

5. Résultats des estimations et analyse

Les résultats des estimations sur l'ensemble de l'échantillon sont présentés dans la section 5.1 et ceux selon les zones géographiques sont présentés dans la section 5.2.

5.1- Résultats sur l'ensemble de l'échantillon

Tableau 4: résultats des estimations

	$\Delta \log(\text{CPI})$									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Log(Pluvio)	0.022*** (0.004)				0.023*** (0.004)		0.021*** (0.004)	0.022*** (0.004)	0.019*** (0.004)	0.021*** (0.007)
Log(varpluvio)		-0.007*** (0.002)			-0.006*** (0.002)			-0.006*** (0.002)		-0.004 (0.010)
Log(tmp)			0.065** (0.031)			0.064** (0.029)	0.050** (0.025)	0.047** (0.024)	0.050** (0.024)	0.048* (0.025)
Log(vartmp)				-0.009*** (0.003)		-0.009*** (0.003)			-0.007*** (0.002)	-0.002 (0.011)
$\Delta \text{LogRPIB}$	-0.229*** (0.021)	-0.232*** (0.021)	-0.235*** (0.022)	-0.231*** (0.021)	-0.228*** (0.021)	-0.234*** (0.021)	-0.231*** (0.021)	-0.229*** (0.021)	-0.230*** (0.021)	-0.230*** (0.021)
logM2	-0.007** (0.003)	-0.012*** (0.003)	-0.011*** (0.003)	-0.013*** (0.003)	-0.009*** (0.003)	-0.013*** (0.003)	-0.007** (0.003)	-0.010*** (0.003)	-0.010*** (0.003)	-0.010*** (0.003)
logPbrent	0.017** (0.007)	0.020*** (0.007)	0.020*** (0.007)	0.020*** (0.007)	0.019*** (0.007)	0.021*** (0.007)	0.019*** (0.007)	0.020** (0.007)	0.020*** (0.007)	0.020*** (0.007)
Log(G)	0.006* (0.003)	0.007* (0.003)	0.010*** (0.004)	0.006 (0.004)	0.004 (0.003)	0.007* (0.004)	0.007** (0.003)	0.005 (0.003)	0.005 (0.003)	0.005 (0.003)
Crisealim20072008	0.049*** (0.006)	0.047*** (0.006)	0.048*** (0.006)	0.046*** (0.006)	0.048*** (0.006)	0.046*** (0.006)	0.048*** (0.006)	0.047*** (0.006)	0.047*** (0.006)	0.047*** (0.006)
UnionMonetaire	-0.062*** (0.007)	-0.060*** (0.0097)	-0.065*** (0.010)	-0.061*** (0.008)	-0.066*** (0.007)	-0.071*** (0.009)	-0.069*** (0.008)	-0.073*** (0.008)	-0.073*** (0.007)	-0.073*** (0.008)
Constant	-0.133*** (0.040)	-0.016 (0.030)	-0.206* (0.106)	-0.014** (0.030)	-0.126*** (0.039)	-0.221** (0.100)	-0.289*** (0.088)	-0.274*** (0.084)	-0.288*** (0.084)	-0.278*** (0.089)
Observations	534	534	534	534	534	534	534	534	534	534
N Pays	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Wald Chi2	277.03***	221.81***	219.59***	234.03***	301.36***	245.05***	284.70***	310.58***	311.04***	306.70***
R2-intra	0.236	0.244	0.239	0.247	0.243	0.247	0.237	0.244	0.244	0.244
R2-inter	0.760	0.622	0.630	0.659	0.791	0.696	0.777	0.808	0.807	0.808
R2-global	0.433	0.385	0.383	0.400	0.450	0.414	0.440	0.457	0.456	0.457
Sigma-u	0.015	0.022	0.022	0.021	0.014	0.020	0.014	0.014	0.014	0.014
Sigma_e	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
rho	0.091	0.176	0.168	0.160	0.080	0.145	0.088	0.076	0.076	0.080
Effet pays aléatoire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Source : Calcul de l'auteur

Le tableau 4 présente une série de résultats des estimations de l'équation 1 conformément à la démarche suivie. Cette dernière a consisté à introduire dans l'équation 1 les variables climatiques d'abord une à une et ensuite leurs différentes combinaisons. La colonne 1 présente les résultats des estimations lorsque la pluviométrie est la seule variable climatique introduite dans l'équation. La colonne 2 présente les résultats lorsque seule la variance de la pluviométrie est introduite. La colonne 3 présente les résultats lorsque seule la température est prise en compte. La colonne 4 présente les résultats lorsque seule la variance de la pluviométrie est introduite. La colonne 5 présente les résultats lorsque la pluviométrie en moyenne et en variance est introduite. La colonne 6 présente les résultats lorsque la température en moyenne et en variance est introduite. La colonne 7 présente les résultats lorsque la pluviométrie moyenne et la température moyenne sont introduites. La colonne 8 présente les résultats lorsque la pluviométrie en moyenne et variance et la température en moyenne sont introduites. La colonne 9 présente les résultats lorsque la pluviométrie en évolution moyenne et la température en moyenne et en variance sont introduites. La colonne 10 présente les résultats lorsque la pluviométrie en évolution moyenne et sa variance ainsi que la température en évolution moyenne et sa variance sont introduites.

Dans toutes les équations où elle apparaît, la pluviométrie a un effet statistiquement significatif et positif sur l'inflation. Nous suspectons que cet effet positif s'explique par le fait que lorsque la pluviométrie augmente, le revenu de la population agricole, qui représente près de 60% de la population totale, augmente et la demande des produits non agricoles augmente aussi. Etant donné que les produits non agricoles pèsent pour environ 60% à l'évolution du niveau général de prix, l'inflation s'en trouve positivement affecté. Nos tentatives de justification empirique de cette explication par la prise en compte de la croissance de la part de la valeur ajoutée agricole dans le PIB dans l'équation 1 se sont avérées non concluantes. La variance de la pluviométrie a un effet déflationniste. En effet, dans les équations où l'effet de la variance de pluviométrie est statistiquement significatif, il est négatif. L'effet de la température sur l'inflation est statistiquement significatif. Cet effet est positif traduisant le caractère inflationniste de la température. En effet, l'augmentation de la température, qui est synonyme de la sécheresse, affecte négativement la production et par ricochet l'inflation. La variance de la température quant à elle présente un effet statistiquement significatif et négatif. La variabilité de la température durant la période de culture agricole pluviale est synonyme de la régularité de la pluie qui a un effet positif sur la production.

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Cette dernière impacte négativement l'inflation lorsqu'elle augmente. On note cependant que dans la colonne 10 où la pluviométrie en évolution moyenne et en variance et la température en évolution moyenne et en variance sont introduites, la pluviométrie en évolution moyenne et la température en évolution moyenne ont un effet statistiquement significatif. Lorsque la pluviométrie augmente de 1%, l'inflation augmente de 2,1% au seuil de confiance de 1% et lorsque la température augmente de 1%, l'inflation augmente de 4,8% au seuil de confiance de 10%. L'effet évolution moyenne de la pluviométrie et de la température est plus important que l'effet variance de ces deux variables climatiques.

La croissance du PIB réel affecte significativement l'inflation. Lorsqu'elle augmente, l'inflation diminue. La colonne 10 montre que lorsque la croissance du PIB augmente de 1%, l'inflation diminue de 2,3%. La masse monétaire en % du PIB a un effet statistiquement significatif et négatif sur l'inflation. Lorsqu'elle augmente de 1% du PIB, l'inflation diminue de 0,7% à 1,3% au seuil de confiance (dans le pire de cas) de 5%. Les dépenses publiques n'ont pas un effet statistiquement significatif net sur l'inflation. Dans certaines estimations, elles ont un effet significatif et positif et dans d'autres, elles n'ont pas d'effets significatifs. La variable, prix du Brent sur les marchés internationaux, a un effet statistiquement significatif et positif sur l'inflation. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 1,7 à 2,1% au seuil de confiance de 10% dans les pires de cas. L'augmentation des prix du pétrole sur les marchés internationaux est donc l'une des causes de l'inflation en Afrique subsaharienne. La variable indicatif crise alimentaire de 2007/2008 présente un effet statistiquement significatif et positif sur l'inflation. C'est dire que la crise alimentaire mondiale a eu un effet inflationniste dans les économies d'Afrique subsaharienne. Lorsqu'elle s'était survenue en 2007/2008, elle a causé une augmentation de l'inflation autour de 4% au seuil de confiance de 1%. La variable indicatif Union monétaire cependant présente un effet statistiquement significatif et négatif sur l'inflation. Lorsqu'on passe d'un pays qui n'appartient pas à une union monétaire à un pays qui y appartient, l'inflation diminue entre 5,2 à 7,1%. Ainsi le fait d'appartenir à une union monétaire expose moins à l'inflation. C'est un résultat qui conforte la situation présentée dans les faits stylisés.

5.2- Analyse selon les zones géographiques

Les zones géographiques objets de l'analyse sont composées des zones sahélienne, tropicale, équatoriale et australe.

5.2.1- Analyse de l'inflation dans la zone sahélienne

Tableau 5 : Résultats des estimations de la relation entre variables météorologiques et l'inflation pour les pays sahéliens.

	$\Delta \log(\text{CPI})$									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Log(Pluvio)	-0.003 (0.022)				-0.015 (0.037)		-0.052 (0.035)	-0.040 (0.041)	-0.050 (0.037)	0.124 (0.126)
Log(varpluvio)		-0.002 (0.006)			0.005 (0.010)			-0.007 (0.010)		-0.150 (0.107)
Log(tmp)			0.309* (0.170)			0.382* (0.199)	0.552** (0.268)	0.598** (0.280)	0.571** (0.037)	0.649** (0.286)
Log(vartmp)				-0.004 (0.006)		-0.006 (0.006)			-0.002 (0.007)	0.101 (0.075)
$\Delta \text{LogRPIB}$	-0.297* (0.158)	-0.298* (0.158)	-0.329* (0.170)	-0.301* (0.159)	-0.300* (0.161)	-0.326** (0.163)	-0.345*** (0.165)	-0.345** (0.166)	-0.345** (0.166)	-0.358** (0.166)
logM2	-0.028 (0.019)	-0.029 (0.019)	-0.032 (0.020)	-0.030 (0.020)	-0.029 (0.019)	-0.030 (0.020)	-0.031 (0.019)	-0.029 (0.019)	-0.030 (0.020)	-0.033 (0.021)
logPbrent	0.057* (0.029)	0.058* (0.029)	0.081** (0.038)	0.059* (0.030)	0.058* (0.029)	0.084** (0.039)	0.094** (0.042)	0.096** (0.022)	0.095** (0.042)	0.101** (0.044)
Log(G)	0.026 (0.021)	0.025 (0.021)	0.022 (0.020)	0.024 (0.020)	0.025 (0.021)	0.024 (0.020)	0.030 (0.0021)	0.032 (0.022)	0.031 (0.021)	0.054 (0.035)
Crisealim20072008	0.071*** (0.018)	0.070*** (0.018)	0.069*** (0.018)	0.069*** (0.018)	0.070*** (0.018)	0.071*** (0.018)	0.074*** (0.033)	0.075*** (0.018)	0.074*** (0.018)	0.079*** (0.075)
UnionMonétaire	-0.088*** (0.028)	-0.087*** (0.0031)	-0.093*** (0.028)	-0.081*** (0.033)	-0.073* (0.043)	-0.107*** (0.031)	-0.072** (0.033)	-0.090** (0.040)	-0.078** (0.039)	-0.174*** (0.065)
Constant	-0.109 (0.186)	-0.128 (0.140)	-1.243* (0.707)	-0.124 (0.137)	-0.051 (0.225)	-1.507* (0.811)	-1.813** (0.905)	-2.033*** (0.992)	-1.890** (0.937)	-2.792*** (1.334)
Observations	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
Fisher test	7.80***	7.62***	7.84***	7.61***	6.82	6.74***	7.60***	6.60***	6.62***	6.31***
R2	0.320	0.320	0.336	0.321	0.321	0.338	0.349	0.350	0.349	0.365

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Le tableau 5 est la réplique du tableau 4 dans la zone sahélienne. Ainsi, la description des colonnes (1) à (10) est la même que celle faite des colonnes (1) à (10) du tableau 4. Selon le R2 de la colonne 10, la température et la pluviométrie (par leurs évolutions moyennes et leurs variances), la croissance du PIB réel, le prix du pétrole sur les marchés internationaux, la crise alimentaire mondiale de 2007/2008 et l'appartenance à une union monétaire expliquent 36,5% de la variabilité de l'inflation dans les pays du sahel.

Il ressort des résultats des estimations que dans cette zone, seule la température (en évolution moyenne) est la variable climatique qui a un effet statistiquement significatif sur l'inflation. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 64,9% au seuil de confiance de 5%. Elle confirme ainsi l'effet inflationniste des hautes températures ou de la sécheresse.

On note également que les variables de contrôle qui ont des effets statistiquement significatifs sur l'inflation sont la croissance du PIB réel, le prix du pétrole sur les marchés internationaux, la crise alimentaire mondiale et l'appartenance à une union monétaire. La croissance du PIB a effet déflationniste dans les pays du sahel sûrement par la production agricole. C'est aussi le cas de l'appartenance à une union monétaire. Ceci montre que les politiques monétaires dans les unions monétaires sont plus efficaces que dans les autres types de pays. Le prix du pétrole, cependant, a un effet inflationniste. C'est aussi le cas de la crise alimentaire mondiale 2007/2008.

5.2.2- Analyse de l'inflation dans la zone tropicale

Le tableau 6 est aussi la réplique du tableau 4 pour la zone tropicale. Ainsi, la description des colonnes (1) à (10) est la même que celle faite des colonnes (1) à (10) du tableau 4. Selon le R2 de la colonne 10, la pluviométrie et la température (en moyenne et en variance), la croissance du PIB réel, le prix du pétrole sur les marchés internationaux, la crise alimentaire de 2007/2008 et l'appartenance à une union monétaire expliquent 92,9% de la variabilité de l'inflation dans les pays de la zone tropicale.

Tableau 6 : Résultats des estimations de la relation entre variables météorologiques et l'inflation dans la zone tropicale

	$\Delta \log(\text{CPI})$									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Log(Pluvio)	0.023*** (0.004)				0.024*** (0.004)		0.025*** (0.004)	0.025*** (0.004)	0.021*** (0.005)	0.048*** (0.008)
Log(varpluvio)		-0.009 (0.010)			-0.010 (0.006)			-0.010* (0.006)		-0.0058*** (0.021)
Log(tmp)			-0.023 (0.187)			0.016 (0.159)	-0.125 (0.083)	-0.097 (0.069)	-0.083 (0.076)	-0.186** (0.073)
Log(vartmp)				-0.015* (0.008)		-0.015 (0.009)			-0.009 (0.006)	-0.050** (0.021)
$\Delta \text{LogRPIB}$	-0.182*** (0.057)	-0.189*** (0.055)	-0.190*** (0.036)	-0.187*** (0.055)	-0.178*** (0.056)	-0.186*** (0.055)	-0.182*** (0.057)	-0.179*** (0.057)	-0.180*** (0.011)	-0.176*** (0.058)
logM2	-0.005 (0.005)	-0.010* (0.006)	-0.007 (0.006)	-0.011* (0.007)	-0.008 (0.006)	-0.011* (0.007)	-0.004 (0.005)	-0.007 (0.006)	-0.007 (0.006)	-0.006 (0.006)
logPbrent	0.011 (0.011)	0.014 (0.011)	0.012 (0.011)	0.014 (0.010)	0.013 (0.011)	0.014 (0.011)	0.008 (0.011)	0.011 (0.011)	0.010 (0.011)	0.009 (0.011)
Log(G)	0.004 (0.006)	0.004 (0.008)	0.006 (0.007)	0.002 (0.007)	0.001 (0.007)	0.002 (0.007)	0.004 (0.006)	0.0006 (0.006)	0.001 (0.007)	0.0005 (0.006)
Crisealim20072008	0.050*** (0.008)	0.050*** (0.008)	0.050*** (0.008)	0.049*** (0.008)	0.049*** (0.008)	0.049*** (0.008)	0.049*** (0.008)	0.049*** (0.008)	0.048*** (0.008)	0.050*** (0.008)
UnionMonétaire	-0.076*** (0.008)	-0.075*** (0.015)	-0.066*** (0.010)	-0.079*** (0.011)	-0.085*** (0.011)	-0.080*** (0.011)	-0.073*** (0.009)	-0.082*** (0.011)	-0.080*** (0.011)	-0.087*** (0.009)
Constant	-0.102*** (0.047)	0.065 (0.039)	0.117 (0.633)	-0.019 (0.050)	-0.084** (0.042)	-0.033 (0.551)	0.299 (0.265)	0.229 (0.228)	0.173 (0.252)	0.575 (0.273)
Observations	181	181	181	181	181	181	181	181	181	181
N Pays	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Wald Chi2	190.07***	80.68***	144***	132.82***	194.45***	279.16***	181.00***	364.15***	252.51***	472.28***
R2-intra	0.270	0.283	0.270	0.288	0.286	0.289	0.266	0.282	0.281	0.280
R2-inter	0.863	0.678	0.684	0.735	0.872	0.732	0.899	0.895	0.888	0.929
R2-global	0.614	0.510	0.499	0.552	0.630	0.551	0.634	0.641	0.637	0.656
Sigma-u	0.018	0.019	0.020	0.017	0.015	0.018	0.017	0.017	0.018	0.014
Sigma_e	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
rho	0.187	0.209	0.226	0.166	0.134	0.189	0.175	0.171	0.188	0.114
Effet pays aléatoire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Source : auteur

Dans la zone tropicale, les variables climatiques impactent de manière statistiquement significative l'inflation par la température et la pluviométrie à la fois par leurs évolutions moyennes ou par leurs variances. La température agit négativement à la fois par son évolution moyenne et par sa variance. C'est un résultat contre-intuitif et traduit sans nul doute un effet non linéaire de cette variable climatique. La pluviométrie par contre agit positivement par son évolution moyenne et négativement par sa variance. L'effet positif de la pluviométrie peut s'expliquer par le revenu qu'elle procure à la population agricole. Sa variance est synonyme d'une régularité de la pluie et donc agit négativement par la bonne production qu'elle occasionne.

Les variables de contrôle qui ont un effet statistiquement significatif de manière certaine dans les pays de la zone tropicale sont la croissance du PIB réel, la crise alimentaire mondiale de 2007/2008 et l'appartenance à une union monétaire. La croissance du PIB réel et l'appartenance à une union monétaire ont un effet négatif sur l'inflation. La croissance du PIB réel agit négativement sur l'inflation car elle est synonyme d'une croissance agricole dans le contexte d'Afrique subsaharienne. Et l'appartenance à une union monétaire a un effet négatif sur l'inflation par la qualité des politiques monétaires mise en œuvre. La crise alimentaire mondiale de 2007/2008 a un effet positif sur l'inflation.

5.2.3- Analyse de l'inflation dans la zone équatoriale

Tableau 7: Résultats des estimations de la relation entre variables météorologiques et l'inflation dans la zone équatoriale

	$\Delta \log(\text{CPI})$									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Log(Pluvio)	0.031 (0.022)				-0.008 (0.021)		-0.002 (0.022)	-0.016 (0.021)	-0.025 (0.021)	-0.092** (0.041)
Log(varpluvio)		-0.013*** (0.004)			-0.014*** (0.004)			-0.009* (0.005)		0.096 (0.058)
Log(tmp)			0.284*** (0.083)			0.174** (0.085)	0.288*** (0.076)	0.0191** (0.086)	0.188** (0.084)	0.261*** (0.090)
Log(vartmp)				-0.013*** (0.005)		-0.008 (0.005)			-0.010** (0.005)	-0.112* (0.063)
$\Delta \text{LogRPIB}$	-0.463*** (0.127)	-0.463*** (0.122)	-0.465*** (0.127)	-0.461*** (0.120)	-0.466*** (0.122)	-0.460*** (0.121)	-0.465*** (0.126)	-0.466*** (0.123)	-0.467*** (0.123)	-0.472*** (0.119)
logM2	-0.017*** (0.006)	-0.028*** (0.007)	-0.031*** (0.007)	-0.027*** (0.007)	-0.028*** (0.006)	-0.032*** (0.007)	-0.031*** (0.007)	-0.034*** (0.007)	-0.034*** (0.0057)	-0.033*** (0.007)
logPbrent	0.044*** (0.013)	0.050*** (0.013)	0.055*** (0.013)	0.049*** (0.013)	0.051*** (0.013)	0.054*** (0.013)	0.055*** (0.007)	0.056*** (0.012)	0.056*** (0.012)	0.056*** (0.013)
Log(G)	-0.011 (0.007)	-0.012* (0.007)	0.012* (0.007)	-0.011 (0.007)	0.011 (0.007)	0.012* (0.007)	0.012* (0.007)	0.012* (0.007)	0.012 (0.007)	0.006 (0.008)
Crisealim20072008	0.057*** (0.016)	0.052*** (0.016)	0.051*** (0.016)	0.052*** (0.016)	0.052*** (0.016)	0.050*** (0.016)	0.051*** (0.016)	0.050*** (0.016)	0.050*** (0.016)	0.050*** (0.017)
UnionMonetaire	-0.072*** (0.016)	-0.049*** (0.010)	-0.092*** (0.014)	-0.052*** (0.010)	-0.045 (0.016)	-0.075*** (0.015)	-0.92*** (0.092)	-0.067*** (0.020)	-0.065*** (0.020)	-0.064*** (0.019)
Constant	-0.308* (0.163)	-0.089* (0.052)	-1.014*** (0.276)	-0.138** (0.054)	-0.035 (0.156)	-0.682** (0.276)	-1.015*** (0.273)	-0.598* (0.313)	-0.573* (0.307)	-0.742** (0.327)
Observations	117	117	117	117	117	117	117	117	117	117
Fisher test	8.40***	8.97***	9.23***	8.86***	9.43***	8.42***	9.91***	9.35***	9.30***	8.79***
R2	0.495	0.534	0.535	0.534	0.534	0.546	0.535	0.547	0.550	0.562

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Le tableau 7 aussi est la réplique du tableau 4 pour la zone équatoriale. Ainsi, la description des colonnes (1) à (10) est la même que celle faite des colonnes (1) à (10) du tableau 4. Selon le R2 de la colonne 10, les variables climatiques, la croissance du PIB réel, la masse monétaire, le prix du pétrole sur les marchés internationaux et l'appartenance à une union monétaire expliquent 56,2% de la variabilité de l'inflation dans la zone équatoriale d'Afrique subsaharienne.

Les variables climatiques qui agissent de manière significative sur l'inflation sont la pluviométrie par son évolution moyenne, la température par sa moyenne et sa variance. Lorsque la pluviométrie varie de 1%, l'inflation diminue de 9,2% au seuil de confiance de 5%. C'est un résultat intuitif. En effet, une bonne pluviométrie est synonyme d'une bonne campagne agricole qui a un effet baissier sur le niveau général de prix. Lorsque la moyenne de la température augmente de 1%, l'inflation augmente de 26,1% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Lorsque la variance de température augmente de 1%, l'inflation diminue de 11,2% au seuil de confiance de 10%.

Parmi les variables de contrôle, la croissance du PIB réel, la masse monétaire, le prix du Brent, la crise alimentaire de 2007/2008 et l'appartenance à une union monétaire ont un effet statistiquement significatif sur l'inflation. La croissance du PIB réel agit négativement sur l'inflation par l'effet production ou de l'offre. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation diminue de 47,2% (voir colonne 10). La masse monétaire agit négativement sur l'inflation traduisant la qualité de la politique monétaire dans la zone équatoriale. Lorsqu'elle augmente de 1% du PIB, l'inflation diminue de 3,3% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs (colonne 10). Le prix du Brent également agit positivement sur l'inflation. Lorsqu'il augmente 1%, l'inflation augmente de 5,6% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs (colonne 10). La crise alimentaire de 2007/2008 a eu aussi des effets positifs sur l'inflation. L'appartenance à une union monétaire a un effet négatif sur l'inflation. Lorsqu'on passe d'un pays qui n'appartient pas à une union monétaire à un pays qui y appartient, l'inflation diminue de 6,4% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs.

5.2.4- Analyse de l'inflation dans la zone australe

Tableau 8: Résultats des estimations de la relation entre variables météorologiques et l'inflation dans la zone australe

	$\Delta \log(\text{CPI})$									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Log(Pluvio)	0.043*** (0.006)				0.042*** (0.006)		0.043*** (0.006)	0.042*** (0.006)	0.044*** (0.006)	0.060*** (0.009)
Log(varpluvio)		-0.007*** (0.002)			-0.0005 (0.001)			-0.0004 (0.0014)		-0.025** (0.010)
Log(tmp)			-0.024 (0.018)			0.018 (0.018)	0.016 (0.016)	0.016 (0.016)	0.016 (0.016)	0.012 (0.016)
Log(vartmp)				-0.009*** (0.002)		-0.009*** (0.002)			-0.0003 (0.002)	0.031** (0.013)
$\Delta \text{LogRPIB}$	-0.189*** (0.043)	-0.185*** (0.050)	-0.197*** (0.051)	-0.186*** (0.049)	-0.188*** (0.044)	-0.188*** (0.049)	-0.190*** (0.043)	-0.190*** (0.044)	-0.190*** (0.044)	-0.181*** (0.043)
logM2	0.006 (0.005)	0.005 (0.005)	-0.005 (0.006)	-0.004 (0.005)	0.006 (0.005)	-0.002 (0.006)	-0.005 (0.005)	-0.005 (0.005)	0.005 (0.005)	0.009 (0.005)
logPbrent	-0.012 (0.012)	-0.007 (0.014)	-0.009 (0.014)	-0.007 (0.013)	-0.012 (0.012)	-0.007 (0.013)	-0.0012 (0.012)	-0.011 (0.012)	0.012 (0.012)	-0.011 (0.012)
Log(G)	-0.006 (0.005)	-0.011* (0.006)	-0.003 (0.007)	-0.010* (0.006)	-0.007 (0.005)	-0.008 (0.007)	-0.005 (0.006)	-0.005 (0.006)	-0.005 (0.006)	-0.008 (0.006)
Crisealim20072008	0.037*** (0.007)	0.036*** (0.008)	0.036*** (0.008)	0.035*** (0.008)	0.037*** (0.007)	0.035*** (0.008)	0.036*** (0.007)	0.036*** (0.007)	0.0036*** (0.007)	0.038*** (0.007)
UnionMonetaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Constant	-0.150*** (0.057)	0.110* (0.058)	0.027 (0.086)	0.082 (0.056)	-0.144** (0.060)	-0.188* (0.049)	-0.199** (0.079)	-0.194** (0.082)	-0.202** (0.082)	-0.188** (0.081)
Observations	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
Fisher test	17.21***	8.18***	6.53***	9.73***	14.69***	8.96***	15.03***	13.08***	613.11***	12.04***
R2	0.455	0.302	0.242	0.324	0.455	0.327	0.457	0.458	0.457	0.473

Les seuils de significativité : *** à 1%, ** à 5% et * à 10%

Les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types

Le tableau 8 aussi est la réplique du tableau 4 pour la zone d'Afrique australe. Ainsi, la description des colonnes (1) à (10) est la même que celle faite des colonnes (1) à (10) du tableau 4. R2 de la colonne 10, la température et la pluviométrie (en évolution moyenne et la variance), la croissance du PIB réel, le prix pétrole sur le marchés internationaux, la crise alimentaire de 2007/2008 et l'appartenance à un union monétaire expliquent 56,2% de la variabilité de l'inflation en Afrique subsaharienne sur la période de 2000 à 2018.

Parmi les variables climatiques, il y a la pluviométrie qui agit par sa moyenne et sa variance (voir colonne10). La pluviométrie a un effet inflationniste. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 6% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Comme expliqué précédemment, une bonne pluviométrie est synonyme d'une augmentation de revenus de la population agricole et donc une augmentation des prix des produits non-agricoles par le biais duquel l'inflation s'en trouve impactée. La variance de pluviométrie agit négativement sur l'inflation.

Parmi les variables de contrôle, ce sont la croissance du PIB réel et la crise alimentaire mondiale qui agissent de manière statistiquement significative sur l'inflation. La croissance du PIB réel agit négativement sur l'inflation par l'entremise de la production. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 18,1% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. La crise alimentaire par contre agit positivement sur l'inflation. Celle de 2007/2009 a provoqué une augmentation de 3,8% de l'inflation dans la zone d'Afrique australe.

6. Conclusion

La présente étude analyse la relation entre l'inflation et les facteurs climatiques en Afrique subsaharienne en considérant le climat comme une réalité plus large. Les facteurs climatiques considérés sont la pluviométrie en évolution moyenne et variance ainsi que la température en évolution moyenne et en variance.

Il apparaît de manière claire que la pluviométrie et la température ont un effet statistiquement significatif sur l'inflation : positif par leurs évolutions moyennes et négatif par leurs variances. La pluviométrie affecte positivement l'inflation par l'effet revenu qu'elle procure aux ménages agricoles. Et la température affecte positivement l'inflation par son impact sur la production et donc par l'effet offre. Ce résultat qui porte sur l'ensemble des pays d'Afrique subsaharienne est contraire à celui des pays pris isolément présenté dans le tableau 1. Ceci peut s'expliquer par le fait que prise isolément, la masse critique de la population agricole (70% de la population totale) ne s'exprime pas, mais lorsque les pays sont rassemblés, cette masse s'exprime mieux. Lorsque les quatre variables climatiques (pluviométrie en moyenne et variance, température en moyenne et variance) sont prises en compte dans l'analyse, ce sont les effets de la composante moyenne de la pluviométrie et de la température qui apparaissent significatifs.

Selon les zones géographiques, il y a une nette disparité. Dans la zone sahélienne, c'est la température qui est la variable climatique qui affecte de façon statistiquement significative l'inflation par sa moyenne. Lorsqu'elle augmente, l'inflation augmente aussi. C'est l'effet inflationniste qu'on lui reconnaît. Dans la zone tropicale, les variables climatiques impactent de manière statistiquement significative l'inflation par la température et la pluviométrie à la fois par leurs évolutions moyennes et par leurs variances. La température agit négativement à la fois par son évolution moyenne et par sa variance. C'est un résultat contre-intuitif et traduit sans nul doute un effet non linéaire de cette variable climatique. La pluviométrie par contre agit positivement par son évolution moyenne et négativement par sa variance. Dans la zone équatoriale, les variables climatiques qui agissent de manière significative sur l'inflation sont la pluviométrie par son évolution moyenne, la température par sa moyenne et sa variance. Lorsque la pluviométrie varie de 1%, l'inflation diminue de 9,2% au seuil de confiance de 5%. C'est un résultat intuitif. Lorsque la moyenne de la température augmente de 1%, l'inflation augmente de 26,1% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Lorsque la variance de température augmente de 1%, l'inflation diminue de 11,2% au seuil de confiance de 10%. Dans la zone australe, La pluviométrie

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

a un effet inflationniste. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 6% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Comme expliqué précédemment, une bonne pluviométrie est synonyme d'une augmentation de revenus de la population agricole et donc une augmentation des prix des produits non-agricoles par le biais duquel l'inflation s'en trouve impactée. La variance de pluviométrie agit négativement sur l'inflation.

Cette étude confirme également le fait connu de la transmission des chocs extérieurs de prix du pétrole ou des crises alimentaires mondiales sur les marchés nationaux d'Afrique subsaharienne. Le prix du pétrole sur les marchés internationaux impacte particulièrement l'inflation dans les pays du Sahel et de la zone équatoriale. L'effet de la crise alimentaire sur l'inflation par contre n'épargne aucun pays d'Afrique subsaharienne. Elle confirme également l'effet de la masse monétaire sur l'inflation surtout dans les pays de la zone équatoriale. Elle confirme enfin le fait que l'inflation dans les unions monétaires est plus maîtrisée que hors des unions monétaires. Les dépenses publiques cependant semblent ne pas avoir d'effet clair sur l'inflation dans les économies d'Afrique subsaharienne. La croissance du PIB réel a aussi un effet déflationniste dans toutes les grandes zones géographiques mais à intensité variée.

Ces résultats montrent qu'en termes de politiques économiques, la gestion de l'inflation devrait désormais tenir compte de l'évolution des variables climatiques. Toutes ces variables agissent sur l'inflation à travers la production et/ou les revenus agricoles. On peut retenir que dans le contexte d'Afrique subsaharienne, une évolution climatique favorable à la production agricole peut contribuer à entretenir l'inflation.

7. Bibliographie

- Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. (2004, May). Institutions as a fundamental cause of long-run growth. *NBER Working paper serie*.
- Adjei, S. K. (2018). Inflation Determinants - Milton Friedman's Theory and the Evidence from Ghana, 1965-2012. *International Journal of Applied Economics, Finance and Accounting*, pp. 21-36.
- Adjei, S. K. (2018). Inflation Determinants - Milton Friedman's Theory and the Evidence from Ghana, 1965-2012. *International Journal of Applied Economics, Finance and Accounting*.
- Aron, J., Muellbauer, J., & Sebudde, R. (2015). Inflation forecasting models for Uganda: is mobile money relevant? *New Economic thinking*.
- Baldini, A., & Paplawski_Ribeiro, M. (2011, March). Fiscal and Monetary Determinants in Low-Income countries: Theory and evidence from Sub-Saharan Africa. *Journal for African economies*, pp. 419-462.
- Bawa, S., Abdullahi, S. S., & Adamu, I. (2016, June). Analysis of Inflation Dynamics in Nigeria. *CBN Journal of Applied Statistics*.
- Behera, H. K., Wahi, G., & Kapur, M. (2018, June). Phillips curve relationship in an emerging economy: Evidence from India. *Economic Analysis and Policy*.
- Bodin, J. (1568). Réponse au paradoxe de M. de Malestroict touchant l'enchérissement de toutes choses, et les moyens d'y remédier .
- Caceres, C., Poplawski-Ribeiro, M., & Tartari, D. (2012, November). Inflation Dynamics in the CEMAC region. *Journal of African Economies*, pp. 239–275.
- Caraballo, A., & Carlos, U. (2009, October 30). *The relevance of supply shocks for inflation: the spanish case*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/00036840601007443>
- Chaudhary, S. K., & Xiumin, L. (2018, August). Analysis of the Determinants of Inflation in Nepal. *American Journal of Economics*, pp. 209-212.
- Chaudhary, S. K., & Xiumin, L. (2018). Analysis of the Determinants of Inflation in Nepal. *American Journal of Economics*.
- Cogley, T., Primiceri, G. E., & Sargent, T. J. (2010). Inflation-Gap Persistence in the US. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2 (1): 43-69.
- De Figueroa, E. (1969, Mars). L'"inflation structurelle" et l'expérience latino-américaine. *Tiers monde*, pp. 533-552.
- Diouf, M. A. (2007, December). Modeling Inflation for Mali. *IMF Working paper*.
- Dräger, L., Gründler, K., & Potrafke, N. (2022, April 7). Political Shocks and Inflation Expectations: Evidence from the 2022 Russian Invasion of Ukraine. *CESifo Working Paper No. 9649*, p. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4070238.
- Eftekhari Mahabadi, S., & Kiaee, H. (2015). Determinants of Inflation in Selected Countries. *Journal of Money and Economy*.
- Eftekhari Mahabadi, S., & Kiaee, H. (2015). Determinants of Inflation in Selected Countries. *Journal of Money and Economy*.
- Faccia, D., Parker, M., & Stracca, L. (2021, November 12). *What we know about climate change and inflation*. Retrieved from ECB Working Paper, forthcoming: <http://www.thethao247web.net/article/what-we-know-about-climate-change-and-inflation>
- Fisher, B., & Mayer, T. (1980). On the structuralist view of inflation in some Latin American countries: a reassessment. *Kiel Institute of world Economics: Working paper no. 103*.
- Fisher, I. (1911). The purchasing power of money.

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

- FMI. (2001). Staff report for 2000 Article IV consultation and request for three year arrangement under the poverty reduction and growth facility.
- FMI. (2001). Staff report for 2001 Article IV consultation and discussion on Staff-Monitoring program.
- FMI. (2002). Africa Subsaharan: regional economic outlook.
- FMI. (2004). Zimbabwe: 2004 Article IV Consultation-Staff report.
- FMI. (2018). Annual Report on Exchange Arrangements and Exchange Restrictions. *Annual report*.
- Frances, P. H., & Janssens, E. (2018, September). Inflation in Africa:1960-2015.
- Friedman, M., & Schwartz, A. J. (1963). A monetary history of the United States 1867-1960.
- Galesi, A., & Lombardi, M. J. (2009, June 12). External Shocks and International Inflation Linkages: A Global VAR Analysis. *ECB Working Paper No. 1062*, p. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1414192.
- García-Schmidt, M., & Woodford, M. (2019, January). *Are Low Interest Rates Deflationary? A Paradox of Perfect-Foresight Analysis*. Retrieved from www.aeaweb.org: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.20170110>
- Gordon, R. J. (1976). Recent developments in the theory of inflation and unemployment.
- Guyen, A. D., Jemma, D., Unsal, F. D., & Williams, O. H. (2017). On the drivers of inflation in Sub-Saharan Africa. *International Economics*, pp. 71-84.
- Hahn, E. (2003). Pass-Through of External Shocks to Euro Area Inflation. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=457310.
- Ireland, P. N. (2007). Changes in the Federal Reserve's Inflation Target: Causes and Consequences. *Journal of Money, Credit and Banking*, 39(8):1851–1882.
- Kabundi, A. (2012). Dynamics of Inflation in Uganda. *ADB Working Paper*.
- Kapko, F. (2017, December 8). *Ecofinance Hebdo*. Retrieved from Agenceecofin: <https://www.agenceecofin.com/dissection/0712-52712-croissance-et-inflation-en-afrique-zoom-par-pays-et-par-sous-region-selon-les-chiffres-de-la-bad>
- Karras, G. (1993). Money, inflation, and output growth: Does the aggregate demand-aggregate supply model explain the international evidence? *Review of World Economics*, 129, pages662–674.
- Keay, R. (1959). Vegetation map of the South of the Tropic of cancer-Explanatory notes. *Oxford University Press*.
- Keynes, J. M. (1936). The General Theory of Employment, Interest and Money.
- Kinda, T. (2011, March). Modeling Inflation in Chad. *International Monetary Fund Working paper*.
- Kirkpatrick, C., & Nixon, F. I. (1976). The origins of inflation in less developed countries. *Manchester University Press*.
- Kunawotor, M. E., Bokpin, G. A., Asuming, P. O., & Amoateng, K. A. (2021). The impacts of extreme weather Event on inflation and the implication for monetary plicy in Africa. *Sage Journals*.
- Labra, R., & Torrecillas, C. (2018). Estimating dynamic Panel data. A practical approach to perform long panel. *Revista Colombiana de Estadística*.
- Labra, R., & Torrecillas, C. (2018, January). Estimating dynamic Panel data. A pratical approach to perform long panels. p. 39.
- Leduc, S., & Liu, Z. (2016). Uncertainty shocks are aggregate demand shock. *Journal of Monetary Economics*, 20-35.
- Lukmanova, E., & Rabitsch, K. (2022, February 21). <https://papers.ssrn.com/>. Retrieved from www.ssrn.com/: <https://ssrn.com/abstract=3437907>

Chapitre2 : Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

- Madito, O., & Odhiambo, N. M. (2018). Main determinants of inflation in South Africa: an empirical investigation. *Organizations and Markets in emerging countries*.
- Maweje, J., & Lwanga, M. M. (2016). Inflation dynamics and agricultural supply shocks in Uganda.
- McKibbin, W., Morris, A., Panton, A. J., & Wilcoxon, P. J. (2017, December). Climate change and monetary policy: Dealing with disruption. *CAMA Working Paper 77/2017*.
- Mukherjee, K., & Ouattara, B. (2021, August 10). Climate and monetary policy: do temperature shocks lead to inflationary pressures? *Climatic Change*.
- Nahousse, D. (2019). The Determinants of Inflation in West Africa. *International Journal of Economics and Financial Research*, 100-105.
- Ncube, M., & Eliphias, N. (2011, August). Inflation Targeting, Exchange Rate Shocks and Output: Evidence from South Africa. *AFDB Working Paper No. 134*.
- Nomahlubi, M., Mhaka, S., & Phiri, A. (2019). The inflation -growth relationship in Sub-Saharan Africa. *Sciend*, pp. 84-102.
- Okoye, L. U., Olokoyo, F. O., Ezej, F. N., Okoh, J. I., & Evbuomwan, G. O. (2019, February). Determinants of behaviour of inflation rate in Nigeria. *Investment management and financial innovations*, pp. 25-36.
- Okoye, L. U., Olokoyo, F. O., Ezeji, F. N., Okoh, J. I., & Evbuomwan, G. O. (2019). Determinants of behavior of inflation rate in Nigeria. *Investment Management and Financial Innovations*.
- Olsson, O., Douglas, A., & Hibbs, J. (2005). Biogeography and long-run economic Development. *European Economic Review*, pp. 109-138.
- Oulatta, M. (2018). Modelling Inflation in Tanzania. *Working Paper American University*.
- Ricardo, D. (1817). Les principes de l'économie politique et de l'impôt.
- Rodier, J. (1964). Regimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'Ouest du Congo. *Orstom*.
- Roodman, D. (2009). A Note on the Theme of Too Many Instruments. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*.
- Sivakumar, M. (1989). Agroclimatic Aspects of Rainfed Agriculture. *ICRISAT Conference Paper no. CP 410*.
- Svensson, L. E. (2000, February). Open-economy inflation targeting. *Journal of International Economics*, pp. 155-183.
- Totonchi, J. (2011). Macroeconomic theories of inflation. *International Conference on Economics and Finance Research*.
- Trabelsi, A. H. (1998). *La crédibilité des politiques de désinflation par ancrage nominal du taux de change dans les pays en voie de développement (cas du Chili et d'Israël)*. Retrieved from www.theses.fr/1998PA020057
- Uribe, M. (2021). The Neo-Fisher Effect: Econometric Evidence from Empirical and Optimizing. *American Economic Journal: Macroeconomics, forthcoming*.
- Zhao, L., Zhang, X., Wang, S., & Xu, S. (2016). The effects of oil price shocks on output and inflation in China. *Energy Economics*, 101–110.

8. Annexes

Annexe 1 : Contribution des fonctions de consommation dans la détermination de l'indice de prix.

F1	Produits alimentaires et boissons non alcoolisées
F2	Boissons alcoolisées et tabac
F3	Articles d'habillements et chaussures
F4	Logement, eau, gaz, électricité et autres combustibles
F5	Meubles, articles de ménage et entretien courant de la maison
F6	Santé
F7	Transports
F8	Communications
F9	Loisirs et culture
F10	Enseignement
F11	Restaurants et hôtels
F12	Biens et services divers

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	Total
AGO	47%	2%	6%	11%	7%	3%	8%	3%	2%	2%	3%	5%	100%
BEN	38%	1%	5%	11%	2%	5%	11%	4%	2%	6%	12%	5%	100%
BWA	14%	4%	6%	17%	5%	3%	23%	7%	3%	5%	4%	9%	100%
BFA	50%	3%	6%	9%	4%	3%	8%	3%	1%	2%	6%	4%	100%
BDI	57%	2%	6%	5%	6%	3%	4%	3%	2%	1%	9%	2%	101%
CPV	25%	2%	7%	24%	5%	3%	13%	4%	3%	2%	4%	7%	100%
CMR	31%	1%	10%	13%	5%	5%	12%	5%	4%	3%	7%	5%	100%
CAF	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TCD	44%	2%	8%	26%	3%	2%	8%	2%	1%	1%	1%	2%	100%
COM	56%	1%	4%	11%	3%	4%	9%	4%	1%	3%	2%	3%	100%
COD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
COG	47%	1%	5%	10%	5%	5%	9%	4%	2%	3%	3%	5%	100%
CIV	34%	0%	7%	12%	1%	7%	13%	10%	4%	2%	3%	7%	100%
GNQ	50%	13%	2%	2%	5%	6%	11%	1%	1%	1%	8%	1%	100%
ERI	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ETH	54%	5%	6%	17%	5%	2%	3%	2%	0%	0%	5%	3%	101%
GAB	33%	2%	8%	21%	6%	4%	10%	4%	5%	2%	5%	3%	100%
GMB	59%	1%	12%	4%	6%	1%	5%	3%	2%	2%	0%	6%	100%
GHA	44%	2%	9%	9%	5%	2%	7%	3%	3%	4%	6%	7%	100%
GIN	31%	7%	7%	11%	8%	11%	7%	4%	4%	1%	2%	7%	100%
GNB	59%	2%	9%	4%	4%	2%	6%	3%	2%	3%	1%	4%	100%
KEN	36%	2%	7%	18%	6%	3%	9%	4%	2%	3%	4%	5%	100%
LSO	36%	3%	13%	12%	8%	2%	5%	2%	6%	4%	1%	7%	100%
LBR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MDG	53%	3%	4%	20%	3%	1%	5%	1%	1%	5%	3%	1%	100%
MWI	45%	3%	3%	23%	5%	3%	8%	4%	1%	2%	2%	2%	100%
MLI	55%	1%	6%	10%	4%	3%	10%	5%	2%	1%	1%	3%	100%
MUS	25%	11%	5%	11%	6%	4%	15%	4%	4%	5%	5%	5%	100%
MOZ	30%	1%	8%	8%	7%	1%	19%	6%	1%	3%	13%	4%	100%
NAM	16%	13%	3%	5%	28%	2%	14%	4%	4%	4%	1%	5%	100%
NER	48%	1%	8%	7%	9%	4%	9%	4%	2%	1%	4%	3%	100%
NGA	52%	1%	8%	17%	5%	3%	7%	7%	7%	4%	1%	2%	112%
RWA	27%	5%	5%	21%	4%	1%	12%	3%	3%	3%	9%	6%	99%
STP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SEN	53%	0%	5%	15%	6%	2%	5%	3%	3%	2%	2%	3%	100%
SYC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLE	42%	2%	7%	14%	6%	11%	8%	2%	1%	3%	1%	3%	100%
ZAF	17%	6%	4%	25%	4%	1%	14%	3%	5%	3%	3%	15%	100%
SSD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SWZ	29%	0%	3%	29%	5%	3%	11%	3%	1%	9%	2%	4%	100%
TZA	39%	4%	8%	1%	6%	3%	13%	6%	2%	2%	4%	3%	89%
TGO	35%	1%	6%	12%	3%	3%	13%	6%	2%	4%	9%	6%	100%
UGA	28%	3%	5%	12%	4%	6%	14%	5%	6%	6%	6%	6%	100%
ZMB	53%	2%	8%	11%	8%	1%	6%	1%	1%	3%	0%	5%	100%
ZWE	34%	4%	6%	18%	10%	2%	10%	3%	2%	6%	1%	4%	100%
Moyenne	34%	3%	5%	11%	5%	3%	8%	3%	2%	2%	3%	4%	84%

Source :Calcul de l'auteur

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Annexe 2 : Statistiques descriptives des variables d'intérêt

Variables		Moyenne	Variance	Min	Max	Observations
D.logPCI	global	0.07	0.11	-0.35	1.76	N = 791
	Inter		0.09	0.02	0.55	n = 45
	Intra		0.09	-0.57	1.28	bar = 17.5778
M2RGDP	global	0.47	0.55	0.00	5.58	N = 844
	Inter		0.40	0.17	1.88	n = 45
	Intra		0.40	-1.39	4.36	bar = 18.7556
RGDPHAB	global	1.71	2.77	0.01	24.31	N = 825
	Inter		2.62	0.14	15.33	n = 44
	Intra		0.93	-9.28	10.68	bar = 18.75
CPIA	global	3.17	0.50	1.43	4.16	N = 502
	Inter		0.50	1.81	3.98	n = 37
	Intra		0.16	2.35	3.81	bar = 13.5676
tempj	global	24.51	3.18	12.40	30.34	N = 792
	Inter		3.19	13.21	28.85	n = 44
	Intra		0.44	21.87	27.56	T = 18
Precip	global	811.15	469.12	24.20	2692.71	N = 792
	Inter		468.03	31.74	2143.05	n = 44
	Intra		75.68	429.40	1360.81	T = 18
logvar~f	global	1.90	1.91	-1.19	6.96	N = 792
	Inter		1.93	-0.96	6.71	n = 44
	Intra		0.11	1.41	2.51	T = 18
logvar~p	global	-1.99	1.77	-4.78	2.20	N = 792
	Inter		1.79	-4.77	2.20	n = 44
	Intra		0.02	-2.08	-1.90	T = 18
Pubcon~P	global	0.15	0.10	0.00	0.84	N = 844
	Inter		0.09	0.00	0.49	n = 45
	Intra		0.05	-0.21	0.51	bar = 18.7556

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

privco~P	global	0.68	0.24	0.00	1.55	N = 844
	Inter		0.24	0.00	0.94	n = 45
	Intra		0.09	-0.14	1.31	bar = 18.7556
Pubinv~P	global	0.11	0.47	0.00	9.38	N = 843
	Inter		0.14	0.00	0.63	n = 45
	Intra		0.45	-0.49	8.96	bar = 18.7333
PrivIn~P	global	0.14	0.11	0.00	0.65	N = 844
	Inter		0.09	0.00	0.37	n = 45
	Intra		0.06	-0.10	0.48	bar = 18.7556
Import~P	global	0.48	0.47	0.04	3.45	N = 817
	Inter		0.40	0.08	1.76	n = 43
	Intra		0.25	-1.13	2.17	T = 19
Export~P	global	0.37	0.47	0.02	5.30	N = 817
	Inter		0.38	0.06	2.27	n = 43
	Intra		0.28	-1.64	3.41	T = 19
OILP	global	77.45	23.06	44.05	111.96	N = 630
	Inter		0.00	77.45	77.45	n = 45
	Intra		23.06	44.05	111.96	T = 14
ExRate	global	604.42	1138.35	0.54	9088.32	N = 844
	Inter		1033.22	1.00	5317.18	n = 45
	Intra		491.19	-2965.90	4606.06	bar = 18.7556

Source: calculs
de l'auteur

Annexe 3 : Zones géographiques

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Num	Zone géographique			
	Sahel	Tropical	Equatoriale	Australe
1	Burkina	Benin	Burundi	Angola
2	Djibouti	Cameroun	Congo	Botswana
3	Erythrée	Cap vert	Gabon	Comores
4	Mali	Cote d'Ivoire	Guinée équatoriale	Ile Maurice
5	Mauritanie	Ethiopie	Kenya	Lesotho
6	Niger	Gambie	Ouganda	Madagascar
7	Sénégal	Ghana	RDC	Malawi
8	Soudan	Guinée	Rwanda	Mozambique
9	Tchad	Guinée Bissau	Tanzanie	Namibie
10		Liberia		Sud Afrique
11		Nigeria		Swaziland
12		RCA		Zambie
13		Sao Tome		Zimbabwe
14		Sierra Leone		
15		Soudan du Sud		
16		Togo		

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Annexe5 : corrélation entre les variables du modèle

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
F1	D.logPCI	1												
F2	logM2	-0.016	1											
F3	logOilP	-0.028	0.048	1										
F4	logG	0.094***	0.826***	0.05	1									
F5	logPrecip	0.147***	-0.061*	0.011	0.128***	1								
F6	logtempj	-0.045	-0.082**	-0.059	-0.131***	0.174***	1							
F7	logvarplu~rf	-0.089***	-0.508***	0.006	-0.514***	-0.008	-0.045	1						
F8	logvartmp	-0.122***	-0.513***	-0.005	-0.552***	-0.201***	-0.027	0.968***	1					
F9	choc20072008	0.095***	-0.018	0.174***	0.049	0.013	-0.014	0.005	-0.001	1				
F10	zmoney	-0.297***	-0.105***	0	-0.102***	0.166***	0.454***	-0.093***	-0.085***	0	1			
F11	Vaagricole	-0.018	-0.342***	-0.002	-0.208***	0.225***	0.371***	0.043	-0.005	0.002	0.118***	1		
F12	CroissanceVA	-0.064*	0.101***	-0.027	0.102***	0.061	0.063*	-0.022	-0.043	0.003	0.009*	0.063*	1	
F13	logPIB/HAB	-0.104***	0.41***	0	0.35***	-0.2***	-0.18***	0.089**	0.106***	-0.004	0.038	-0.699***	0.0138	1

Chapitre 2 : Déterminants météorologiques ou climatiques de l'inflation en Afrique subsaharienne

Annexe 7 : tests statistiques pour le choix des meilleurs estimateurs

	Echantillon global	Echantillon global	Sahel	Zone tropical	Zone équatoriale	Zone australe
Test de Hausman	Chi2(7)=11.18 Proba=0.1310	Chi2(7)=10.82 Proba=0.1466	Chi2(6)=1.10 Proba=0.9815	Chi2(6)=6.24 Proba=0.2862	Chi2(6)=9.65 Proba=0.1402	Chi2(6)=6.57 Proba=0.3620
Test de Breusch and Pagan Lagrangian multiplier	Chibar2(1)=15.27 Proba=0.0000	Chibar2(1)=51.09 Proba=0.0000	Chibar2(1)=0.00 Proba=1.000	Chibar2(1)=14.51 Proba=0.0001	Chibar2(1)=0.27 Proba=0.3030	Chibar2(1)=22.88 Proba=0.000
Conséquences	Choix panel effet aléatoire	Choix panel effet aléatoire	Choix du MCO	Choix panel effet aléatoire	Choix du MCO	Choix du MCO car le panel a effet aléatoire ne donne pas le test de Wald

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad.¹²

1. Introduction

There is no doubt that climatic changes have had unprecedented significant effects on agricultural and animal husbandry in developing countries, particularly in the Sahel zone (Barrios, et al., 2008). This subregion illustrates some of the most dramatic cases of recorded climatic change leading to environmental degradation, rainfall variability and famine (Gado, 1993); (Warren, Batterbury, & Osbahr, 2001); (Mortimore & Adams, 2001); Rasmussen et al., 2016), although being presumably the least contributors to climate change globally. One of the reasons is that the ecological characteristics of the Sahel zone combined with its farming practices expose its agricultural sector to adverse change (Kandji, et al., 2006).

Given that agricultural production is the primary source of food availability in households, production uncertainty caused by climate variability puts the population of the Sahel at high risk of food insecurity. Food availability being the necessary condition of food security measures (Barrett, 2010), the transition of drastic effects of climatic changes on food security is straightforward. According to FAO (2018), hunger in the world worsened during the 2016-2018, and severe food insecurity would affect all sub-regions of sub-Saharan Africa and South America. Like other Sahelian countries, Chad is highly sensitive to climate risk, especially droughts and floods. Its agriculture is almost always dependent on rainfall throughout 3 to 4 months a year in highly productive regions, and years of insufficient rainfall or drought are more recurrent (Hulme, 2001). Drought with varying degrees of severity occurs in two over five years, making the harvests of major food and commercial crops very uncertain (Hengsdijk, et al., 2002).

Yet, the effects of climate change on food security are huge, little is known in terms of adaptation strategies to cope with these unprecedented changes. Understanding key determinants of food security in the context of climate change remains an interested case study both policy and research wise. This paper explores factors, especially climate factors that affect food security in Chad along with copying strategies adopted by households to adopt or mitigate effect of climate change.

¹² This chapter is co-written with Deudibe Bopahbe Gildas

Ideally, using a longitudinal survey or panel data to analyze determinants of food security and its dynamics would provide substantial insights. However, in many developing countries panel data are not readily available, span few periods, or suffer from “non-random” attrition issues, hindering the capacity of researchers to study food security dynamics. To overcome the absence of panel data or longitudinal surveys, authors such as Deaton (1985), Deaton and Paxson (1994) and Pencavel (2007) have proposed methodologies to construct pseudo-panels by following similar age cohorts across multiple cross-section surveys. Nevertheless, as argued by Dang et al. (2014), these methodologies typically rely on having several rounds of cross-section surveys, but do not allow to perform analysis at a more disaggregated level than the cohort. In this work we rely on data of repetitive surveys on which we will test the pseudo panel method.

The paper is organized as follow: food security and Chadian specificities are presented in section 2. The overview of Data and stylized facts are presented in section 3, followed by the econometric strategies in section 4. Section 5 is devoted to results and robustness analysis, and section 6 concludes.

2. Food security and Chadian specificities

This section aims at explaining varied and complex definitions of food security and its measurement. We also document literature review and present specificity of the Chadian case study.

2.1- Definitions and measurement of food security.

There are several definitions and metrics for measuring food security in the literature. In this paragraph, we present some of them before indicating the definition and measure that are used in this work.

2.1.1- Overview of definitions

Food security definition or measurement is complex (Barrett, 2010) and has evolved over time from a more quantitative concept to integrating qualitative aspects (Yobom, 2020). The concept was focused on food supply at the aggregate level to include in recent studies food demand and access at the scale of households and individuals (Pinstруп-Andersen, 2009); (Leroy, Ruel, Frongillo, Harris, & Ballard, 2015). More generally, food security occurs when everyone has physical, social, and economic access to sufficient, safe and nutritious food that meets their dietary needs and dietary preference for an active and healthy life (FAO, 1996), (CFS, 2012) (Barrett, 2010). As such, four inter-related and hierarchical dimensions or pillars of food security (food availability, physical and economic accessibility, food usage or consumption and food stability across time) must be satisfied to consider

an individual as food secure (Gross, Schoeneberger, Pfeifer, & Preuss, 2000). However, there are approaches that rely on the determination of variables measuring one or more of the four dimensions (Babu, et al., 2014). While Yobom (2020) provided the approach for calculating the four dimensions of food security, but it did not appear clear how these indicators can be combined to assess the overall food security of a given household. Other methods were developed as well for food security measurement such as principal component approach to capture several dimensions of food security into one indicator. Although the latter approach relies on a maximalization of information provided by different subcomponents, it is not clear whether keeping only one dimension should be sufficient to assess precisely food security at a micro level. Another common approach (chronic vulnerability or scaling approach) was developed by Maxwell (1996) and focuses on adaptation strategy used by households with insufficient food consumption. As a result, a cumulative index based on six food adaptation strategies is developed to measure food security. Practically, Maxwell (1996) implemented a scale that takes into account the frequency of each individual strategy is deployed by a household multiplied by a severity weighting factor based on the ordinal ranking to obtain the household's food security score (Babu, et al., 2014). Other approaches consider difficulties that households may encounter during a given period of consumption. Thus, it makes it possible to measure food security through the existence of episodes of food shortages at the household level. All these approaches presented above focus on a particular aspect of food security or coping strategies related to food security. However, the recent methodology of food security measurement developed by the World Food Program (WFP) approach summarizes substantially various approaches presented above including four pillars of the food security as well as coping strategies to face food security. We rely on the latter methodology in this paper, which will be presented the following section.

2.1.2- World Food Program approach of food security measurement

The WFP approach of food security is provided through a Consolidated Approach for Reporting Indicators (CARI) summarized in table 2. This approach encompasses current consumption indicators and as well as coping strategies variables.

The current consumption is measured by food consumption score (FCS) and/or food energy shortfall indicators. FCS is a proxy of households' food access used to classify households into different groups based on the adequacy of the foods consumed in the week prior to the survey. It is calculated by summing the yes (coded 1) or no (coded 0) answers to a series of questions on food products consumed in the last 7 days (see Annex 1). The higher the score, the more it reflects a variety of

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

products consumed. Food energy shortfall however is based on calorie intake compared to the minimum energy necessary to maintain a normal life. This indicator combines both the nutritional quality of the products consumed as well as their quantities. It takes into account both the accessibility and usage pillars. In the current data, Food energy shortfall indicators are not collected. So current consumption indicators are equal to food consumption scores.

The Coping strategies indicators aim to measure households' resilience to potential shocks. It considers two dimensions of household coping capacity which are the Economic vulnerability and asset depletion. The Economic vulnerability is determined by the poverty status or the food expenditure share in the household (only one of the two 'economic vulnerability' indicators should be used). It considers the stability pillar. The asset depletion or the likelihood coping strategy is derived from a series of questions regarding the household's experience with livelihood stress and asset depletion during the 30 days prior to the survey. Responses are used to understand the stress and insecurity faced by households and describes their capacity regarding future productivity. All strategies are classified into three broad groups, including stress, crisis and emergency strategies. Food security finally result by averaging value of current food status with those of coping strategies.

The food security variable has four modalities which are food security taking code 1, marginal food security taking code 2, moderate food insecurity with code 3 and severe food insecurity taking code 4. The modalities of this variable therefore increase with the degree of food insecurity. A food secure household is therefore a household that has an acceptable level of food consumption with a calorie level of at least 2100 kcal and whose food expenditure represents less than 50% of total expenditure and which has not adopted any strategy to deal with the lack of food. A marginal food secure household is one that has an acceptable level of consumption, consumes a calorie level between 2100kcal and the minimum level of calories required and whose food expenditure represents between 50 and 65% of total expenditure and employs stress strategies to deal with the lack of food. The stress strategy involves selling non-productive goods, buying or borrowing food on credit, spending household savings, and selling animals. A household in moderate insecurity is one with a limit level of food consumption, a calorie level between 2100kcal and the minimum level of calories required, food expenditure represents 65 to 75% of total expenditure and which uses the crisis strategy in the face of food shortages. The crisis strategy is to consume seeds, remove children from school and sell productive goods. A household that is severely food insecure is one that has a low level of food consumption, a calorie level below the minimum level, whose food expenditure represents more than

75% of total expenditure and which employs the emergency strategy if food shortage occurs. The emergency strategy is to send household members to beg, sell plots of land and the last breeding female.

. Table 1. Summary of construction of food security index.¹³

Food security Index (FSI)	Area	Indicators		Food secure	Marginally food secure	Moderately insecure	Severely insecure
	Current status	Food consumption	Food consumption score	Acceptable			Borderline	Poor
Food energy shortfall			> 2100 kcal	< 2100; > avg (2100,MDER. ¹⁴)	< avg (2100, MDER) >MDER	<MDER	
Coping capacity	Economic Vulnerability	Food expenditure share	<50%	50-65%	65-75%	> 75%	
		Poverty status	Total expenditure > poverty line		100% food poverty line > Total Exp < 100% of poverty line	Total Exp < 100% of food poverty line	
	Asset Depletion	Livelihood coping strategy categories	None	Employed stress strategies	Employed crisis strategies	Employed emergency strategies	

Source: WFP, 2015

2.2- Main determinants of food security

This sub section presents some studies on determinant of food security with a special focus in the Sahel and similar geographic areas. Some literatures are related to the approach that focuses on supply factors and others are related to food entitlement approach (Sen, 1982) (Ravallion, 1985)

2.2.1- Climatic determinants of food security

The evolution of temperature, precipitation, drought, and flooding have been identified as determining food security especially in a supply driven approach. unlike the food entitlement approach supported by Sen (1982). In Sen's work, a situation of drought cumulated with famines, which is a critical

¹³ Grey components (Food energy shortfall and Poverty status) are used only when they are available.

¹⁴ MDER: Minimum Daily Energy Requirement

manifestation of food insecurity, is analyzed in terms of declining food availability. Addressing the approach that focuses on supply factors, Generoso (2015) shows that inter-annual and seasonal rainfall variability have a negative impact on food security in rural Mali. In Senegal, Niébé et al. (2021) found that in years of climatic shocks, households who use to not rely on coping strategies, adopt it eventually and their food expenditures in share of the total expenditure increase, reflecting the impact of climate change on food security. In Niger, Zakari and al. (2014) revealed that flooding is significant factors influencing the daily rations. In a review on the impact of climate change on Food Security and Malnutrition in the Sahel Region of Cameroon, Filho et al. (2016), found that the population of the Sahel region of Cameroon continuously experiences an increasing level of malnutrition, partly due to the impact of climate change since harsh climatic conditions leading to extreme drought have a negative influence on agriculture. Taking to account perceived effects of drought, Twongyirwe and al. (2019) showed that drought is perceived as a problem contributing to food insecurity. They found also that high off-farm incomes induce no perception of drought as food insecurity problem as well as large farm size. After constructing the synthetic index based on three dimension of food security (quantity, quality, and stability), Wineman (2016) showed that the temperature and seasonal rainfall have a significant impact on a household's food security score

2.2.2- Socio-economic determinants of food security

Many socio-economic factors are also critical determinant in the study of food security. Corsi and al. (2017) showed that the access to the market guarantees food security in East regions of Chad (Ravallion, 1987). Petersen and al. (2008) established the nomadism (due to livestock) as a way to prevent food insecurity compared to the sedentarism. He finds that children from pastoralists are better nourished than children from sedentary farmers or settled nomads in northern Mali. In Burkina Faso, the increase in agricultural incomes improves food diversity in some places while in others it is not possible without an increase in non-agricultural incomes ((Fraval, et al., 2020). In Niger, Dedehouanou and al. (2020) found that owning female-managed non-agricultural enterprises is positively related to food accessibility and food availability within female-headed households. Ndhleve and al. (2012) found that purchasing food from the market, accessing food from the environment, income level of the household, receiving social grants, having a professional job, owning a business, and practicing farms are major predictors of adequate access to food. In the rural area of Southwest Ethiopia, Muche and al. (2014) found that the educational status of household head, family size, the use of farm input and the number of oxen owned matter for the household food security status. In

In addition to above factors, Leza and Kuma (2015) reveal that the land size, oxen ownership, access to extension services and credit are important to food security. Twongyirwe and al. (2019) discovered that household socio-economic characteristics affect household perception of food insecurity and coping responses. They found also that access to credit for crop cultivation increased the likelihood that farmers are more aware and concerned about household food security status.

2.2.3- Coping strategies and food security

The strategies adopted by households in situations of food crisis are not only adaptation or mitigation strategies. They are also manifestations of the degree of severity of the situation of food insecurity in the household well reflected in WFP approach. These strategies are for example: the consumption of poor-quality foods (Bloem, Samba, & Kraemer, 2010), the reduction in the number of meals (Kazianga & Udry, 2006) and the deprivation or non-satisfaction of non-food needs for the benefit of food. There are those which aimed at increasing production or revenue in order to improve the food security situation in the short and medium term. Strategies aimed to increase revenue include the sale of household assets (materials or animals) (Harrower & Hoddinott, 2004), the search for work locally (Mertz, et al., 2011), the exodus/migration to cities (Barbier, Yacouba, Karambiri, Zorome, & Some, 2009), (Harrower & Hoddinott, 2004), (Mertz, et al., 2011) (Tapsoba, Combes Motel, & Combes, 2019), taking loan or credit to finance the supplementary purchase of food (Harrower & Hoddinott, 2004). Strategies to improve production include trees planting (Asfaw, et al., 2014, Mertz, et al., 2011), mixed farming of crops (vegetables and cereals) (Asfaw, et al., 2014), soil and water conservation (Asfaw, et al., 2014; Kurukulasuriya & Rosenthal, 2003; Mertz, et al., 2011) usage of inputs (such as inorganic and chemical fertilizers) (Asfaw, et al., 2014, Mertz, et al., 2011), changes in planting times and switches to heat- and drought-resistant crops varieties (Phiri & Saka, 2008), the development and adoption of new crops (Eckhardt, Cominelli, Galbiati, & Tonelli, 2009), the change in the agricultural portfolio of crops and livestock ((Howden, Soussana, Tubiello, Chhetri, & Meinke, 2007), increasing use of irrigation (Howden, Soussana, Tubiello, Chhetri, & Meinke, 2007); increasing regional agricultural diversity (Reidsma & Ewert, 2008) and switching to non-agricultural livelihoods (Morton, 2007, Mertz, et al., 2011)

2.3- Chadian agroclimatic context and food security vulnerability risk

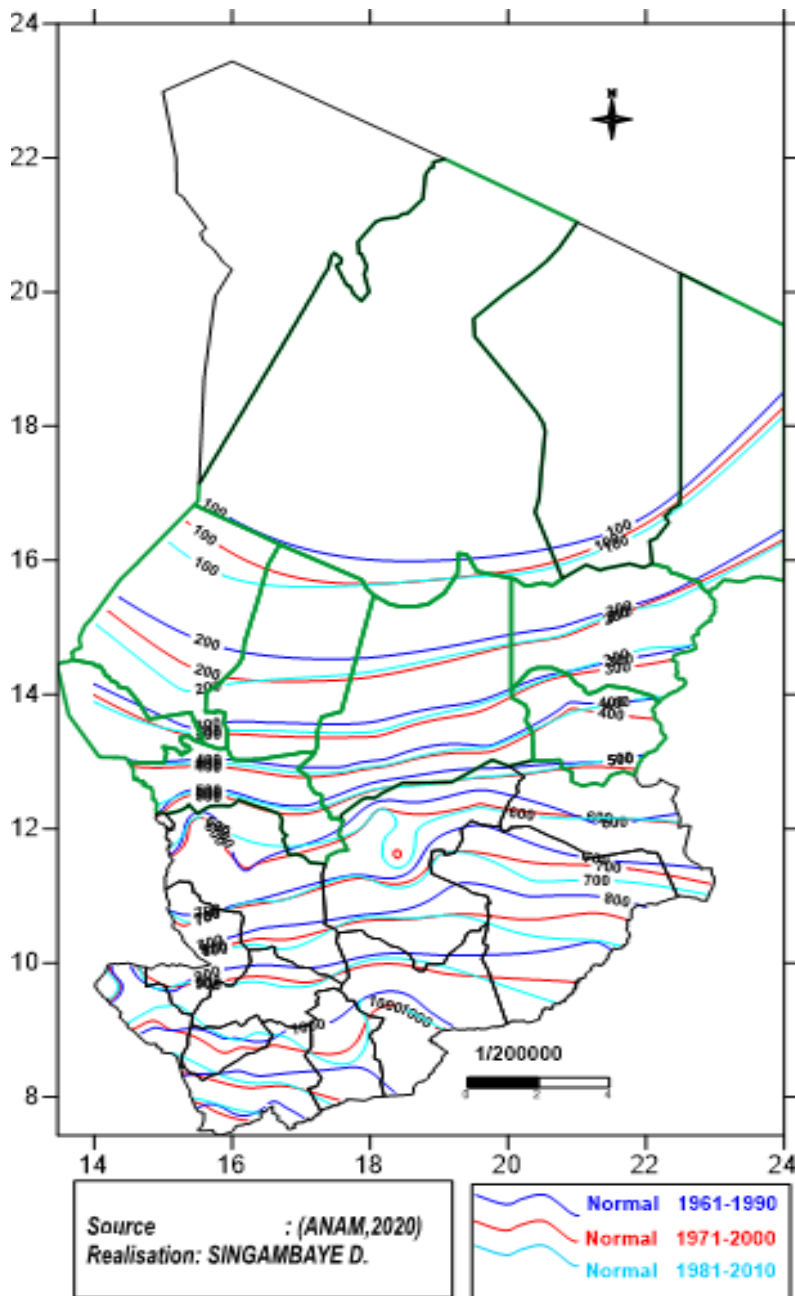
Chad, a landlocked country, has an area of 1284,000 km² with an estimated population of 16.8 million inhabitants in 2021 from which around 80% are farmers and herders. It is divided into three large highly contrasting areas namely the Saharan or desert zone in the north, the Sahelian zone in the center

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

and the Sudanese zone in the south of the country (Adaptation aux changements climatiques et renforcement de la resilience au Tchad: diagnostics et perspective, 2019). The Saharan or desert area in the north, which covers 47% of the national territory, receives a rainfall of less than 100 mm / year, only oasis agriculture and camel breeding and small ruminants can be practiced there as livelihood activities. The Sahelian zone in the center of the country covers 43% of the national territory and is watered by a rainfall of between 100 and 800 mm / year. It has important contrasts between the arid northern part (Saharan and Sahelian climate with annual rains between 100 and 200 mm) and the Sahelo-Sudanese zone in the south characterized by a rainfall of between 600 and 800 mm / year. The contrasts between bioclimatic zones explain the differences in activities between the north with a pastoral vocation of seasonal transhumance and the south where rainfall allows the practice of agriculture associated with mainly sedentary to semi-transhumant animal husbandry. This Sahelian area is particularly sensitive to the effects of climate change. The Sudanese zone in the south of the country, between the isohyets 800 and 1,200 mm, represents only 10% of the national territory.

In a report published by Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) in collaboration with the U.S. Agency for International Development (2012) , critical climate indicators and their consequences on agricultural production in Chad were highlighted. Rainfall have decreased in eastern Chad during the past 25 years. Temperatures have increased by 0.8° Celsius since 1975, amplifying the effect of droughts. Crop yields are very low and stagnant. Population growth with a rate of 3.6% combined with stagnating yields could lead to a 30 percent reduction in per capita cereal production by 2025. These agroclimatic indicators combined with climate variability exposes the whole country, and particularly the Sahelian zone, to a recurrent phenomenon of food insecurity. Naturally, the level of rainfall is increasingly low from south to north. Given the increasing desertification, the low rainfall line descends each decade from north to south by 60km thus expanding the areas of predilection of food insecurity (see Map1).

Map 1: hydroclimatic map of Chad



3. Overview of data and stylized facts

This section discusses the characteristics of the main source of data and is divided in three subsections. The first part shows the main characteristics of the survey including sample description, and the relevance of using it for this study, the second portray the construction of dependent variable and the third subsection is devoted to descriptive statistics.

3.1- Description of the database

There is plethora of databases on food security surveys in Chad. Among these, the most consistent are:

- The National Survey of Food Security and Structural Vulnerability conducted in 2009 co-organized by the National Institute of Statistics, WFP and FAO;
- The National Food Security Survey conducted yearly since 2015 by WFP and other partners including Sustainable Food Security Information system and Early Warning (SISAAP);
- The National Nutrition Survey co-organized by UNICEF and Nutrition and Food Technologies Direction (DNTA) (SMART survey)
- The Household Economic Analysis Survey organized by livelihood zone conducted by SISAAP.

From these databases, the best candidate for in-depth food security analysis is that of the National Food Security Survey (ENSA¹⁵) for various reasons. First, this survey data is nationally representative at the country and province level, allowing country level analysis as well as sub country analysis. The ENSAs follow a two-stage stratified sampling design. The 65 administrative departments of the country constitute the strata within which first-stage selection at the village level with unequal probabilities and second stage at a household level with equal probability of selection. The sample size varies from year to year depending on the resources available and the topics covered but stay around 8,500 to 10,500 households. Second, the data is collected consistently on a yearly basis for a longer period of time. Third, the survey covered consistently a very broad area of topics compared to the other surveys. Some selected villages have been replaced by neighboring ones for security reasons. More than 100 investigators were involved each year in the data collection process.

In brief, the ENSA survey consists in five annual nationally representative surveys collected from 2015 to 2019 by the World Food Program. It covers several topics namely farming activities, income source and expenditure, daily consumption, occurrence of shock, coping strategies among others. Sample size varies from 8,516 to 10,516 households. To complete survey's data, we add climatic data provided by the National Meteorological Agency. These climatic data are collected from the field through the national network of meteorological stations shared out along the territory. Southern areas have better data coverage compared to North. Climatic information of a household is climatic information of the sub-prefecture or region the household live in. The available climatic variable is only rainfall since,

¹⁵ ENSA: Enquête nationale de sécurité alimentaire

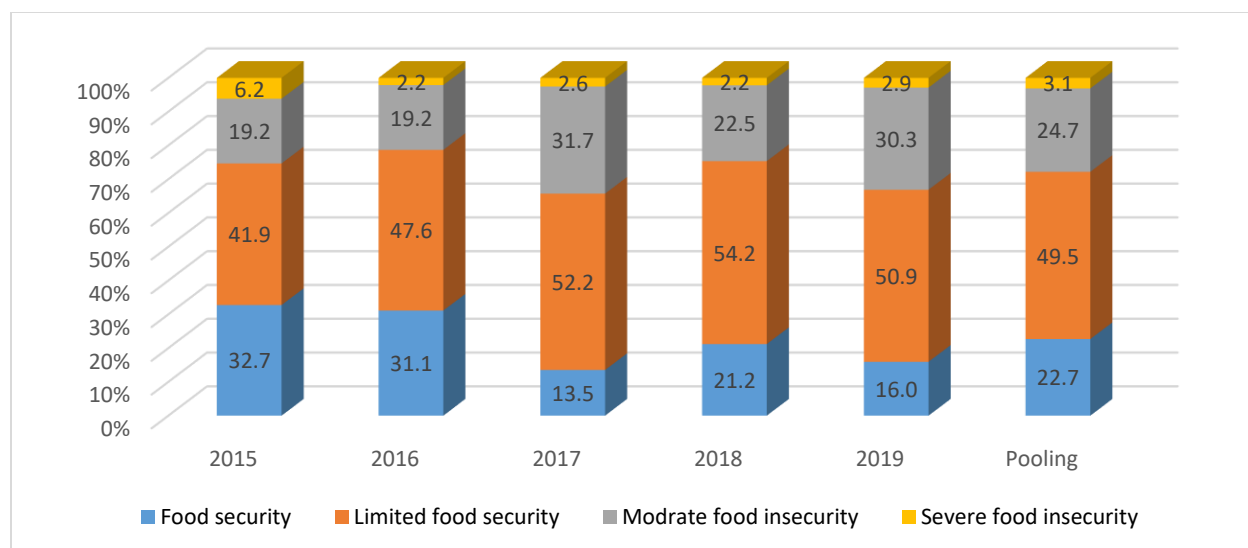
temperature data are not available unfortunately. In addition to climatic variable, the residential variable classifying households into rural or urban area is constructed according to the definition of the national Survey on Consumption and informal sector in Chad (ECOSIT4) which considers all households living the capital of Prefectures/Departments or regions as living in the urban area and others as living in rural area. In this analysis, we will organize data into three groups of databases: i) Annual databases which consists of analysis data year by year; ii) pooling database which is compilation of five annual databases into one database on the same variables; iii) pseudo panel database which consists in aggregating data after grouping unit observations in cohort.

We now proceed with the comparison of pooling database and the building of the pseudo panel database based on annual data. This allows us to appreciate the extent to which pooling and pseudopanel data reflect annual data since they will be used for econometric estimation alongside annual data.

3.1.1- Food security in Pooling database versus annual data

Food security is classified from the most secure to the most insecure situation. Thus, the value of the modalities of the variable increases toward unfavorable food security status. The distribution of food security modalities in the pooling database seems to be the average of the modalities in the annual bases. Indeed, the proportion of households in food security varies from 13.5% to 32.7% in the annual bases, it is 22.7% in the pooling base. The proportion of households with limited food security varies from 41.9% to 54.2% in the annual bases. It is 49.5% in the pooling base. The proportion of moderately food insecure households in the pooling database is 24.7% in the pooling base. However, it varies from 19.2% to 31.7% in the annual bases. Finally, while it varies from 2.2% to 6.2% in the annual bases, the proportion of households in severe food insecurity is 3.1% in the pooling database. The transformation of the annual bases into a pooling database shows that the modalities of food security in the latter are the average modalities of those in the annual bases.

Fig 1: Food security in annual and pooling databases



Source: WFP survey data and authors calculation.

3.1.2- Construction of pseudo panel and comparison with annual data

In this section, we will be introducing the construction of panel data following by descriptive statistics at the cohort level.

For the construction of the generation-based pseudo panel, year of birth and place of residence were used as variables to construct cohort. The rationale behind this is that variable to be used for cohort construction must follow at least two criteria: Being time invariant but also providing sufficient individuals within each cohort to avoid effect of outliers on newly mean of variables at the cohort level. In other terms, the size of the cohorts results from a trade-off between bias and variance; it must be large enough to limit the extent of measurement error on intra-cohort variable means, that generates bias and imprecise estimators of the model parameters. However, increasing the size of the cohorts decreases the number of cohorts observed, which makes estimators less precise. In addition, these cohort variables must obviously be observable for all the individuals and form a partition of the population (everyone is classified into exactly one cohort).

In short, a good selection criterion must: (1) be a characteristic that does not change over time on an individual basis, define a stable (sub-) population, and result from a tradeoff so that (2) large enough cohorts can be formed (3) without losing too much variability.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Under the above appropriate conditions in constructing these cohorts, classic panel data method can be deployed. But in general, the greater the number of individuals in the cohort, the closer this mean estimate will be to the true value, thus the mean estimators are sufficiently precise to be able to neglect measurement errors. As such, all other variables are results of arithmetic means in each cohort constructed. The table below shows the average, minimum, maximum number, and variance of cohort size.

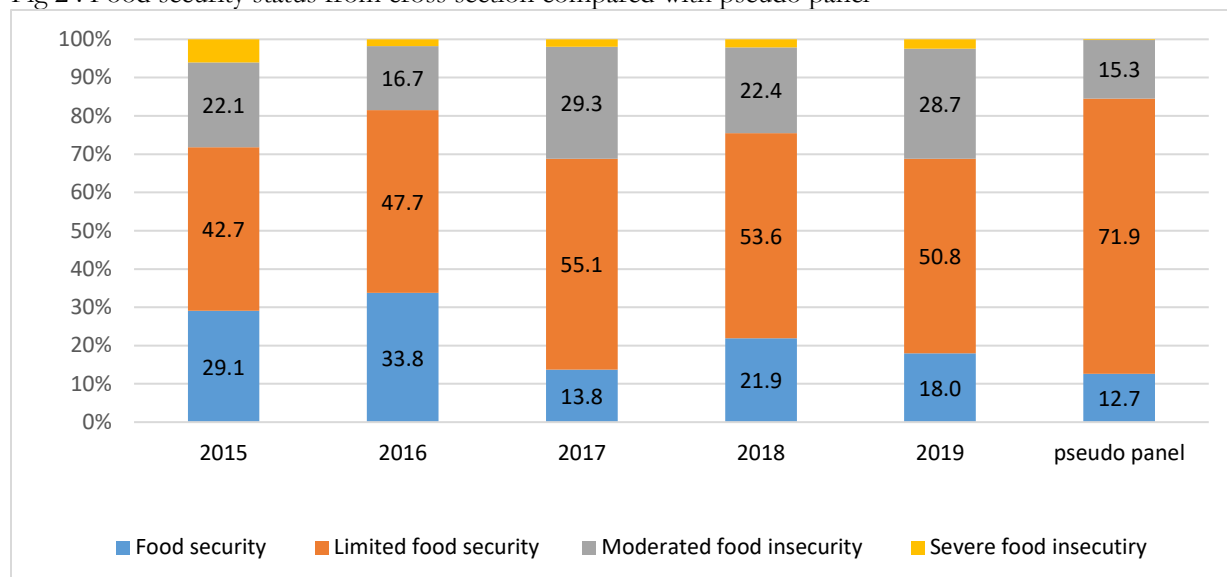
Table 2 : Summary statistics of cells (aggregated observations) size in pseudo panel.

Year	Min	Max	Mean	Sd
2015	14	153	54.5	27.7
2016	12	159	62.4	33.4
2017	15	132	54.	24.3
2018	12	140	55.6	25.6
2019	10	158	63.4	31.2

After construction of the pseudo panel, we check whether the distribution of our variable of interest varies when moving from yearly cross section data to pseudo panel data. This process even though not complete help us understand if distribution of dependent variable shifts more throughout the aggregation process. To be rigorous, we should test this with every variable entering out model, but for the sake of brevity we won't present that.

According to Figure 2, moderate food insecurity, which averages 23.84% in the annual bases, is reduced to 15.3% in the pseudo panel. The limited food security concentrates most households in the pseudo panel (71.9%) against an average of 50% in the annual bases. Food security is reduced to 12.7% in the pseudo panel database against an average of 23.3% in the annual bases. Figure 2 shows how the terms and conditions of the food security variable are broken down by year. The transformation of the annual bases into pseudo panel concentrates households in the central modalities of food security which are limited food security and moderate food insecurity.

Fig 2 : Food security status from cross section compared with pseudo panel



Source: WFP survey data and calculation of authors

3.2- Determinants of Food security in the database

This section is devoted to descriptive statistics of variables of interest identified in the literature review. Let's recall that empirical studies generally group determinants of food security into three groups of broad variables namely socio-economic, climatic, and adaption strategies variables. This descriptive section will be focusing mainly on these variables starting with meteorological variables which are our variables of interest.

3.2.1- Climate conditions

Based on the data we use, not all of the climate variables discussed in the literature review are available. We consider both objective climate conditions (rainfall) and subjective conditions (flood and drought reported by household as shocks). The rainfall variable is the annual quantity of precipitations in millimeter received in the area the household live in (at the lowest geographical area available possible, mostly village level). It is collected by the National agency of meteorology (NAM). The rainfall of the household is the precipitations received in the village, the subprefecture or the region according to the availability of meteorological stations used for measurement. So, households in the same area covered by a meteorological station received same value of annual rainfall variable. The subjective conditions which are flood and drought reported by households are the households' direct self-assessment of a

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

climatic shock The relation between objective climate condition and food security is shown in Table 3. And the relation between subjective conditions and food security is presented in tables 4 and 5.

The proportion of food secure households increase as we move from low to higher rainfall (see table 3). However, the proportion of households in severe or moderate food insecurity decreases overall when we go from a low level of rainfall to a high level. This result hold for each year which make it strong evidence to dig into deeper in our econometric analysis to find whether climate condition explain food security.

Table 3: Food security and climate condition (%)

		Food secure	Limited Food secure	Moderate Food insecure	Severe Food Insecure
Year =2015 Pearson chi2(6) = 475.6397 Pr = 0.000	<600mm	27	37	26	10
	600mm<x<1200mm	34	46	15	4
	>1200mm	46	43	10	1
Year =2016 Pearson chi2(6) = 783.2657 Pr = 0.000	<600mm	21	46	29	4
	600mm<x<1200mm	40	50	10	0
	>1200mm	34	46	18	1
Year =2017 Pearson chi2(6) = 244.3973 Pr = 0.000	<600mm	13	45	37	5
	600mm<x<1200mm	15	54	29	1
	>1200mm	12	61	26	1
Year =2018 Pearson chi2(6) = 631.1336 Pr = 0.000	<600mm	14	44	37	5
	600mm<x<1200mm	24	58	16	1
	>1200mm	22	59	18	1
Year =2019 Pearson chi2(6) = 475.2803 Pr = 0.000	<600mm	10	46	38	6
	600mm<x<1200mm	22	55	22	1
	>1200mm	13	50	34	2

Drought is the most prevalent shocks which appear during the agricultural and livestock production (affecting 25% of households that face shocks) showing that it is an important factor of food insecurity. Drought is associated with a deterioration in the food security for some years, (see table 4). From 2015 to 2017, the proportion of households reporting drought increases almost as one moves from food secure households to food insecure households reflecting the negative effect of drought on food security (see Khi2 test). Figures from 2018 and 2019, which show a small proportion of households affected by drought (compared to 2015 to 2017), also show that food security in these years is not explained by drought.

Table 4: Drought-stricken household by food security status (%).

	2015	2016	2017	2018	2019
Food secure	5.77	8.66	7.1	8.74	9.11
Limited Food secure	13.33	17.27	12.52	8.16	8.43
Moderated Food insecure	13.12	20.64	16.8	8.11	8.96
Severe Food Insecure	18.44	14.56	16.95	4.33	8.56
Khi2 Proba.	0.00	0.00	0.00	0.17	0.78

Flooding affects food security for some years (2017 and 2019) (see table 5). We note that there are years when only drought affects food security (2015 and 2016) and years when only flooding affects it but also years when both affect food security. In the same year, the food security status of one segment of the population is caused by flooding and that of another segment is explained by drought. This is a disruption specific to climate change.

Table 5: Flood-stricken households by food security status (%)

	2015	2016	2017	2018	2019
Food secure	1.15	2.32	5.33	2.4	2.89
Limited Food secure	1.46	2.36	5.25	2.66	3.36
Moderated Food insecure	1.35	1.64	3.1	2.59	4.81
Severe Food Insecure	1.14	1.46	2.54	1.92	3.77
Khi2 Proba	0.73	0.27	0.00	0.86	0.00

Provided that climate is changing and will continue to change in coming century at rates projected to be unprecedented, ending food security is linked with adaptation to climate changes or working toward environmentally friendly behavior.

3.2.2- Coping strategies

To cope with food insecurity, households usually deploy several strategies. Some of them are welfare costly and less reversible than others. The food security literature classifies strategies into three major groups which are stress strategies, crises strategies and emergency strategies. As explained previously these strategies consist of doing specific things. Strategies of stress are the less harmful one and goes from relying on saving, nonproductive assets, or borrowing money from others to buy food. Emergency strategies affect long term wellbeing inasmuch it might take long time to get back to the initial situation before using the strategy. These strategies are for example withdrawing children from school, selling productive asset, or relying on early harvesting. The last group of strategies is crises strategies which affect the dignity of the household in the sense that it exposes hugely the situation of the household. These strategies are for example sending a child to beg money or food, selling female

productive livestock, selling agriculture plot or household land. Figures 3, 4 and 5 represent respectively reliance on different strategies across food securities status.

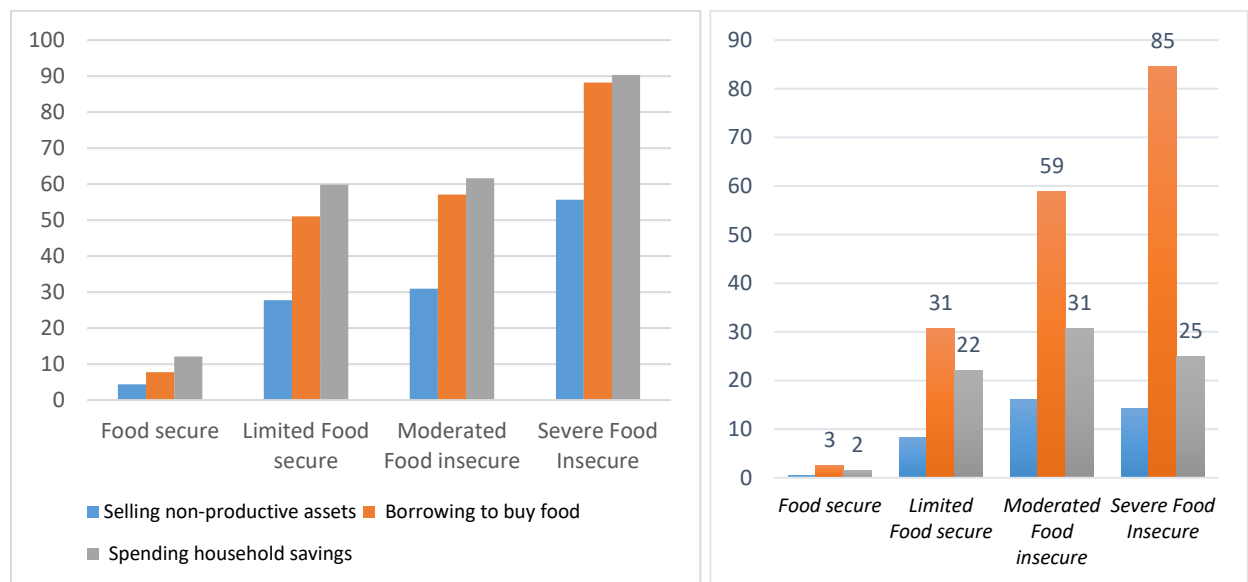
3.2.2.1- Food security and stress strategies

Borrowing money or borrowing food itself is the primary stress strategies for household, followed respectively by reliance on saving and selling of nonproductive assets. For each of these copying strategies, food insecure household are massively overrepresented, meaning that food insecure household are generally stressed when facing difficulties. The proportion of households adopting stress strategies increases with the level of severity of food insecurity.

Fig 3 : Food Security and stress strategies

year 2015

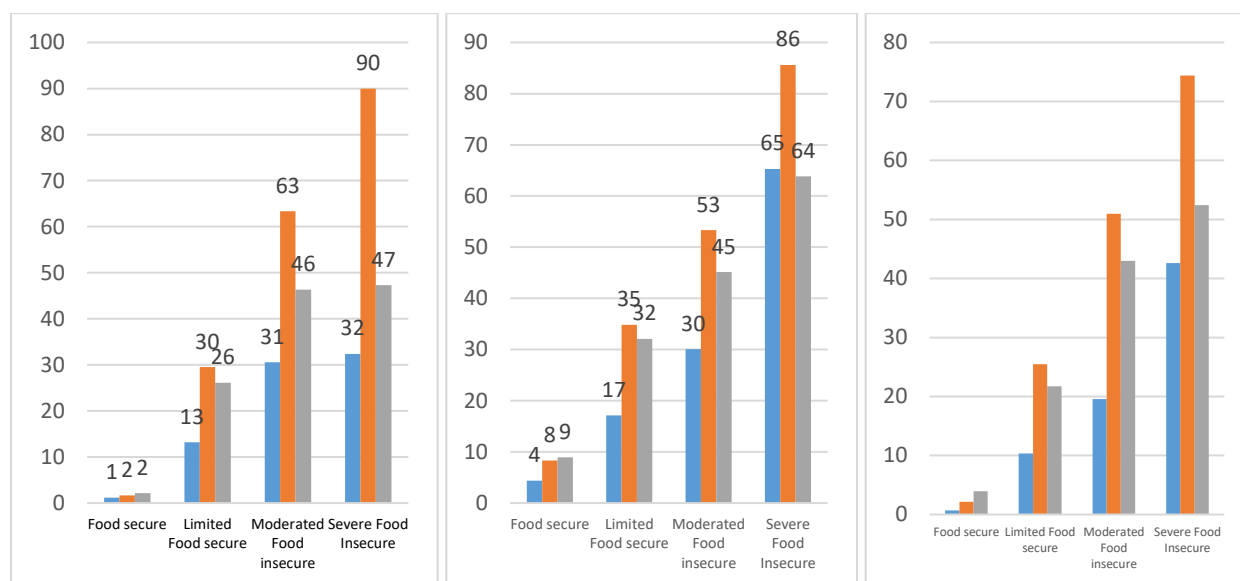
year 2016



year 2017

year 2018

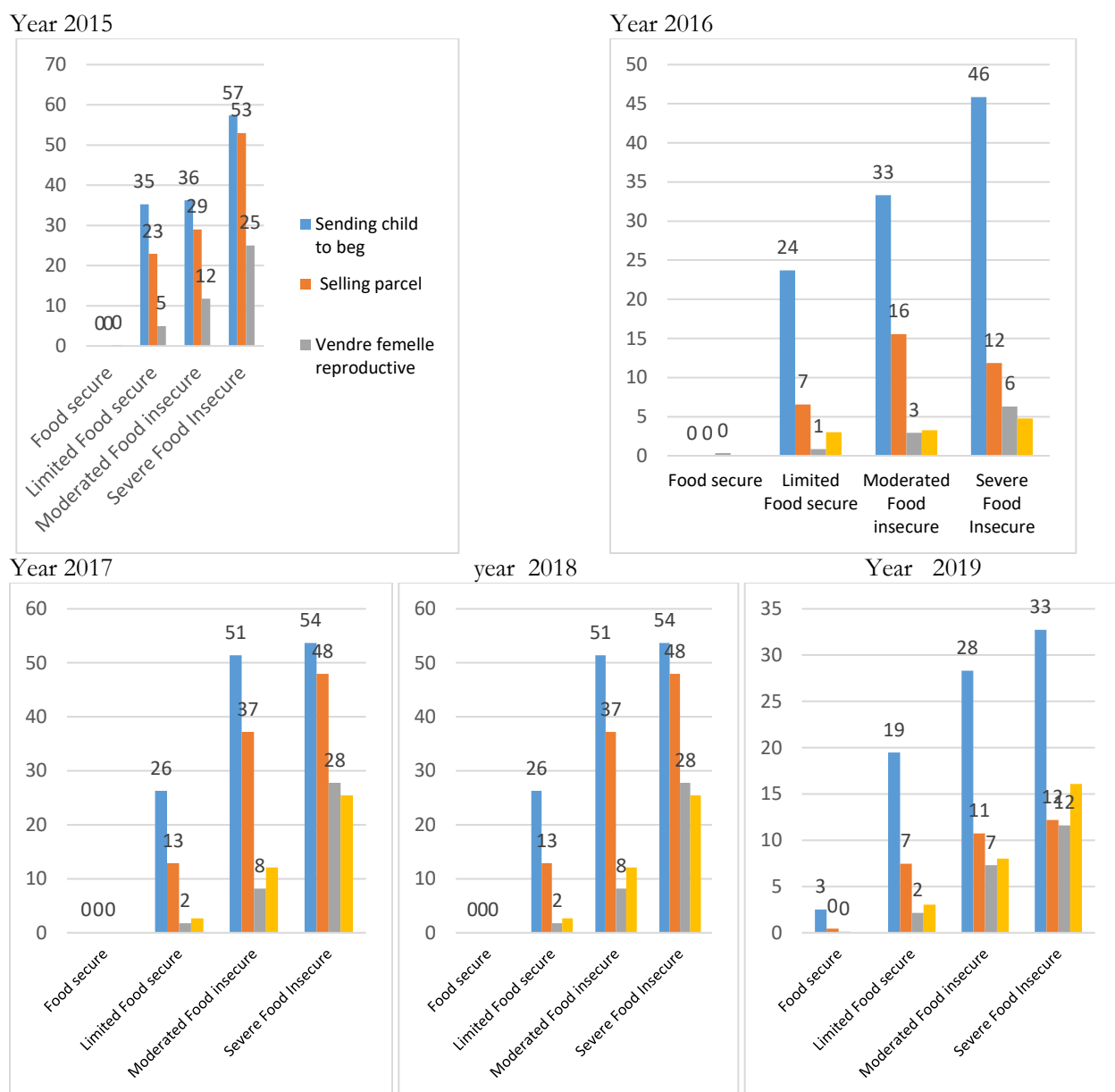
year 2019



3.2.2.2- Food security and emergency strategies

Complete food secure household very rarely if not at all, rely on emergency strategies while a fair amount of severe food insecure one (between 12 to 54 percent) have used such strategies. This is observed in moderate food insecure and limited food insecure households. Although stress strategies are slightly used by complete food secure household, they are safe from relying on emergency strategies as shown in Figure 3. While food secure households do not use the emergence strategy, other categories of households use it differently depending on the type of strategy. The more severe the situation of food insecurity increases, the higher the proportion of households adopting emergence strategies. Emergency coping strategies being prevalent in food insecure household much more, this situation could be an essential justification for assistance program, otherwise it will jeopardize in the future, an already vulnerable food insecure situation.

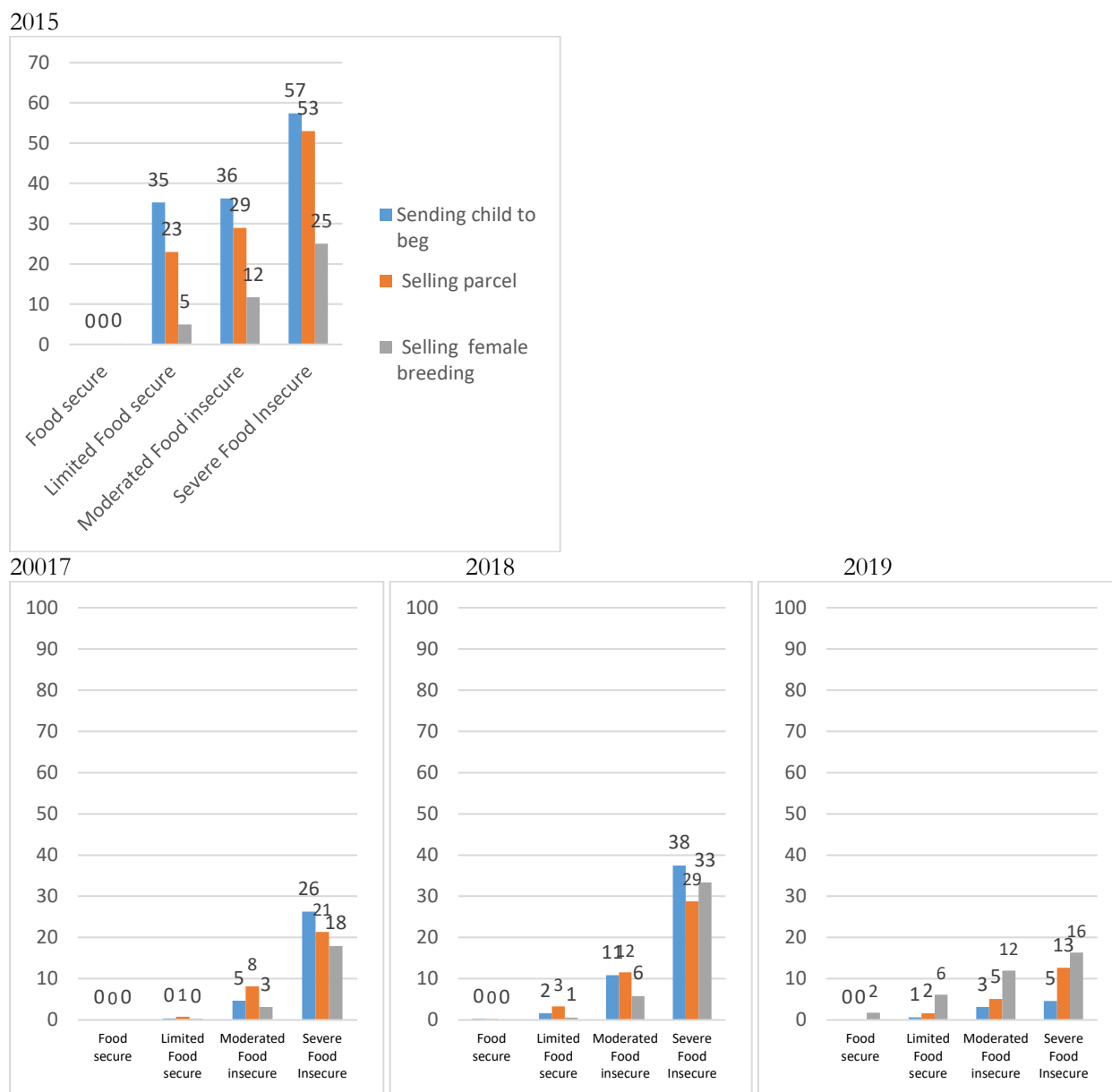
Fig 4 : Emergency strategies and food security



3.2.2.3- Food security and crises strategies

As for emergency strategies, complete food secure households are safe from using crises strategies compared to other 3 categories of households. Also, the data in 2016 is a bit different from other years. While crisis strategies are almost not adopted by food-secure households, other categories of households are increasingly adopting different crisis strategies depending on the severity of the food insecurity category in which they find themselves.

Fig 5 : Crises strategies and food security



3.2.2.4- Reasons for relying on coping strategies

We are also interested in looking at the reason why household relied in copying strategies, particularly sales of female reproductive livestock. In majority of cases, the reasonis to buy food. Other essentials purchases such as education, health expenditures represent in a smaller proportion the reason of using copying strategies. Table 9 shows that food insecure households rely in differents strategies to provide food, while food secure households rely on copying strategies to provide equally food,

education or health needs. Female reproductive female generally represent a source of income that a household could rely on in the future but, if poorer food secure household rely much on that, they exacerbate their condition which is already worse.

Table 6: Food security and raison of selling reproductive livestock (%)

		Buy food	Education purpose	health expenditure	Other
Year =2015	Food secure	60.8	15.8	9.8	9.8
	Limited Food secure	73.3	13.1	4.7	4.7
	Moderated Food insecure	78.5	10.2	2.8	2.9
	Severe Food Insecure	89.2	3.9	3.9	3.9
Year =2016	Food secure	38.4	26.4	4.8	4.8
	Limited Food secure	64.8	17.3	1.5	1.5
	Moderated Food insecure	90.6	3.7	0.9	0.9
	Severe Food Insecure	96.1	2.6	0	0
Year =2017	Food secure	50	16.4	7.1	7.1
	Limited Food secure	68.2	13.0	2.9	2.9
	Moderated Food insecure	79.1	8.7	1.9	1.9
	Severe Food Insecure	100	0	0	0
Year =2018	Food secure	55.3	18.2	3.0	3.0
	Limited Food secure	69.8	14.5	1.4	1.4
	Moderated Food insecure	77.5	14.0	2.1	2.1
	Severe Food Insecure	76.5	5.9	0	0
Year =2019	Food secure	41.3	22.7	7.3	7.3
	Limited Food secure	67.5	14.0	5.0	5.0
	Moderated Food insecure	72.6	13.8	1.3	1.3
	Severe Food Insecure	79.2	4.2	0	0

3.2.3- Socio-economic variables and food security in Chadian context

Some socio-economic determinants mentioned in section 2.2.2 were collected in Chad's surveys. These are the sex of the head of household, the size of the household, the marital status of the head of household, the fact that the head of household is literate or not but not the level of education, the environment of residence of the household, the variables on the level of the household including the assets including livestock, plow, motorcycle, because, the characteristics of the habitat and the fact that the head of household is a farmer or not. This part aims to explore the relationship between these variables and food security through descriptive analysis. The table on the household profile is

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

presented in the body of work while the tables crossing the socio-economic variables to the food security variable are presented in the annex (annex 3).

In general household are headed by male individuals, although few variations exist across regions (table 7). Data shows that food insecurity is most prevalent in female headed households suggesting a link between food security and the gender of the household head. Food insecure households, in general, and those headed by female member, in particular, are small in size because often headed by widowed or separate or divorced member which take the charge of the family. Although the head of household literacy rate increase over time until 2018, more than half of them remains illiterate. However, this rate decreases from food secure households to households with unfavorable food security status, showing that literacy is a likely determinant of food security. Crossing the food security variable with area of residence, surprisingly, food insecurity occurs more in urban area than rural ones. This shows disadvantaged households in urban areas that depend only on the market for supply do not have a backing mechanism as rural households that can resort to reserves of food products from their self-farming production.

Using Multiple correspondence Analysis (MCA), we built a wealth index (disaggregated into 5 quintiles) based on assets and equipment such as livestock, plow, motorcycle, car etc. Crossing this wealth variable with food security, chi-square tests indicated that food security is strongly associated with the wealth index (chi-squared= 747.0730; p-value = 0.000). As a matter of fact, wealthier households are substantially overrepresented in top quintile and underrepresented in bottom quintile.

Household head are generally farmers (about around 90 percent) and produce cereals as primary staples. Cereals are the most cultivated crops, partly due to irregular rainfall and limited technology. The predominant agriculture activity is smallholder farming and a substantial proportion (65 percent at least in 4 years out of 5) also hold livestock (table 1). Looking at food security status of household, it appears that practice of farming in general (agriculture and livestock) is associated with food security (table 8). As a matter of fact, between 79 to 96 percent of food secured household practice either agriculture or animal husbandry. This proportion drop to a range of 35 to 81 percent in the group of households that are severely food insecure. From 2015 to 2019, livestock is much of a factor that separate food security status (compared to agriculture) while in 2018 and the 2019 this factor shift much relatively toward agriculture.

Table 7 : Profile of households in the sample

	2015	2016	2017	2018	2019
Sex of male household head	84.7	84.4	81.0	78.3	75.8
Age of household head (Average)	41.7	41.4	41.8	42.0	42.3
literacy of household head	33.3	42.7	45.4	59.2	39.3
proportion of farmer (practicing agriculture)	88.9	93.2	93.4	90.7	93.5
Area cultivated in ha	3.5	2.5	2.4	2.0	0.0
production of cereals (in	2.5	11.9	12.3	11.5	8.7
proportion of breeding household	64.3	74.7	70.9	31.7	71.9
Average number of cattle	5.5	3.2	3.1	4.0	2.4
Number of cattle a year ago	6.0	3.4	3.3	4.2	2.6
Average number of goats	8.6	5.0	5.0	7.4	4.5
Average number of goats a year ago	10.7	5.7	6.1	9.4	4.9

4. Econometric Strategy

Given the structure of the survey data available and its repetitive nature over time leading to the construction of a pseudo panel database, panel data analysis techniques can be used for these data. Variables included on cohort construction should then satisfy appropriate conditions for an instrumental variable (rank condition, etc.) since estimation techniques based on grouping individual data into cohorts are identical to instrumental variables approaches (Mofit, 1993). Loosely speaking, this not only requires that the instruments are exogenous (in the sense of being uncorrelated to the unobservable in the equation of interest), but also relevant, i.e. appropriately correlated to the explanatory variables in the model. In the empirical literature, Pseudo-panels have been used to model a wide range of topics, including investment (Duhautois, 2001), consumption (Gardes, 1999; Gardes et al., 2005; Marical & Calvet, 2011), or long-term behavioral changes, such as wage trajectories (Koubi, 2003), women’s participation in the labor market (Afsa & Buffeteau, 2005), subjective well-being (Afsa & Marcus, 2008) or living standards (Lelièvre et al., 2010), to mention just the most recent research.

The dependent variable, food security, being an ordinal variable, we will analyze it by adopting a proportional odds model or ordinal model. By choosing this type of model, we assume that there is a common slope for the effect of explanatory variables on our outcome variable. We will confirm this assumption by the test of parallel lines. The model can be formalized as follow:

$$\log \left(\frac{\Pr(Y_{it} < k)}{\Pr(Y_{it} = k)} \right) = a_k + \sum_{j=1}^J \beta_j x_{jit} + \sum_{r=1}^R \theta_r z_{rit} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Where α_k is the intercept for k; x_{jit} is the value of climatic variable j for individual I at time t; β_j is a coefficients of climatic variables j; z_{rit} is the value of the control variable r for individual I at the time t; θ_r is the coefficients of control variables r and ε_{it} is the error term for individual i at the time t.

In order to validate results from the pseudo panel approach, we also regress food security index in yearly cross section data as well as pooling stacked data with dummy for each year. This later pooling data is then used to compare determinants of food security as we work with cohort level data or pseudo panel data. Estimates result in the next section found very similar effect although generally less significant in the case of pseudo panel. This makes a little bit a sense in a systematic way since pseudo panel estimation result in smaller number of “observations” (cohort), but also that effect from same individual within same cohort can negate one another. This strategy allows to fully appreciate the robustness of the equation's results.

5. Estimation results and robustness analysis

In this section, we analyzed the marginal effect of explanatory variables on our variable of interest resulting of equation 1 estimation from the pooling database.

5.1- Marginal effect of climatic and control variables

The table below presents marginal effects of explanatory variables obtained from the estimation made on pooling database and OLS estimation of the equation 1 to allow comparison.

Table 8: marginal effects of weather, socio-economic and demographic variables, and food strategies on food insecurity status.

	Food insecurity				
	OLS		Ordinal logistic odds		
	OLS	Secure	limited secure	moderate insecure	Insecure
Lograinfall	-0.076*** (0.011)	0.034*** (0.005)	0.003*** (0.001)	-0.031*** (0.004)	-0.007*** (0.001)
Drought	0.103*** (0.012)	-0.047*** (0.005)	-0.004*** (0.001)	0.042*** (0.004)	0.009*** (0.001)
Flood	-0.007 (0.021)	0.001 (0.009)	0.0001 (0.001)	-0.001 (0.008)	-0.0002 (0.002)
Sahelian area (<600mm)	0.151*** (0.013)	-0.061*** (0.006)	-0.006*** (0.001)	0.054*** (0.005)	0.012*** (0.001)
HH Age	0.0001 (0.0002)	-0.0001 (0.0001)	-0.00001 (0.00001)	0.0001 (0.0001)	0.00001 (0.0007)
HH male	-0.175*** (0.009)	0.070*** (0.004)	0.007*** (0.0006)	-0.063*** (0.003)	-0.014*** (0.0009)
Literacy of HH	-0.072*** (0.007)	0.032*** (0.003)	0.003*** (0.0004)	-0.028*** (0.003)	-0.006*** (0.0007)

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Living in urban area	0.030*** (0.007)	-0.012*** (0.003)	-0.001*** (0.0003)	0.011*** (0.003)	0.002*** (0.001)
Big livestock	-0.002*** (0.0003)	0.0009*** (0.0002)	0.0001*** (0.00002)	-0.001*** (0.0001)	-0.0002*** (0.00003)
Small livestock	-0.003*** (0.0004)	0.00012*** (0.0002)	0.0001*** (0.00002)	-0.0011*** (0.0001)	-0.0002*** (0.00003)
Fowls	-0.004*** (0.0003)	0.002*** (0.0002)	0.0001*** (0.00002)	-0.0018*** (0.0001)	-0.0004*** (0.00003)
Have comfort Equipment	-0.124*** (0.009)	0.054*** (0.004)	0.005*** (0.0005)	-0.048*** (0.004)	-0.011** (0.0008)
Have a com Equipment	-0.164*** (0.007)	0.071*** (0.003)	0.007*** (0.0006)	-0.063*** (0.003)	-0.014*** (0.0007)
Have a transport equip	0.111*** (0.008)	0.046*** (0.003)	0.004*** (0.0005)	-0.041*** (0.003)	-0.009*** (0.0007)
Have a prod equip.	-0.105*** (0.008)	0.046*** (0.004)	0.004*** (0.0005)	-0.041*** (0.003)	-0.009*** (0.0007)
Has valuable asset	-0.112*** (0.009)	0.050*** (0.004)	0.005*** (0.0005)	-0.044*** (0.003)	-0.010*** (0.0008)
Living Conditions index	-0.048*** (0.009)	0.023*** (0.004)	0.002*** (0.0004)	-0.021*** (0.003)	-0.005*** (0.0008)
Is a farmer	-0.066*** (0.012)	0.028*** (0.005)	0.003*** (0.0005)	-0.025*** (0.005)	0.006*** (0.001)
Sicknesses in household	0.149*** (0.012)	-0.064*** (0.005)	-0.006*** (0.0007)	0.057*** (0.005)	0.013*** (0.001)
Eat less preferred food	0.041*** (0.002)	-0.018*** (0.001)	-0.002*** (0.0002)	0.016*** (0.001)	0.004*** (0.0002)
To borrow food or money	0.106*** (0.003)	-0.044*** (0.002)	-0.004*** (0.0003)	0.039*** (0.001)	0.009*** (0.0004)
Reduce quantity of meal	0.002 (0.004)	-0.0010 (0.002)	-0.0001 (0.0001)	0.0009 (0.001)	0.0002 (0.0003)
Reduce adult meal size	0.009** (0.004)	-0.004*** (0.002)	-0.0004*** (0.0002)	0.004*** (0.002)	0.0008*** (0.0003)
Reduce number of meal	0.027*** (0.004)	-0.012*** (0.002)	-0.001*** (0.0002)	0.010*** (0.001)	0.002*** (0.0003)

Significance level: *** at 1%, ** at 5% and * at 10%

Numbers in parentheses are standard deviations

Among the climatic variables used in this study, rainfall and drought are found to have significant effects on food security. This is also the case of the residence in a least watered area (rainfall<600mm). When rainfall increases by 1%, the probability for a household to be in the food secure increases by 3.4% and the probability to be limited food secure increases by 0.3% at 1% confidence threshold, ceteris paribus. However, the probability to be moderately food secure decreases by 3,1% and the probability to be food insecure decrease by 0,7% at 1% confidence threshold. The increase in rainfall is associated to a high probability to be food secure. When moving from households not affected by drought to the one affected by drought, the probability to be food secure decrease by 4,7% and the probability to be in the limited food secure household decreases by 0,4% to 1% confidence threshold.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Nevertheless, the probability to be in the moderately food insecure household increase by 4,2% to 1% confidence threshold. And the probability to be in the food insecure household also increases by 0,9%. Drought is associated to high probability to be food insecure. Living in the area with less than 600mm decreases the probability to be food secure by 6,1% and to be limited food secure by 0,6% to 1% confidence threshold. However, it increases the probability to be moderately food insecure by 5,4% and food insecure by 1,2% at 1% confidence threshold. Climatic unfavorable area exposes to high risk to be food insecure.

While moving from the household headed by female to the one headed by the male, the probability for the household to be food secure increases by 7%. And the probability for the household to be limited food secure increases by 0,7%. However, the probability for the household to be moderately food insecure decreases by 6,3%. And the probability to be food insecure decreases by 1,4%. The gender of the head of the household matters for food security. When we move from the household headed by no literate head to the one headed by literate person, the probability for the household to be food secure increases by 3,2%. And the probability to be limited food secure increases by 0,3%. Nonetheless, the probability to be moderately food insecure decreases by 2,8%. And the probability to be food insecure decreases by 0,6%. The literacy of the head of the household also affects positively the household food security status. When moving from rural area to urban area, the probability to be food secured decreases by 1,2% and the probability to be limited food secure decreases by 0,1%. However, the probability to be moderately food insecure increases by 1,1% and the probability to be food insecure increases by 0,2%. Food insecurity is more an urban than a rural phenomenon. When the number of large livestock in the household increase by one, the probability for the household to be food secure increases by 0,09%. And the probability for the household to be limited food secure increases by 0,01%. Nevertheless, the probability for the household to be moderately food insecure decreases by 0,1%. And the one for the household to be food insecure decreases by 0,02%. When the number of the small livestock in the household increases by one, the probability for the household to be food secure increases by 0,01%. And the one for the household to be limited food secure increases by 0,01%. However, the probability for the household to be moderately food insecure decreases by 0,11%. And the one to be food insecure decreases by 0,02%. When the number of fowls in the household increases by one, the probability for the household to be food secure increases by 0,2%. And the one to be limited food secure increases by 0,01%. Nonetheless, the probability for the household to be moderately food insecure decreases by 0,18% and the one to be food insecure decreases by 0,04%. Making a breeding (even small) makes it possible to cope with food insecurity.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

While moving from the household with no comfort equipment to the one that has that equipment, the probability to be in a food secure household increases by 5,4% and the one to be in the limited food secure household increases by 0,5%, *ceteris paribus*. However, the probability to be in the moderate food insecure household decreases by 4,8% and the one to be in the food insecure household decreases by 1,1%, *ceteris paribus*. While moving from a household that hasn't communication equipment to the one has it, the probability to be in a food secure household increases by 7,1% and the one to be in the limited food secure household increases by 0,7%, *ceteris paribus*. Though, the probability to be in a moderate food insecure household decreases by 6,3% and the one to be in a food insecure household decreases by 1,4%, *ceteris paribus*. While moving from a household with no transportation equipment to a one that has it, the probability to be in a food secure household increases by 4,6% and the one to be in a limited food secure household increases by 0,4%, *ceteris paribus*. However, the probability to be in the moderately food insecure household decreases by 4,1% and to be in the food insecure household decreases by 0,9%. While moving from a household with no production equipment to a one that has it, the probability to be in a food secure household increases by 4,6% and the one to be in a limited food secure household increases by 0,4%, *ceteris paribus*. Nevertheless, the probability to be in a moderate food insecure household decreases by 4,1% and the one to be in a food insecure household decreases by 0,9%, *ceteris paribus*. While moving from household with no valuable objects to a one with those objects, the probability to be in a food secure household increases by 5% and the one to be in a limited food secure household increases by 0,5%, *ceteris paribus*. However, the probability to be in a moderate food insecure household decreases by 4,4% and the one to be in a food insecure household decreases by 1%, *ceteris paribus*. This shows that households with various facilities are less vulnerable to food insecurity. When the index of life conditions increases by one unit, the probability to be in a food secure household increases by 2,3% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household increases by 0,2% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Nonetheless, the probability to be in a moderate food insecure household decreases by 2,1% to the 1% confidence threshold and the one to be in a food insecure household decreases by 0,5% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. This also shows that the level of life in the household matters for food security. While moving from a household with no farmer as head to a household with farmer as head, the probability to be in a food secure household increases by 2,8% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household increases by 0,3% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. However, the probability to be in a moderate food insecure household decreases by 2,5% to 1% confidence threshold and the one to be

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

in a food insecure household decreases by 0,6% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Farmers are less exposed to food insecurity. This reinforces the fact that food insecurity is an urban phenomenon. While moving from a household which has not sicknesses cases to a one which has it, the probability to be in a food secure household decreases by 6,4% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household decreases by 0,6% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Nonetheless, the probability to be in a moderate food insecure household increases by 5,7% to 1% confidence threshold and the one to be in a food insecure household increases by 1,3% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Difficult situations experienced by households such as diseases that deplete household resources affect their food security.

While moving from a household that doesn't adopt the strategy consist of the eating of no preferred food to a one that adopted, the probability to be in a food secure household decreases by 1,8% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household, the probability decreases by 0,2% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. The probability to be in a moderate food insecure household increases by 1,6% to 1% confidence threshold and the one to be in a food insecure household increases by 0,4% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. While moving from a household that didn't borrow food or money to a one that did it, the probability to be in food secure household decreases by 4,4% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household decreases by 0,4% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Though, the probability to be in a moderate food insecure household increases by 3,9% and the one to be in a food insecure household increases by 0,9% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. While moving from the household that didn't reduce the quantity of meal for adult to the one who did it, the probability to be in a food secure household decreases by 0,4% to 1% confidence threshold and the probability to be in a limited food secure household decreases by 0,04% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Though, the probability to be in a moderate food insecure household increases by 0,4% to 1% confidence threshold and the probability to be in a food insecure household increases by 0,08% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. While moving from a household who didn't reduce the number of meal to the one that did it, the probability to be in a food secure decreases by 1,2% to 1% confidence threshold and the one to be in a limited food secure household decreases by 0,1% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*. Though, the probability to be in the moderate food insecure household increases by 1,0% to 1% confidence threshold and the one to be in a food insecure household increases by 0,2% to 1% confidence threshold, *ceteris paribus*.

5.2- Robustness and consistency analysis

Table 9: Food insecurity and socio-economic, demographic variables and food strategies

	Food insecurity						
	2015	2016	2017	2018	2019	Pooling	pseudo panel
Lograinfall	-0.122*** (0.056)	0.162** (0.068)	-0.264*** (0.089)	-0.689*** (0.099)	-0.318*** (0.102)	-0.233*** (0.032)	-0.002*** (0.0003)
Drought	0.446*** (0.070)	0.220*** (0.067)	0.425*** (0.071)	-	0.131* (0.078)	0.316*** (0.034)	1.1706* (0.221)
Flood	0.418** (0.188)	-0.716*** (0.148)	0.127 (0.106)	-	-0.135 (0.119)	-0.008 (0.062)	-1.2056 (2.231)
HH Age	0.002 (0.002)	0.005*** (0.002)	-0.004** (0.002)	-0.002 (0.002)	0.003* (0.002)	0.0005 (0.0007)	0.0044 (0.0055)
HH Sex	0.696*** (0.064)	-0.443*** (0.066)	-0.412*** (0.065)	-0.181*** (0.061)	-0.340*** (0.057)	-0.476*** (0.027)	-1.0457*** (0.2966)
Literacy of HH	-0.207*** (0.049)	-0.280*** (0.049)	-0.204*** (0.050)	-0.042 (0.049)	-0.371*** (0.050)	-0.214*** (0.021)	-0.623*** (0.2003)
Living in urban area	0.086* (0.045)	-0.032 (0.045)	0.088* (0.052)	0.045 (0.044)	0.055 (0.043)	0.080 (0.020)	0.5160*** (0.1766)
Living in Sahelian area (rainfall < 600mm)	0.382*** (0.071)	0.961*** (0.083)	-0.094 (0.102)	-0.008 (0.110)	0.437*** (0.106)	0.412*** (0.038)	
Household size	-	-0.032*** (0.006)	-0.014** (0.006)	-0.014** (0.006)	-0.022*** (0.007)	-	-0.0721*** (0.1219)
Big livestock	-0.002 (0.002)	0.005** (0.0022)	-0.006*** (0.002)	-0.011*** (0.002)	-0.005 (0.004)	-0.006*** (0.001)	-0.2410*** (0.1070)
Small livestock	-0.026*** (0.003)	-0.015*** (0.002)	-0.002 (0.002)	-0.003 (0.003)	-0.009*** (0.003)	-0.008*** (0.001)	1.0815 (0.2749)
Fowls	-0.010*** (0.002)	-0.009*** (0.002)	-0.003 (0.002)	-0.014*** (0.002)	-0.014*** (0.002)	-0.014*** (0.001)	-0.3438 (2.222)
Have comfort Equipment	-0.388*** (0.060)	-0.089 (0.058)	-0.034 (0.068)	-0.164** (0.065)	-0.494*** (0.062)	-0.267*** (0.027)	0.6553 (2.2450)
Have a com Equipment	-0.561*** (0.050)	-0.337*** (0.049)	-0.512*** (0.053)	-0.502*** (0.050)	-0.414*** (0.050)	-0.481*** (0.022)	-2.0064* (0.2627)
Have a transport equip	-0.151*** (0.051)	-0.102* (0.055)	-0.298*** (0.056)	-0.130** (0.055)	-0.350*** (0.055)	-0.314*** (0.023)	-1.3237*** (0.0221)
Have a prod equip.	-0.279*** (0.052)	-0.152*** (0.059)	0.088 (0.058)	-0.517*** (0.057)	-0.362*** (0.058)	-0.312*** (0.024)	0.002 (0.0126)
Has valuable asset	-0.309*** (0.048)	0.162** (0.069)	-0.105* (0.064)	-0.692*** (0.062)	-0.129** (0.062)	-0.338*** (0.026)	-1.3238 (2.2145)
Living Conditions index	-0.047 (0.058)	-0.722*** (0.120)	0.003 (0.066)	-0.096 (0.060)	-0.224*** (0.062)	-0.159*** (0.026)	-0.0741*** (0.0014)
Is a farmer	-0.213*** (0.080)	0.025 (0.082)	-0.336*** (0.088)	0.130 (0.080)	-0.190** (0.084)	-0.193*** (0.035)	-0.1204 (0.1455)
Eat less preferred food	0.047*** (0.013)	0.916*** (0.054)	0.803*** (0.060)	0.104*** (0.016)	0.241*** (0.021)	0.121*** (0.007)	0.2208*** (0.1122)
Sicknesses in household	0.221*** (0.069)	0.496*** (0.061)	0.431*** (0.083)	-	-0.009 (0.081)	0.433*** (0.034)	0.4373*** (0.2172)
To borrow food or money	0.324*** (0.022)	-0.149** (0.067)	0.988*** (0.058)	0.275*** (0.024)	0.436*** (0.028)	0.298*** (0.010)	0.1204 (0.1455)
Reduce quantity of meal	0.013 (0.021)	0.355*** (0.063)	0.022 (0.076)	-0.030 (0.028)	0.082*** (0.032)	0.007 (0.011)	-0.0365 (0.0835)

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Reduce adult meal size	-0.050** (0.022)	-0.084 (0.068)	0.242*** (0.076)	-0.051* (0.028)	0.074** (0.033)	0.027** (0.011)	0.0852 (0.1194)
Reduce number of meal	0.049** (0.023)	-0.399*** (0.072)	0.289*** (0.069)	0.064** (0.026)	0.119*** (0.030)	0.079*** (0.011)	0.1696*** (0.1903)
Dietary diversity score	-	-0.341*** (0.015)	-0.403*** (0.015)	-0.400*** (0.015)	-0.409*** (0.014)		1.1891 (0.904)
2016						-0.166*** (0.032)	
2017						0.862*** (0.032)	
2018						0.526*** (0.032)	
2019						0.809*** (0.032)	
Cut1	-2.031 (0.409)	-0.942 (0.476)	-7.475 (0.615)	-10.048 (0.693)	-7.950 (0.728)	-3.885 (0.223)	-3.769 (2.360)
Cut2	0.170 (0.409)	2.079 (0.477)	-4.044 (0.609)	-6.851 (0.687)	-4.645 (0.725)	-1.163 (0.223)	0.244 (2.352)
Cut3	2.118 (0.410)	4.969 (0.482)	-0.396 (0.612)	-3.677 (0.686)	-0.954 (0.725)	1.624 (0.223)	5.896 (2.569)
N	7929	8802	8323	8489	8909	34522	2343
R2	0.12	0.20	0.19	0.17	0.21	0.13	0.12
LR Chi2	2345.9***	3860.3***	3419.8***	3150.1***	4142.4***	8958.7***	479.23***

For the analysis of the robustness and consistency of the results, we compare the results of the estimates of the annual bases, pooling and pseudo panel. Following literature review and data availability, we consider four groups of variables to be included as control variables in the regression of food security, including climatic, socio-economic, demographic, and coping mechanism related variables. Table 15 presents yearly cross section estimation as well as estimation on pooling data over years. In the last column we also present of pseudo panel estimation where new individuals are cohorts constructed based on time-invariant characteristics.

When considering coefficients obtained from annual data, the relationship with food security is not always intuitive and varies from one year to another. For example, 2016 and 2015 data show respectively that rainfall and flood are surprisingly positively associated with the food insecurity, which is not the case in other years. Few other non-intuitive results exist for couples of controls variables but, we should bear in mind yearly specific events might be a legitimate explanation. This is the reason why we also include pooling estimation with year-dummy variable to capture such effects. Using pooling estimation, results are more intuitive and consistent.

Climatic variables include rainfall, drought, and flood. Rainfall is associated with more food secure status as his estimated coefficient is negative, meaning (the household is less likely to be food insecure

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

as rainfall increase). Drought in the other hand is associated with higher probability to be food insecure. Flood variable is significant only for two cross sections out of 5 and non-significant in the pooling data. Living in a climate-friendly area (receiving less than 600mm of precipitation) also exposes you to food insecurity.

On the demographic variables, female headed household are better off in term of food security in each of cross section as well as in the pooling database. Age of the household head however provide inconclusive result, but in general and in the pooling data, estimations shows that household with older household head are more food insecure. Largest household size is associate with food secure status for the household both in the cross section as well as in the pooling data set, which can be explained in as much as household size is positively correlated with human capital of that household. This is even true in rural area where larger household size implied bigger manpower for agriculture productions and bigger economy of scale in term of consumption spending.

Literacy of household head is also negatively associated with food insecurity (positively associated with food security) as the more knowledgeable household head is more prepared to face agriculture constraint in rural areas and more likely to get better jobs in urban areas.

Having communication equipment (phone, radio, television) increase the probability to be food secure. This can be explained by that fact that communication equipment give access to information including information related to agricultural activities including the one from the community as well as extension services. Having transport equipment or valuable asset also increases the probability to be food secure as these equipment's are generally deployed as coping mechanism to face food insecurity.

Livestock plays big role in food security status. Although not significant in only one year or two, having livestock is associated with being less food insecure (thus more food secure).

Coping mechanisms are more used by food insecure households. But it would be interesting to check whether relying on copying mechanism induce household to get out of the food insecurity status. The strategy to consume unlike (or less preferred) food has a clear effect whatever the year and the database. Borrowing food or money is generally not benefic food security wise, unless in 2016, where it rather increases probability of being food secure. Similar thing can be said regarding coping mechanism such as reducing quantity of food for adults or number of times to eat food per day.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Based on the analysis of the robustness and consistency, we have retained the results of pooling as the best of which the marginal effects have been analyzed and presented in Table 8.

6. Conclusion

The objective of this work, which is to highlight the effects of climate factors on food security among other determinants, has largely been achieved. Indeed, Climatic variables including rainfall, and drought have clearly exposed their influences on food security. Rainfall is associated with more food secure status as its estimated coefficient is positive, meaning that the household is less likely to be food insecure as rainfall increases. Drought on the other hand is associated with higher probability to be food insecure. Flood however can be significant some years and non-significant some others. Living in a non-favorable climate area (with less than 600mm of precipitation) also exposes to food insecurity.

Other determinants showed also their effect on food security in Chadian context. On the demographic variables, female headed household are better off in term of food security in each of cross section as well as in the pooling database. Literacy of household head is also positively associated with food security (negatively associated with food insecurity) as the more knowledgeable household head is more prepared to face agriculture constraint in rural areas and more likely to get better jobs in urban areas. Food insecurity is more an urban phenomenon than a rural one. This can be explained by the fact that being a farmer exposes to be less likely food insecure. Making a breeding (even small) makes it possible to cope with food insecurity. Having communication equipment (phone, radio, television) increase the probability to be food secure. This can be explained by that fact that communication equipment give access to information including information related to agricultural activities including the one from the community as well as extension services. Having transport equipment or valuable asset also increases the probability to be food secure as these equipment's are generally deployed as coping mechanism to face food insecurity. Livestock plays big role in food security status. Having livestock is associated with being less food insecure (thus more food secure). Having a valuable asset or living in a relatively good conditions exposes less likely to food insecurity. However, having a sickness in the household increases the probability to be food insecure.

Coping mechanisms are more used by food insecure households. But it would be interesting to check whether relying on coping mechanism induce household to get out of the food insecurity status. The strategy to consume unlike (or less preferred) food has a clear effect. It is associated with food insecurity status. Borrowing food or money is generally not benefic food security wise but can increase the probability of being food secure. Similar thing can be said regarding coping mechanism such as reducing quantity of food for adults or number of times to eat food per day

7. Bibliographie

- A Climate Trend Analysis of Chad. FewNet and USAID. 2012.* 2012, Famine Early Warning Systems Network—Informing Climate Change Adaptation Series.
- Adaptation aux changements climatiques et renforcement de la résilience au Tchad: diagnostics et perspective. Broudic, Caroline, et al. 2019.* 2019, Braced.
- Asfaw, Salomon, et al. 2014.** Climate variability, adaptation strategies and food security in Malawi. *FAO ESA Working Paper*. June 2014.
- AU, American University, OIM, Chad and FSC, Food Security Cluster. 2021.** *Climate change, food security and migration in Chad: a complex nexus*. N'Djamena, Tchad : International Organization for Migration, 2021.
- Babu, S., Gajanan, S. N. and Sanyal, P. 2014.** Food security, poverty and nutrition policy analysis: statistical methods and applications. *Academy Press*. 2014.
- Barbier, Bruno, et al. 2009.** Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel: Farmers' Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso. *Environmental Management*, 43. 2009.
- Barrett, Christopher. 2010.** Measuring Food Insecurity. *Science*. Février 12, 2010.
- Barrios, Salvador, Ouattara, Bazoumana and Strobl, Eric., 2008.** The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? *Direct Science*. Janvier 2008.
- Bhuyan, Biswabhusan, Sahoo, Bimal Kishore and Suar, Damodar. 2020.** Food insecurity dynamics in India: A synthetic panel approach. *Social Sciences & Humanities Open*. 2020.
- Bloem, Martin W., Samba, Richard D. and Kraemer, Klaus. 2010.** Castel Gandolfo Workshop: An Introduction to the Impact of Climate Change, the Economic Crisis, and the Increase in the Food Prices on Malnutrition. *Journal of Nutrition*, 140. 2010, pp. 32-135.
- CFS. 2012.** *Global Stratégie framework for food security and nutrition*. Rome, Italy : Committee on world food security, 2012.
- CILSS. 2004.** www.cilssnet.org/anglais/index_anglais.htm. 2004.
- Corsi, Stefano, Marchisio, Laura Viviana and Orsi, Luisi. 2017.** Connecting smallholder farmers to local markets: Drivers of collective action, land tenure and food security in East Chad. *Land Use Policy*. 2017, pp. 39-47.
- De Haen, H., Klasen, S. and Qaim, M. 2011.** What do we really know? metrics for food insecurity and undernutrition. *Food Policy*. 2011, pp. 760–769.
- Di Falco, Salvatore and Veronesi, Marcello. 2013.** How can African agriculture adapt to climate change?: A counterfactual Analysis from Ethiopia. *Land Economics* 89. 2013, pp. 743-766.
- Eckhardt, N.A., et al. 2009.** The future of science: food and water for life. *The Plant Cell* 21. 2009, pp. 68–372.
- Elbers, C., Lanjouw, J. O. and Lanjouw, P. 2001.** Welfare in villages and towns: micro-level estimation of poverty and inequality. *Vrije Universiteit, Yale University and the World Bank (mimeo)*. 2001.
- Factors Influencing Household Food Security in West Africa: The Case of Southern Niger. Zakari, Seydou, Ying, Liu and Song, Baohui. 2014.* 2014, sustainability.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

FAO, et al. 2018. L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2018. Renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition. *Rome FAO*. 2018.

Farmer Adaptation, Change and "Crisis" in the Sahel. **Mortimore, M. J. and Adams, W. M. 2001.** 2001, Global Environmental Change, pp. 49-57.

Feder, Gershon, Just, Richard E. and Zilberman, David. 1985. Adoption of agricultural innovations in developing countries: a survey. *Economic Development and Cultural Change*. January 1985, pp. 255-298.

Filho, Walter Leal, Azeiteiro, Ulisses M. and Alves, Fátima. 2016. *Climate change and Health*. s.l. : Climate Change management, DOI 10.1007/978-3-319-24660-4_9, 2016.

Food security and climate shocks in Senegal: Who and where are the most vulnerable households? **Nébié, Elisabeth Kagoïlboudo, Ba, Diaba and Gianniniac, Alessandra. 2021.** 2021, Global Food Security.

Food security in rural Burkina Faso: the importance of consumption of own-farm sourced food versus purchased food. **Fraval, Simon, et al. 2020.** 2020, Agriculture & Food Security.

Food security: definition and measurement. **Pinstrup-Andersen, P. 2009.** 2009, Food Sec. 1, 5–7 (2009).<https://doi.org/10.1007/s12571-008-0002-y>.

Fox, P. and Rockström, J. 2003. Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahel. *Agricultural Water Management* 61, June 2003, pp. 29-50.

Gender, entrepreneurship and food security in Niger. **Dedehouanou, Sènakpon Fidèle Ange and Araar, Abdelkrim. 2020.** 2020, WILEY.

Gherssi, G. and Rastoin, J.-L. 2010. Le système alimentaire mondial: concepts et méthodes analyses et dynamiques. *Éditions Quae*. 2010.

Habyarimana, Jean-Baptiste. 2015. Determinants of Household Food Insecurity in Developing Countries : evidence from a Probit Model for the Case of Rural Households in Rwanda. *Sustainable Agriculture Research*. 2015.

Haddad, L., Kennedy, E. and Sullivan, J. 1994. Choice of indicators for food security and nutrition monitoring. *Food Policy*. 1994, pp. 19(3):329–343.

Harris-Fry, Helen, et al. 2015. Socio-economic determinants of household food security and women's dietary diversity in rural Bangladesh: a cross-sectional study. *Journal of Health, Population and Nutrition*. 2015.

Harrower, Sarah and Hoddinott, John. 2004. Consumption smoothing and vulnerability in the zone lacustre, Mali . *International Food Policy Research Institute* . March 2004.

Hengsdijk, H. and Van Keulen, H. 2002. The effect of temporal variation on inputs and outputs of future-oriented land use systems in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. September 2002, pp. 245-259.

Hentschel, J., et al. 2000. Combining census and survey data to trace the spatial dimensions of poverty: A case study of ecuador. *The World Bank economic review*. 2000, pp. 147–165.

How do rainfall variability, food security and remittances interact? The case of rural Mali. **Generoso, Rémi. 2015.** 2015, Ecological Economics, pp. 114: 188–198.

Howden, S. Mark, et al. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 104. 2007.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

- Hulme, Mike. 2001.** Climate perspectives on Sahelian desiccation: 1973–1998. *Global Environmental Change* 11. 2001, pp. 19-29.
- Hunger and entitlements.* **Sen, Amartya. 1987.** 1987, Research and Action., World Institute for Development, Economics Research, United Nations University.
- Kandji, Serigne Tacko, Verchot, Louis and Mackensen, Jens. 2006.** Climate Change and Variability in the Sahel Region: Impacts and Adaptation Strategies in the Agricultural Sector. *World Agroforestry Centre (ICRAF) et United Nations Environment Programme (UNEP)*. 2006.
- Kazianga, Harounan and Udry, Christopher. 2006.** Consumption Smoothing? Livestock, Insurance and Drought in rural Burkina Faso. *Journal of Development Economics*, 79. 2006.
- Kurukulasuriya, Pradeep and Rosenthal, Shane. 2003.** Climate change and Agriculture: a review of impacts and adaptations. *World Bank: Climate change series 91*. June 2003.
- La propriété du bétail a-t-elle une incidence sur la sécurité alimentaire ? Cas de la Mauritanie rurale.* **Ba, Mamoudou. 2020.** 2020, hal-03088715.
- Leza, Tekle and Kuma, Berhanu. 2015.** Determinants of rural farm household food security in Boloso Sore District of Wolaita Zone in Ethiopia. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*. 2015.
- Mason, Ryan, et al. 2014.** Determinants of food security in Tanzania: gendered dimensions of household headship and control of resources. *Springer Science+Business Media Dordrecht*. 2014.
- Maxwell, D. G. 1996.** Measuring food insecurity: the frequency and severity of coping strategies. *Food Policy*. 1996, pp. 291–303.
- Measuring Food Insecurity.* **Barrett, Christopher B. 2010.** s.l. : Science, 2010, Science.
- Measuring the Food Access Dimension of Food Security: A Critical Review and Mapping of Indicators.* **Leroy, Jef L, et al. 2015.** 2015, Food Nutr Bull., pp. 36(2):167-95. doi: 10.1177/0379572115587274. PMID: 26121701.
- Mertz, Ole., et al. 2011.** Adaptation strategy and climate vulnerability in the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Royal Meteorological Society: Atmospheric Science letters*. 2011.
- Morton, John F. 2007.** The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 104. 2007.
- Muche Muche, Mequanent, Endalew, Birara and Koricho, Tesfalew. 2014.** Determinants of household food security among Southwest Ethiopia rural households. *Asian Journal of Agricultural Research*. May 2014.
- Ndhlev, S., Musemwa, L. and Zhou, L. 2012.** Household food security in a coastal rural community of South Africa: Status, causes and coping strategies. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*. November 2012.
- One Leg or Two? Food Security and Pastoralism in Northern Sahel.* **Pedersen, Jon and Benjaminsen, Tor A. 2008.** 2008, Hum Ecol, pp. 36:43–57.
- Phiri, Ibrahim M. G. and Saka, Alez R. 2008.** The Impact of changing environmental conditions on vulnerable communities in the Shire Valley, Southern Malawi. *The Future of dryland. Paris, Springer and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) Publishing*. 2008.
- Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation.* **Sen, Amartya. 1982.** 1982, Oxford: Clarendon Press.

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Ravallion, Martin. 1987. *Markets and Famine*. s.l. : Oxford: Clarendon Press, 1987.

Reidsma, Pytrik and Ewert, Frank. 2008. Regional Farm Diversity Can Reduce Vulnerability of Food Production to climate change. *Ecology and Society*, 13. 2008.

Sekhampu, Tshediso Joseph. 2013. Determination of the factors affecting the food security status of households in Bophelong, South Africa. *International Business & Economics Research Journal*. May 2013.

Sustainability and Sabelian soils: evidence from Niger. **Warren, Andrew, Batterbury, Simon and Osbahr, Henny. 2001.** 2001, *The Geographical Journal*, pp. 324-341.

Tapsoba, Alexandra T., Combes Motel, Pascale and Combes, Jean-Louis. 2019. Remittances, food security and climate variability: The case of Burkina Faso. *CERDI: SÉRIE ÉTUDES ET DOCUMENTS*. November 2019.

Tapsoba, Alexandra, Motel, Pascale Combes and Combes, Jean-Louis. 2019. Remittances, foodsecurityandclimatevariability: The case of Burkina-Faso. *halsbs-02364775* . Nov. 2019.

The Four Dimensions of Food and Nutrition Security:Definitions and Concepts . **Gross, Rainer, et al. 2000.** 2000, *Nutrition and Food Security*.

The performance of rice market in Bangladesh during the 1974 famine. **Ravallion, Martin. 1985.** s.l. : The Economic Journal, 95(377) pp15-29 doi:10.2307/2233466, 1985.

Tshirley, David L. and Weber, Michael T. 1994. Food security strategies under extremely adverse conditions: The determinants of household income and consumption in rural Mozambique. *World Development*. 1994.

Twongyirwe, Ronald, et al. 2019. Perceived effects of drought on households food security in South-Western Uganda: coping responses and determinants. *Weather and Climate Extremes*. 2019.

Une histoire de famine au Sabel: Etudes de grandes crises alimentaires (XIXe-XXe siècle). **Gado, Boureima Alpha. 1993.** 1993, *Journal des africanistes*.

Wineman, Ayala. 2016. Multidimensional Household Food Security Measurement in Rural Zambia. *Agricultural Economics Research, Policy and Practice in Southern Africa*. 2016.

Yobom, Oudah. 2020. *Climate Change, Agriculture and Food Security in Sabel*. Université Bourgogne Franche-Comté : Economics and Finance, 2020.

8. Annexes

Annexe 1 : Food consumption determination

Module 1: Food Consumption Score

How many days over the last 7 days, did members of your household eat the following food items, prepared and/or consumed at home, and what was their source ?

(Use codes below, write 0 if not consumed in last 7 days)

Note for enumerator : Determine whether consumption of fish, milk was only in small quantities.

Foods	1.03- Number of days eaten in past 7 days <i>If 0 days, do not specify the main source.</i>	1.04- How was this food acquired? Write the main source of food for the past 7 days
1.	Cereals, grains, roots and tubers |__| Rice, pasta, bread, sorghum, millet, maize, fonio, potato, yam, cassava, white sweet potato	|__|
2.	Legumes / nuts : beans, cowpeas, peanuts, lentils, nut, soy, pigeon pea and / or other nuts |__|	|__|
3.	Milk and other dairy products: fresh milk / sour, yogurt, cheese, other dairy products (Exclude margarine / butter or small amounts of milk for tea / coffee) |__|	|__|
4.	Meat, fish and eggs: goat, beef, chicken, pork, blood, fish, including canned tuna, escargot, and / or other seafood, eggs (meat and fish consumed in large quantities and not as a condiment) |__|	|__|
If 0 <input type="checkbox"/> skip to question 5		
4.1	Flesh meat: beef, pork, lamb, goat, rabbit, chicken, duck, other birds, insects |__|	|__|
4.2		Organ meat: liver, kidney, heart and / or other organ meats
4.3	Fish/shellfish: fish, including canned tuna, escargot, and / or other seafood (fish in large quantities and not as a condiment) |__|	|__|
4.4	Eggs |__|	|__|
5.	Vegetables and leaves: spinach, onion, tomatoes, carrots, peppers, green beans, lettuce, etc |__|	|__|
If 0 <input type="checkbox"/> skip to question 6		
5.1	Orange vegetables (vegetables rich in Vitamin A): carrot, red pepper, pumpkin, orange sweet potatoes, |__|	|__|
5.2	Green leafy vegetables: , spinach, broccoli, amaranth and / or other dark green leaves, cassava leaves |__|	|__|
6.	Fruits: banana, apple, lemon, mango, papaya, apricot, peach, etc |__|	|__|
If 0 <input type="checkbox"/> skip to question 7		
6.1	Orange fruits (Fruits rich in Vitamin A): mango, papaya, apricot, peach |__|	|__|
7.	Oil / fat / butter: vegetable oil, palm oil, shea butter, margarine, other fats / oil |__|	|__|

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

8.	Sugar, or sweet: sugar, honey, jam, cakes, candy, cookies, pastries, cakes and other sweet (sugary drinks)	|___|	|___|
9.	Condiments / Spices: tea, coffee / cocoa, salt, garlic, spices, yeast / baking powder, lanwin, tomato / sauce, meat or fish as a condiment, condiments including small amount of milk / tea coffee.	|___|	|___|

Food acquisition codes

1 = Own production (crops, animal)	5 = market (purchase with cash)	9 = gift (food) from family relatives or friends
2 = Fishing / Hunting	6 = market (purchase on credit)	10 = food aid from civil society, NGOs, government, WFP etc.
3 = Gathering	7 = beg for food	
4 = Loan	8 = exchange labor or items for food	

Annexe 2: Livelihood coping strategies master list

Livelihood coping strategies master list ID	Strategy	Category1	Rationale/discussion
1	Sold household assets/goods (radio, furniture, television, jewelry etc.)	Stress	Selling off household assets is equivalent to spending down savings – a sign of stress, or mild food insecurity
2	Spent savings	Stress	Incurring more debt to meet food needs or spending down savings are signs of stress, or mild food insecurity.
3	Sold more animals (non-productive) than usual	Stress	Items indicating reduced ability to deal with future shocks due to current reduction in resources or increase in debts
4	Sent household members to eat elsewhere	Stress	Incurring more debt to meet food needs or spending down savings are signs of stress, or mild food insecurity.
5	Purchased food on credit or borrowed food	Stress	Incurring more debt to meet food needs or spending down savings are signs of stress, or mild food insecurity.
6	Borrowed money	Stress	Incurring more debt to meet food needs or spending down savings

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

7	Move children to less expensive school	Stress	are signs of stress, or mild food insecurity. Used in Malawi, Gambia and other countries as a sign of stress.
8	Sold productive assets or means of transport (sewing machine, wheelbarrow, bicycle, car, etc.)	Crisis	Selling off productive assets is a crisis strategy, or moderate food insecurity.
9	Withdrew children from school	Crisis	This decreases human capital, a productive asset, so is considered a crisis strategy, or moderate food insecurity.
10	Reduced expenses on health (including drugs) and education	Crisis	This decreases human capital, a productive asset, so is considered a crisis strategy, or moderate food insecurity.
11	Harvested immature crops (e.g. green maize)	Crisis	
12	Consumed seed stocks that were to be saved for the next season	Crisis	This action decreases productive assets, affecting next year's harvest, which is a crisis strategy.
13	Decreased expenditures on fertilizer, pesticide, fodder, animal feed, veterinary care, etc.	Crisis	Items that directly reduce future productivity, including human capital formation
14	Sold house or land	Emergency	Items that affect future productivity and are more difficult to reverse, or more dramatic in nature
15	Begged	Emergency	Items that affect future productivity and are more difficult to reverse, or more dramatic in nature, includes loss of human dignity

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

16	Engaged in illegal income activities (theft, prostitution)	Emergency	Items that affect future productivity, but are more difficult to reverse, or more dramatic in nature, includes loss of human dignity
17	Sold last female animals	Emergency	Specific to livestock producers; Items that affect future productivity, and are more difficult to reverse
18	Entire household migrated	Emergency	Items that affect future productivity, but are more difficult to reverse, or more dramatic in nature

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Annexe 3: cross tables with socioeconomic variables et food security variable

Table 10 : Food security and sex of household head (male)					Table 10 : Food security and household's size				
	Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure		Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure
2015	92	84	70	53	2015	5.5	5.3	4.9	5.2
2016	93	83	68	61	2016	8.4	7.6	7.2	6.8
2017	94	84	69	56	2017	9.1	8.1	7.4	7.2
2018	88	80	68	56	2018	8.4	7.6	7	6.2
2019	88	78	64	48	2019	7.9	7.1	6.4	5.8

Table 11: Food security and literacy of household head(%)

	Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure
2015	45	34	25	18
2016	52	36	22	20
2017	57	44	32	22
2018	52	41	32	18
2019	58	38	24	18

Table 12 : Food security and area of residence (%)

		Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure
Year =2015 Pearson chi2(3) = 75.8285 Pr = 0.000	Rural	36	42	18	5
	Urbain	28	42	22	8
Year =2016 Pearson chi2(3) = 28.4020 Pr = 0.000	Rural	31	48	19	1
	Urbain	31	47	19	3
Year =2017 Pearson chi2(3) = 18.9445 Pr = 0.000	Rural	13	54	31	2
	Urbain	14	49	34	3
Year =2018 Pearson chi2(3) = 36.7840 Pr = 0.000	Rural	22	54	22	1
	Urbain	20	54	23	3
Year =2019 Pearson chi2(3) = 50.4792 Pr = 0.000	Rural	18	52	28	3
	Urbain	14	50	32	3

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Table 13 . Food security and quintile of wealth (%)

	Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure		Food secure	Limited Food secure	Moderated Food insecure	Severe Food Insecure
year 2015					year 2016				
quintile 1	19	40	29	11	15	46	35	3	
quintile 2	32	42	20	6	27	50	22	1	
quintile 3	35	48	14	3	29	51	19	2	
quintile 4	45	45	8	1	38	48	11	3	
quintile 5	53	43	4	1	47	43	9	1	
year 2017					year 2018				
quintile 1	5	46	45	4	7	49	39	6	
quintile 2	9	50	38	3	14	55	28	3	
quintile 3	10	53	35	2	19	58	21	2	
quintile 4	18	55	26	2	25	60	14	1	
quintile 5	26	58	14	1	41	49	10	0	

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

year 2019				
quintile 1	5	42	47	6
quintile 2	12	50	34	3
quintile 3	15	54	29	3
quintile 4	20	56	22	2
quintile 5	28	53	18	1

Table 14: Activity of household across food security status (%)

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Breeder	Farmer	Breeder	Farmer	Breeder	Farmer	Breeder	Farmer	Breeder	Farmer
Food secure	80	87	94	79	95	76	93	85	96	82
Limited Food secure	74	86	90	73	94	73	93	71	94	75
Moderated Food insecure	56	82	80	59	88	66	85	48	88	64
Severe Food Insecure	51	81	81	69	76	59	79	35	75	55

Conclusion générale

Cette thèse, réalisée dans un contexte où les avancées notables ont été enregistrées pour ce qui est du consensus autour de l'impact multidimensionnel des changements climatiques sur la survie de l'humanité, apporte sa pierre à la compréhension du phénomène qui reste d'actualité pour la région d'Afrique subsaharienne. Elle combine les questions de portée macroéconomique et à celles de portée microéconomique et est l'une de rares thèses qui allient la macro à la micro ce qui en soit mérite d'être noté. Tout en étant conscient de l'impérieuse nécessité que l'Afrique subsaharienne, à l'instar des autres régions du monde, apporte sa contribution à l'effort d'atténuation et de réduction de ses effets, le présent travail, qui s'est intéressé à trois aspects et de ses conséquences socio-économiques, cherche justement à répondre à la question : quelles sont les conséquences des changements climatiques en Afrique subsaharienne ? Ces aspects portent spécifiquement sur l'impact des changements climatiques sur la croissance par habitant, la recherche de déterminants climatiques probables de l'inflation et le lien avéré entre les changements climatiques et la sécurité alimentaire. Pour chacun des aspects étudiés, les enseignements suivants peuvent être notés.

→ Croissance par habitant et changements climatiques en Afrique subsaharienne de 2000 à 2017

En 2003, Artadi et Sala-i-Marti ont identifié quelques facteurs qui ont contribué à ce qu'ils appellent tragédie économique du 20^e siècle en Afrique. Ils se sont intéressés justement à la croissance par habitant sans toutefois faire allusion explicitement aux changements climatiques. En cela, le présent chapitre est un parfait complément en étudiant comment des variables climatiques (températures, pluviométrie, évapotranspiration) agissent sur la croissance économique. En effet, en Afrique subsaharienne la température agit sur la croissance par son évolution tendancielle et sa variance. En évolution tendancielle, elle affecte positivement la croissance jusqu'à un seuil et devient nuisible par la suite. L'effet positif de la température sur la croissance est avéré pour les pays développés mais son effet négatif est largement évoqué dans les pays en développement. L'effet positif relevé dans cette étude peut provenir du fait que la température considérée dans cette étude, est celle de la période d'activité agricole et donc qui est nécessaire à la croissance végétale mais qui peut être nuisible lorsqu'elle est excessive. L'étude a permis également de confirmer de manière empirique de l'effet

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

négatif de la variance de la température sur la croissance par habitant. La pluviométrie cependant n'impacte la croissance par habitant que par sa variance et ce, négativement. C'est un résultat qui n'a pas encore été évoqué dans la littérature. On note également que, globalement, en Afrique subsaharienne, les zones climatiques en proportion des territoires n'affectent pas la croissance par habitant. La déclinaison de l'analyse par zone géographique montre une nette disparité des effets de variables climatiques sur la croissance par habitant comme évoqué dans la littérature (Gallup, Sachs, & Mellinger, 1999) (Khawar, 2014). Dans la zone sahélienne, c'est plutôt l'indice d'évapotranspiration qui s'est révélé déterminant positif de la croissance par habitant traduisant le caractère multidimensionnel de l'effet du climat dans cette zone. Dans la zone tropicale, la température agit positivement sur la croissance par habitant jusqu'à un seuil et devient nuisible par la suite. Sa variance et celle de la pluviométrie affectent cependant négativement la croissance. L'effet des zones climatiques (d'isohyètes supérieur à 600mm) dans cette zone est positif. Dans la zone équatoriale, seule la température et sa variance agissent de manière statistiquement significative sur la croissance par habitant. La température a un effet négatif significatif alors que sa variance a un effet positif et significatif. C'est la seule zone où l'effet négatif net de la température est observé. Dans la zone australe, ce sont les effets de la pluviométrie

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

et des zones climatiques qui sont avérés. La pluviométrie impacte positivement la croissance alors que sa variance agit négativement sur celle-ci. Plus les zones climatiques intérieures plus arrosées sont importantes, plus la croissance par habitant s'en trouve positivement impactée. Ces résultats montrent que les politiques publiques visant à adresser tant les problèmes économiques que climatiques ne devraient pas être conçues seulement sur la base des études régionales. Elles doivent tenir compte des spécificités de certaines économies. En effet, les politiques d'adaptation aux phénomènes climatiques ne devraient pas être les même dans les zones géographiques. Dans le Sahel, par exemple où les conditions climatiques impactant la croissance par habitant sont multiples, les politiques d'adaptation devraient tenir compte de la multiplicité des conditions pour être plus efficaces. Les autres zones géographiques ont également chacune des spécificités à considérer dans la définition des politiques.

➔ Déterminants climatiques de l'inflation en Afrique Sub-Saharienne entre 2000 et 2018

Cet essai cherche à évaluer l'importance des facteurs climatiques dans la détermination de l'inflation. Il contribue à la littérature sur

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

le ciblage de l'inflation jusque-là circonscrite aux facteurs économiques. Les facteurs climatiques considérés sont la pluviométrie en évolution moyenne et variance ainsi que la température en évolution moyenne et en variance. Il apparaît que la pluviométrie et la température ont un effet statistiquement significatif sur l'inflation : positif par leurs évolutions tendancielle et négatif par leurs variances. La pluviométrie affecte positivement l'inflation par un effet revenu qu'elle procure aux ménages agricoles. Et la température affecte positivement l'inflation par son impact sur la production et donc par un effet d'offre. Ce résultat qui porte sur l'ensemble des pays d'Afrique subsaharienne est contraire à celui des pays pris isolément présenté dans la littérature. Ceci peut s'expliquer par le fait que prise isolément, la masse critique de la population agricole (70% de la population totale) ne s'exprime pas mais lorsque les pays sont rassemblés, cette masse s'exprime mieux. Lorsque les quatre variables climatiques (pluviométrie en moyenne et variance, température en moyenne et variance) sont prises en compte dans l'analyse, ce sont les effets de la composante tendancielle de la pluviométrie et de la température qui apparaissent significatifs. Selon les zones géographiques, il y a une nette disparité. Dans la zone sahélienne, c'est la température qui est la variable climatique qui affecte l'inflation par sa moyenne. Lorsqu'elle augmente, l'inflation augmente aussi. C'est l'effet inflationniste qu'on lui reconnaît dans la littérature. Dans la zone

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

tropicale, les variables climatiques impactent de manière statistiquement significative l'inflation par la température et la pluviométrie à la fois par leurs évolutions tendancielle et par leurs variances. La température agit négativement à la fois par son évolution tendancielle et par sa variance. C'est un résultat contre-intuitif et traduit sans nul doute un effet non linéaire de cette variable climatique. La pluviométrie par contre agit positivement par son évolution tendancielle et négativement par sa variance. Dans la zone équatoriale, les variables climatiques qui agissent de manière significative sur l'inflation sont la pluviométrie par son évolution tendancielle, la température par sa moyenne et sa variance. Lorsque la pluviométrie varie de 1%, l'inflation diminue de 9,2% au seuil de confiance de 5%. C'est un résultat intuitif. Lorsque la moyenne de la température augmente de 1%, l'inflation augmente de 26,1% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Lorsque la variance de température augmente de 1%, l'inflation diminue de 11,2% au seuil de confiance de 10%. Dans la zone australe, La pluviométrie a un effet inflationniste. Lorsqu'elle augmente de 1%, l'inflation augmente de 6% au seuil de confiance de 1% toute chose égale par ailleurs. Comme expliqué précédemment, une bonne pluviométrie est synonyme d'une augmentation de revenus de la population agricole et donc une augmentation des prix des produits non-agricoles par le biais duquel l'inflation s'en trouve impactée. La variance de

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

pluviométrie agit négativement sur l'inflation. Ces résultats montrent qu'en termes de politiques économiques, la gestion de l'inflation devrait désormais tenir compte de l'évolution des variables climatiques. Toutes ces variables agissent et/ou les revenus agricoles. On peut retenir que dans le contexte d'Afrique subsaharienne, une évolution climatique favorable à la production agricole peut contribuer à entretenir l'inflation. Ces résultats montrent que les politiques de ciblage de l'inflation qui sont généralement monétaires ou budgétaires devraient désormais considérer les aléas climatiques comme les facteurs déclencheurs. Elles devraient non seulement être sensibles aux conjonctures climatiques défavorables qui créent des chocs d'offre, mais aussi faire attention à l'évolution pluviométrique favorable qui peut être source d'inflation dans le contexte d'Afrique subsaharienne compte tenu des revenus qu'elle procure à la population agricole majoritaire.

➔ Sécurité alimentaire et changements climatiques dans le sahel : cas du Tchad

Cette étude met en évidence l'effet des facteurs climatiques sur la sécurité alimentaire. Sur la base d'un appariement des données

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

météorologiques avec celles des enquêtes auprès des ménages (entre 8000 à 10000 enquêtés chaque année de 2015 à 2019), une estimation économétrique de cette relation en considérant l'évolution des précipitations et la perception des ménages des chocs climatiques (sécheresse et inondation). Les précipitations sont associées à un statut de sécurité alimentaire plus élevé, car leur coefficient estimé est négatif, ce qui signifie que les ménages sont moins susceptibles d'être en situation d'insécurité alimentaire à mesure que les précipitations augmentent. La sécheresse, d'autre part, est associée à une probabilité plus élevée d'insécurité alimentaire. Cependant, les inondations n'ont pas toujours d'effets significatifs. Vivre dans une zone climatique défavorable (recevant moins de 600 mm de précipitations) expose également à l'insécurité alimentaire. Ces résultats montrent qu'il y a des zones où l'insécurité alimentaire est prévalente et qui doivent recevoir prioritairement l'assistance humanitaire. Au Tchad comme dans les pays du Sahel, les politiques publiques de développement du secteur agricole ou d'assistance à la population vulnérable devraient privilégier les zones identifiées comme favorables à l'insécurité alimentaire pour des impacts directs. L'étude fournit également des éléments qualitatifs d'identification de la population la plus exposée pour des actions ciblées. Les politiques nationales d'atténuation ou d'adaptation à l'insécurité alimentaire aussi doivent être orientées en particulier dans ces zones pour des

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

impacts plus directs. D'autres déterminants ont également montré leur effet sur la sécurité alimentaire dans le contexte tchadien. En ce qui concerne les variables démographiques, les ménages dirigés par des femmes sont les plus exposés à l'insécurité alimentaire. L'alphabétisation des chefs de ménage est également associée négativement à l'insécurité alimentaire (associée positivement à la sécurité alimentaire), car les chefs de ménage les mieux informés sont mieux préparés à faire face aux contraintes agricoles dans les zones rurales et plus susceptibles d'obtenir de meilleurs emplois dans les zones urbaines. Avoir de l'équipement de communication (téléphone, radio, télévision) augmente la probabilité d'être en sécurité alimentaire. Cela peut s'expliquer par le fait que les équipements de communication donnent accès à des informations, y compris des informations relatives aux activités agricoles, y compris celles de la communauté, ainsi qu'aux services de vulgarisation. Le fait d'avoir du matériel de transport ou des biens de valeur augmente également la probabilité d'être en sécurité alimentaire, car ces équipements sont généralement déployés comme mécanisme d'adaptation pour faire face à l'insécurité alimentaire. Le bétail joue un rôle important dans l'état de la sécurité alimentaire. Avoir du bétail est associé à une moins grande insécurité alimentaire (donc plus de sécurité alimentaire).

Chapitre 3: Food security and climate change in Sahel: case of Chad

Cette thèse étant une œuvre humaine n'est pas sans imperfections. Les mécanismes d'actions des facteurs explicatifs d'intérêts sur les sujets étudiés n'ont pas été suffisamment éprouvés empiriquement par manque de variables pertinentes en particulier sur le sujet d'inflation. Ensuite sur les questions macroéconomiques, l'allongement des périodes étudiées permettraient d'estimer des modèles ARDL pour distinguer les effets de court terme de ceux de long terme des variables d'intérêt. Sur la question sur la sécurité alimentaire, d'autres mesures de celle-ci pourraient être considérées en lieu de celles du PAM pour de besoins de comparaison. Les prochaines études qui peuvent s'inscrire dans le cadre de la continuation des présentes études par l'auteur et par d'autres personnes intéressées par les sujets abordés seraient enrichissantes. Ce travail continue de recherche, réalisé parallèlement à une vie professionnelle pleine, est en soit une prouesse. Elle a renforcé mes capacités dans le domaine de recherche sur des questions à la fois macro et micro et mes connaissances sur des sujets qui constituent les nouvelles priorités des institutions de développement tel que le FMI. Je me réjouis d'être ainsi mieux outillé pour être plus productif.