

Extrêmes climatiques et production du maïs dans les zones soudano-sahélienne et soudanienne du Burkina Faso

N'golo David COULIBALY^{1*}
Issouf TRAORE¹, Omer COMBARY²

Résumé

L'évaluation des effets du changement climatique sur l'agriculture a animé le monde de la recherche au cours de la dernière décennie. L'objectif de l'étude est d'évaluer les effets des extrêmes climatiques sur la production du maïs, à Bobo-Dioulasso et à Dédougou, au Burkina Faso. A l'aide des modèles de régression linéaire multiple la production du maïs a été estimée pour chaque localité, en fonction des variables climatiques (précipitations et températures) d'une part et les excès de ces variables d'autre part, sur la période de 1984 à 2018. La Théorie des Valeurs Extrêmes a été utilisée pour la détermination des seuils des variables climatiques, à travers l'approche « Peaks-Over Threshold ». Des simulations ont été faites sur la base des prévisions du modèle MAGICC/SCENGEN du Programme National d'adaptation au changement climatique au Burkina Faso. Les résultats ont montré que les variables précipitations et températures ont un effet positif sur la production du maïs dans les zones d'étude. Toutefois, les cumuls pluviométriques mensuels excédant le seuil de 168 mm, impactent négativement sur la production du maïs à Bobo-Dioulasso. Les Scenarii de diminution des précipitations ou/et d'augmentation des températures du modèle MAGICC/SCENGEN sont très dommageables pour la production du maïs à Bobo-Dioulasso.

Mots-clés : Burkina Faso ; changement climatique ; production du maïs ; seuil de qualité ; théorie des valeurs extrêmes,

Climatic extremes and maize production in the soudano-sahelian and soudanian zones of Burkina Faso

Abstract

Climate is an important factor in crop production. The assessment of the potential effects of climate change on agriculture has led to a research area for the past decade. The objective of the study was to assess the effects of climate extremes on maize production in Bobo-Dioulasso and Dédougou, Burkina Faso. Using multiple linear regression models, maize production was estimated for each locality, as a function of climatic variables (rainfall and temperature) on the one hand and the excesses of these variables on the other, over the period 1984 to 2018. Extreme Value Theory was used to determine the thresholds of the climate variables, through the "Peaks-Over Threshold" approach. Simulations were made based on forecasts from the MAGICC/SCENGEN model of the National Program for Adaptation to Climate Change in Burkina Faso. The results showed that rainfall and temperature variables have a positive effect on maize production in the study areas. However, the rainfalls exceeding the 168 mm threshold have a negative effect on maize production in Bobo-Dioulasso. The scenarios of rainfall decreasing and / or temperatures increasing from the MAGICC / SCENGEN model are very damaging to maize production in Bobo-Dioulasso.

Keywords: Burkina Faso; climate change; maize production; quality threshold; extreme value theory

Introduction

Le changement climatique est maintenant un phénomène sans équivoque (GIEC, 2007 ; GIEC,2013). Ses effets varient d'une région du globe à une autre et cela, du fait de la grande variabilité spatiale du climat et du développement socio-économique. L'Afrique est soumise à un climat fortement variable et cette situation fragilise ses systèmes agricoles qui ne répondent

¹ Institut Universitaire de Formations Initiale et Continue, Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso.

² Unité de Formation et de Recherche en Sciences Economiques et de Gestion, Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso

*Auteur correspondant : Email : ngolocoul003@yahoo.com

plus aux pressions actuelles du climat (YEGBEMEY *et al.*, 2014). MERTZ *et al.* (2010) ont montré que le climat joue entre 30 % et 50% dans les variations de rendement de l'agriculture familiale pluviale. Au Burkina Faso, l'activité agricole occupe 86 % de la population rurale dont les pratiques agricoles demeurent traditionnelles et la production tributaire des conditions climatiques (DIPAMA, 2016). Selon DGPER (2010), une perte de plus de 200 000 tonnes de céréales due aux aléas climatiques a été enregistré en 2009.

Parmi les principales cultures au Burkina Faso, la culture céréalière représente plus de 70 % de la superficie cultivée annuelle (MAAH, 2020). Le maïs fait partie des céréales les plus cultivées dans le monde (FAO, 2008 ; FAO, 2007). Au Burkina Faso, il occupe la troisième place en 2010 parmi les céréales cultivées tant au niveau des superficies et de la production, qu'au niveau de la consommation (EPA/DGPER, 2010) et est la céréale la plus produite en 2018 (MAAH, 2020). Aujourd'hui, le maïs entre dans les habitudes culinaires et devient une matière première pour les brasseries. Il est essentiellement destiné à l'autoconsommation et procure des revenus monétaires variables selon les exploitations (WEY, 1998). Toutefois, la culture du maïs est une activité agricole sensible aux aléas du climat et des conditions météorologiques (SARR *et al.*, 2011).

Les modifications du régime des précipitations sont de plus en plus incertaines. Le modèle MAGICC/SCENGEN prévoit une diminution relativement faible de la pluviométrie, allant de 3,4% en 2025 à 7,3% en 2050 et une hausse de la température annuelle de 0,8°C à l'horizon 2025 et de 1,7°C à l'horizon 2050 (PANA, 2007). La question est de savoir : « Quelle prévision peut être faite en ces différentes périodes, pour la production du maïs au Burkina Faso ? »

Les études effectuées au Burkina Faso traitent de l'identification des risques associés (SARR *et al.*, 2011) au climat et son impact sur le revenu agricole (OUEDRAOGO, 2012), la question des stratégies d'adaptions (DIPAMA, 2016) ou la caractérisation de la variabilité climatique (KABORE *et al.*, 2017). Cependant, à notre connaissance très peu d'évidences scientifiques ont simulés les pertes de productions dues aux extrêmes climatiques.

Les objectifs de la présente étude sont : (i) établir une relation mathématique entre la production du maïs et les variables température et précipitation ; (ii) établir une relation mathématique entre la production du maïs et les excès de ces variables au-delà de leurs seuils de qualité respectifs ; (iii) évaluer l'effet de ces variables sur la production du maïs sur la base des scénarii des changements climatiques.

I. Matériels et méthode

I.1. Zone de l'étude

OUEDRAOGO *et al.* (2010) rapportent que le climat du Burkina Faso appartient au type soudano-sahélien avec trois zones agro climatiques distinctes (Figure 1). La zone soudanienne, située au sud du parallèle 11°30'. Avec une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 900 et 1 200 mm et une saison des pluies de six mois, cette zone a à son sein, la région des Hauts-Bassins (Bobo-Dioulasso). La zone soudano-sahélienne, située entre les parallèles 11°30' et 14°00'N. Elle contient Dédougou et manifeste une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 600 et 900 mm, répartie sur quatre à cinq mois. La zone sahélienne située au nord de 14°00'N, avec une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 300 et 600 mm et concentrée sur trois mois.

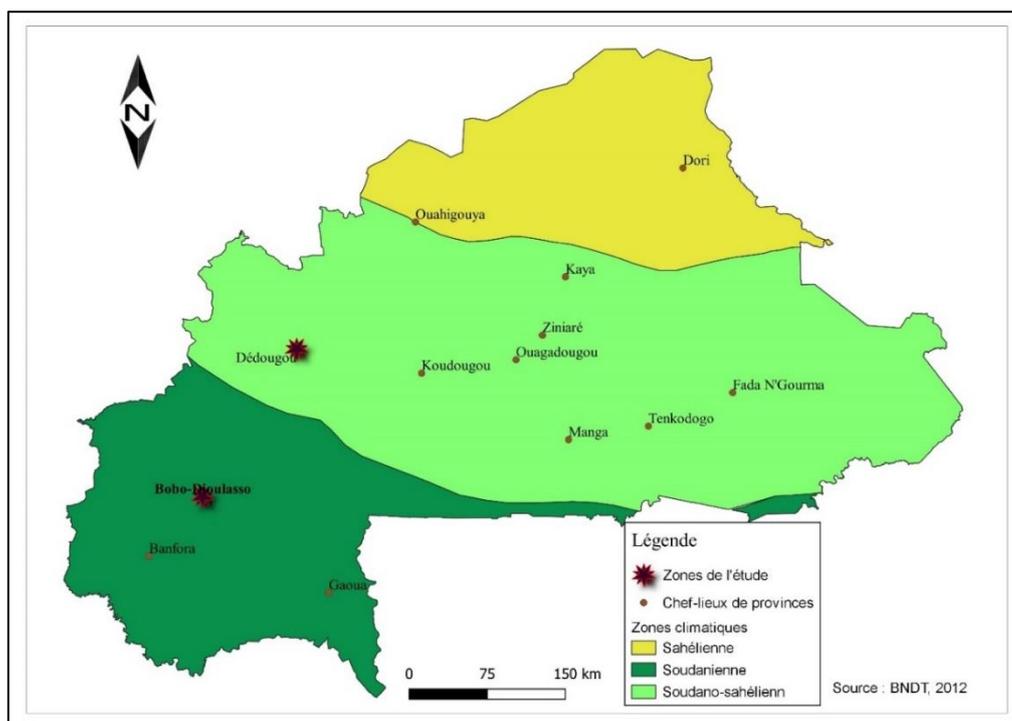


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

I.2. Evolution de la production du maïs à Bobo-Dioulasso et à Dédougou de 1984 à 2018

La production du maïs est plus importante à Bobo-Dioulasso qu'à Dédougou durant notre période d'étude avec une production moyenne respective de 102 957,642 tonnes contre 31 478,7787 tonnes (Figure 2). Globalement, on constate une tendance à la hausse de la production du maïs dans les deux zones durant la période d'étude. Cette hausse est animée par des séances intercalées de baisses, de part et d'autre durant les différentes saisons de la période. Le pic de production le plus important s'observe en 2014 à Bobo-Dioulasso avec une production de 207 271,16 tonnes. A Dédougou, il est de 85 998,13 tonnes et est observé en 2006.

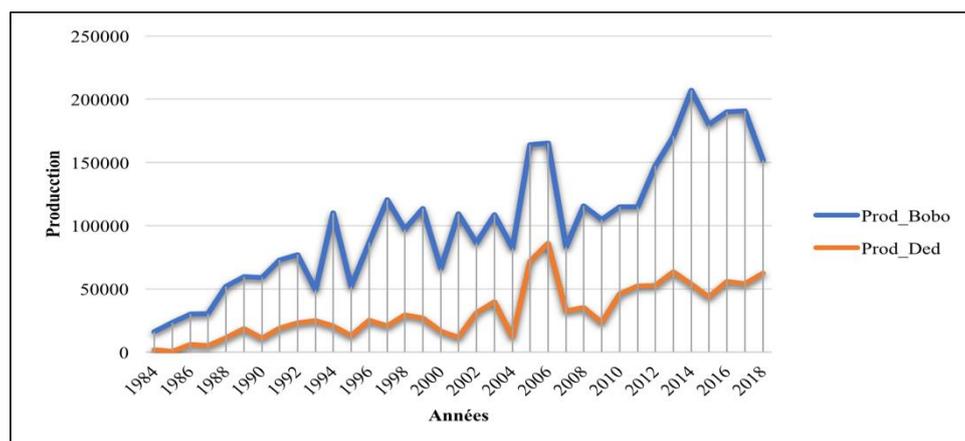


Figure 2 : Evolution de la production du maïs à Bobo-Dioulasso et à Dédougou de 1984-2018

Source : Données DGESS_MAAH (2019)

I.3. Collecte et exploration de données

Les données utilisées dans le cadre de cette recherche sont de type quantitatif et proviennent de deux sources. De l'enquête permanent agricole (EPA) : des statistiques agricoles sur les céréales de 1984-2018 (superficies cultivées et productions) disponibles à la Direction Générale des

Etudes et Statistiques Sectorielles du Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques (DGESS-MAAH). De l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) : des données de température et de précipitation journalières de 1984 à 2018 d'une station météorologique représentative de la zone soudanienne (localisée à Bobo-Dioulasso) et d'une autre de la zone soudano sahélienne (localisée à Dédougou). Pour la manipulation des données, le logiciel R version 3.5.1 a servi à l'analyse des données.

I.4. Analyse de données

Il s'agit, dans la présente étude, d'évaluer la réaction de la culture du maïs face à des excès de températures et de précipitations au-delà de leurs seuils de qualité. Ainsi, pour la détermination du seuil, la théorie des valeurs extrêmes (TVE) a été utilisée à travers l'approche de dépassement de seuil (POT) développée par PICKANDS (1975). Ce dernier l'a assimilé à la loi de Pareto Généralisée (GPD). Pour un seuil assez grand, la loi de probabilité conditionnelle ci-après a été utilisée :

$$P(X > x | X > \mu) = \left[1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma} \right]^{-\frac{1}{\xi}} \quad (1)$$

Avec :

ξ , le paramètre de forme,

μ , le seuil fixe,

σ , le paramètre d'échelle.

Afin d'évaluer l'effet des changements climatiques sur l'agriculture, l'approche par la fonction de production qui, par définition, tente d'estimer directement à travers les modèles de production ou des méthodes statistiques, l'impact des changements climatiques sur la production agricole (ADAMS *et al.*, 1990 ; KAISER *et al.*, 1993 ; REILLY *et al.*, 1994 ; ROSENZWEIG & IGLESIAS, 1994 ; ROSENZWEIG & PARRY, 1994) a été employée. Pour ce faire, la forme fonctionnelle semi-logarithmique a été utilisée dans le cadre de la régression linéaire multiple (CHEBIL *et al.*, 2011). La forme fonctionnelle utilisée est la fonction semi-logarithmique, énoncée comme suit :

$$\log Y = \alpha + \beta X \quad (2)$$

Où :

Y = Production du maïs ;

α = Constante ;

β = Vecteur ligne des coefficients de la régression ;

X = Vecteur colonne des variables.

L'équation (1) n'est valable que lorsque Y est strictement positif (Production > 0).

$$\log Y = \alpha + \beta X \quad \Rightarrow \quad Y = e^{\alpha + \beta X} ; \quad \frac{dY}{dX} = \beta(e^{\alpha + \beta X}) = \beta Y$$

$$\Rightarrow \quad e_{Y,X} = \frac{dY}{dX} \frac{X}{Y} = \beta Y * \frac{X}{Y} = \beta X$$

D'où : $e_{Y,X} = \beta X$

Par ailleurs, le vecteur β s'interprète comme une semi élasticité et mesure une variation relative de Y (production) pour une variation absolue (unitaire) de X (variable explicative).

I.4.1. Spécification du modèle

L'estimation de la variation de la production de la céréale a été faite dans les deux zones de l'étude en fonction des variables climatiques d'une part, et de leurs excès respectifs au-delà d'un seuil de qualité u d'autre part, des mois de mai-juin et d'août-septembre de la saison pluvieuse pour chaque zone. Ce choix se base sur les travaux de SARR *et al.* (2011) quand ils identifiaient les risques climatiques pour la culture du maïs. Aussi les céréales, comme les autres cultures, ont besoin d'eau au cours de tout leur cycle de développement. Toutefois, certaines

périodes sont jugées plus critiques notamment la période de semis (mai-juin) et celle de floraison-remplissage des graines (août-septembre). En effet, un manque d'eau au cours de ces périodes agit considérablement sur le rendement en le diminuant (CHEBIL *et al.*, 2011). Deux modèles seront estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO), dans chaque localité. Par ailleurs, pour capter l'effet de la variabilité climatique, les variables d'interactions conjointes des variables climatiques (températures et précipitations) et de leurs excès respectifs au-delà d'un seuil u , sont générées et intégrées aux modèles.

On a :

$$\log y_t = \varphi(c, plu_{mj}, plu_{as}, temp_{mj}, temp_{as}, sup, tech) \quad (3)$$

$$\log y_t = \psi(plux_{mj}, lux_{as}, tempex_{mj}, tempex_{as}, sup, tech) \quad (4)$$

Avec :

y	=	Production du maïs
plu	=	Pluviométrie
$plux$	=	Excès pluviométriques au-delà du seuil u
$temp$	=	Température
$tempex$	=	Excès de températures au-delà du seuil u
sup	=	Superficie emblavée
$tech$	=	Paquet technologique

Ainsi, les modèles pour les deux localités se présentent comme suit :

Pour les variables climatiques :

$$\log y_t = \alpha_0 + \alpha_1 plu_{mjt} + \alpha_2 plu_{mjt}^2 + \alpha_3 temp_{mjt} + \alpha_4 temp_{mjt}^2 + \alpha_5 plu_{ast} + \alpha_6 plu_{ast}^2 + \alpha_7 temp_{ast} + \alpha_8 temp_{ast}^2 + \alpha_9 plu_{mjt} * temp_{mjt} + \alpha_{10} plu_{ast} * temp_{ast} + \alpha_{11} sup_t + \varepsilon_t ;$$

Pour les excès des variables climatiques au-delà de leurs seuils respectifs, on a :

$$\log y_t = \alpha'_0 + \alpha_{12} lux_{mjt} + \alpha_{13} lux_{mjt}^2 + \alpha_{14} tempex_{mjt} + \alpha_{15} tempex_{mjt}^2 + \alpha_{16} lux_{ast} + \alpha_{17} lux_{ast}^2 + \alpha_{18} lux_{mjt} * tempex_{mjt} + \alpha_{19} lux_{ast} * tempex_{mj} + \alpha_{20} sup_t + \omega_t$$

Avec :

y_t	=	Production du maïs à l'année t ;
plu_{mj}	=	Pluviométrie des mois de mai-juin de l'année t
plu_{as}	=	Pluviométrie des mois d'août-septembre de l'année t
$plux_{mj}$	=	Excès pluviométriques au-delà du seuil u des mois de mai-juin de l'année t ;
$plux_{as}$	=	Excès pluviométriques au-delà du seuil u des mois d'août-septembre de l'année t
$temp_{mj}$	=	Température moyenne des mois de mai-juin de l'année t
$temp_{ast}$	=	Température moyenne des mois d'août-septembre de l'année t
$tempex_{mjt}$	=	Excès des températures au-delà du seuil u des mois de mai-juin de l'année t
sup	=	Superficie emblavée de l'année t
$\varepsilon_t = \omega_t$	=	Termes d'erreur de l'année t

α_i et β_j = Des paramètres de la régression à estimer, avec $i, j = \overline{0; 25}$

I.4.2. Simulation de l'impact du changement climatique sur la production du maïs

La présente simulation se fonde sur les projections faites par le MECV (2007) dans son Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux changements climatiques (PANA). Ces

projections stipulent une augmentation des températures moyennes de 0,8°C à l'horizon 2025 et de 1,7°C à l'horizon 2050 et une diminution relativement faible de la pluviométrie correspondant à -3,4% en 2025 et à -7,3% en 2050 sur l'ensemble du territoire burkinabè. Afin d'évaluer les effets des variables climatiques sur la production du maïs à Bobo et à Dédougou, un calcul de la variation en pourcentage de la production a été obtenu par le modèle, en utilisant les températures moyennes et les cumules pluviométriques de la période d'analyse (Y₀) et celles basées sur les scénarii du modèle MAGICC/SCENGEN à l'horizon 2025 (Y₁) et 2050 (Y₂), selon les coefficients estimés. La formule s'écrit comme suit :

$$\Delta y = \frac{(y_i - y_0)}{y_0} * 100 ; \text{ avec } i = \overline{1; 2}$$

II. Résultats

2.1. Statistiques des variables climatiques selon les zones de l'étude

L'évolution des cumuls annuels des précipitations sur la Figure 3a (à gauche) présente une évolution erratique des précipitations dans les deux (02) localités. Pour mieux appréhender les différentes évolutions, nous avons scindé notre période d'étude en décennies. Ainsi, sur la période 1984-1993, on observe une tendance à la baisse de la pluviométrie à Bobo-Dioulasso. Cette baisse est évaluée à 35,4 mm. A la même période, une hausse de 50,5 mm est observée à Dédougou. La décennie 1994-2003, elle, a enregistré une baisse continue de 102,3 mm à Bobo-Dioulasso, et une baisse de 452 mm à Dédougou. Quant à la période 2004-2013, elle est animée par une tendance à la hausse de la pluviométrie dans les deux localités, avec une hausse de 283,5 mm à Bobo-Dioulasso et de 75,5 mm à Dédougou. Cette disparité pluviométrique est expliquée par la Figure 3b avec une médiane des cumuls mensuels s'élevant à 44 mm à Bobo-Dioulasso et de 21 mm à Dédougou. Ainsi, 50 % des cumuls mensuels de pluies est supérieure à 44 mm à Bobo-Dioulasso, alors que la moitié des cumuls mensuels de pluies est supérieure à 21 mm à Dédougou. (Figure 3b.).

L'observation des températures moyennes annuelles (Figure 3a. à droite) montre une hausse générale sur la période de 1984-2018 dans les deux (02) localités. Cette hausse est plus modérée à Dédougou (0,41°C) qu'à Bobo-Dioulasso (0,53°C). Les valeurs moyennes annuelles des températures sont respectivement de 26,99°C à Bobo-Dioulasso et 28,99°C à Dédougou avec un écart type de 0,43 et de 0,41. Par ailleurs, les températures moyennes mensuelles sont plus dispersées à Dédougou qu'à Bobo-Dioulasso et le 1er quartile faisant 27 °C à Dédougou correspond à la médiane à Bobo-Dioulasso. Cela signifie que 50 % des températures moyennes mensuelles est supérieure à 27 °C à Bobo-Dioulasso, alors que 75 % l'est à Dédougou (Figure 3b.).

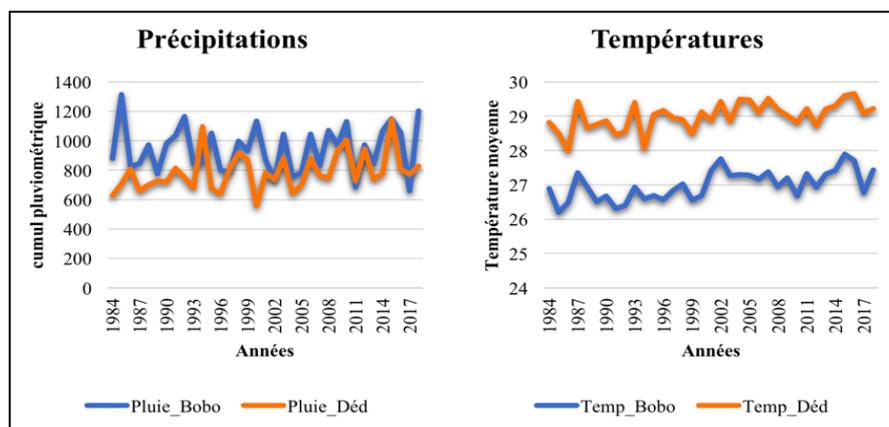


Figure 3a : Evolution des précipitations et des températures annuelles à Bobo-Dioulasso et à Dédougou de 1984 à 2018

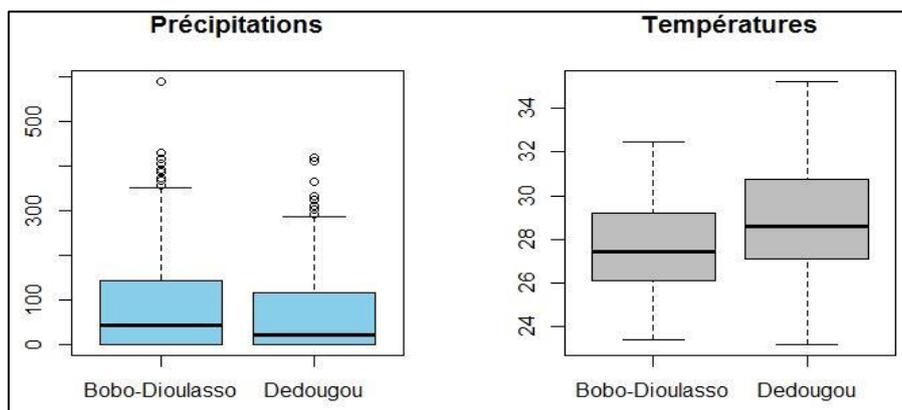


Figure 3b : Boxplot des températures moyennes mensuelles et des cumules de précipitations mensuelles à Bobo-Dioulasso et à Dédougou de 1984 à 20218

Sources : DGESS_MAAH (2019)

2.2. Détection de seuil de qualité « u » par la méthode graphique

Les deux graphiques « Mean Excess Plot » (Meplot) à gauche et « Mean Residual Plot » (Mrlplot) à droite, donnés en Figure 4 pour les variables précipitations à Bobo-Dioulasso, présentent la linéarité sous deux formes différentes et permettent de guider le choix de l'intervalle de seuil optimal.

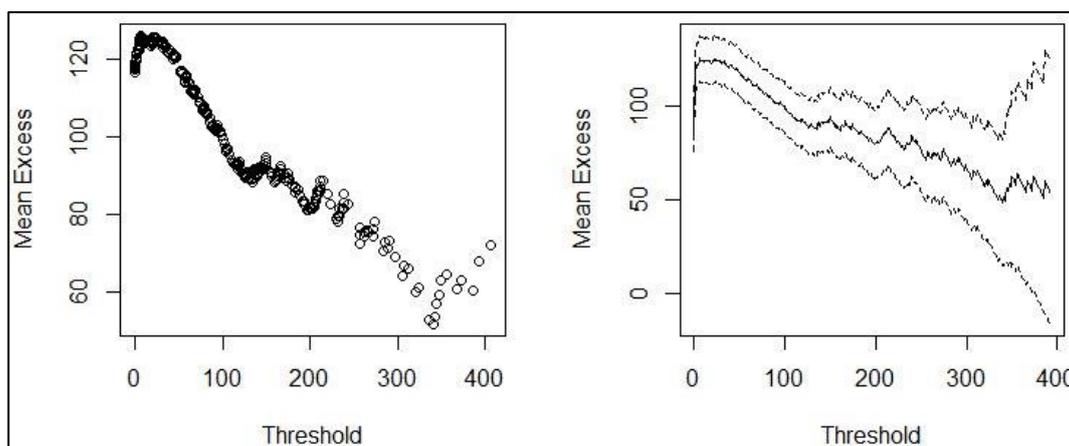


Figure 4 : Fonction moyenne des excès des variables précipitation à Bobo-Dioulasso

Source : DGESS_MAAH (2019)

79

La Figure 4 montre une certaine stabilité linéaire dans l'intervalle [110mm ; 200mm] pour les précipitations à Bobo-Dioulasso. Le seuil de décision, à être pris dans les applications, doit se situer dans ces intervalles pour la présente variable. Le graphe de stabilité des paramètres de forme (à droite) et d'échelle (à gauche) présenté par la Figure 5, a guidé le choix de la restriction de l'intervalle adéquat de seuil en donnant des estimations du paramètre d'échelle et celui de forme. Une stabilité plus forte observée sur l'intervalle [163 mm, 180 mm] sur la Figure 5 a permis de prendre un seuil égal à 168 mm pour les précipitations.

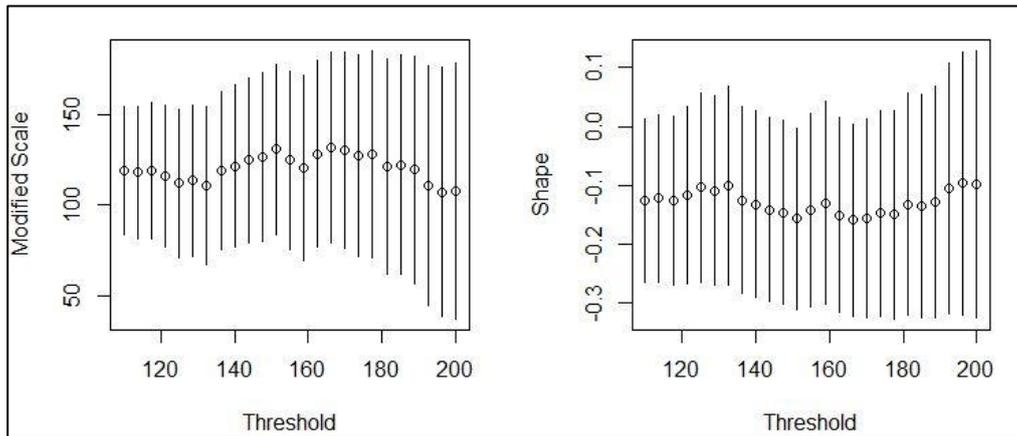


Figure 5 : Stabilité des paramètres de forme et celui d'échelle des variables précipitation à Bobo-Dioulasso

Source : DGESS_MAAH (2019)

De façon analogue, la fonction moyenne des excès des températures a affiché un intervalle de seuil de [25°C ; 27°C]. Le Graphe de stabilité des paramètres de forme et d'échelle ont montré un seuil de 26,7°C. Le résultat de l'estimation des paramètres GPD selon les seuils des variables climatiques à Bobo-Dioulasso (Tableau I) a donné des paramètres GPD significatifs et/ou hautement significatifs pour les variables climatiques étudiées. La proportion des excès est respectivement de 18,8 % pour les précipitations et de 60,95 % pour les températures.

Tableau I : Estimation des paramètres GPD selon les seuils des variables climatiques dans la zone soudanienne (Bobo-Dioulasso)

Variables climatiques	Seuil	Nombre d'excès au-dessus du seuil	Proportion	Paramètres estimés	
				ξ	σ
Précipitations	168	79	0.1881	-0.15789 *	104.82703 **
Températures	26.7	256	0.6095	-0.70056 **	4.06810 **

*significatif à 10 %, ** significatif à 5 %

Source : Données ANAM (2019)

De façon analogue, à Dédougou, le résultat de l'estimation des paramètres GPD ont été significatifs pour l'ensemble des variables (Tableau II). Le nombre des excès sont respectivement de 34 pour les précipitations et de 106 pour les températures, avec un seuil de 217 mm pour les précipitations et 30,7°C pour les températures à Dédougou.

Tableau II : Estimation des paramètres GPD selon les seuils des variables climatiques dans la zone soudano-sahélienne (Dédougou)

Variables climatiques	Seuil	Nombre d'excès au-dessus du seuil	Proportion	Paramètres estimés	
				ξ	σ
Précipitations	217	34	0.0810	-0.42494 **	100.39694 **
Températures	30.7	106	0.2524	-0.72322 **	3.30326 **

*significatif à 10 % ; **significatif à 5 %

Source : Données ANAM (2019)

2.3. Effets des variables climatiques sur la production du maïs

Le Tableau III indique que les coefficients de détermination R^2 sont de 83,15% et 85,82% pour respectivement les localités Bobo-Dioulasso et Dédougou. Le R^2 ajusté est respectivement de 75,09% et 79,04%. Cela traduit que les modèles utilisés expliquent une grande variabilité de la production de ces cultures. La probabilité associée au Fisher est de $1,754^E-06$ pour Bobo-Dioulasso et de $2,729^E-07$ pour Dédougou, toutes inférieures à 5%. Cela implique que la qualité globale de la régression est bonne pour les deux localités. Les valeurs obtenues au test d'auto corrélation des erreurs de Durbin-Watson (D-W) sont respectivement de 2,36 et 1,95 pour Bobo-Dioulasso et Dédougou, avec des probabilités respectives de 0,847 et 0,335 toutes $> 5\%$. Cela indique l'absence de problème d'autocorrélation des erreurs du 1^{er} ordre dans les deux équations. La superficie emblavée du maïs à Bobo-Dioulasso et à Dédougou a un effet positif et statistiquement significatif à 1% pour la production de la céréale.

Les coefficients en relation avec les variables précipitations et températures stipulent que l'effet de ces variables est positif et significatif au seuil de 10 % pour les mois de mai – juin à Bobo-Dioulasso, pour la production du maïs. Ils montrent un effet non significatif à Dédougou. Par ailleurs les coefficients des variables précipitations et températures des mois d'août – septembre, non significatifs à Bobo-Dioulasso, sont significatifs à un seuil d'au moins 5% à Dédougou et y sont positifs. Le coefficient du second ordre de la variable précipitation d'août – septembre à Dédougou et celui de la température de mai – juin à Bobo-Dioulasso, sont négatifs et significatifs respectivement à 1% puis à 10%. Les coefficients d'interaction des variables précipitations et températures sont significatifs à 5% et négatifs durant la période mai-juin à Bobo-Dioulasso et août-septembre à Dédougou.

2.4. Effets des excès des variables climatiques sur la production du maïs

A Bobo-Dioulasso, la variable « excès pluviométrique de mai-juin » ($Plux_{mj}$), a son coefficient négatif et significatif au seuil de 10 %. Cela signifie que les pluies excédant le seuil de 168 mm ont un effet négatif sur la production du maïs à Bobo-Dioulasso. Le coefficient de la variable d'interaction des températures et des précipitations de mai-juin est significatif à 10 %. Son signe positif indique que l'effet combiné d'une hausse de températures et des précipitations au-delà de leur seuil respectif, n'a pas atteint son niveau de nuisance pour la production du maïs à cette période à Bobo. Pour la même localité, les coefficients des « excès pluviométrique d'août-septembre » ($Plux_{as}$) et les « excès de températures au-delà du seuil $u = 26,7\text{ °C}$ de mai-juin » ($Tempex_{mj}$) sont respectivement négatif et positif, mais non significatifs à 10 %. De même, la variable d'interaction des températures de mai-juin et des précipitations d'août-septembre est positif mais non significatif à 10%. Le Tableau IV présente l'essentiel des résultats de l'estimation.

Tableau III : Estimation des effets des variables climatiques sur la production du maïs à

Variables	Dédougou et Bobo-Dioulasso	
	Zone soudanienne (Bobo-Dioulasso)	Zone soudano-sahélienne (Dédougou)
Constante	$-4,724^E+02 *$ (-1,863)	$-4,202^E+02$ (-0,703)
Superficie	$2,929^E-05 ***$ (8,140)	$6,051^E-05 ***$ (4,211)
plu_{mj}	$1,579^E-01 *$ (1,918)	$-4,149^E-02$ (-0,161)
plu_{mj}^2	$2,237^E-06$ (0,139)	$1,242^E-05$ (0,269)

plu_{as}	-3,768 ^{E-02} (-1,095)	2,559 ^{E-01} *** (3,006)
plu_{as}^2	-7,683 ^{E-07} (-0,591)	-2,319 ^{E-05} *** (-3,513)
$temp_{mj}$	1,385 ^{E+01} * (1,964)	-1,669 ^{E+01} (-0,643)
$temp_{mj}^2$	-2,250 ^{E-01} * (-1,848)	2,660 ^{E-01} (0,671)
$temp_{as}$	2,157 ^{E+01} (1,078)	4,699 ^{E+01} * (1,748)
$temp_{as}^2$	-4,298 ^{E-01} (-1,109)	-8,005 ^{E-01} (-1,639)
$plu_{mj} * temp_{mj}$	-5,641 ^{E-03} ** (-2,083)	1,237 ^{E-03} (0,159)
$plu_{as} * temp_{as}$	1,512 ^{E-03} (1,127)	-8,610 ^{E-03} ** (-2,794)
R – squared	0,8315	0,8582
Adjusted R – squared	0,7509	0,7904
F – Fisher	10,83 ***	12,66 ***
D – W	2,36	1,95

*significatif à 10 % ; **significatif à 5 % ; ***significatif à 1 % ; t – student entre parenthèses

Source : Données ANAM & DGESS_MAAH (2019)

A la lumière des résultats d'estimation des excès au-delà des seuils trouvés pour les variables climatiques (précipitations et températures), il ressort que seule la variable « superficie » influence significativement ou non significativement ? la production du maïs, en présence des excès au-delà des différents seuils, à Dédougou.

Tableau IV : Estimation des effets des variables climatiques au-delà des seuils de qualité respectifs sur la production du maïs à Dédougou et à Bobo-Dioulasso

Variables	Zone soudanienne (Bobo-Dioulasso)	Zone soudano-sahélienne (Dédougou)
Constante	-2,168 ^{E+02} (-1,138)	2,669 ^{E+00} (0,425)
Superficie	2,121 ^{E-05} *** (10,209)	8,357 ^{E-05} *** (7,442)
$plux_{mj}$	-6,659 ^{E-02} * (-2,008)	-
$plux_{mj}^2$	3,376 ^{E-05} *** (4,559)	-
$plux_{as}$	-3,114 ^{E-03} (-0,177)	2,720 ^{E-02} (1,007)
$plux_{as}^2$	-1,246 ^{E-07} (-0,085)	-1,142 ^{E-06} (-0,516)
$tempex_{mj}$	1,601 ^{E+01} (1,200)	1,609 ^{E-01} (0,505)
$tempex_{mj}^2$	-2,822 ^{E-01} (-1,209)	3,447 ^{E-04} (0,069)
$plux_{mj} * tempex_{mj}$	2,030 ^{E-03} * (1,800)	-
$plux_{as} * tempex_{mj}$	1,236 ^{E-04} (0,202)	-8,043 ^{E-04} (-0,964)
R – squared	0,8513	0,7503
Adjusted R – squared	0,7977	0,6967
F – Fisher	15,9 ***	14,02 ***
D – W	1,74	1,53

*significatif à 10 % ; **significatif à 5 % ; ***significatif à 1 % ; t – student entre parenthèses

Source : Données ANAM & DGESS_MAAH (2019)

2.5. Impacts du changement climatique sur la production du maïs

Les résultats de la variation en pourcentage de la production du maïs par localité sont illustrés dans le Tableau V.

Tableau V : Variations de la production du maïs selon les projections du modèle MAGICC/SCENGEN à l'horizon 2025 et 2050

Localité	Horizon	Variation de la production du maïs
Zone soudanienne (Bobo-Dioulasso)	2025	-7,96%
	2050	-24,85%
Zone soudano-sahélienne (Dédougou)	2025	+0,50%
	2050	-4,73%

Source : Données MAGICC/SCENGEN (PANA 2007)

En 2050, des pertes s'annoncent pour les deux zones de l'étude, dans la production du maïs de l'ordre de 24,85 % et 4,73 % respectivement pour Bobo et Dédougou. A partir des pertes observées en pourcentage, les pertes physiques réelles pour la localité et les pertes économiques correspondantes en tenant compte des prix actuellement établis pour la céréale par la SONAGESS (137,5 FCFA le Kg à Bobo-Dioulasso et 155 FCFA/Kg à Dédougou) ont été calculées. En 2050, Bobo-Dioulasso subira la plus forte perte estimée à 37736,95 tonnes avec une perte monétaire de l'ordre de 5188, 830 millions de Francs CFA. A Dédougou, la perte observée en 2050 est estimée à 2959,06 tonnes. La perte monétaire prévue est de l'ordre de 458, 655 millions, *ceterus paribus*.

III. Discussion

3.1 Détection graphique du seuil de qualité « u »

La détection graphique du seuil affiche des seuils respectifs de 168 mm et 26, 7 °C pour les cumuls pluviométriques mensuels et températures moyennes mensuelles à Bobo-Dioulasso et 217 mm et 30,7 °C à Dédougou. Selon BARRY (2007) les besoins totaux en eau du maïs varient entre 415 mm dans la zone soudanienne et 544 mm dans la zone sahélienne. SARR et al. (2011) ont montré que le cumul pluviométrique annuel est toujours ≥ 620 mm en zone soudano sahélienne et peut même atteindre des valeurs de plus de 900 mm en zone soudanienne, dans leur analyse du cumul pluviométrique annuel de la série 1979-2008. Ils ont indiqué que l'engorgement du maïs consécutif à des pluies importantes constitue, en zone soudanienne, un risque majeur pour la culture du maïs. Toutefois, POSS et al. (1998) ont démontré que si les besoins en eau à la floraison du maïs sont satisfaits à moins de 60%, les rendements deviennent très faibles, quelles que soient les conditions hydriques sur le reste du cycle. Pour SARR et al (2011), ce sont les excès d'eau, ou les excès d'eau conjugués à des déficits hydriques qui contribuent à réduire fortement la productivité du maïs dans la zone soudanienne ; tandis qu'en zone soudano-sahélienne, les risques agro climatiques du maïs sont principalement dus à l'apparition de périodes de déficits hydriques.

Le choix graphique des différents seuils s'est fondé sur la méthode GPD à travers des graphes de la fonction moyenne des excès et de stabilité des paramètres. Ceci est conforme l'approche utilisée par DIAMOUTENE (2018) sur la modélisation des extrêmes pour la gestion des risques d'accidents dans l'aéronautique dans l'évaluation de la contribution de la Théorie des Valeurs Extrêmes à la gestion et à la santé des systèmes. Toutefois, BERMUDEZ et KOTZ (2010) ont indiqué que le succès de GPD sur une base de données dépendait substantiellement du processus d'estimation des paramètres. FAR et WAHAB (2016), ont proposé une approche appelée méthode hybride permettant de spécifier la valeur de seuil adéquat pour le modèle POT tandis que ZHANG *et al.* (2015) se sont intéressés à la méthode POT en travaillant sur la quantification des incertitudes statistiques.

3.2 Effets des variables climatiques et de leurs excès au-delà des seuils de qualité sur la production du maïs

La production du maïs augmente à travers l'extension de la superficie dans les deux localités. Ces résultats sur les superficies confirment que la production de maïs est extensive dans ces zones du Burkina Faso. L'augmentation de la température et des précipitations des mois de mai – juin influencent positivement la production du maïs à Bobo-Dioulasso et une hausse de la température et des précipitations d'août-septembre est bénéfique pour la production de maïs à Dédougou. Cela corrobore le résultat trouvé par CHEBIL *et al.* (2011) quand ils analysaient l'impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie). Aussi, le même comportement a été observé pour les variables précipitations, dans les études menées par YAI *et al.* (2013) sur l'incidence des variables climatiques sur la

production agricole du coton, du maïs du sorgho et de l'arachide dans la commune de Banikoara, au Bénin. Les effets de la température et de la précipitation sur la production du maïs sont non linéaires. La production du maïs est une fonction concave des variables précipitations et températures pour les différentes périodes indiquées. L'effet non linéaire des précipitations sur la production du maïs a été révélé par CHEBIL *et al.* (2011). Il existe alors un seuil au-delà duquel, les variables précipitation et température auront un effet non bénéfique pour la production de la céréale en ces différentes périodes pour les localités respectives. Par ailleurs, une augmentation conjointe de la température et des précipitations durant la même période (mai-juin ou août-septembre) a un effet néfaste pour la production du maïs dans les différentes localités. Pour CHEBIL *et al.* (2011), cette situation est favorable à l'apparition des maladies des plantes dans les localités respectives et par conséquent, entraînerait une diminution de la production de la céréale.

3.3 Impacts du changement climatique sur la production du maïs

De la simulation de la variation de la production du maïs selon les projections du modèle MAGICC/SCENGEN à l'horizon 2025 et 2050, il ressort que les conséquences pourraient être plus lourdes à Bobo-Dioulasso avec une perte de la production du maïs de l'ordre de 24,85%. La localité affiche ainsi une grande vulnérabilité face aux changements climatiques, *ceterus paribus*. Cela témoigne d'une faible capacité d'adaptation de la zone soudano-sahélienne. Cela pourrait s'expliquer par un faible octroi du crédit agricole qui joue un rôle indéniable dans la décision d'adaptation du producteur au changement climatique (MADDISON, 2007 ; DERESSA *et al.*, 2009 ; BELOW *et al.* 2012). D'ailleurs, MADDISON (2007), MERTZ *et al.* (2009) ont révélé que les populations se sont rendues compte de la variabilité du climat et ont identifié le vent, le manque et l'excès de précipitations comme les facteurs les plus perceptibles.

Conclusion

Les estimations des modèles semi-logarithmiques ont montré que l'effet de la variation des températures et des précipitations sur la production du maïs dans les zones d'études, varie selon les périodes considérées. Cependant, une augmentation de la précipitation et de la température, au cours de la même période, affecte négativement les productions dans les deux localités en fonction des périodes considérées. Par ailleurs, il ressort de l'estimation de l'effet des excès, que les pluies de mai-juin excédant le seuil de 168 mm, ont un effet négatif sur la production du maïs à Bobo-Dioulasso. Aussi, l'effet combiné d'une hausse de températures et des précipitations de mai-juin, au-delà de leur seuil respectif, n'est plus à son niveau de nuisance pour la production du maïs à cette période à Bobo-Dioulasso. Les résultats de la simulation de l'impact des projections des changements climatiques, selon les scénarios du modèle MAGICC/SCENGEN à l'horizon de 2050, montrent un effet de perte de production plus fort à Bobo-Dioulasso de l'ordre de 24,85 %, *toutes choses restant égale par ailleurs*. Ces résultats annoncent une crise dans la production nationale du maïs compte tenu de la contribution de la zone soudanienne dans la production céréalière, si aucune incitation à la décision d'adaptation au changement climatique n'est faite. Cela pourrait jouer négativement sur la sécurité alimentaire au regard de l'importance de la céréale dans les habitudes alimentaires de notre pays. Les effets négatifs des variables climatiques peuvent être réduits par la prise de certaines mesures d'adaptation sur le secteur agricole. Les futures études devraient élargir le sujet à d'autres céréales, intégrer des variables climatiques supplémentaires (jours d'ensoleillement, vitesse du vent, humidité, etc.), les technologies et les techniques culturales (part des semences certifiées, indices de mécanisations etc.), et tenir compte des extrêmes dans toutes les évaluations de l'impact des changements climatiques.

Références bibliographiques

ADAMS, R., ROSENWEIG, C., PEARL, R., RITCHIE, J., MC, C. B., GLYER, D., ALLEN, H. (1990). Global Climate Change and U.S Agriculture. *Nature*, 345, 219-223.

BARRY, D. (2007). Contribution à la détermination des besoins en eau des principales cultures irriguées selon les zones agroclimatiques du Burkina Faso. *Mémoire de fin d'études d'Ingénieur en Agrométéorologie*. Niamey: Centre Régional Agrhymet, P.56.

BELOW, T. B., MUTABAZI, K. D., KIRSCHKE, D., FRANKE, C., SIEBER, S., SIEBERT, R., & TSCHERNING, K. (2012). Can farmers' adaptation to climate change be explained by socio-economic household-level variables? *Global Environmental Change* 22 :, 223-5.

BERMUDEZ, Z., & KOTZ, S. (2010). Parameter estimation of the generalized pareto, part II. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140:1374–1388.

CHEBIL, A., MTIMET, N., & TIZAOU, H. (2011). Impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie). *AfJARE Vol 6 No 2*, 144-154.

DERESSA, T., HASSAN, R., RINGLER, C., ALEMU, T., & YESUF, M. (2009). Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change* 19 :, 248-255.

DGPER. (2010). *Analyse de la Compétitivité des Filières de Céréales Sèches au Burkina Faso*. Ouagadougou: MAHRH.

DIAMOUTENE, A. (2018, Novembre 26). Contribution de la Théorie des Valeurs Extrêmes à la gestion et à la santé des systèmes. *Thèse de Doctorat*. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse; Cotutelle internationale : Université Ouag 1, Professeur Joseph Ki-Zerbo.

DIPAMA, J.-M. (2016). Changement climatique et agriculture durable au Burkina Faso: stratégies d'adaptations basées sur les savoirs locaux. *Innovation Environnement Développement*, 17-21.

FAR, S., & WAHAB, A. (2016). Evaluation of peaks over threshold method. *Ocean Science*.

GIEC. (2013). *Changements climatiques en 2013, Les éléments scientifiques, résumé à l'intention des décideurs*. service d'appui technique du groupe de travail I GTI.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds.): Cambridge University Press: Cambridge, UK.

KABORE, P. N., OUEDRAOGO, A., SANON, M., YAKA, P., & SOME, L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie, vol. 14*, 82-92.

KAISER, H. M., RIHA, S., WILKS, D., ROSSITER, D., & SAMPATH, R. (1993). A farm-level analysis of economic and agronomic impacts of gradual warming. *American Journal of Agricultural Economics*, 75, 387-398.

MAAH (Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-Agricoles) Direction Générale des Etudes et des statistiques sectorielles. (2020). *Annuaire des statistiques agricoles 2018. Version définitive*. Ouagadougou: DGESS.

- MADDISON, D. (2007). *The perception and adaptation to climate change in Africa. Policy Research Working Paper WPS4308*. Washington (DC): The World Bank, Development Research Group, Sustainable Rural and Urban Development Team;.
- MERTZ, O., MBOW, C., NIELSEN, J., MAÏGA, A., DIALLO, D., REENBERG, A., . . . D, D. (2010). Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecologie and Society*, 15.
- OUEDRAOGO, M. (2012). Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso. *Journal of Agriculture and Environment for International Development - JAEID*, 3-21.
- PANA. (2007). *Programme d'Action National d'Adaptation à la Variabilité et aux Changements Climatiques*. Ouagadougou: Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le Développement Durable, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- PICKANDS, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics. *Annals of Statistics* 3, 119-131.
- POSS, R., SARAGONI, H., & IMBERNON, J. (1998). Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. *Agr. Trop.*, 43(1): , 18-29.
- REILLY, J., HOHMANN, N., & KANE, S. (1994). Climate change and agricultural trade: who benefits, who loses? *Global Envir. Change* 4, 24-36.
- ROSENZWEIG, C., & IGLESIAS, A. (1994.). Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study. *US Environmental Protection Agency. EPA 230- B-94-003*. Washington DC.
- ROSENZWEIG, C., & PARRY, M. L. (1994). Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 367, 133-138.
- SARR, B., KAFANDO, L., & ATTA, S. (2011, August). Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chimical Sciences* 5(4): , 1659-1675.
- YEGBEMEY, R. N., YABI, J. A., AÏHOUNTON, G. B., & PARAÏSO, A. (2014). Modélisation simultanée de la perception cas des producteurs de maïs du Nord Béninet de l'adaptation au changement climatique :. *Cah Agric*, 23, 177-187.
- ZHANG, Y., CAO, Y., & DAI, J. (2015). Quantification of statistical uncertainties. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(5):717–726.