



Cartographie de l'impact des Changements Climatiques sur les zones actuelles et futures de production du sorgho (*Sorghum bicolor*) au Mali

Lassana Traoré^{1*}, Yaya Issifou Moumouni², Ibouaïma Balogoum⁵, Faki Chabi¹, Orou Daouda Bello⁴, , Ibouaïma Yabi³, Essehou Léonard Ahoton⁴, Aliou Saïdou¹

⁽¹⁾ Rural Polytechnic Institute for Training and Applied Research of Katibougou. Department of Water & Forests and Rural Engineering. BP 06 Katibougou (Mali)

⁽²⁾Laboratoire de Cartographie (LaCarto)/Institut de Géographie de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (IGATE)/ Université d'Abomey-calavi (UAC), Bénin

⁽³⁾University of Abomey-Calavi. Faculty of Human and Social Sciences (FASHS). Department of Geography and Land Management. Pierre PAGNEY Laboratory "Climate, Water, Ecosystem and Development". BP 526 RP Cotonou (Benin)

⁽⁴⁾University of Abomey-Calavi. Faculty of Agricultural Sciences. School of Plant Production Sciences and Technicals. Plant Biology Laboratory. BP 526 RP Cotonou (Benin)

⁽⁵⁾National University of Agriculture. School of Management and Plant and Seed Production Ecole. BP 43 Kétou (Benin)

⁽⁶⁾ University of Abomey-Calavi. Faculty of Agricultural Sciences. School of Plant Production Sciences and Technicals. Soil Science Laboratory. Research Unit on Sustainable Soil and Crop Management (ISCM). 04 BP 1510 Cadjèhoun Cotonou (Bénin).

⁽²⁾Rural Polytechnic Institute for Training and Applied Research of Katibougou. Laboratory of Agro-Physio-Genetics and Plant Biotechnology. BP 06 Katibougou (Mali)

Résumé : Le changement climatique impacte les productions agricoles en Afrique de l'Ouest depuis déjà une vingtaine d'années. Si de nombreux travaux prévoient une baisse des rendements agricoles de 10 à 15 % en 2050 dans ces régions du fait de l'élévation des températures, aucune ne s'intéressait jusqu'alors à la situation des aires de production du Sorgho. L'objectif de la présente recherche est d'évaluer l'effet du changement climatique sur les zones de production sorgho à l'horizon 2050 au Mali en considérant trois scénarios climatiques : le scénario actuel (RCP 2.5), le scénario optimiste (RCP 4.5) et le scénario pessimiste (RCP 8.5). En effet, 11 674 points d'occurrence du sorgho (*Sorghum bicolor*) ont été collectés et associés aux variables environnementales des trois scénarii climatiques selon l'approche de l'entropie maximale (Maxent). Le test de Jackknife a été réalisé pour déterminer l'importance des variables environnementales individuelles utilisées. La statistique d'Area Under the Curve (AUC) a été utilisée pour apprécier la performance du modèle de même que True Skill Statistique (TSS). Dans les conditions climatiques actuelles, les zones Très peu favorables à la culture du sorgho représentent 61% de la superficie du Mali. Les aires de culture du sorgho peu favorable occupent 6%, tandis que les aires favorables et très favorables occupent respectivement 14% et 19% de la superficie du Mali. En considérant le scénario optimiste (RCP4.5), on observe une augmentation des aires très favorables qui occupent les 27% de la superficie totale du Mali, les aires favorables occupent 9%, environs 59% seront occupés par des aires de culture très peu favorable et alors que les aires peu favorable représentent 5%. Dans le contexte d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP 8.5), on constate que 10% de la superficie du Mali seront très favorable à la culture du sorgho d'ici 2050. Par contre, on note une augmentation de 25% des surfaces favorables,

une légère augmentation de 7% des aires peu favorable et de 58% des aires très peu favorable à la culture du sorgho au Mali. Ce travail est une contribution à la recherche de stratégies d'adaptation et de résilience des agriculteurs au changement climatique.

Keywords: Mali, Modeling, Maxent Model, Sorghum bicolor, Climatic Scenarios.

I. Introduction

Les changements climatiques constituent actuellement, l'un des principaux dangers qui menacent la biodiversité (GIEC, 2013 ; Fandohan et al., 2013). Cette menace sur les espèces ou leurs habitats, constitue un élément central des stratégies d'adaptation (Heller et al., 2009 ; Fandohan et al., 2013). Il est de plus en plus probable que les fluctuations des variables climatiques telles les précipitations et la température auront une incidence sur la diversité biologique et sur la répartition géographique des habitats favorables aux espèces IPCC (2007). L'impact des changements climatiques sur la végétation a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques (Hughès et al., 200 ; Tchétangni et al., 2016) et demeure une préoccupation centrale des gestionnaires des ressources végétales. En Afrique, la question de l'impact des changements climatiques sur la biodiversité est d'autant plus inquiétante que d'après les projections, 20 à 30 % des espèces végétales et animales feront face à un plus grand risque d'extinction si le réchauffement global excède 1,5°C à 2,5°C (IPCC, 2007 ; Busby et al., 2010). De même, il a été mentionné que 25 à 42 % des espèces végétales pourraient être menacées d'extinction du fait d'une perte de 81 à 97 % des habitats favorables d'ici 2085 (M. Boko et al., Africa. In M.L Parry. et al., eds. Climate change 2007) Face à de telles menaces annoncées, la végétation ligneuse fourragère des parcours naturels présenterait une vulnérabilité accrue du fait des fortes pressions auxquelles elle est déjà soumise. En effet, dans plusieurs régions africaines, cette végétation subit actuellement une régression généralisée sous l'effet de la baisse constante des précipitations depuis les années soixante, de l'extension des surfaces cultivées, des systèmes d'élevage entraînant souvent la surexploitation de cette ressource et d'une demande urbaine en bois en augmentation rapide (J. Onana et J.-L. Devineau ; Zakari et al. 2017). Le sorgho n'échappe guère à cette situation ; en effet, il est l'une des céréales les plus cultivées au monde en raison de sa forte implication dans l'alimentation humaine et animale. Au Mali, le sorgho est cultivé du sud au nord (Soumare, 2004) du pays avec plus de 1700 écotypes identifiés lors des enquêtes (Toure & Diallo, 2004) et 70% de ces écotypes identifiés appartiennent à la race guinéenne (Toure, 2016 ; Traore et al., 2021). La superficie allouée à la culture du sorgho est d'environ 3,34% et c'est un produit important pour l'alimentation de base de la population. Cependant, cette production est menacée par la perte importante de la diversité variétale ces dernières années en raison du changement climatique et de ses effets tels que les sécheresses récurrentes et irrégulières, les déficits pluviométriques, les épisodes de fortes pluies, les inondations dévastatrices, etc. (Traore et al., 2013 ; Ouattara et al., 2019, Traore et al. ; 2021). Les modèles de simulation ont été largement utilisés pour prédire le comportement ou la performance des cultures dans différentes conditions environnementales (augmentation des températures, diminution des précipitations, etc.) (Soufianou et al., 2019).

La Modélisation de la Distribution des Espèces (SDM pour Species Distribution Modeling) représente un outil important de prédiction en écologie de la conservation (Guisan & Zimmermann, 2000 ; Fleishman et al., 2001 ; Scott et al., 2002 ; Phillips et al., 2006 ; Austin, 2007 ; Franklin, 2009 ; Peterson et al., 2012 ; Padalia et al., 2014 ; Moukrim et al., 2018 ; Soufianou et al., 2019). Elle consiste à construire une fonction de paramètres environnementaux qui prédit la probabilité de présence de l'espèce. Le jeu de données utilisé comprend des données de présence actuelle de l'espèce et des valeurs de certains paramètres, essentiellement environnementaux, aux sites d'observation de l'espèce (Elith et al., 2006 ; Phillips et al., 2006 ; Sampaou & Badeau, 2009 ; Moukrim et al., 2018). Plusieurs méthodes pour modéliser la distribution des espèces ont été développées et utilisées (Phillips et al., 2006). Ces méthodes diffèrent suivant le type de réponse qu'elles prennent en compte, la manière de pondérer les observations et d'incorporer les interactions, et suivant leur capacité de prédiction (Elith et al., 2006 ; Elith & Leathwick, 2009 ; Moukrim et al., 2018).

Aujourd'hui, les modèles de distribution d'espèces sont de plus en plus utilisés pour répondre aux problématiques majeures que sont la compréhension, la description et la prédiction de l'aire potentielle d'une espèce, et l'identification des facteurs qui déterminent sa distribution (Kumar & Stohlgren, 2009; Moukrim et al., 2018). Ils représentent de ce fait, un outil pertinent pour la gestion et la conservation de l'environnement et de la biodiversité (Guisan & Zimmermann, 2000 ; Barbosa et al., 2009). De même, l'ajustement des pratiques agricoles en tant que stratégies d'adaptation aux effets du changement climatique peut être réalisé à l'aide de la modélisation (Lobell & Field, 2007; Sinclair et al., 2014). Malgré les progrès de l'agriculture africaine de nos jours, l'utilisation des modèles climatiques pour la planification des activités agricoles est encore en développement au Mali. Les résultats des études de modélisation dans le domaine climatique, même s'ils révèlent parfois des controverses (Sultan & Gaetani, 2016), sont d'une grande importance compte tenu de l'impact significatif que le changement climatique aura sur la sécurité alimentaire dans le futur (Wheeler & von Braun, 2013). L'objectif de la présente étude était donc d'évaluer l'impact de la variabilité climatique selon différents scénarios climatiques sur les aires propices à la production de sorgho dans les régions du Mali. Nous sommes partis de l'hypothèse qu'une variation des conditions environnementales et climatiques conduirait à une diminution significative de la zone propice à la culture du sorgho à court et à long terme (Traoré et al., 2021). La modélisation de la distribution géographique de cette espèce est basée sur le principe d'Entropie Maximale "MaxEnt" (Phillips et al., 2006).

II. Zone d'étude

Le secteur est la république du Mali (Figure 1) où règne un climat de type tropical sec. Le territoire est subdivisé en quatre types de climat : un climat saharien (désertique) au Nord (pluviométrie annuelle < 200 mm), sahélien au centre (pluviométrie annuelle comprise entre 200 mm et 600 mm), soudanien (pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1000 mm) et soudano-guinéenne au sud (pluviométrie > 1000 mm). Les températures sont élevées, la moyenne maximale sous abri varie entre 34 et 37°C et la minimale entre 21 et 23°C ; l'humidité relative maximale oscille entre 31 et 75 % et la minimale entre 11 et 38 % ; l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle qui exprime la demande évaporative du climat varie entre 1.534 et 2.003 mm contre en moyenne moins de 100 à plus de 1.000 mm de pluies ; l'ensoleillement mensuel moyen varie de 284,7 à 322,0 heures (Pana, 2007). Les 4 zones climatiques correspondent également à 4 zones écologiques principales avec un potentiel agricole assez diversifié ; plus le Delta intérieur du Niger : la zone saharienne 632 000 km² : soit 51% du territoire national. Elle correspond à la partie septentrionale du Mali, la zone sahélienne couvre une superficie de 285 000 km² soit 23% du territoire. Elle comprend deux sous zones qui sont : la zone sahélo saharienne au Nord et la zone sahélo soudanienne au sud. La zone soudanienne couvre 215 000 km² soit 17,5% du territoire. Zone agricole par excellence, elle constitue de plus en plus à une zone de transhumance et de refuge avec une tendance à la sédentarisation des éleveurs et des troupeaux. La pluviométrie répartie sur cinq mois varie de 600 mm au Nord contre plus de 800 mm au sud. La zone soudano guinéenne à l'extrême sud du pays ne couvre que 75 000 km² soit 6% du territoire. Zone onchocerquienne jusqu'à un passé récent, elle est d'une manière générale encore relativement peu exploitée. La saison des pluies s'étale sur une période de 6 mois et les hauteurs varient de 800 à plus de 1000 mm par an. Le Delta Intérieur du Niger et la région lacustre constituent une entité écologique spécifique en tant que région humide à cheval sur les zones soudanienne et sahélienne (Pana, 2007). Elle s'étend sur plus de 30.000 à 35.000 km² et se prolonge par une bande le long du fleuve Niger où l'on pratique des cultures de décrue. Le Mali connaît l'alternance de deux saisons : Une saison sèche dont la durée varie de neuf (9) mois au Nord (octobre à juin) à six (6) mois au Sud (novembre à avril), Et une saison humide ou hivernage, mai à octobre au Sud, de juillet à septembre au Nord avec des intersaisons plus ou moins marquées correspondant à des mois « ni pluvieux, ni secs ». Les pluies liées aux lignes de grains sont particulièrement importantes aux latitudes sahéliennes. Le régime de mousson est le facteur dominant de la saison des pluies. Le climat est marqué par une pluviométrie annuelle décroissante du Sud au Nord (de plus de 1100 mm à moins de 100 mm) pour la période 1971-2000 (Pana, 2007). Les coordonnées géographiques

(longitude et latitude) en degrés décimaux de l'aire de répartition du Sorghum bicolor ont été collectées dans les régions phytogéographiques du Mali en 2019 et en Afrique de l'Ouest (disponibles sur le site du GBIF).

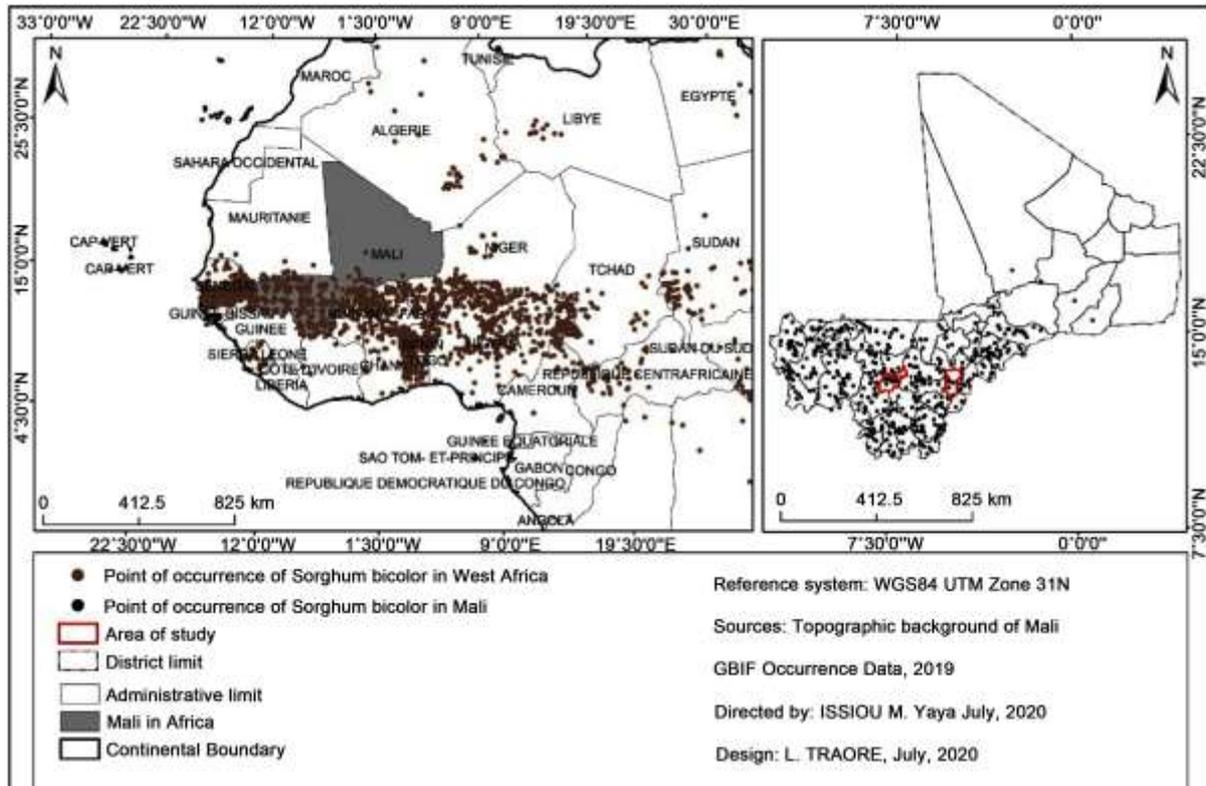


Figure 1 : Localisation des données d'occurrence utilisées. Source (Traore et al., 2021)

III. Matériel et méthodes

3.1 Données d'occurrence

Environ 1674 points de présence ont été collectés sur le terrain en 2021. De plus, plus de 10 000 points d'occurrence complémentaires ont été téléchargés sur le site de GBIF (Global Biodiversity Information Facility) (<http://www.gbif.org/occurrence/download>) à l'aide du plugin *GBIF occurrences* dans le logiciel QGIS 3.20 à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest. Au total, 11674 points d'occurrence ont été collectés et utilisés pour chaque spéculation. Notons que 20 % des données ont été utilisés pour tester le modèle.

3.2 Variables environnementales utilisées et modèles de simulation

Les données climatiques actuelles sont dérivées des données climatiques (1950-2000) recueillies dans la base de données de Worldclim version 1.4.

Pour les projections climatiques futures, le modèle régionale « AFRICLIM 3.0 : high résolution ensemble climate projections for Africa » disponible sur <https://webfiles.york.ac.uk/kite/AfriClim> a été utilisée pour extraire les variables bioclimatiques futures. Ce modèle convient plus aux réalités du Bénin, comparativement aux modèles de circulation globale WorldClim (Platts et al., 2015). Concernant ce modèle, les projections à l'horizon 2050 ont été retenues sous deux scénarii : les conditions climatiques pour un future optimiste (RCP 4.5) et les conditions climatiques pour un future pessimiste (RCP 8.5). Les couches climatiques utilisées sont celles de résolution 1 km 30 seconde arc (soit une grille de résolution approximativement de 1 km x 1 km). Aux données bioclimatiques, il y a été ajouté les données des images Shuttle Radar Topography Mission (Mukul et al., 2016) (<https://earthexplorer.usgs.gov>) et les données relatives aux formations pédologiques (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-Worldsoil-database>) à la même résolution.

Le jeu de données constitué a été soumis à une analyse de corrélation afin d'éliminer les variables faiblement corrélées comme l'a suggéré certains auteurs (Elith et al., 2010). Cette analyse a été faite avec l'outil ENMTools 1.3 utilisé par Soufianou et al. (2019).

Le tableau 1 présente les variables environnementales utilisées pour générer les cartes de distribution potentielle du Sorgho.

Tableau 1. Variables environnementales utilisées pour générer les cartes de distribution potentielle des espèces de *Sorghum bicolor* en Afrique de l'Ouest et au Mali.

Variable	Description	Units	Year
Name	Abbreviation		
Bioclimatic data			
1. Temperature variables			
Bio_1	Bio_1	Mean annual temperature	°C
Bio_2	Bio_2	Mean diurnal range in temperature	°C
Bio_3	Bio_3	Isothermality	°C
Bio_4	Bio_4	Temperature seasonality	°C
Bio_5	Bio_5	Max temp warmest month	°C
Bio_6	Bio_6	Min temp coolest month	°C
Bio_7	Bio_7	Annual temp range	°C
Bio_10	Bio_10	Mean temp warmest quarter	°C
Bio_11	Bio_11	Mean temp coolest quarter	°C
Potential evapotranspiration	pet	Potential evapotranspiration	mm
Precipitation variables			
Bio_12	Bio_12	Mean annual rainfall	mm
Bio_13	Bio_13	Rainfall wettest month	mm
Bio_14	Bio_14	Rainfall driest month	mm
Bio_15	Bio_15	Rainfall seasonality	mm
Bio_16	Bio_16	Rainfall wettest quarter	mm
Bio_17	Bio_17	Rainfall driest quarter	mm
Moisture index	Mi	moisture index	n/a
Moisture index moist quarter	Mimq	Moisture index moist quarter	n/a
Moisture index arid quarter	miaq	Moisture index arid quarter	n/a
Dry months	Dm	Number of dry months	month
Length of longest dry season	llds	Length of longest dry season	month

Source: Platts et al. (2015b); AFRICLIM 3.0.

3.3. Traitement et analyse des données

3.3.1. Modélisation de l'impact des changements climatiques sur les aires de production du *Sorghum bicolor* et évaluation du modèle

La modélisation a été réalisée à partir de toutes les données de présence et des différentes variables environnementales et climatiques citées précédemment à l'aide du logiciel Maxent 3.4 (Phillips et al., 2006).

Pour les deux scénarii utilisés, le gain de simulation régularisé du modèle varie de 2,025 à 2,047 ; alors que l'AUC (Area Under the Curve) de simulation est entre 0,967 et 0,966, contre 0,940 à 0,955 pour les données test avec un écartype de $0,010 \pm 0,008$, soit nettement supérieure au seuil de prédiction aléatoire (0,5). L'algorithme s'est terminé après 800 itérations en moyenne (24 secondes).

Le test de Jackknife a été réalisé pour déterminer l'importance des variables environnementales individuelles utilisées. La statistique d'Area Under the Curve (AUC) (Phillips *et al.*, 2006) a été utilisée pour apprécier la performance du modèle de même que True Skill Statistique (TSS) (Allouche *et al.*, 2006). Le modèle est dit performant si la valeur de AUC est supérieure à 0,90 ; il est passable lorsque $0,75 \leq AUC \leq 0,90$ et il est qualifié de mauvais si $AUC < 0,75$ (Peterson *et al.*, 2011). Dans le cas d'espèce, la valeur de l'AUC est supérieure à 0,90 pour les deux espèces, le modèle est très performant par conséquent.

Le TSS est la capacité du modèle à détecter avec précision les vraies présences (sensitivité) et les vraies absences (spécificité). Un modèle avec $TSS \leq 0$ indique une prédiction aléatoire, tandis qu'un modèle avec un TSS proche de 1 ($TSS > 0,5$) a un bon pouvoir prédictif (Allouche *et al.*, 2006, p1226 ; Soufiyanou *et al.*, 2019, p35). La figure 2 présente un exemple de courbe de ROC permettant d'apprécier la robustesse du modèle.

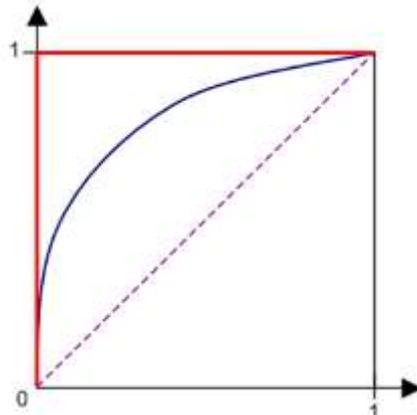


Figure 2 : Courbe ROC permettant de tester la robustesse du modèle obtenu (Source: Decout, 2007)

L'aire sous la courbe (AUC= Area Under Curve) permet de tester cette robustesse. Plus la valeur de cette aire, comprise entre 0 et 1, est grande et plus le modèle est proche de la réalité.

3.3.2. Analyse des contributions des variables

Trois principaux outils permettent d'apprécier la façon dont les variables environnementales ont été utilisées pour produire les prédictions :

- L'importance des variables environnementales pour expliquer la distribution prédite ;
- Le poids de chaque variable pour le modèle obtenu : il est estimé par une analyse produite au cours du modèle, le test de "Jackknife" ;
- Les courbes de relations entre les variables environnementales et la probabilité de présence obtenue par le modèle.

Ces outils sont ici systématiquement utilisés pour tester la robustesse des modèles obtenus à partir de la contribution de chaque variable.

La technique de 'jackknife' et le pourcentage de contribution ont été utilisés pour estimer la contribution/importance prédictive des différentes variables environnementales. Les courbes de réponse sont générées par Maxent. Celles qui montrent les relations entre les probabilités de présence prédites, en tenant compte de la variation de chaque prédicteur environnemental ont été utilisées uniquement. Toutes les courbes de réponse ont été évaluées dans le sens biologique, les modèles sans sens biologique n'ont pas été pris en compte pour les évaluations ultérieures. Pour classer les performances des modèles, la sensibilité du test à des taux d'omission (OR) de 0 et 10 % (Liu *et al.*, 2013 ; Kumar *et al.*, 2015) et l'AUC (aire sous la courbe caractéristique d'exploitation du récepteur (ROC) (Peterson *et al.*, 2013) ont été évalués.

3.3.3. Spatialisation des résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation ont été cartographiés avec le logiciel ArcGIS 10.5. La dynamique des aires de production de chaque spéculation sous l'effet des conditions climatiques actuelle et future a été analysée. La distribution de probabilité brute obtenue par le modèle a été estimée comme mesure de la probabilité d'occurrence des cultures. Une catégorisation à quatre niveaux (très probable, probable, peu probable et improbable) de cette probabilité a été faite pour la discrimination des zones écologiques de chaque espèce à travers l'outil « reclassify » de la boîte à outil « spatial analyst tools » de ArcGIS 10.5. En plus, dans le cadre de la présente recherche, une zone est considérée comme improbable à l'installation de *Sorghum bicolor* lorsque la probabilité d'occurrence de l'espèce est inférieure ou égale à 0,23. Si cette probabilité est comprise entre 0,24 et 0,46 la zone est peu probable. Les valeurs de probabilité comprises entre 0,47 et 0,68 indiquent une zone probable, alors que celles supérieures ou égales à 0,69 sont considérées comme zones très probable à l'installation et au développement de *Sorghum bicolor* sur le territoire national.

Pour obtenir l'étendue des aires définies, le fichier image a été converti en fichier vecteur de format shapefile (fichier de forme). Un champ nommé "area" a été ajouté dans la table d'attribue, puis les superficies de chaque aire y ont été générées en utilisant l'outil « calculate geometry ». A partir de ces superficies, la proportion de la superficie du secteur d'étude qu'occupe chaque aire a été calculée en fonction de la superficie totale du secteur d'étude.

IV. Résultats

4.1. Contribution des variables à la prédiction de la zone agro-écologique du sorgho

La contribution des variables présélectionnées à la prédiction de la zone de culture du sorgho dans les zones climatiques diffère selon les deux scénarios climatiques. Les tableaux 2, 3, 4 montrent la contribution des variables de la prédiction des zones de culture du sorgho pour les scénarios RCP 2.5, RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement. Les proportions observées dans la dernière colonne du tableau 2 concernent la réduction du pouvoir prédictif du modèle lorsque les valeurs d'une variable donnée sont permutées aléatoirement entre les points de fond et de présence. Une valeur élevée indique une grande importance de la variable concernée. Dans les conditions climatiques actuelles (tableau 2), on observe une variation proportionnelle (%) de la contribution des variables à la prédiction du modèle. Les variables telles que : la saisonnalité des précipitations (bio15), les précipitations annuelles (bio12), le nombre de mois secs (dm), l'indice d'humidité du trimestre humide (mimq), le nombre de pluie du mois le plus humide (bio13) cumulent une contribution de 76,77% et sont donc les variables qui ont le plus contribué à la prédiction des zones agroécologiques du sorgho (en considérant le scénario RCP 2.5) du point de vue de leur ordre d'intégration dans le modèle de prédiction.

Table 2: Contribution of variables to the prediction of the sorghum production area considering the current scenario RCP 2.5

Conditions Actuelles		
Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio15	21.3	2
bio12	19.5	13.3
dm	15	7.4
mimq	10.5	2.9
bio13	10.5	6.3
bio7	4.8	10.8
bio2	3.9	7.1
llds	2.5	1.6
bio15	21.3	2
bio12	19.5	13.3

Source: Field data, 2021; GBIF, 2021; Worldclim/AFRICLIM 3.0, 2000-2050

Table 3: Contribution of variables to the prediction of the sorghum production area considering the RCP 4.5 scenario

RCP 4.5		
Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio13	30	14.4
bio16	21.7	6.8
bio12	20.1	12.9
mimq	4.8	8.8
bio7	4.7	9
bio17	4.4	3.9
dm	2.7	1.5
bio2	2.6	5.3

Source: Field data, 2021; GBIF, 2021; Worldclim/AFRICLIM 3.0, 2000-2050

Table 4: Contribution of variables to the prediction of the sorghum production area considering the RCP 8.5 scenario

RCP 8.5		
Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio13	30.1	13.1
bio16	21.6	6.4
bio12	20.2	10.3
bio17	4.9	3.8
mimq	4.6	12.3
pet	3.9	5.7
dm	2.6	0.8
bio2	2.4	4.7
bio13	30.1	13.1
bio16	21.6	6.4

Source: Field data, 2021; GBIF, 2021; Worldclim/AFRICLIM 3.0, 2000-2050

En considérant les résultats du tableau 2, en termes d'importance de la permutation, la variable des précipitations annuelles (bio12), le rapport de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle (bio3), la variation annuelle de la température (bio7), le nombre de mois secs (dm), la moyenne de la variation journalière de la température (bio2) et les précipitations du mois le plus humide (bio13) réduisent la prédiction du modèle à environ 57,14%. Ces variables ont été les plus déterminantes dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle des zones agro-écologiques du sorgho en considérant le scénario RCP 2.5.

Cependant, des variables telles que les précipitations du trimestre le plus sec (bio17), l'indice d'humidité du trimestre humide (mimq), la variation annuelle de la température (bio7), les précipitations du mois le plus humide (bio13), les précipitations annuelles (bio12), les précipitations du trimestre le plus humide (bio16) ont cumulé une contribution de 85,8% et sont donc les variables qui ont le plus contribué à la prédiction des zones agroécologiques de sorgho (Tableau 3). En ce qui concerne l'importance de la permutation, la variable pluviométrie annuelle (bio13), la pluviométrie annuelle (bio12), la variation annuelle de la température (bio7), l'indice d'humidité du trimestre humide (mimq), la pluviométrie du trimestre le plus humide (bio16), la variation journalière moyenne de la température (bio2) et les précipitations du trimestre le plus sec (bio17), entraînent la réduction du pouvoir prédictif du modèle lorsqu'elles sont permutées entre 3,91 et 14,37%. On ne peut que

déduire que la permutation de ces variables réduit le pouvoir prédictif du modèle à près de 61,03%. Par conséquent, ces variables ont été les plus déterminantes dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle des zones agro-écologiques de distribution du Sorghum bicolor. Cependant, le nombre de mois secs (dm) a eu peu d'influence sur la discrimination de ces zones.

Selon le scénario pessimiste (Tableau 4), on note que la pluviométrie du mois le plus humide (bio13), la pluviométrie du trimestre le plus humide (bio16), la pluviométrie annuelle (bio12), cumulent une contribution de 71,86% et sont donc les variables contribuant le plus à la prédiction des zones agroécologiques du sorgho en considérant le scénario pessimiste. Concernant l'importance de la permutation, la pluviométrie annuelle (bio13), l'indice d'humidité du trimestre humide (mimq), la pluviométrie annuelle (bio12), la variation annuelle de la température (bio7), le rapport de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle (bio3), la pluviométrie du trimestre le plus humide (bio16), l'évapotranspiration potentielle (pet), la variation journalière moyenne de la température (bio2) et les précipitations du trimestre le plus sec (bio17), entraînent une réduction du pouvoir prédictif du modèle de près de 3,79% à 13,07%. Seule la permutation de ces variables réduit la prédiction du modèle à près de 70,28%. Par conséquent, ces variables ont été les plus déterminantes dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle des zones agro-écologiques de distribution du Sorghum bicolor. Par contre, le nombre des mois secs (dm) a eu peu d'influence sur la discrimination de ces zones.

4.2. Capacité prédictive du modèle et résultats du test du Jackknife par scénario climatique

Les figures 3, 4 et 5 présentent, respectivement, les résultats du test du Jackknife sur l'importance des variables utilisées en termes de gain d'information pour les scénarios RCP 2,5, 4,5 et 8,5 respectivement.

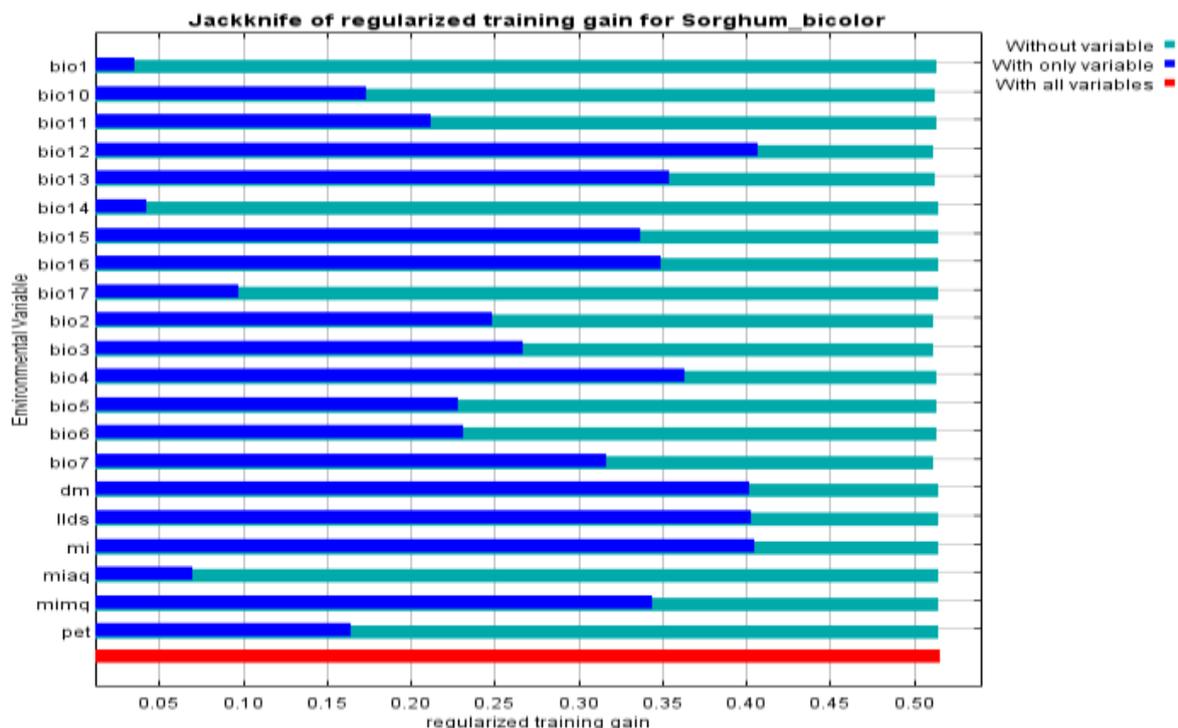


Figure 3 : Résultats du test Jackknife pour le scénario RCP 2.5

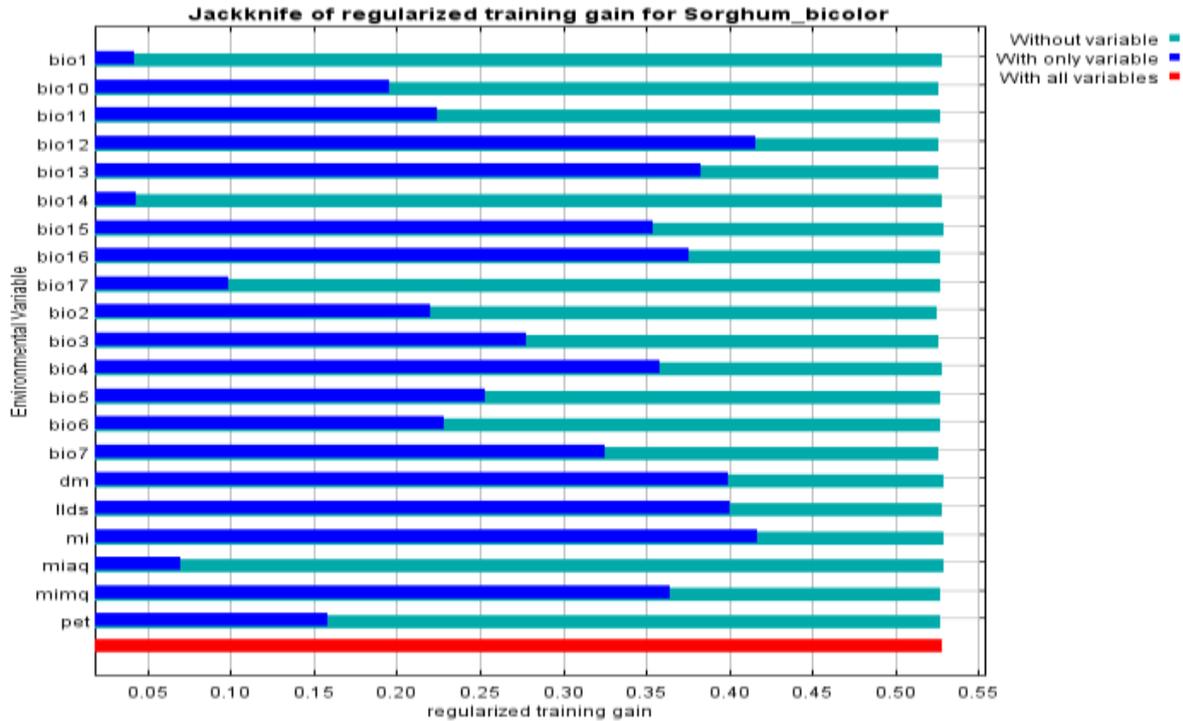


Figure 4 : Résultats du test Jackknife pour le scénario RCP 4.5

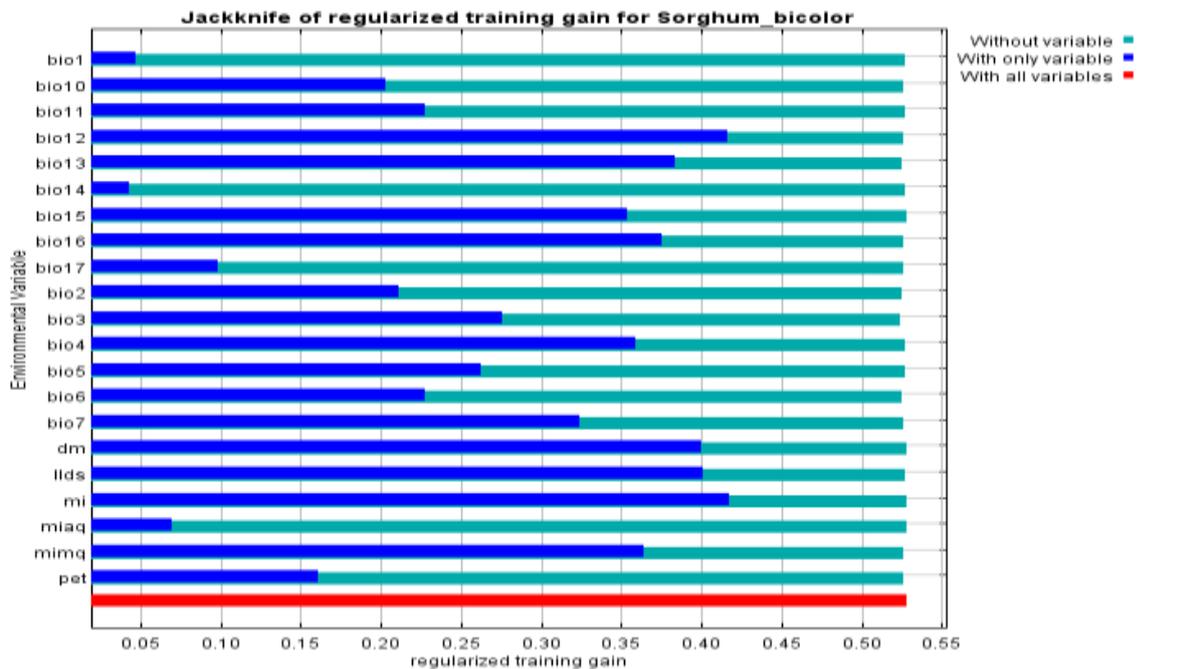


Figure 5 : Résultats du test Jackknife pour le scénario RCP 8.5.

Les statistiques d'évaluation du pouvoir prédictif du modèle ($TSS = 1,42 \pm 1,65$ et $AUC = 0,93 \pm 0,023$) indiquent une bonne performance du modèle dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle de l'habitat du Sorghum bicolor dans l'environnement d'étude compte tenu des conditions actuelles. Les variables qui augmentent le gain d'information expliquant la distribution du sorgho (Figure 3) lorsque les variables sont

utilisées individuellement sont : la pluviométrie annuelle (bio12) et l'indice d'humidité (mi) suivis du nombre de mois secs (dm) et des valeurs de la durée de la plus longue saison sèche (Ilds).

En considérant le scénario optimiste, les valeurs moyennes du TSS (1.39 ± 1.616) et de l'AUC (0.93 ± 0.024) indiquent une bonne performance du modèle dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle de l'habitat du sorgho dans les zones agro-écologiques en considérant le scénario. Les résultats du test de Jackknife sur l'importance des variables utilisées dans le scénario optimiste (Figure 4) montrent que la variable qui augmente le gain d'information expliquant la distribution du sorgho concernant la variable pluviométrie annuelle (bio12), suivie par le nombre de mois secs (dm), la durée de la plus longue saison sèche (Ilds) et l'indice d'humidité (mi). Les valeurs de TSS obtenues ($0,42 \pm 1,63$) et d'AUC ($0,93 \pm 0,02$) indiquent une bonne performance du modèle dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle de l'habitat du sorgho dans les zones agro-écologiques. D'après les résultats de la figure 5, il apparaît que la variable qui augmente le gain d'information expliquant la distribution du Sorghum bicolor lorsqu'il est isolé est la pluviométrie annuelle (bio12) suivie par le nombre de mois secs (dm), la durée de la plus longue saison sèche (Ilds) et l'indice d'humidité (mi). Finalement, le modèle de prédiction de la dynamique spatio-temporelle du sorgho dans les zones est efficace en considérant les trois scénarios.

4.3. Cartographie de la dynamique des zones actuelles et futures de production du sorgho au Mali

Les variations observées des aires cultivées en sorgho dans les zones d'études sont présentées respectivement dans le tableau 5. La dynamique des surfaces actuelles et futures du sorgho montre des variations dans l'espace et dans le temps. La proportion des surfaces cultivées en sorgho varie d'un scénario à l'autre dans la zone d'étude (tableau 5).

Tableau 5 : Les données actuelles et futures zones de culture du sorgho au Mali

Gridcode	Zone	Situation actuelle		RCP4.5		RCP8.5	
		Surface (Km ²)	(%)	Surface (Km ²)	(%)	Surface (Km ²)	(%)
1	Très peu favorable	740619.33	61	740619.33	59	740619.33	58
2	Peu favorable	62764.35	6	65501.91	5	62764.35	7
3	Favorable	112975.83	14	110497.63	9	112975.83	25
4	Très favorable	338927.49	19	342126.66	27	338927.49	10

Il ressort de l'analyse du tableau 5 que les aires de production très peu favorable passeront de 61% actuellement à 58% du territoire en 2050 peu importe le scénario. Les aires très favorables passeront de 19% actuellement à 10% du territoire en 2050 considérant le scénario pessimistes. Par contre, le scénario optimiste prévoit 27% en 2050 dans un contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La figure 6 présente la Dynamique des aires de production actuelles et futures du sorgho du Mali.

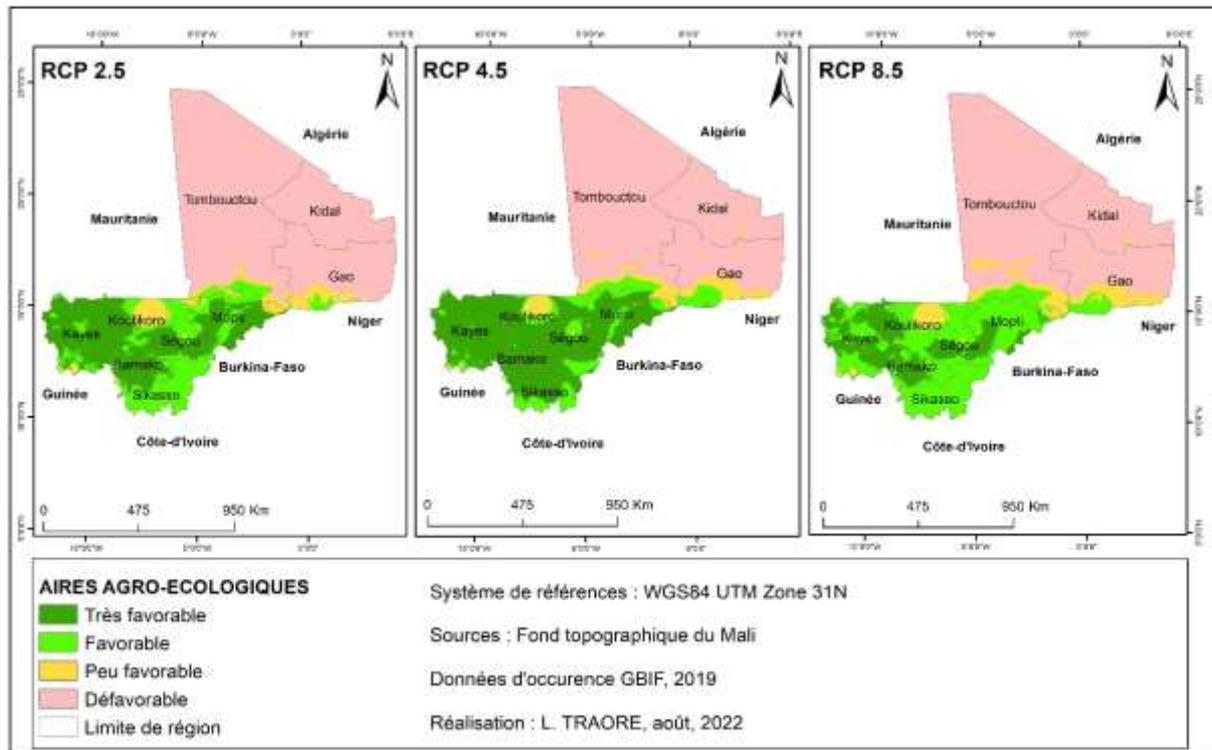


Figure 5 : Dynamique des aires de production actuelles et futures du sorgho du Mali

Dans les conditions climatiques actuelles, les zones Très peu favorables (61%) à la culture du sorgho représentent la majeure partie de la superficie totale de cette zone ; elles sont situées dans les régions de Tombouctou, Gao et de Kidal, le nord du Mali. Les aires de culture du sorgho peu favorable (6%) sont situées dans une partie de la région de Kayes vers le Sud 'Ouest, Koulikoro (Nord-Ouest) et Mopti (centre Nord) du Mali, tandis que les aires de culture du Sorghum bicolor favorables (14%) et très favorables (19%) s'étendent de la région de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti du Mali (Figure 6). En considérant les scénarios optimistes (RCP4.5), on observe une augmentation des aires très favorable pour la culture du sorgho et occupe les 27% de la superficie totale du Mali des régions de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti et 9% des aires de culture du Sorghum bicolor favorables des régions de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti. Les 59% des aires de culture sont très peu favorable et (5%) peu favorable des régions de Tombouctou, Gao et de Kidal, le nord du Mali.

Dans le contexte d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP 8.5), on constate que 10% des aires de culture du Sorghum bicolor des régions Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti seront complètement favorable à la culture du sorgho d'ici 2050. Enfin, à l'horizon 2050, on observe une augmentation de 25% des surfaces favorables Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti, une légère augmentation de 7% des aires de culture du Sorghum bicolor des régions de Kayes vers le Sud 'Ouest, Koulikoro (Nord-Ouest) et Mopti (centre Nord) seront peu favorable et de 58% des aires très peu favorable à la culture du sorgho des régions de Tombouctou, Gao et de Kidal, le nord du Mali.

V. Discussion

5.1. Réponse de l'adéquation de la performance du modèle et de la probabilité d'occurrence aux variables environnementales

La modélisation des zones de culture du sorgho a été réalisée sur la base du principe de Maxent (Maximum Entropy) (Phillips et al., 2006; Soufianou et al., 2019). Cette approche est basée sur le concept fondamental de la niche de Hutchinson (1957) qui représente les intervalles de conditions et de ressources existant dans un espace donné et qui est potentiellement exploitable par une espèce, sans prendre en compte les éventuelles interactions biotiques avec d'autres espèces (Ricklefs, 2010 ; Soufianou et al., 2019 ; Traoré et al., 2021). Cette

approche prend en compte la coexistence d'espèces impliquant une certaine dissimilarité (même si celle-ci n'est pas mise en évidence) ainsi que le principe empirique (l'objectif est de prédire via des mesures de niche la coexistence ou l'exclusion, ou, via l'observation de la coexistence, la dissimilarité minimale des niches (Hutchinson, 1957). Les modèles prédictifs sont généralement utilisés par les scientifiques pour la protection des espèces végétales et pour estimer leur distribution spatiale (Dotchamou et al., 2016). Ces modèles sont utilisés pour déterminer quelles plantes sont en danger d'extinction (Ortega-Huerta & Peterson, 2004 ; Dotchamou et al., 2016), pour calculer les probabilités d'invasion des espèces (Fandohan et al., 2015) et pour évaluer les impacts du changement climatique sur la distribution des espèces (Dotchamou et al., 2016). La modélisation de la niche écologique a souvent été considérée comme un outil puissant pour cartographier la distribution actuelle et future des espèces et prédire l'impact du changement climatique sur leur distribution (Fandohan et al., 2013 ; Nakao et al., 2010, Traoré et al., 2021). En effet, ces modèles ont fait l'objet de nombreuses critiques en raison de leurs faiblesses dans la prédiction de l'impact du : Parmi ces faiblesses, on peut citer les incertitudes liées aux modèles utilisés, les difficultés à paramétrer les interactions écologiques, les réponses idiosyncratiques de chaque espèce au changement climatique, les limites de dissémination propres à chaque espèce, la plasticité des limites physiologiques et les réponses adaptatives des agents de dissémination (Elith et al., 2006 ; Schwartz, 2012 ; Fandohan et al., 2013). En effet, on observe moins d'incertitudes liées aux modèles utilisés, notamment les difficultés à déterminer les paramètres des interactions écologiques et les limites de propagation propres à chaque espèce (Schwartz, 2012; Fandohan et al., 2013). La modélisation des niches écologiques a de nombreuses applications et est principalement utilisée pour proposer des scénarios d'utilisation durable de l'environnement (Beaumont et al., 2007), et pour évaluer les impacts du changement climatique sur la biodiversité (Araujo et al., 2005 ; Araujo & Luoto, 2007 ; Traore et al., 2021).

5.2. Impact du changement climatique sur la distribution du Sorghum bicolor dans la zone d'étude

L'ordre d'intégration des variables dans le modèle de prédiction a montré que les précipitations du trimestre le plus humide, la saisonnalité des précipitations, les précipitations du mois le plus humide, les précipitations annuelles, ont un impact positif sur la prédiction des aires de culture du Sorghum bicolor. L'abondance des précipitations est le principal facteur qui influence la quantité et la qualité de la croissance des plantes (PSSP, 2009), selon Camberlin et al. (2007), Tennant et Hewitson (2002), Boyard-Micheau (2013) et Traoré et al. (2021), le cumul saisonnier ne représentait pas une information suffisante pour le secteur agricole dans la mesure où une saison à fort cumul peut contenir de longues périodes sèches potentiellement néfastes au bon développement des cultures. Cette situation est d'autant plus néfaste à la survenance des périodes sèches pendant la phase de floraison ou de remplissage des grains des cultures (Sultan et al., 2005). Des variables telles que la répartition intra-saisonnière des précipitations ou les dates de début et de fin de saison doivent être prises en considération car elles influencent les rendements et déterminent le calendrier agricole. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Sene (1995) indiquant que la production de la matière sèche par la plante est fonction de la quantité d'eau et de sels minéraux absorbés. Cette absorption dépend de facteurs externes et internes, notamment des facteurs climatiques du moment (ETP par exemple) et du patrimoine génétique de la plante dont les besoins en eau et en sels minéraux sont variables au cours du cycle de développement (Traoré et al., 2021). L'analyse des résultats du modèle de prédiction des habitats a montré que la variation annuelle de la température, la variation journalière moyenne de la température, le rapport entre l'amplitude thermique journalière et l'amplitude thermique annuelle intégrée dans le modèle ont eu un impact favorable dans la prédiction des habitats de Sorghum bicolor. Ces résultats sont similaires à ceux de Bougma et al. (2018) que les températures élevées causent une réduction considérable de la viabilité du pollen, entraînant par conséquent la stérilité de l'épillet et des effets négatifs sur les rendements.

5.3. Implications de l'étude

La réduction de près de 61% (scénario RCP 2.4), 59% (scénario RCP 4.5) et 58% (scénario RCP 8.5) du pouvoir prédictif du modèle observé lorsque les variables étudiées sont permutées justifie leurs rôles déterminants dans la prédiction de la dynamique spatio-temporelle des aires de culture du sorgho. En effet, ces variables agissent

en interaction directe sur les plantes et constituent les paramètres climatiques majeurs en écologie végétale déterminante pour la prédiction de la dynamique spatio-temporelle des zones de production des espèces (Dossou et al., 2016 ; Hounkpevi et al., 2016 ; Fandohan et al., 2015 ; Soufiyanou et al., 2019 ; Traoré et al., 2021). Les conditions climatiques actuelles (scénario RCP 2,5) indiquent que les zones de production de la région de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti du Mali sont et resteront totalement très favorable et favorable à la culture du Sorghum bicolor d'ici 2050. Cependant, les aires de production du Sorghum bicolor d'une partie de la région de Kayes vers le Sud 'Ouest, Koulikoro (Nord-Ouest) et Mopti (centre Nord) sont des aires de production du Sorghum bicolor peu favorable, par contre les régions de Tombouctou, Gao et Kidal sont respectivement très peu favorable compte tenu des scénarios climatiques actuels et futurs.

Les conditions climatiques futures (scénario RCP 4.5) ont montré que les aires de production de la région de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti du Mali sont et resteront totalement très favorable et favorable à la culture du Sorghum bicolor d'ici 2050. Néanmoins, les aires de production du Sorghum bicolor d'une partie de la région Koulikoro (Nord-Ouest), Mopti (centre Nord) et une partie de la région de Gao au centre sont des aires de production du Sorghum bicolor peu favorable, par contre les régions de Tombouctou, Gao et Kidal sont respectivement très peu favorable en considèrent des scénarios climatiques actuels et futurs.

Les conditions climatiques futures (scénario RCP 8.5) ont montré que les aires de production de la région de Kayes, Koulikoro, Bamako, Ségou, Sikasso et Mopti du Mali, seulement 10% de la superficie sont très favorable et 25% resteront favorable à la culture du Sorghum bicolor d'ici 2050. Néanmoins, les 7% des aires de production du Sorghum bicolor d'une partie de la région de Kayes au sud 'Ouest, Koulikoro (Nord-Ouest), Mopti (centre Nord) et une partie de la région de Gao au centre sont des aires de production du Sorghum bicolor peu favorable, par contre les 58% des régions de Tombouctou, Gao et Kidal sont respectivement très peu favorable en considèrent des scénarios climatiques actuels et futurs d'ici 2050. Cependant, la zone propice à la production de Sorghum bicolor sera le centre Nord, le Sud et vers l'Ouest. Les zones de production non appropriées se trouveront dans les régions du Nord. Ceci pourrait s'expliquer par un déplacement de l'isoète du Nord vers le sud avec une diminution de la pluviométrie de 20% (Pana, 2007) et cela par le fait que la distribution et l'abondance du sorgho évoluent en fonction du gradient climatique de la région soudanaise. En effet, le gradient climatique de la région soudanaise évolue de manière croissante et décroissante d'Est en Ouest. Ces résultats corroborent ceux de Soumare (2004) qui montre que la culture varie de 5% à l'Est à 40% à l'Ouest. Le potentiel actuel des zones de culture du sorgho était sensible aux prédictions des deux scénarios appliqués pour 2050. Cela montre que le changement climatique peut avoir un impact sur les zones de culture du sorgho dans les aires agro-écologiques, notamment sur la distribution et l'abondance des écotypes (Guisan & Zimmermann, 2000 ; Thomas et al., 2015 ; Renner et al., 2015 ; Traoré et al., 2021). En considérant l'étendue des zones de production obtenues par les valeurs de probabilité brute supérieures ou égales à 0,5 générées par le modèle, nous pouvons déduire quelque que soit le scénario retenu, le changement climatique constituera une menace sérieuse pour la survie de la culture du sorgho à l'horizon 2050 aussi bien dans la zone du Sorghum bicolor du Mali.

VI. Conclusion

La modélisation des aires de culture du sorgho au Mali à l'aide du modèle Maxent (Maximum Entropy) a montré que le modèle est efficace pour prédire la dynamique spatio-temporelle des aires de culture du sorgho dans les zones agro-écologiques du Mali. La distribution future du sorgho dans les zones agro-écologiques sera déterminée par la saisonnalité des précipitations, les précipitations annuelles, le nombre de mois secs, et l'indice d'humidité du trimestre humide, les précipitations du mois le plus humide, la variation annuelle de la température et la variation journalière moyenne de la température. Dans une perspective d'atténuation et d'émission de gaz à effet de serre, les variations climatiques réduiront les zones propices à la culture du sorgho dans les zones agroécologiques du Mali. Il est donc impératif de mener des enquêtes sur la prévision du rendement potentiel du sorgho dans les zones d'étude du Mali afin d'identifier les aires de production

appropriées de la culture dans un avenir proche (2050) et à long terme (2100) comme stratégies d'adaptation et de résilience des agriculteurs au changement climatique.

VII. Remerciements

L'équipe de recherche tient à exprimer ses sincères remerciements au Projet de renforcement des capacités des établissements d'enseignement supérieur en gestion intégrée des ressources en eau (IES4GIRE NICHE_MLI_251) au Mali pour le financement du présent travail de recherche. L'équipe remercie également les deux arbitres anonymes pour leurs commentaires et contributions utiles.

VIII. Références

- a. Y. Tchetangni, A. E. Assogbadjo et T. Houehanou, Perception paysanne des effets du changement climatique sur la production des noix d'anacardier (*Anacardium Occidentale L.*) dans la commune de Savalou Au Bénin, *European Scientific Journal*, 12 (2016) 220 – 239
2. Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the Accuracy of Species Distribution Models: Prevalence, Kappa and the True Skill Statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
3. Araujo, M. B., & Luoto, M. (2007). The Importance of Biotic Interactions for Modelling Species Distributions under Climate Change. *Global Ecological Biogeography*, 16, 743-753. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00359.x>
4. Araujo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005). Validation of Species-Climate Impact Models under Climate Change. *Global Change Biology*, 11, 1504-1513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x>
5. Austin, M.P. (2007). Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecol Model.*, 200: 1-19.
6. Barbosa, A.M., Real, R. & Vargas., J.M. (2009).— Transferability of environmental favourability models in geographic space: The case of the Iberian desman (*Galemys pyrenaicus*) in Portugal and Spain. *Ecol Model.*, 220: 747-754.
7. Beaumont, L. J., Pitman, A. J., Poulsen, M., & Hughes, L. (2007). Where Will Species Go? Incorporating New Advances in Climate Modelling into Projections of Species Distributions. *Global Change Biology*, 13, 1368-1385. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01357.x>
8. Bougma, L. A., Ouerdraogo, M. H., Sawadogo, N., Sawadogo, M., Balma, D., & Vernoooy, R. (2018). Perceptions paysannes de l'impact du changement climatique sur le mil dans la zone sahelienne et soudano-sahelienne du Burkina Faso. *Afrique Science*, 14, 264- 275.
9. Boyard-Micheau, J. (2013). Previsibilité potentielle des variables climatiques à impact agricole en Afrique de l'Est et application au sorgho dans la région du mont Kenya (338p.). Doctoral Dissertation, Dijon.
10. Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N., & Richard, Y. (2007). Determinants of the Interannual Relationships between Remote Sensed Photosynthetic Activity and Rainfall in Tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 106, 199-216. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.009>
11. Decout, S. (2007). *Effets des patrons d'organisation spatiale du paysage sur l'habitat d'une espèce animale à gestion conservatoire: le cas de l'habitat de reproduction du tétras-lyre (Tetrao tetrix L.) dans un contexte d'expansion des aulnaies vertes (Alnus alnobetula (Ehrh.) C. Koch)* (Doctoral dissertation, Docteur en Biologie, Université Joseph Fourier Grenoble 1).
12. Dossou, E. M., Lougbegnon, T. O., Houessou, L. G., & Codjia, J. T. C. (2016). Analyse de l'impact du changement climatique sur l'aire de distribution actuelle et future de *Lannea microcarpa* Engl, & K, Krause au Bénin, Afrique de l'Ouest. *Afrique Science*, 12, 27-38.
13. Dotchamou, F. T., Atindogbe, G., Sode, A. I., & Fonton, H. N. (2016). Density and Spatial Pattern of *Parkia biglobosa* under Climate Change: The Case of Benin. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 110, 173-194,

14. Elith, J. & Leathwick, J.R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 40: 677-697.
15. Elith, J., Graham, R. P., Anderson, M., Dudik, S., Ferrier, A., Guisan, R. J., Hijmans, F., Huettmann, J. R., Leathwick, A., Lehmann, J., Li, L. G., Lohmann, B. A., Loiselle, G., Manion, C., Moritz, M., Nakamura, Y., Nakazawa, J. M., Overton, A. T., Peterson, S. J., Phillips, K., Richardson, R., Scachetti-Pereira, R. E., Schapire, J., Soberon, S., Williams, M. S., Wisz, N., & Zimmermann, E. (2006). Novel Methods Improve Prediction of Species' Distributions from Occurrence Data. *Ecography*, 29, 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
16. Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. (2010). The Art of Modelling Range-Shifting Species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>
17. Fandohan, A. B., Oduor, A. M. O., Sode, A. I., Wu, L., Cuni-Sanchez, A., Assede, E., & Gouwakinnou, G. N. (2015). Modeling Vulnerability of Protected Areas to Invasion by *Chromolaena odorata* under Current and Future Climates. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1, 20. <https://doi.org/10.1890/EHS15-0003.1>
18. Fandohan, B., Gouwakinnou, G. N., Fonton, N. H., Sinsin, B., & Liu, J. (2013). Impact des changements climatiques sur la repartition géographique des aires favorables à la culture et à la conservation des fruitiers sous-utilisés: Cas du tamarinier au Bénin. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17, 450-462
19. Fleishman, E., Macnally, R., Fay, J.P. & Murphy, D.D. (2001). Modeling and predicting species occurrences using broad-scale environmental variables: an example with butterflies of the Great Basin. *Conserv. Biol.*, 15: 1674- 1685.
20. Franklin, J. (2009). *Mapping Species Distribution: Spatial Inference and Prediction (Ecology, Biodiversity and Conservation)* Saint Diego State (318 p.). Cambridge: Cambridge University Press.
21. GIEC, *Changements climatiques : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC*, (2013) 34 p.
22. Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive Habitat Distribution Models in Ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
23. Heller N.E. & Zavaleta E.S., 2009. Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biol. Conserv.*, 142, 14-32
24. Hounkpevi, A., Tosso, F., Gemavo, D. S. J. C., Kouassi, E. K., Kone, D., & Glele-Kakai, R. (2016). Climate and Potential Habitat Suitability for Cultivation and in Situ Conservation of the Black Plum (*Vitex doniana* Sweet) in Benin, West Africa. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 8, 67-80.
25. Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-457. <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
26. IPCC, *Climate change : synthesis report*. New York, USA : Cambridge University Press, (2007) L. HUGHES, Biological consequences of global warming : is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 15 (2) (2000) 56 – 61
27. J. Onana et J.-L. Devineau, *Afzelia africana* Smith ex Persoon dans le Nord-Cameroun. Etat actuel des peuplements et utilisation pastorale, *Revue Élev. Méd. Vét.*, 55 (1) (2002) 39 – 45
28. J. W. Busby, T. G. Smith, K. L. White et S. M. Strange, Locating climate insecurity : where are the most vulnerable places in Africa? Austin, TX, USA : University of Texas, The Robert Strauss Center for International Security and Law, *Climate Change and African Political Stability (CCAPS) Programme*, (2010) M. BOKO et al., Africa. In M.L Parry. Et al., eds. *Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, (2007) 433 – 467
29. Kumar, S. & Stohlgren, T.J. (2009).— Maxent modelling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ.*, 1(4): 94-98.
30. Kumar, S., Neven, L. G., Zhu, H., & Zhang, R. (2015). Assessing the global risk of establishment of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) using CLIMEX and MaxEnt niche models. *Journal of economic entomology*, 108(4), 1708-1719.

31. Liu, Y., Cheng, Q., Xia, Q., & Wang, X. (2013). Application of singularity analysis for mineral potential identification using geochemical data—A case study: Nanling W–Sn–Mo poly-metallic metallogenic belt, South China. *Journal of Geo-chemical Exploration*, 134, 61–72.
32. Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global Scale Climate—Crop Yield Relationships and the Impacts of Recent Warming. *Environmental Research Letters*, 2, Article ID: 014002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
33. Moukrim, S., Lahssini, S., Alaoui, H. M., Rifai, N., Arahou, M., & Rhazi, L. (2018). Modélisation de la distribution spatiale des espèces endémiques pour leur conservation: cas de l'Argania spinosa (L.) Skeels. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 73(2), 153-166.
34. Mukul, M., Srivastava, V., & Mukul, M. (2016). Accuracy analysis of the 2014–2015 Global Shuttle Radar Topography mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using international Global Navigation Satellite System Service (IGS) network. *Journal of Earth System Science*, 125(5), 909-917.
35. Nakao K. et al., 2010. Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecol.*, 212, 229-243.
36. Ortega-Huerta, M. A., & Peterson, A. T. (2004). Modelling Spatial Patterns of Biodiversity for Conservation Prioritization in North-Eastern Mexico. *Diversity and Distributions*, 10, 39-54. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2004.00051.x>
37. Ouattara, I., Diarra, Y., & Mariko, S. (2019). Etude des Impacts des Changements Climatiques sur les Activités Agricoles dans la Commune Rurale de Mafoune, Cercle de Tominian, Région de Segou au Mali. *European Scientific Journal*, 15, 121-144. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n11p121>
38. Padalia, H., Srivastava, V., & Kushwaha, S. P. S. (2014). Modeling Potential Invasion Range of Alien Invasive Species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, 22, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.04.002>
39. PANA, 2007. AEDD, Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques, Mali, 100 p.
40. Peterson AT, 2011. Ecological niche conservatism: A time-structured review of evidence. *Journal of Biogeography*, 38:817-827. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02456.x>
41. Peterson, A.T. & Soberón, J. (2012).— Species distribution modeling and ecological niche modeling: Getting the concepts right. *Nat. Conservação*, 10: 102-107.
42. Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
43. Platts, P. J., Marchant, R. A. (2015). AFRICLIM: High-Resolution Climate Projections for Ecological Applications in Africa. *African Journal of Ecology*, 53, 103-108. <https://doi.org/10.1111/aje.12180>
44. PSSP (Projet de Sécurisation des Systèmes Pastoraux) (2009). La mobilité pastorale dans la région de Zinder, IRAM-Karkara/AFD (113 p.).
45. Renner, I. W., Elith, J., Baddeley, A., Fithian, W., Hastie, T., Phillips, S. J., Popovic, G., & Warton, D. I. (2015). Point Process Models for Presence-Only Analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 366-379. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12352>
46. Ricklefs, R. E. (2010). *A Economia da Natureza* (570 p.). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. Schwartz, M. W. (2012). Using Niche Models with Climate Projections to Inform Conservation Management Decisions. *Biological Conservation*, 155, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.011>
47. Sampoux, J.P. & Badeau, V. (2009).— Modélisation de la niche écologique des fétuques à feuilles fines: quels apports pour la conservation et la valorisation des ressources génétiques? *Innov. Agron.*, 7: 79-91.
48. Schwartz M.W., 2012. Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biol. Conserv.*, 155, 149-156.
49. Scott, J.M., Beglund, P.J., Morrison, M.L., Haufler, J.B., Raphael, M.G., Wall, W.A. & SAMSON, F.B. (eds) (2002).— Predicting species occurrences: Issues of accuracy and scale. Island Press, Washington, DC. SHANNON, C.E. (1948).— A mathematical theory of communication. *AT&T Tech. J.*, 27: 379-423.

50. Sene, L. (1995). Reponse de la variete de sorgho CE 145-66 a l'alimentation en eau: Effets du stress hydrique sur le rendement et la qualite des semences (59 p.). Memoire d'ingenieur en travaux agricoles, ENCR, CNRA de Bambey.
51. Sinclair, T. R., Marrou, H., Soltani, A., Vadez, V., & Chandolu, K. C. (2014). Soybean Production Potential in Africa. *Global Food Security*, 3, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2013.12.001>
52. Soufianou, K., Ismaila, T. I., & Oussen, A. (2019). Impact de la Variabilite Climatique sur la Niche Ecologique de *Diospyros mespiliformis* Hochst. ex A. De. dans la Region Soudanienne au Benin (Afrique de l'Ouest). *European Scientific Journal*, 15, 2-19. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n36p1>
53. Soumare, M. (2004). Contribution a la prevision de l'aire de diffusion de varietes de sorgho au Mali: Couplage entre modele de croissance des cultures et systeme d'information geographique (92 p.). Doctoral Dissertation, Universite de Paris-Nanterre.
54. Sultan, B., & Gaetani, M. (2016). Agriculture in West Africa in the Twenty-First Century: Climate Change and Impacts Scenarios, and Potential for Adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1262. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262>.
55. Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B., & Janicot, S. (2005). La variabilite climatique en Afrique de l'Ouest aux echelles saisonniere et intra-saisonniere, II: Applications a la sensibilite des rendements agricoles au Sahel. *Science et changements planetaires/Secheresse*, 16, 23-33.
56. Tennant, W. J., & Hewitson, B. C. (2002). Intra-Seasonal Rainfall Characteristics and Their Importance to the Seasonal Prediction Problem. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22, 1033-1048. <https://doi.org/10.1002/joc.778>.
57. Thomas, B., Lutz, S., & Rideau, C. (2015). Modelisation de la repartition des campagnols aquatiques du genre *Arvicola* en Normandie, Groupe Mammalogique Normand, Agence de l'Eau Seine-Normandie (62 p.).
58. Toure, A. O., & Diallo, A. G. (2004). Caracteristique et techniques culturelles des varietes et hybrides de sorgho au Mali (70 p.). Institut d'Economie rurale (IER)/Centre Regional de Recherche Agronomique de Sotuba (CRRA).
59. Toure, H. A. (2016). Effect of Climate Change and Variability on Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R, Br.) Production in the Sudanian and Sahelian Agro-Ecological Zones in Mali (183 p.). Doctoral Dissertation.
60. Traore, B., Corbeels, M., Van Wijk, M. T., Rufino, M. C., & Giller, K. E. (2013). Effects of Climate Variability and Climate Change on Crop Production in Southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 49, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.004>.
61. Traoré, L., Bello, O. D., Togola, A., Balogoun, I., Chabi, F., Yabi, I., Ahoton, E.L., & Saïdou, A. 2021. Farmers' perceptions of climate change and adaptation strategies on sorghum productivity in the Sudanian and Sahelian zones of Mali. *African Crop Science Journal*, 29(1), 157
62. Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science*, 341, 508-513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>.
63. Zakari, S., Arouna, O., Toko, I. I., Yabi, I., & Tente, B. A. H. (2017). Impact des changements climatiques sur la distribution de deux espèces ligneuses fourragères (*Khaya senegalensis* et *Azelia africana*) dans le bassin versant de la Sota, Bénin. *Afrique Science*, 13(3), 1-14.