
**Contribution de l'imagerie satellitaire à la lutte contre
au Burkina Faso : Prévion de rendements du sorgho (*Sorghum bicolor* L.
Moench) à partir des modèles SPIRITS, GeoWRSI et des images du NDVI**

Auteur : Sankara, Rasmata

Promoteur(s) : Mohamed Sallah, Abdoul-Hamid

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10076>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de
l'Environnement**

UCLouvain - Faculté des bioingénieurs

**CONTRIBUTION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE À LA LUTTE CONTRE
L'INSÉCURITÉ ALIMENTAIRE AU BURKINA FASO : PRÉVISION DE
RENDEMENTS DU SORGHO (*SORGHUM BICOLOR* L. MOENCH) À PARTIR
DES OUTILS SPIRITS, GEOWRSI ET DES IMAGES DU NDVI**

Par : SANKARA Rasmata

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master de
Spécialisation en Gestion des risques et des Catastrophes**

Promoteur : Abdoul-Hamid MOHAMED SALLAH

Co-Promoteur : Weimè SOME

Lecteur : Bernard TYCHON

Année académique **2019-2020**

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain.

L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : « SANKARA Rasmata
rasmtatsank@yahoo.fr »

Dédicace

A mon cher époux ZONGO Bétéo

A mon fils ZONGO Arthur Yanis

Table des matières

Dédicace	iii
Liste des figures	vi
Remerciement.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract	x
Acronyme	xi
Introduction	1
I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1.1 Concepts de sécurité alimentaire et d'insécurité alimentaire.....	4
1.2 Situation alimentaire au Burkina Faso	5
1.3 Politiques de lutte contre l'insécurité alimentaire au Burkina Faso.....	7
1.4 Prévision de rendement.....	8
1.5 Généralité sur le sorgho	10
1.6 Culture du sorgho et contribution pour la sécurité alimentaire au Burkina Faso ..	12
II. METHODOLOGIE	14
2.1 Présentation de la zone d'étude.....	14
2.2 Cadre théorique	16
2.3 Analyse selon la régression linéaire multiples.....	19
2.4 Validation.....	19
2.5 Traitement et analyse des données.....	21
2.5.1 Sources des données.....	21
2.5.1.1 Rendements historiques	21
2.5.1.2 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	21
2.5.1.3 Les données d'entrées de GeoWRSI	23

2.5.1.4	Données CHIRPS	23
2.5.2	Analyse des données	23
2.5.2.1	L'analyse des données avec le logiciel GeoWRSI	23
2.5.2.2	Traitement des données avec SPIRITS	24
2.5.2.3	Analyse des données avec JMP	25
2.5.2.4	Le logiciel ArcGis	25
III.	RESULTATS ET DISCUSSION	27
3.1	Résultats.....	27
3.1.1	Prévision des rendements dans la région de la Boucle du Mouhoun	28
3.1.1.1	<i>Province des Balé</i>	28
3.1.1.2	<i>Province des Banwa</i>	29
3.1.1.3	<i>Province de Kossi</i>	29
3.1.1.4	<i>Province de Sourou</i>	30
3.1.1.5	<i>Province du Mouhoun</i>	30
3.1.1.6	<i>Province du Nayala</i>	31
3.1.2	Prévision dans la région du Centre-Ouest	32
3.1.2.1	<i>Province du Boulkièmdé</i>	32
3.1.2.2	<i>Province du Sanguié</i>	32
3.1.2.3	<i>Province de la Sissili</i>	33
3.1.2.4	<i>Province de Ziro</i>	33
3.1.3	Prévision des rendements dans la région du Nord.....	34
3.1.3.1	<i>Province de Louroum</i>	34
3.1.3.2	<i>Province du Yatenga</i>	35
3.1.3.3	<i>Province de Zondoma</i>	35
3.1.3.4	<i>Province du Passoré</i>	36
3.1.4	Contribution des variables dans les différents modèles.....	36
3.2	Discussion.....	38

3.2.1 Prévision des rendements du sorgho	38
3.2.2 Déterminants du rendement du sorgho	38
CONCLUSION	41
BIBLIOGRAPHIE	42
Webographie	45

Liste des figures

<i>Figure 1: Couverture des besoins céréalières en 2017.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2: Morphologie d'un plant de sorgho</i>	<i>11</i>
<i>Figure 3: Evolution de la production du sorgho au Burkina Faso.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 4: Limite administrative de la zone étude</i>	<i>15</i>
<i>Figure 5: Schéma adapté de la méthodologie.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 6 : Aperçu du NDVI non lissé et lissé.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 7: Modèle de prévision de la province du Balé.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 8 : Modèle de prévision de la province du Banwa</i>	<i>29</i>
<i>Figure 9 : Modèle de prévision dans la province du Kossi.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 10 : Modèle de prévision de la province du Sourou.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 11 : Modèle de prévision de la province du Mouhoun</i>	<i>31</i>
<i>Figure 12 : Model de prévision de la province du Nayala</i>	<i>31</i>
<i>Figure 13 : Modèle de prévision de la province du Boulki�me</i>	<i>32</i>
<i>Figure 14 : Modèle de prévision dans la province du Sanguié</i>	<i>33</i>
<i>Figure 15 : Modèle de prévision de la province de la Sissili.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 16 : Modèle de prévision de la province de Ziro</i>	<i>34</i>
<i>Figure 17 : Modèle de prévision dans la province du Loroum.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 18 : Modèle de prévision de la province du Yatenga</i>	<i>35</i>
<i>Figure 19 : Modèle de la province du Zondoma.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 20 : Modèle de prévision dans la province du Passoré</i>	<i>36</i>

Listes des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des variables utilisé dans la modélisation	18
Tableau 2 : Synthèse des équations des différents modèles de prévision de rendement du sorgho	27

Tableau 3 : Synthèse des indicateurs des modèles	28
Tableau 4: Fréquence d'apparition des variables	37

Remerciement

Nos remerciements vont d'abord à l'endroit de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur /Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD) de la Belgique, de nous avoir donné cette opportunité de formation en nous octroyant une bourse. Toutes nos reconnaissances à Mr Abdoul-Hamid MOHAMED SALLAH, promoteur de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses multiples conseils et orientations.

Nous témoignons notre reconnaissance à Mr. SOME Weimè, co-promoteur pour les nombreux conseils et son soutien technique lors de nos travaux de recherches. Toutes nos gratitudee au corps enseignant de Université de liège, particulièrement dans le département de master en gestion des risques et catastrophes notamment :

- Dr Pierre OZER, le coordonnateur du master de spécialisation en gestion des risques et catastrophes, pour son soutien moral surtout pendant la crise sanitaire du COVID-19 ;
- Dr. Antoine DENIS qui a été à l'écoute de nos différentes préoccupations pendant les travaux de recherche ;
- A toute ma famille.

Résumé

Au Burkina Faso, l'agriculture est pluviale et soumise aux effets des variabilités climatiques qui entraînent des pertes de production dont la conséquence est l'insécurité alimentaire. Prévoir le rendement agricole est un moyen de lutter contre l'insécurité alimentaire à travers l'anticipation des mesures de résiliences. La présente étude a été conduite afin de contribuer à la lutte contre l'insécurité alimentaire à partir de l'alerte précoce en modélisant le rendement du sorgho dans quatorze (14) provinces de trois régions du Burkina Faso avec les outils GeoWRSI (Water Requirements Satisfaction Index), SPIRITS, les images NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'historique des rendements. La méthodologie a consisté à rechercher un modèle de prévision de rendement adéquat du sorgho en mettant en évidence la corrélation entre les rendements historiques et les différentes variables explicatives du rendement à savoir les variables phénologiques à travers l'analyse du profil temporel du NDVI, le bilan en eau du GeoWRSI et les données de pluviométrie issues de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data).

Les résultats des analyses révèlent que le rendement du sorgho est fortement corrélé aux variables phénologiques du NDVI et du bilan en eau. Ainsi des modèles ont été construits à travers la combinaison de ces dernières. Dans l'ensemble, les modèles sont globalement performants et robustes. Toutefois les plus performants restent les modèles mixtes en occurrence ceux des provinces du Banwa, Mouhoun, et Ziro avec un R^2 de validation élevé soit respectivement 0,83 ; 0,80 et 0,82. Quant à l'écart quadratique moyen relatif (RRMSE), sa valeur reste faible pour ces trois provinces ; soit 6,82 % dans la province des Banwa ; 3,72% au Mouhoun et 6,60% au Ziro . Le rendement simulé s'écarte de celui mesuré de 66,37 kg dans les Banwa, de 40,44 Kg au Mouhoun, et de 75,90 Kg au Ziro. Par ailleurs, les modèles des provinces du Sourou et du Zoundama enregistrent des moins bonnes performances avec des valeurs du RRMSE relativement élevées soit respectivement 27,48% et 25,14%.

Au regard des résultats, il ressort que les variables phénologiques et le bilan en eau sont significativement corrélés aux rendements du sorgho. Les modèles construits avec ces variables sont globalement performants, fiables et robustes et peuvent contribuer à la lutte contre l'insécurité alimentaire à travers une alerte précoce.

Mots clés : Burkina Faso ; GeoWRSI, NDVI, Rendement, Sorgho

Abstract

In Burkina Faso, agriculture is rain-fed and subjected to the effects of climate variability, which leads to production losses and food insecurity. Predicting agricultural yield is a way to fight against food insecurity by anticipating resilience measures. The present study was conducted in order to contribute to the fight against food insecurity from early warning by modeling sorghum yield in fourteen (14) provinces of three regions of Burkina Faso using GeoWRSI (Water Requirements Satisfaction Index), SPIRITS, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) images and historical yield data. The methodology consisted in searching for an adequate sorghum yield forecasting model by highlighting the correlation between historical yields and the different yield explanatory variables, namely phenological variables through the analysis of the NDVI time profile, the water balance of GeoWRSI and rainfall data from CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data).

The results of the analyses reveal that sorghum yield is highly correlated with the phenological variables of NDVI and water balance. Models were thus constructed through the combination of the latter. On the whole, the models are globally efficient and robust. However, the best performing models are the mixed models, namely those of Banwa, Mouhoun, and Ziro provinces, with a high validation R^2 of 0.83, 0.80, and 0.82 respectively. As for the relative root mean square deviation (RMSD), its value remains low for these three provinces: 6.82% in Banwa province, 3.72% in Mouhoun and 6.60% in Ziro. The simulated yield differs from that measured by 66.37 kg in the Banwa, 40.44 kg in Mouhoun, and 75.90 kg in Ziro. On the other hand, the models of the Sourou and Zondoma provinces recorded poorer performances with relatively high EMRWH values of 27.48% and 25.14% respectively.

The results show that phenological variables and water balance are significantly correlated with sorghum yields. The models built with these variables are globally efficient, reliable and robust and can contribute to the fight against food insecurity through early warning.

Keywords: Burkina Faso; GeoWRSI, NDVI, Yield, Sorghum

Acronyme

BCAH/OCHA : Bureau de la coordination des affaires humanitaires.

CCNUC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

CILSS : Comité Permanent Inter-Etat de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel.

DGCID : Direction Générale de la Coopération Internationale et du Développement.

DGESS : Direction Générale des Etudes et Statistiques Sectorielles

DRAAH : Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagement Hydro-agricole.

EPA : Enquête Permanent Agricole.

FAO : Food and Agriculture Organization.

FAPAR : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation.

FEWS NET : Famine Early Warning Systems Network.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat.

ICRISAT : Institut international de Recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides.

MAAH : Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricole.

MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire.

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index.

PAM : Programme Alimentaire Mondial.

SP/CONEDD : Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le Développement Durable.

Introduction

Le réchauffement du système climatique est une évidence (GIEC, 2014). Selon les observations effectuées sur tous les continents, il y a une variation anormale des paramètres climatiques (GIEC, 2007 ; 2014). Ces incidences climatiques sont marquées, entre autres, par une augmentation des températures et une baisse ou une augmentation anormale des précipitations affectant ainsi le fonctionnement des écosystèmes (GIEC, 2014). Les impacts de cette variabilité climatique diffèrent des régions géographiques. Toutefois la région du Sahel reste la zone la plus vulnérable à la menace climatique actuelle (CILSS, 2004 ; Challinor *et al.*, 2007a ; GIEC, 2007). Au Sahel, l'agriculture est essentiellement pluviale et soumise aux perturbations climatiques occasionnant les baisses de rendements et par ricochet l'insécurité alimentaire et la paupérisation de plus 70% de la population agricole (Ozer *et al.*, 2009 ; FAO, 2011 ; PNUD, 2014).

Au Burkina Faso, la majorité de la population (plus de 80%) dépend de l'agriculture qui est régulièrement affectée par les aléas climatiques. Selon l'enquête multisectorielle continue, près de 26% des ménages subissent annuellement au moins un choc idiosyncratique tandis que plus de 50% d'entre eux (un ménage sur deux) font face au moins à un choc covariant (INSD ; 2014). Parmi les aléas climatiques, les sécheresses et les inondations sont les plus récurrentes et entraînent des déficits de production céréalière essentiellement destinée à la consommation alimentaire nationale (MAAH, 2011-2019 ; FAO et ICRISAT, 1997). La problématique de l'accès à une alimentation suffisante pour les populations se pose avec acuité au regard des risques climatiques auxquels le pays est confronté (SP/CONEDD, 2007 ; MAAH, 2019). En plus des variabilités climatiques auxquelles le pays peine à trouver des solutions durables, vient s'ajouter la problématique de l'insécurité humaine. En effet depuis avril 2015, le Burkina Faso est confronté à une crise sécuritaire marquée par la recrudescence des attaques des groupes armés et des affrontements intercommunautaires (FEWSNET, 2019 ; OCHA, 2019). Selon OCHA, (2019) et MAAH (2019), l'insécurité, en plus d'affecter négativement les activités agricoles limite l'accès des zones de production pour la collecte des données des statistiques agricoles pourtant important pour la planification d'urgence.

Les chocs climatiques couplés à l'insécurité humaine en limitant la production agricole accentue la vulnérabilité des populations à l'insécurité alimentaire (FAO, 2016). Les impacts sont plus sévères sur les couches sociales vulnérables dans toutes les régions du pays, en particulier les femmes, les jeunes et surtout les enfants de moins de cinq ans en termes de malnutrition (FAO, 2017b ; MAAH, 2019). L'insécurité alimentaire est un phénomène récurrent au Burkina Faso et touche annuellement plusieurs milliers de personnes. Selon la FAO (2017a) plus de 20% de la

population, soit plus de 3,5 millions de personnes sont en situation d'insécurité alimentaire. Elle constitue un véritable défi à relever pour cette frange de la population, en occurrence les ménages pauvres. Pour la FAO et OCHA (2014), une meilleure gestion de l'insécurité alimentaire repose sur une alerte précoce, car elle donne en avance des avis d'alerte pour permettre d'adopter des mesures de prévention et d'intervention en vue d'atténuer les chocs. Pour ce faire, il est impératif de disposer des outils d'aide à la prise de décision. Cela permet le suivi des cultures mais aussi et surtout, la prévision des rendements agricoles, dans le but d'anticiper la recherche des réponses appropriées aux éventuelles crises alimentaires (Tychon et Rosillon, 2006 ; Kouadio, 2007).

Par ailleurs, la recherche scientifique, en établissant la relation entre le climat et l'agriculture, a généré des modèles de prévisions de la variabilité climatique sur la production agricole au profit des agriculteurs mais aussi des décideurs politiques (Sultan *et al.*, 2008). Les modèles comme, AquaCrop, SARRA-H ont été utilisés dans plusieurs pays dont le Burkina Faso (Wellens *et al.*, 2013 ; Traoré *et al.*, 2010). Ces outils permettent les suivis agrométéorologiques des cultures à travers le bilan hydrique, carboné, phénologique, etc. A partir des suivis, il est possible de faire une prévision des rendements agricole (FAO., 2018, Bronne *et al.*, 2011 ; Kouadio, 2007). Bien que ces modèles, soient robuste en termes de prévision de rendement, ils nécessitent un nombre très important de données d'entrées. Cela constitue une contrainte pour les techniciens du développement rural, dans la mesure où la disponibilité des données est une problématique surtout pour un pays comme le Burkina Faso. De ce fait, le suivi des cultures et la prévision des rendements agricoles sont réalisés, à travers les enquêtes et des observations sur le terrain suivi de l'installation des carrés de rendement (EPA, 2008 ; MAAH, 2019). Cette méthode nécessite une main d'œuvre importante, un coût financier exorbitant et demeure fastidieuse. En plus de ces contrainte, la crise sécuritaire limite l'accès à certaines zones de production pour la collecte des données à travers les enquêtes agricoles (FEWSNET, 2019 ; OCHA, 2019 ; MAAH, 2019).

Afin de répondre aux besoins des utilisateurs, plusieurs institutions comme le Joint Research Centre (JRC), le Food and Agriculture Organisation (FAO) et le FEWSNET ont développé des modèles simples et accessibles au grand public dont les données d'entrées sont téléchargeables sur leurs sites web. Il s'agit entre autres de *Processing and Interpretation of Remotely Sensed Image Time Series* (SPIRITS), *Geospatial Water Requirement Satisfaction Index* (GeoWRSI). Ces modèles permettent non seulement le suivi des cultures mais aussi de faire une prévision des rendements agricoles. Ils ont été utilisés sur diverses spéculations et ont fourni des résultats satisfaisants dans la prévision de rendement du coton au Bénin (Tossou., 2018), du sorgho et du mil au Niger (Peeters, 2018), de l'arachide au Sénégal (Kane, 2019). Au stade actuel, peu d'études

ont été fait au Burkina Faso sur l'utilisation de ces modèles dans le cadre de la prévision des rendements agricoles. De ce fait, des questions restent posées sur la contribution de ces modèles pour améliorer le dispositif de prévision des rendements agricoles au Burkina Faso. Cela justifie la présente étude intitulée « **Contribution de l'imagerie satellitaire à la lutte contre l'insécurité alimentaire au Burkina Faso : Prévision de rendements du sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) à partir des modèles SPIRITS, GeoWRSI et des images du NDVI** ». Le choix du sorgho pour cette étude s'explique par le fait qu'il constitue la principale céréale d'alimentation de la population au Burkina Faso et sa consommation annuelle moyenne est estimée à près de 90 à 100 Kg par habitant (MAHRH, 2011). L'identification des zones déficitaires de production de sorgho pourrait donc contribuer à la lutte contre insécurité alimentaire au Burkina Faso.

L'objectif global de cette étude est de contribuer à la lutte contre l'insécurité alimentaire à travers l'alerte précoce afin de localiser les zones à risque et d'anticiper les réponses face aux crises alimentaires. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- identifier les variables pertinentes dans la prévision des rendements du sorgho avec les métriques phénologiques des images de NDVI et les variables agrométéorologiques de GeoWRSI ;
- élaborer des modèles de prévision de rendements du sorgho au Burkina Faso ;

Les hypothèses associées à la présente étude sont :

- les métriques phénologiques du NDVI et les paramètres agrométéorologiques du GeoWRSI expliquent mieux le rendement du sorgho dans les provinces du Burkina Faso ;
- les modèles élaborés à travers les métriques du NDVI et les variables du bilan en eau de GeoWRSI, sont fiables et adaptées à la prévision du rendement du sorgho dans les différentes provinces du Burkina Faso ;

Le présent document est structuré en trois parties. La première partie est consacrée à la synthèse de la revue bibliographique, la deuxième partie décrit la méthodologie adoptée et la troisième partie présente les résultats de l'étude ainsi que la discussion.

I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Concepts de sécurité alimentaire et d'insécurité alimentaire

Concept de sécurité alimentaire

Le concept de sécurité alimentaire est évolutif. En 1975, l'Organisation des Nations Unies définissait la sécurité alimentaire comme la capacité d'approvisionnement du monde en produits de base afin d'assurer la croissance de la consommation alimentaire, tout en maîtrisant les fluctuations et les prix (ONU, 1975). Selon MAXWELL (1987) il y a sécurité alimentaire lorsque le système alimentaire d'un pays, d'un peuple fonctionne de telle sorte qu'il n'y a aucune crainte d'insuffisance alimentaires. En 1989, le Programme Alimentaire Mondial définit la sécurité alimentaire comme la capacité pour toute personne de posséder à tout moment un accès physique et économique aux besoins alimentaires de base (PAM, 1989). Quant à Frankenberger (1991), la sécurité alimentaire est assurée lorsque la viabilité du ménage n'est pas menacée par un déficit alimentaire. Ces définitions mettent en exergue la satisfaction de la demande, les conditions d'accès physiques et économique et l'accès à court et à long terme. Cependant, ces dernières années, la plupart des définitions prennent en compte non seulement la satisfaction et l'accès mais aussi et surtout la question du risque et la durabilité. Ainsi au Sommet Mondial de l'Alimentation à Rome, la sécurité alimentaire a été considérée comme la situation dans laquelle *"tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active"* (FAO, 1996). Pour qu'il ait sécurité alimentaire, les quatre composantes suivantes doivent être satisfaites : la disponibilité physique, l'accès physique et économique, l'utilisation des aliments et la stabilité dans le temps et dans l'espace (FAO et al., 2017).

- la disponibilité physique des aliments, se rapporte à l'offre alimentaire par rapport à la demande ;
- l'accessibilité physique des aliments qui fait appel à des notions telles que la capacité financière, le système de commerce et de distribution ainsi que l'aptitude à surmonter les obstacles dus à l'isolement géographique (FAO, 2008) ;
- l'utilisation des aliments, se rapporte aux bonnes pratiques alimentaires au sein des ménages et la qualité nutritionnelle et énergétique mais aussi la diversité.
- la stabilité qui met en relief la durabilité dans le temps et dans l'espace des trois composantes. Elle tient compte des risques, qu'ils soient naturels (sécheresse,

inondations etc.), techniques, socio-économique et politique pouvant impacter la sécurité alimentaire.

Concept d'insécurité alimentaire

La littérature offre une panoplie de définition du concept d'insécurité alimentaire. Selon (FAO, 1996), il y'a l'insécurité alimentaire lorsque l'une ou plusieurs composantes de la sécurité alimentaire n'est pas satisfaite ou mieux lorsque des êtres humains n'ont pas un accès sûr à des quantités suffisantes de nourriture saine et nutritive leur permettant de mener une vie saine et active. Pour le CILSS, (2009), l'insécurité alimentaire existe lorsque des personnes sont dans l'incapacité de se procurer en quantité suffisante une nourriture de qualité par des moyens normaux, sans devoir dépendre de l'aide alimentaire ou d'autres formes d'accès à la nourriture non autonome. Deux types d'insécurité alimentaires ont été identifiés par la FAO (2008) selon sa durée dans le temps. Il s'agit de :

- l'insécurité alimentaire chronique ou structurelle : elle est persistante et les ménages se trouvant dans cette situation sont dans l'incapacité de satisfaire leurs besoins nutritionnels sur de long terme. Elle est due à la pauvreté prolongée, de l'absence de biens, et l'accès limité aux ressources productives ou financières ;
- l'insécurité alimentaire conjoncturelle ou transitoire est de courte durée et peut être cyclique (période de soudure) et transitoire. Elle est le résultat des chocs et des fluctuations de l'offre alimentaire, des prix mais aussi et surtout le revenu monétaire des ménages.

1.2 Situation alimentaire au Burkina Faso

Selon l'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, le nombre des personnes sous-alimentées est en hausse (FAO, 2009). Environ un Milliard de personnes souffrait de faim en 2009 (FAO, 2009). Selon FAO, 2009 la majorité des personnes sous-alimentées vivent dans les pays en développement, en occurrence l'Asie avec 642 millions en 2009, suivi de l'Afrique Sub-saharienne avec 265 millions en 2009.

A l'instar des pays de l'Afrique Sub-saharienne, l'insécurité alimentaire et nutritionnelle reste élevée et persistante au Burkina Faso. Selon la FAO, (2017a), 20% de la population, soit plus de 3,5 millions de personnes, sont en situation d'insécurité alimentaire. Cette situation est due à la pauvreté de la population. En 2015, l'Indice de développement humain (IDH) du Burkina Faso était de 0,402, classant ainsi le pays au rang de 183^{ème} sur 188 pays (PNUD,2018). Ce faible IDH s'explique par la paupérisation de la majorité (près de 80%) de la population dont

l'activité principale et la source d'alimentaire demeurent l'agriculture qui reste tributaire des risques climatiques. (FAO,1991 ; MAAH,2018). Aussi, l'infertilité des sols et les attaques parasitaires la faible mécanisation, l'inaccessibilité au crédit, le manque d'assurance agricole d'autres causes indirectes de s'insécurité alimentaire au Burkina Faso (PNSAN, 2013).

Au Burkina Faso, les risques alimentaires sont plus récurrents au Nord où les terres sont très dégradées et la pluviométrie est déficitaire . Ces zones sont dans une situation d'insécurité alimentaire chronique amplifiée depuis 2015 par les attaques des terroristes. La figure 1 illustre le taux de couverture des besoins céréaliers de l'année 2017. En effet, en 2017, sur les 13 régions que compte le pays, seulement quatre régions dont les Haut-bassins, la Boucle du Mouhoun, le Sud-Ouest et le Centre-Sud étaient en situation d'équilibre avec un taux de couverture céréalière supérieur à 120% (ISND, 2020).

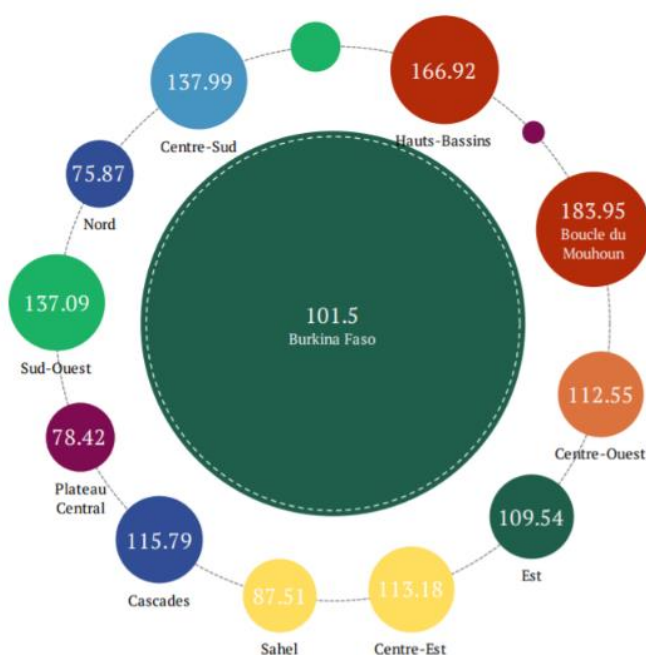


Figure 1: Couverture des besoins céréaliers en 2017

Source : [ISND, 2020](#)

1.3 Politiques de lutte contre l'insécurité alimentaire au Burkina Faso

La lutte contre l'insécurité alimentaire est une priorité pour Burkina Faso ; c'est pourquoi elle est en première ligne dans le Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté (CSLP, année). Conformément aux objectifs de CSLP, le gouvernement du Burkina Faso s'est assigné comme objectif de réduire de moitié le nombre de personnes souffrant d'insécurité alimentaire (PNSAN, 2013). Cette volonté du gouvernement de lutter contre insécurité alimentaire, se traduit par la mise en œuvre d'un ensemble de stratégies, de plans et de politiques pour l'alimentation au cours des deux dernières décennies.

En 2002, le pays s'est doté d'une Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire dont l'objectif est d'augmenter durablement le niveau de la production alimentaire nationale afin d'améliorer les conditions économiques et nutritionnelles des populations pauvres et des groupes vulnérables. Aussi, en 2012, le Burkina Faso a adhéré à l'Alliance Globale pour la Résilience au Sahel et en Afrique de l'Ouest (AGIR) lors d'une réunion sur les crises alimentaires au Sahel tenu à Bruxelles en Belgique. En 2015 le pays a validé le document Priorités Résilience Pays (PRP) dans le cadre de AGIR. Les PRP ambitionnent de réduire de moitié la pauvreté et l'insécurité alimentaire à l'horizon 2035 (PRP, 2015).

Afin d'atteindre les objectifs du PRP, le pays s'est donné pour mission de renforcer la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages et leur capacité de résilience face aux chocs et stress à travers la mise en œuvre de plusieurs politiques suivantes :

- la Politique Nationale de Protection Sociale (PNPS) pour la période 2013-2022, dont l'objectif est de contribuer au changement qualitatif des conditions de vie de toutes les couches sociales ;
- la Politique Nationale de Nutrition (PNN), dont l'objectif est de contribuer à l'amélioration de l'état de santé des populations ;
- le Programme National du Secteur Rural (PNSR II 2016-2020) pour une plus grande performance des politiques de développement agricole ;
- la Politique Nationale de Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle (PNSAN) qui constitue le référentiel en matière d'orientation de toutes les actions de promotion de la sécurité alimentaire et nutritionnelle ;
- les plans de soutien aux populations vulnérables aux crises alimentaires et nutritionnelles.

En dépit de ces politiques et plans, plusieurs projets et programmes interviennent afin d'améliorer la situation alimentaire de la population. Au niveau institutionnel, le Conseil National de Sécurité Alimentaire (CNSA) assure la supervision de la mise en œuvre des actions. Il œuvre à l'implication de tous les acteurs qui œuvrent dans la gestion de la sécurité alimentaire au plan structurel et conjoncturel (MAHRH, 2004).

1.4 Prévion de rendement

En agriculture, le rendement désigne la quantité de récolte obtenue par unité de surface qu'est hectare. Le rendement est fonction des facteurs agronomiques et climatiques. Prévoir le rendement, c'est être en mesure de donner une estimation de sa valeur avant la récolte (auteur). Au le Sahel, où l'agriculture est tributaire des variabilités climatiques, il est de plus en plus difficile pour les agriculteurs et les techniciens du monde rurale d'estimer en avance le rendement même si toutes les conditions agronomiques sont réunies. Or, la prévision de rendement agricole, lorsqu'elle est connue tôt, permet aussi bien aux agriculteurs qu'aux décideurs politiques d'anticiper des mesures de résilience pour des zones à risque alimentaire (auteur). Il existe plusieurs méthodes d'estimation des rendements agricoles. Genovese (1994) propose trois modèles pour prévoir le rendement d'une culture. Il s'agit de modèles heuristiques et mixtes, déterministes/pseudo-déterministes et empiriques statistiques.

Au Burkina Faso, la prévision du rendement est réalisée à partir des modèles mixtes (EPA,2009). Elle combine la variation de rendement attendu par l'agriculteur et celui obtenue par imagerie satellitaire à travers le ratio des indices de végétation selon la formule :

$$R = (1 + r^*) \times R_{t-1} \quad (1)$$

R étant le rendement attendu, R_{t-1} le rendement de la campagne précédente et r^* la variation attendue du rendement

$$r^* = (1 - \alpha) \times Rw + \alpha \times INDVICOR \quad (2)$$

$$Rw = \frac{Q}{1 + s} - 1 \quad (3)$$

$$s = \frac{S_t}{S_{t-1}} - 1 \quad (4)$$

Où :

Rw =variation des rendements attendue par le paysan

Q = ratio entre la production attendue et la production de la campagne précédente obtenue par la déclaration du producteur ;

s = variation des superficies de la campagne en cours par rapport aux superficies définitives de la campagne passée ;

INDICAOR = variation des rendements obtenue par les observations satellitaires de la végétation. C'est le ratio des indices de végétation entre la décade d'un mois donné (en octobre généralement) de la campagne en cours par rapport à la même décade du même mois de la campagne passée ;

α = coefficient de pondération dont la valeur est comprise entre 0,75 et 1 .

Bien que permettant une précision du rendement agricole, la prévision des rendements à partir de cette méthode est limitée dans un contexte de climat changeant. En effet, il existe plusieurs incertitudes autour des paramètres climatiques mais également biologiques (ravageurs) non encore maîtrisés par les agriculteurs et les scientifiques. Ces incertitudes pourraient constituer des biais dans la prévision de rendement attendu par l'agriculteur. Afin de réduire les incertitudes, et prendre en compte les variabilités des paramètres météorologiques et agrométéorologiques plusieurs modèles de prévision ont été développés. En rappels les modèles SPIRITS, GeoWRSI qui ont été utilisé au Niger, Benin et Sénégal par (Tossou, 2018 ; Peeters 2018 et Kane, 2019) et qui ont fournies des résultats satisfaisants.

Un modèle est une représentation simplifiée du fonctionnement du système complexe. Il est représenté le plus souvent sous forme d'une équation mathématique reliant les variables à étudier aux paramètres (Giere, 2004 ; Bahol, 2016). C'est cette approche de la prévision de rendement qui sera explorée dans le cadre de la présente étude à travers l'utilisation des outils tels que SPIRITS, GeoWRSI avec les images satellitaires comme le NDVI.

L'utilisation de ces outils présente plusieurs avantages en termes d'alerte précoce en sécurité alimentaire. En effet elle permet l'identification en un temps raisonnable des zones à risques d'insécurité alimentaire et d'anticiper les mesures de résilience compte tenu de la facilité d'accès des paramètres. Aussi la démarche est simple et utilise des données d'entrée et des logiciels libres et accessibles au grand public.

1.5 Généralité sur le sorgho

1.5.1.1 Taxonomie, morphologie et physiologie du sorgho

Le sorgho sous le nom scientifique *Sorghum bicolor* L. Moench, est une herbacée de la famille des Poaceae, sous famille des Panicoïdeae, tribu des Andropogoneae et du genre *Sorghum* (Doggett, 1988). Il est cultivé généralement pour ses grains et parfois comme fourrage. Il existe plusieurs variétés de sorgho. Toutefois certaines caractéristiques morphologiques permettent de le distinguer des autres céréales. En effet, le sorgho est une plante annuelle dont la tige principale peut atteindre 3 à 5m de long. Cette dernière d'une forme cylindrique avec une série de nœuds et entre-nœuds porte plusieurs feuilles et une inflorescence terminale en panicule compact comportant les grains (Jacques *et al.*, 2013). Composées de gaine, les feuilles sont dressées le long de la tige en alternance sur deux lignes. Le système racinaire du sorgho peut atteindre 110 à 130 cm de profondeur avec plusieurs ramifications (figure 2). Les caractéristiques morphologiques diffèrent suivant les variétés et les conditions agro-pédo-climatiques. Cinq principales races de sorgho sont à distinguer : **Bicolor** ; **Caudatum** ; **Durra**, Guinea, et Kafir. Au Burkina Faso, la race Guinea est majoritairement cultivé, représentant environ 93% des variétés locales (Zongo, 1991).

La croissance et le développement du sorgho se fait en trois phases suivantes : la phase végétative, la phase reproductive et la phase de remplissage et de maturation. La phase végétative débute de la germination jusqu'à l'initiation paniculaire. La germination survient quelques jours après le semis lorsque la température du sol est élevée (27°C en moyenne). Cependant elle peut aller jusqu'à dix jours lorsque la température est faible (inférieure à 11° C). La phase reproductive quant à elle, part de l'initiation paniculaire à la floraison. Elle débute par l'apparition des ébauches florales entre 30 à 40 jours après la germination. Enfin la phase de remplissage commence par la floraison, la fécondation des fleurs et se termine par la maturité physiologique.

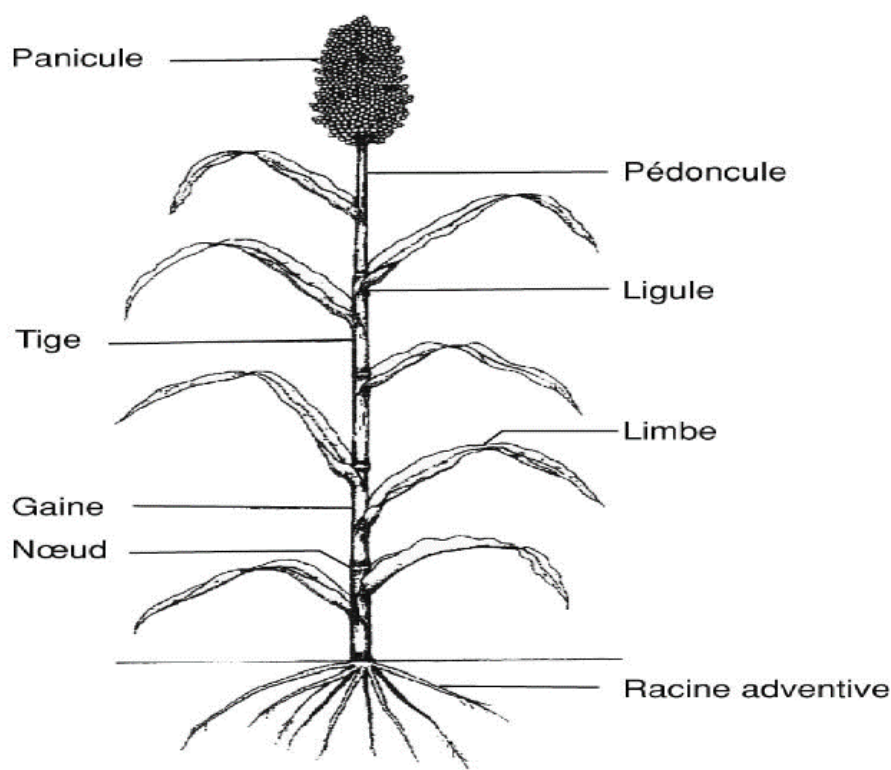


Figure 2: Morphologie d'un plant de sorgho

Source : Clerget, 2004

1.5.2 Besoins environnementaux du sorgho

Le sorgho est une plante moins exigeante en eau et peut être cultivé dans les conditions environnementales précaires. En effet la température optimale pour la croissance et le développement du sorgho est de 30°C avec un maximal de 42 °C (Jacques *et al.*, 2013). Les exigences thermiques des sorghos cultivés diffèrent d'une variété à l'autre. Le sorgho ne supporte pas les faibles températures. Lorsque la température est inférieure à 11°C, la croissance du sorgho s'arrête. Pour ce faire il est appelé une plante dite « C4 », ce qui lui confère une meilleure efficacité en conditions chaudes et sèches. En raison de son origine tropicale, le sorgho est photopériodique de jours courts. Quant aux besoins en eau, le sorgho est une plante moins exigeante en eau, il est adapté aux zones arides et semi-arides qui sont des zones où la pluviométrie est déficitaire. Selon Jacques *et al.*, (2013), les besoins en eau d'une culture pluviale de sorgho varient entre 400 mm pour une variété à cycle court (90 jours) contre 550-600 mm pour une variété de cycle long (110-120 jours). Le sorgho est une plante économe en eau, pour ce faire tolère le stress hydrique grâce à trois aptitudes qui sont : sa capacité (i) d'échappement permettant à la plante d'esquiver la sécheresse à travers son cycle, cela est rendu possible grâce à l'existence de variétés à cycles courts ou des variétés photopériodiques aux cycles bien calés sur la fin des saisons des pluies ; (ii) l'évitement lié au maintien d'un bon état hydrique des plantes en situation de stress hydrique, cette

capacité est assuré par le système racinaire profond et puissant du sorgho mais aussi par une bonne régulation de la fermeture des stomates ; (iii) la tolérance due à la capacité de la plante à rester fonctionnelles sous faible teneur en eau des tissus. Cette tolérance provient de la stabilité membranaire élevée (Jacques *et al.*, 2013).

Le sorgho peut être cultivé sur plusieurs type de sol, toutefois sa culture réussit mieux sur les sols limoneux et limono-sableux (Zolikpo, 2011). Le PH convenable pour la croissance et le développement du sorgho est compris entre 5,0 et 8,5 (House, 1987). Le sorgho s'adapte aux sols pauvres et peut produire des graines sur des sols où beaucoup d'autres cultures échoueraient (Chantereau *et al.*, 1997). L'importance et la profondeur de son système racinaire assure une capacité d'extraction des minéraux du sol supérieure à celle d'autres plantes comme le maïs (Jacques *et al.*, 2013).

1.6 Culture du sorgho et contribution pour la sécurité alimentaire au Burkina Faso

Au Burkina Faso, le sorgho est cultivé dans toutes les zones agroécologiques allant de Ouest jusqu'au Nord du pays où la pluviométrie est déficitaire. Il est souvent cultivé en association avec d'autres cultures comme les légumineuses. La production annuelle moyenne est estimé à 1,8 million de tonnes, soit environ 40 % de la production céréalière nationale. Le rendement moyen est de l'ordre de 800 kg/ha (MAAH, 2019). Ce chiffre couvre des disparités en fonction des zones de production et de système de production.

Le sorgho constitue la première céréale alimentaire au Burkina Faso. En effet, le sorgho est utilisé dans la fabrication de plusieurs mets locaux comme le tô ou *sabgo* en langue moré, un plat national. Le sorgho est également utilisé dans la fabrication de la bière locale appelé *Dolo*, *Dam* ou *Tchapalo* selon la région où l'on se trouve. En plus de nombreux autres mets sont fabriqués à base du sorgho : couscous, beignets, galettes, etc. Les grains du sorgho sont également consommés frais ou bouilli pendant les périodes de récolte ou pendant les périodes de soudure. Les tiges de certaines variétés du sorgho *bicolor* sont consommées en frais comme la canne à sucre. Les cendres servent à fabriquer la potasse alimentaire. Bien qu'il existe une variation interannuelle de la production totale du sorgho au Burkina Faso, la tendance générale montre une hausse de la production (figure 4).

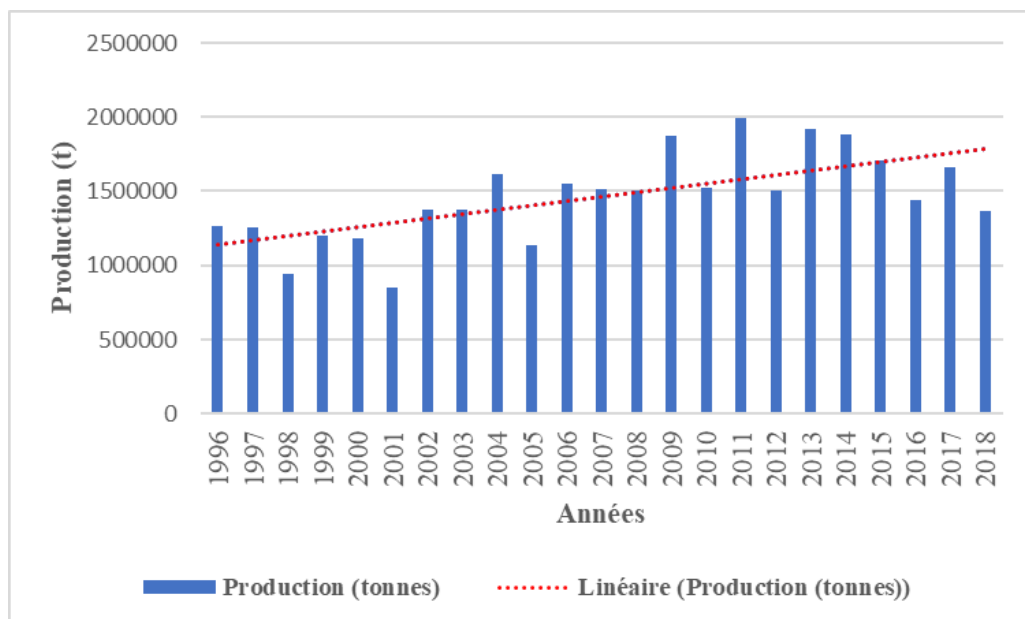


Figure 3: Evolution de la production du sorgho au Burkina Faso

Source : ISND (2020)

II. METHODOLOGIE

2.1 *Présentation de la zone d'étude*

2.1.1 *Situation administrative de la zone d'étude*

Le Burkina Faso est un pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest, situé dans la zone de transition entre les régions Sud-Soudaniennes (Côte d'Ivoire, Togo, Ghana au Sud, Benin au Sud-Est) et Sahélienne (au Nord et à l'Ouest le Mali, le Nord-Est le Niger). La zone de l'étude couvre les régions du Nord, du Centre Ouest et de la Boucle du Mouhoun. La figure n° 1 montre les limites administratives de la zone de l'étude. Le choix des régions (Nord, Centre-Ouest, Boucle du Mouhoun) s'explique par le fait qu'elles représentent la zone de production du sorgho suivant la variabilité agro-climatique du pays (Guinko, 1984 ; Zongo, 1991).

La région du nord dont le chef-lieu est Ouahigouya, est limitée à l'Est par les régions du Sahel et du Centre-Nord, à l'Ouest par la région de la Boucle du Mouhoun, au Sud par les régions du Centre-Ouest et du Plateau Central et au Nord par la République du Mali. Elle s'étend sur une superficie de 16 199 km², soit 5,9% de la superficie du territoire national et compte quatre provinces à savoir le Loroum, le Passoré, le Yatenga et le Zondoma.

D'une superficie de 34 162 km², la région de la Boucle du Mouhoun est située au Nord et à l'Ouest par le Mali, au Sud par les régions des Hauts Bassins et du Sud-Ouest et à l'Est par la région du Centre-Ouest. La région compte six provinces à savoir les Balé, les Banwa, la Kossi, le Mouhoun le Nayala et le Sourou (ISND, 2016).

D'une superficie de 21 891 Km² la région du Centre-Ouest est limitée à l'Est par les régions du Plateau Central, du Centre-Sud et du Centre, au nord par la région du Nord, à l'ouest par les régions de la Boucle du Mouhoun et du Sud-Ouest et au sud par Ghana. La région compte quatre provinces dont le Ziro, le Sanguié, le Sissili et le Boulkiédé (ISND, 2016).

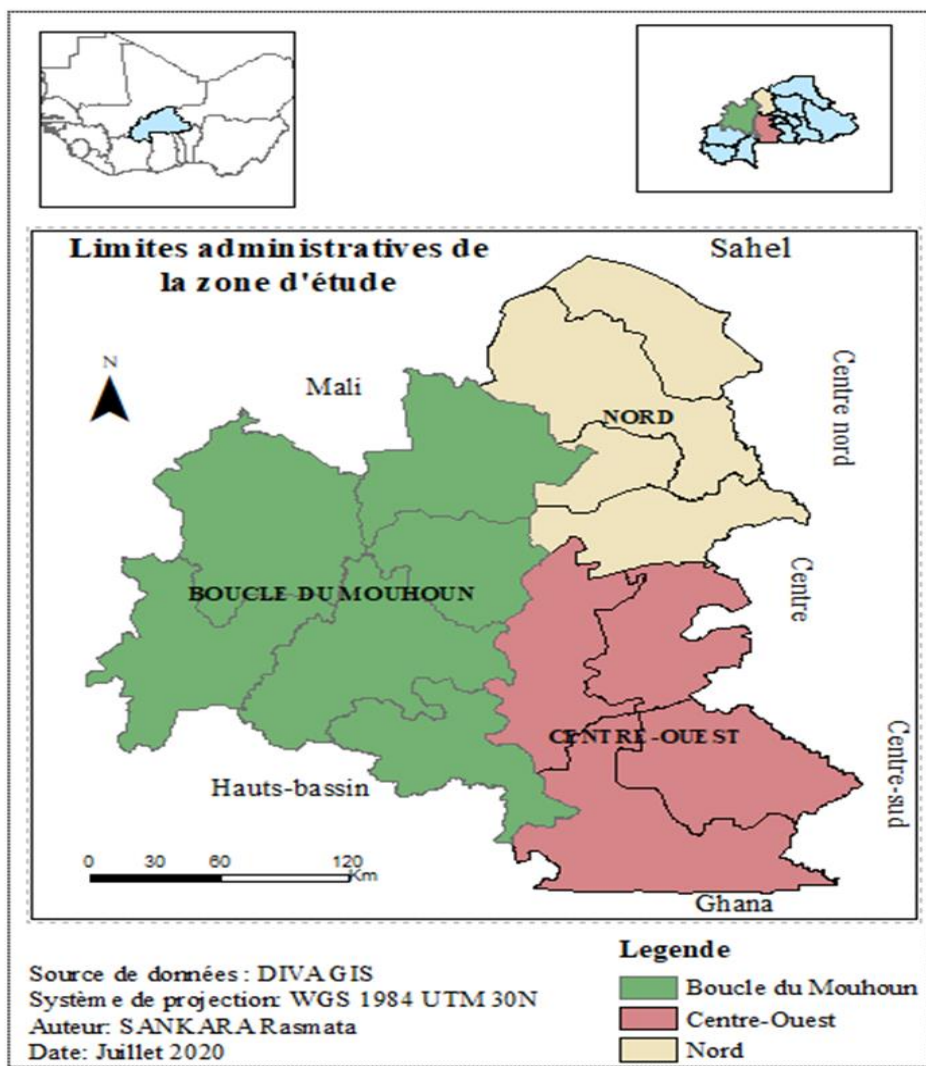


Figure 4: Limite administrative de la zone étude

2.1.2 Caractéristiques biophysiques et socio-économiques

Le Burkina Faso a un climat de type soudano-sahélien avec deux saisons à savoir : la saison des pluies avec des précipitations comprises entre 300 mm et 1 200 mm et la saison sèche durant laquelle souffle l'harmattan. La saison humide dure environ 4 mois, entre mai-juin et septembre. Toutefois il existe une disparité en fonction de la région et ce en fonction de la zone agro-climatique dans laquelle elle se trouve. Ainsi la région du Nord a un climat de type soudano-sahélien, caractérisé par l'alternance de deux saisons, une longue saison sèche allant généralement d'octobre à mai et une courte saison pluvieuse allant de juin à septembre. Ce climat est marqué par des précipitations faibles, irrégulières et inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 600 à 750 mm. Quant à la région de la Boucle du Mouhoun, elle a une pluviométrie allant de 500 mm à 1000 mm du Nord au Sud. Dans la région du centre-Ouest, la pluviométrie est comprise entre 700 mm à 1200 mm du nord au sud de la région.

Le Burkina Faso est caractérisé par deux types de relief. Une partie du pays est couvert par une pénéplaine. Elle forme un relief très légèrement vallonné avec par endroits quelques collines isolées, ultimes vestiges d'un massif du Précambrien. L'autre moitié du pays est formé par un massif gréseux. Notre zone d'étude s'identifie dans le premier type de relief. Sur le plan pédologique, les sols du Burkina Faso sont dans leurs ensembles pauvres avec des disparités du nord vers le sud du pays. Au Nord on distingue des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, à des sols ferrugineux tropicaux lessivés à pseudogley en bas de pente. Ce sont des sols profonds à texture sableuse à sablo-argileuse. Ces sols sont pauvres en éléments minéraux. Dans la région de la Boucle du Mouhoun on distingue quatre (4) types de sols : les sols ferrugineux remaniés, indurés sur matériaux gravillonnaire avec une capacité de rétention en eau très élevée ; les sols ferrugineux lessivés hydromorphes, très épais et lourds, rencontrés dans les plaines alluviales ; les sols sur cuirasse ferrugineuse d'une peu profond ; les lithosols sur cuirasse remaniée appauvrie. Quant à la région du Centre-ouest, les sols sont de types hydromorphes sur matériaux argilo sableux associés à des lithosols sur cuirasse, ferrugineux et les sols évolués sur matériaux gravillonnaires (MED, 2005)

Selon le recensement général de 2020, la population du Burkina Faso est estimée, à 21 510 181 habitants avec un taux d'accroissement de 3,1% (INSD, 2020).

L'agriculture est la principale source d'alimentation et de revenu de la population (République du Burkina, 2015). Les cultures céréalières (le maïs, mil, sorgho, et le riz) dominent avec environ 80% des terres cultivées. On retrouve aussi les oléagineux et la culture du cotonnier dont le Burkina Faso est l'un des plus grands exportateurs en Afrique. Les animaux d'élevages sont les bovin, ovin, les caprins, les volailles etc. La région de l'étude à l'instar des treize (13) régions que compte le pays ont pour activité principale l'agriculture et l'élevage.

2.2 Cadre théorique

Les rendements des cultures sont déterminés par plusieurs paramètres qui peuvent être appréhendés à partir des indicateurs météorologiques et agrométéorologiques, les données issues de la télédétection et l'estimation de la tendance (Bronne et *al.*, 2011). Selon l'auteur, à partir de ces paramètres, il est possible d'estimer les rendements à travers un modèle de prévision. La démarche consiste à rechercher un modèle de prévision des rendements du sorgho dans chaque province en mettant en évidence la corrélation entre les rendements historiques et différents déterminants qui sont des facteurs explicatifs. Cette approche méthodologique de prévision de rendements agricoles utilise la relation statistique empirique faisant appel à une

régression linéaire multiple. Généralement, le modèle de régression multiple de prévision des rendements d'une culture est formulé selon l'équation suivante :

$$Y = \textit{constante} + f1(\textit{tendance}) + f2(\textit{sortie modèle agrométeo} + f3(\textit{indicateurs de biomasse}) + \textit{erreur} \quad (5)$$

Avec :

- **Y** : le rendement estimé ;
- **f1 f2, f3** : les fonctions particulières ajustées aux sorties des différents sous modèles.

Les étapes de la prévision des rendements et les sous-modèles (GeoWRSI , SPIRITS) sont présents par la figure 5.

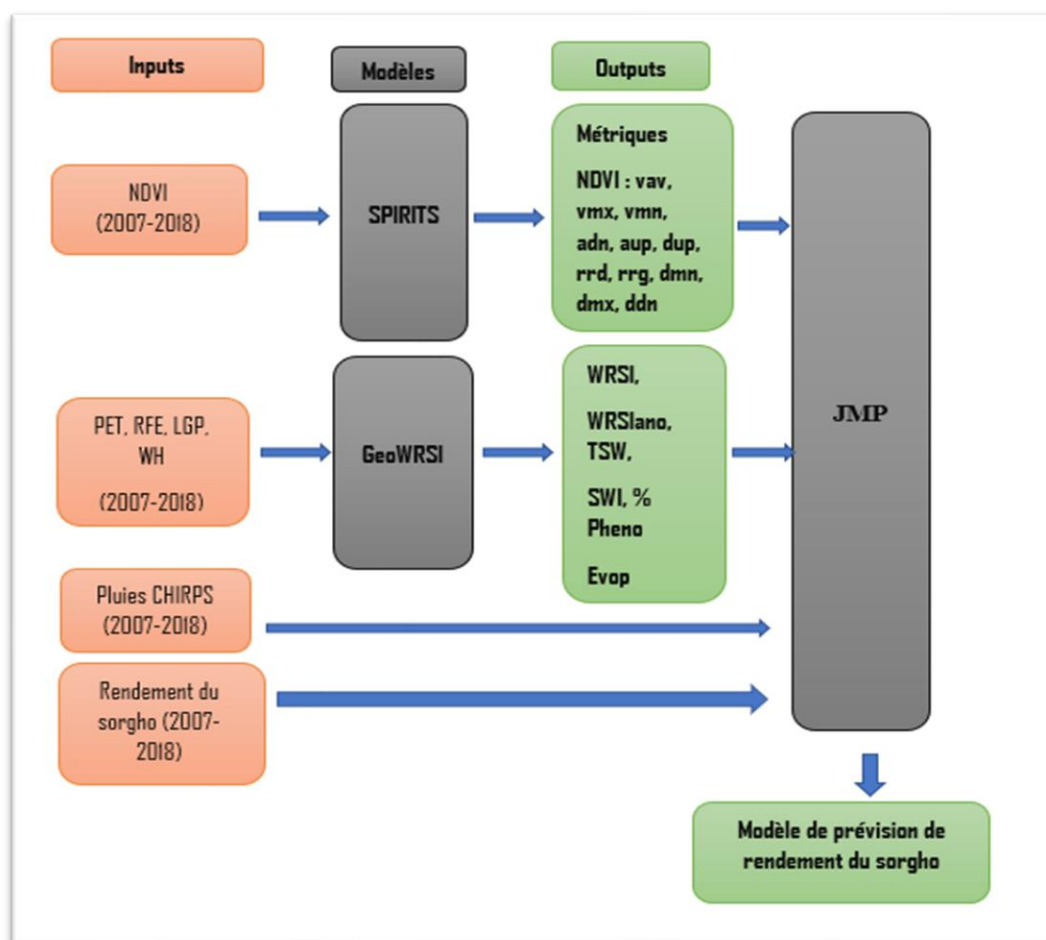


Figure 5: Schéma adapté de la méthodologie

Source : Auteur

Tableau 1 : Synthèse des variables utilisé dans la modélisation

Source de données	Variables
NDVI	vav, vmx, vmn, adn, aup, dup, rrd, rrg, dmn, dmx, ddn
GeoWRSI	WRSI1 ; WRSI2 ; WRSI3 ; WRSI4
	SWI1 ; SWI2 ; SWI3 ; SWI4
	TSW1; TSW2 ; TSW3; TSW4
	Evop1; Evop2 ; Evop3; Evop4
	%pheno EOS
	Anomaly WRSI EOS
Pluies CHIRPS	Pluies CHIRPS

NB : 1 : Phase initiale ; 2 : phase végétative ; 3 : phase de floraison / reproduction ; 4 : phase de maturation/ final ; EOS : fin de saison/ end of season

2.3 Analyse selon la régression linéaire multiples

L'analyse par régression linéaire multiple est une méthode statistique qui consiste à décrire les liens entre une variable quantitative dépendante et n variables quantitatives indépendantes. Dans le cadre de la présente étude, la régression multiple linéaire multiple selon la méthode pas à pas avec le logiciel JMP a permis de sélectionner les variables pertinentes dans la prévision du sorgho pour la construction des modèles. Les modèles ayant un coefficient de détermination élevé, dont les variables sont très peu corrélées entre elles avec un maximum de quatre variables sont retenues pour afin faire une validation croisée.

2.4 Validation

Un modèle de culture n'est une bonne représentation de la réalité que s'il peut être utilisé pour prédire un phénomène observable, dans une fourchette à l'intérieur de la gamme pour laquelle il est calibré et validé, avec suffisamment d'exactitude et une précision acceptables (Loague *et al.*, 1991). La validation permet donc d'estimer la fiabilité et la robustesse d'un modèle. Il existe trois méthodes de validation à savoir :

- La validation « **testset validation** » ou « **holdout method** » ou encore la validation non croisée. Dans cette méthode, l'échantillon de taille n est divisé par deux sous-échantillons. L'un dit d'apprentissage (supérieur à 60%) et l'autre dit de validation ou de test. Le modèle est construit sur l'échantillon d'apprentissage et validé sur l'échantillon de test, .
- La validation croisée à blocs, « **k-fold cross-validation** », on divise l'échantillon original en k échantillons (ou « blocs »), puis on sélectionne un des k échantillons comme ensemble de validation pendant que les $k-1$ autres échantillons constituent l'ensemble d'apprentissage. Après apprentissage, la performance de validation est évaluée. L'opération est répétée en sélectionnant un autre échantillon de validation parmi les blocs prédéfinis. À l'issue de la procédure nous obtenons ainsi k scores de performances, un par bloc. La moyenne et l'écart type des k scores de performances peuvent être calculés pour estimer le biais et la variance de la performance de validation.
- La validation croisée, « **leave-one-out cross-validation** » (LOOCV) : il s'agit d'un cas particulier de la validation croisée à k blocs où $k=n$. C'est-à-dire qu'à chaque itération d'apprentissage-validation, l'apprentissage se fait sur $n-1$ observations et la validation sur l'unique observation restante.

Compte tenu de notre la taille de nombre échantillon très réduite, la troisième méthode c'est-à-dire la validation « leave-one-out cross-validation » (LOOCV) a été appliqué afin de déterminer l'adéquation des différents modèles. Pour chaque modèles, le coefficient de détermination R^2 de validation, l'écart quadratique moyen (RMSE) et l'écart quadratique moyen relatif RRMSE sont évalués.

Le coefficient de détermination est un indicateur qui permet de juger la qualité d'un modèle. Sa valeur est comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre les rendements observés et les variables explicatives. Elle est calculée selon la formule :

$$R^2 = \sum_0^N \frac{(y_p - \bar{y})^2}{(y - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Où : N = nombre de mesures, y la valeur mesurée du rendement du sorgho, y_p = valeur estimée du rendement et \bar{y} = valeur moyenne mesurée du rendement.

Plus le coefficient est élevé plus la régression est pertinente (Scolab,2020). Selon Scolab,2020 Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points. Ce pendant lorsque le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points. Dans la présente étude, le modèle est considéré performant lorsque R^2 est supérieur à 0,50.

Quant au RMSE, il représente l'erreur entre la valeur prévisionnelle et la valeur mesurée. En d'autres termes le RMSE donne une indication de l'écart possible entre la valeur prédite par les modèles et la valeur réelle du rendement pour l'année considérée. Plus la valeur de RMSE est faible plus le modèle est performant. Le RMSE est évalué selon la formule :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Avec N le nombre de mesures, y la valeur de la mesure, y_i la valeur prédite correspondante et \bar{y} la moyenne des mesures. RRMSE évalue la valeur de l'écart entre le rendement mesuré et celui estimé en pourcentage.

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (8) .$$

2.5 Traitement et analyse des données

2.5.1 Sources des données

2.5.1.1 Rendements historiques

Dans le cadre de cette étude, les rendements historiques (de 2007 à 2018, soit 12 années) du sorgho sont fournis par l'enquête permanente agricole (EPA). L'EPA est un dispositif piloté par la Direction Générale des Etudes et Statistiques Sectorielles (DGESS) du Ministère en charge de l'agriculture sous le visa N° **AP2008002CNCS4** du 7 octobre 2008 conformément à la loi sur les activités statistiques nationales (EPA, 2009). Elle fournit et met à la disposition des utilisateurs des données structurelles et conjoncturelles qui permettent de caractériser les systèmes de production et les performances de l'agriculture (EPA, 2009). L'EPA se veut un outil d'aide à la prise de décision de la sécurité alimentaire dans la mesure où elle fournit les estimations du rendement et la production par spéculation et ce par province courant le mois de septembre.

L'enquête permanente agricole se fait en deux étapes. Une première enquête au mois d'Août et Septembre pour les prévisions saisonnières, et la seconde au mois d'Octobre à Décembre pour les résultats définitifs de la campagne.

Au total 706 enquêteurs, 72 contrôleurs, 12 superviseurs et l'équipe de coordination assurent la collecte des données. L'unité d'observation de L'EPA est le ménage agricole et concerne l'ensemble des ménages agricoles excepté ceux des communes urbaines en occurrence les treize (13) chef-lieu de région que compte le Burkina Faso. Le domaine géographique de l'EPA est la province et les résultats sont obtenus par sondage à deux degrés avec stratification au premier degré (village) et au second degré (ménage agricole).

2.5.1.2 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

L'indice de végétation par différence normalisé (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), est une mesure du bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par les objets sur la terre. Au niveau des plantes, cet indice établit une valeur mesurant l'intensité de vert d'une zone donnée, c'est-à-dire indiquant la masse de végétation présente dans celle-ci, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance. Le NDVI est donc un indicateur de l'état de phénologie des plantes et se construit à partir des canaux du rouge (R) et proche infrarouge (PIR). Le NDVI est déterminé selon la formule

$$NDVI = \frac{(PIR-R)}{PIR+R} \quad (9)$$

La valeur du NDVI est comprise entre -1 et 1. Le NDVI est utilisé depuis longtemps dans plusieurs domaines (Baret et Guyot, 1991 ; Rouse et al, 1974 ; Tucker et *al.*, 1981). Il sert à quantifier et suivre l'état de la végétation et de données d'entrer dans plusieurs modèles en occurrence les modèle de prévision de rendement, de suivi des pâturage COPERNICUS, (2016)

Dans le cadre de cette étude, les images NDVI décadaire utilisées proviennent des satellites l'Observation de la Terre (SPOT VEGETATION) pour les années 2007 à 2013 et de Project for On-Board Autonomy Vegetation (PROBA-V) entre 2014 à 2018 du programme européen **Copernicus** avec une résolution spatiale de 1 km.

Le programme Copernicus Global Land Service (CGLS) selon COPERNICUS, (2016) est destiné, en tant que composante du Land service, à exploiter "une composante de service polyvalente" qui fournit une série de produits bio-géophysiques sur l'état et l'évolution de la surface terrestre à l'échelle mondiale. Lancé en Avril 1998, avec le satellite l'Observation de la Terre (SPOT Vegetation), ce dernier sera remplacé à partir du 1^{er} Janvier 2014 par le satellite de Project for On-Board Autonomy Vegetation (PROBA-V). Le programme fournit plusieurs produits dont le NDVI.

Une analyse des images du NDVI à travers le logiciel SPIRITS permettra d'extraire les paramètres phénologiques caractérisant l'évolution de la saison de végétation. Au nombre de onze (11), ces paramètres phénologiques sont calculés pour chaque pixel de l'image, et sont présentés eux aussi sous forme d'image. Les onze paramètres phénologiques sont :

- **Vav** : Average value (or mean) ;
- **Vmn** : Minimum Value
- **Vmx** : Maximum Value
- **Aup** : Largest Increase (angle) between subsequent periods
- **Adn** : Largest Decrease (angle) between subsequent periods
- **Rsd** : Relative Standard deviation (with N as denominator, not N-1)
- **Rrg** : Relative Range (Maximum – Minimum)
- **Dmn** : Relative date of (first) Vmn
- **Dmx** : Relative date of (last) Vmx
- **Dup** : Relative date of (last) Aup
- **Ddn** : Relative date of (last) Adn

2.5.1.3 Les données d'entrées de GeoWRSI

Quatre données d'entrée sont utilisés pour faire tourner le modèle GeoWRSI : l'indice des précipitations (RFE), la longueur de la période de croissance (LGP), d'évapotranspiration potentielle (PET) décadaires, et la capacité de rétention en eau du sol (WHC). Ces données sont téléchargeables sur le site de FEWSNET(<https://earlywarning.usgs.gov>) Les images satellitaires du NDVI sont quant à elles disponible sur le site web du programme COPERNICUS (<https://land.copernicus.vgt.vito.be>). La fréquence temporelle de ses produits étant décadaire.

2.5.1.4 Données CHIRPS

Les données Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est l'estimation de les précipitations à partir des observations des pluviomètres et d'imagerie satellitaire. En effet depuis les années 1999, les scientifiques de Climatate, Hazard Center (CHC) l'USGS, soutenus par l'USAID, la NASA et de la NOAA, ont développé des techniques pour produire des cartes des précipitations, en particulier dans les régions où l'accès des données est une problématique ([Climate Hazard Center](#)). CHIRPS est fournie en plusieurs format (shp, cvs, xcl), et peut être utiliser dans les modèles de suivi environnemental. Dans le cadre de cette étude, les valeurs numériques décadaire de CHIRPS (2007- 2018) ont été téléchargés sur le site <https://clim-engine.appspot.com/climateEngine> avec une résolution de 4,8km. Ainsi, pour chaque province les valeurs de la pluviométrie CHIRPS de la période de croissance des cultures(du premier décade du mois de mois au troisième décade du mois de septembre) ont été calculé pour ensuite être utilisé dans la modelisation.

2.5.2 Analyse des données

2.5.2.1 L'analyse des données avec le logiciel GeoWRSI

Le GeoWRSI est un programme informatique développé par le FEWSNET, et permet de calculer l'indice de satisfaction des besoins en eau (WRSI). Le programme exécute un modèle de bilan hydrique spécifique à une culture pour une région sélectionnée en utilisant des données matricielles. Les résultats du programme peuvent être utilisés pour aider à évaluer et à surveiller qualitativement l'état des cultures pendant la saison de croissance mais aussi régressés avec les rendements pour développer des modèles d'estimation des rendements.

Afin de faire tourner GeoWRSI, quatre indicateurs servent de données d'entrée : l'indice des précipitations (RFE), la longueur de la période de croissance (LGP), d'évapotranspiration potentielle (PET) décadaires, et la capacité de rétention en eau du sol (WHC). Ces données sont téléchargeables sur le site de FEWSNET et le JRC. Plusieurs sorties sont fournies par le modèle, cependant six d'entre eux sont utilisés dans le cadre de notre travail que sont :

- Water Requirement Satisfaction Index (WRSI) qui représente l'indice de satisfaction des besoins en eau et est calculé selon la formule suivante :

$$RSI = \frac{\sum AET_c}{\sum PET_c} * 100 \quad (10)$$

$$PET_c = PET * K_c$$

Avec K_c le coefficient cultural ; AET représente la quantité d'eau réelle retirée du réservoir du sol.

- Anomalie relative du WRSI (WRSI anomaly) qui compare le WRSI d'une décade par rapport à l'image du WRSI climatologique (médiane du WRSI de toutes les années étudiées) lors de la configuration de la région ;
- Soil Water Index (SWI) qui représente la quantité d'eau disponible dans la zone racinaire de la plante par rapport à la capacité de rétention en eau du sol à une décade donnée.
- $SWI = \frac{SW_i}{WHC} * 100 \quad (11)$
SW la quantité d'eau dans le sol et i la décade donnée ;
- Total Surplus Water (TSW) qui mesure le surplus total en eau (mm) pour la plante pour chaque décade. Un TSW élevé est un indicateur d'inondation ou d'érosion hydrique.
- Pourcentage de phénologie ; il varie entre 0 et 100 et montre la progression phénologique de la plante du semis (0 %) jusqu'à la récolte (100 %).
- L'évapotranspiration représentant la quantité d'eau transpiré par la plante et perdu au niveau du sol.

Plusieurs versions de GeoWRSI existent, cependant dans le cadre de la présente étude nous avons utilisé la version 3.8.011.

2.5.2.2 Traitement des données avec SPIRITS

Le Software for the Processing and Interpretation of Remotely Sensed Image Time Series (SPIRITS) est un logiciel d'analyser des données d'Observation de la Terre (OT) développé par VITO pour le JRC. SPIRITS est un logiciel libre et téléchargeable sur le site de JRC

<http://spirits.jrc.ec.europa.eu>. Il permet d'analyser les séries temporelles d'images satellitaires de basse résolution comme SPOT-VEGETATION, PROBA-V, NOAA-AVHRR, METOP-AVHRR, TERRA-MODIS, ENVISAT-MERIS and MSG-SEVIRI (Garba, 2017). Dans le cadre de cette étude ce logiciel a servi à l'analyse des images NDVI, du FAPAR mais également pour l'analyse des paramètres météorologiques.

Ainsi, pour les images NDVI, nous avons procédé à une conversion des images en formant ENVI, le formant dont SPIRITS peut lire. Afin de réduire l'effet des facteurs atmosphériques comme les nuages, le vent, un lissage selon la méthode SWETS a été fait. La figures 6 illustre le NDVI lissé et non lissé à gauche et le NDVI lissé à gauche. Une valeur moyenne de chaque paramètre a été calculée pour chaque province ("Overall Mean"). Nous avons extrait les onze (11) paramètres phénologiques du NDVI de la période allant de la première décade du mois de mai jusqu'à la troisième décade du mois de septembre correspondant à la période de saison de production agricole au Burkina Faso.

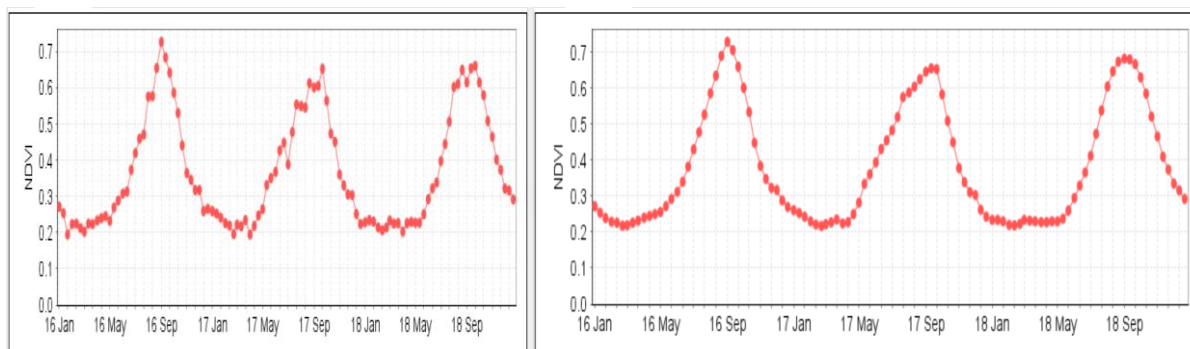


Figure 6 : Aperçu du NDVI non lissé et lissé

2.5.2.3 Analyse des données avec JMP

JMP est un programme informatique de statistiques mis au point l'Institut Statistical Analysis System. C'est un logiciel gratuit très pratique pour les analyses statiques. Le logiciel permet de lire différent format de fichier dont le fichier Excel. Pour l'analyse et le traitement des données, une base de données est établie sur Excel et ensuite envoyé sur JMP pour la modélisation. Il existe plusieurs versions du logiciel JMP, cependant dans le cadre de cette étude nous avons utilisé la version Pro 14.

2.5.2.4 Le logiciel ArcGis

ArcGis est un logiciel de cartographie développé par la firme américaine Environmental Systems Research Institute (ESRI). IL permet de gérer les informations géographiques. La version 10.4.1

a été utilisée dans le cadre de cette étude pour générer les différentes cartes à travers les données shapefiles téléchargés sur le site de la FAO et sur le site de diva GIS.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

L'analyse du profil de la végétation à travers le NDVI, du bilan en eau, de la pluviométrie, a permis de révéler les variables explicatives du rendement du sorgho dans chaque province et de construire les modèles de prévision de rendement. Les tableaux ci-dessous font la synthèse des résultats. Les modèles dans leurs ensembles sont composés de trois (03) variables à l'exception de ceux des provinces des Banwa et de Boulkiémdé qui compte quatre (04) variables explicatives (tableau 2). Les modèles sont globalement performant avec un coefficient de détermination (R^2 de validation) élevé et les valeurs de l'écart quadratique moyen relatif (RRMSE) sont faibles (tableau 3)

Tableau 2 : Synthèse des équations des différents modèles de prévision de rendement du sorgho

Provinces	Variables	Equation
Balé	ddn, rsd, pluies CHIRPS	$R(s) = -4617,31 + 58,75*ddn - 56,93*rsd + 1,18*PluiesCHIRPS$
Banwa	Adn, vav, TSW1, TWS2	$R(s) = 4750,71 + 772,11*adn - 7678,13*vav + 35,58*TSW1 - 8,68*TWS2$
Boulkiémdé	Pluies CHIRPS, Evap1, SWI3, SWI2	$R(s) = 1885,54 + 10*Pluies CHIRPS - 28,82*Evap1 - 8,54*SWI3 + 8,02*SWI2$
Kossi	vav, SWI1, TSW3	$R(s) = 958,94 + 5257,98*vav - 21,60*SWI1 + 1,18 TSW3$
Louroum	vav, vmn, WRSI2	$R(s) = -11148,87 + 19699,9*vav + 21946,82*vmn + 23,45*WRSI2$
Mouhoun	ddn, SWI3, TSW4	$R(s) = 5462,22 - 33,40*ddn - 15,04*SWI3 + 2,58*TSW4$
Nayala	adn, vav	$R(s) = -1242,88 + 483,07*adn + 5669,25*vav$
Passoré	adn, dup, rrg	$R(s) = -2155,84 + 730,76*adn + 17,95*dup + 58,26*rrg$
Sanguié	TSW4, WRSI2	$R(s) = -2673,95 + 5,30*TSW4 + 18,75*WRSI2$
Sissili	Evap1, WRSI2, TSW2	$R(s) = 3392,71 - 33,51*Evap1 - 5,36*WRSI2 - 7,39*TSW2$
Sourou	adn, vmx, TSW1	$R(s) = -1900,21 + 1506,91*adn + 5560,60*vmx - 83,04*TSW1$
Yatenga	vmx, SWI4, TSW2	$R(s) = 4,56 + 7306,49*vmx - 30,56*SWI4 + 12,87*TSW2$
Ziro	Adn, WRSI1, WRSI3	$R(s) = 2517,15 + 310,58*adn - 60,43*WRSI1 + 6,85*WRSI3$
Zandoma	rsd, WRSI4, TSW2	$R(s) = -9858,77 + 312,42*rsd + 28,63*WRSI4 + 36,57*TWS2$

Tableau 3 : Synthèse des indicateurs des modèles

Provinces	R ²	RMSE (Kg)	RRMSE (%)
Balé	0,63	99,82	8,26
Banwa	0,83	66,57	6,82
Boulkièmdé	0,41	116,94	16,59
Kossi	0,26	102,02	9,84
Louroum	0,60	176,18	16,32
Mouhoun	0,80	40,41	3,72
Nayala	0,27	159,30	16,8
Passoré	0,75	123,94	13,96
Sanguié	0,30	144,78	17,21
Sissili	0,65	89,44	8,06
Sourou	0,49	268,58	27,48
Yatenga	0,68	135,64	15,37
Ziro	0,82	75,90	6,60
Zandoma	0,55	269,51	25,14

3.1.1 Prédiction des rendements dans la région de la Boucle du Mouhoun

3.1.1.1 Province des Balé

Le modèle de prédiction du rendement du sorgho est globalement performant dans la province des Balé selon l'équation $R(s) = -4617,31 + 58,75 * \text{ddn} - 56,93 * \text{rsd} + 1,18 * \text{Pluies CHIRPS}$. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,63. Le RRMSE évalué à 8,26 % avec un RMSE de 99,82 kg indiquant une faible erreur dans la prédiction du rendement du sorgho. Le rendement simulé s'écarte de 99,82 kg de la moyenne des observations (figure 7). Les variables explicatives du rendement du sorgho dans cette provinces sont : Relative date of Adn(**ddn**), Relative Standard deviation (with N as denominator, not N-1)(**rsd**), Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (**pluies CHIRPS**).

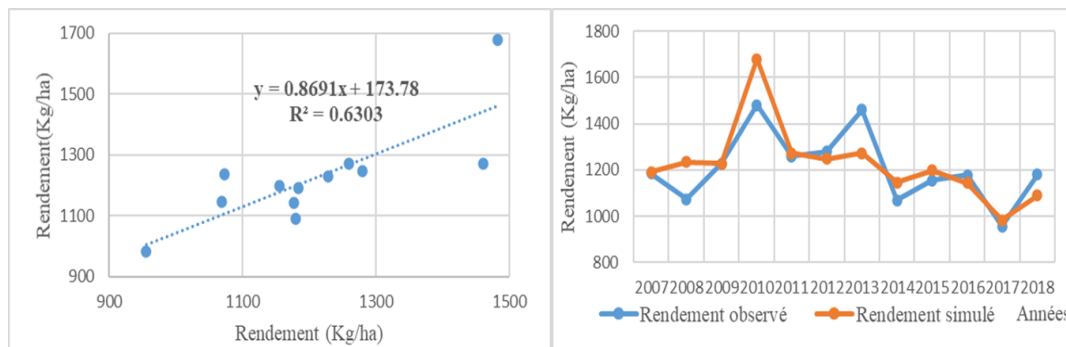


Figure 7: Modèle de prévision de la province du Balé

3.1.1.2 Province des Banwa

L'équation du modèle de prévision du rendement du sorgho dans la province des Banwa est $R(s) = 4750,71 + 772,11 \cdot \text{adn} - 7678,13 \cdot \text{vav} + 35,58 \cdot \text{TSW1} - 8,68 \cdot \text{TSW2}$. Le R^2 de validation est de 0,83, le RRMSE est de 6,82% indiquant un faible écart entre le rendement observé et simulé (figure 8) ; soit 66,57Kg la valeur de l'écart quadratique moyen (RMSE).

Les variables explicatives sont : largest Decrease (angle) between subsequent periods (**adn**) , Average value (or mean) (**vav**), Total Water Surplus à la phase initial (**TSW1**), Total Water Surplus à la phase vegetative (**TSW2**).

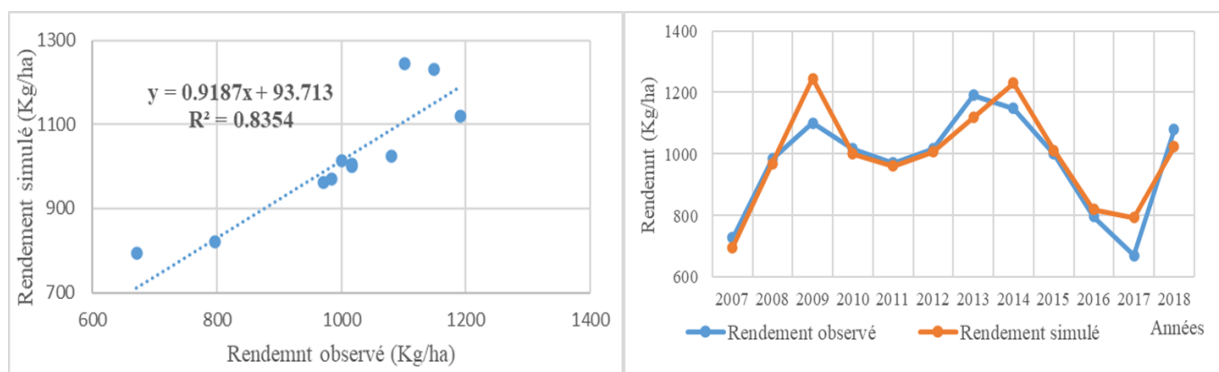


Figure 8 : Modèle de prévision de la province du Banwa

3.1.1.3 Province de Kossi

Dans la province de Kossi, le modèle de prévision du rendement du sorgho est moins performant avec un coefficient de détermination ($R^2 = 0,26$) inférieur à 0,5 selon l'équation $R(s) = 958,94 + 5257,98 \cdot \text{vav} - 21,60 \cdot \text{SWI1} + 1,18 \cdot \text{TSW3}$. Bien que le modèle soit moins satisfaisant, l'écart quadratique moyen relatif (RRMSE) reste faible soit 9,84% traduisant un faible écart entre le rendement observé et simulé. L'écart entre le rendement observé et celui simulé est évalué à 102,02 Kg (RMSE= 102,02 Kg) (figure 9).

Les variables pertinentes pour la prévision de rendement dans le Kossi sont Average value (**vav**), Soil Water Index en phase d'initiation (**SWI1**), Total Surplus Water en phase de reproduction (**TSW3**).

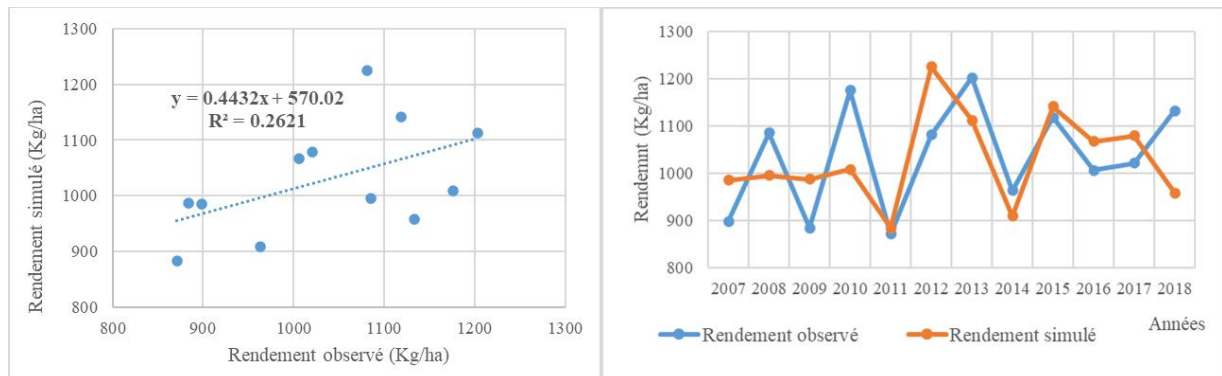


Figure 9 : Modèle de prévision dans la province du Kossi

3.1.1.4 Province de Sourou

Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,49$) montre que le modèle de prévision de rendement du sorgho est moins performant selon l'équation $R(s) = -1900,21 + 1506,91 \cdot \text{adn} + 5560,60 \cdot \text{vmx} - 83,04 \cdot \text{TSW1}$. La valeur de RMSE et le RRMSE sont élevés soit respectivement 268,58 kg 27,48%. Trois variables sont significativement corrélées au rendement du sorgho dans la province du Sourou. Il s'agit de : Maximum Value (**vmx**); Largest Decrease between subsequent periods (**adn**), Total Surplus Water à la phase initiale (**TSW1**)

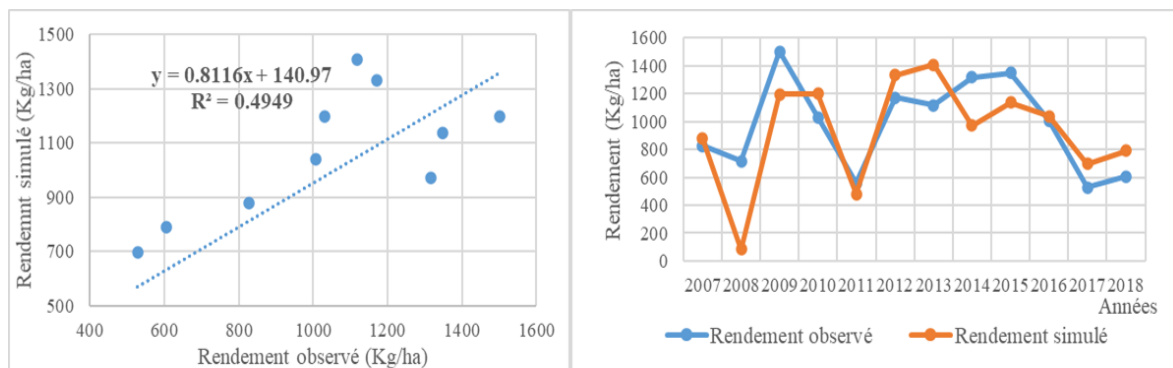


Figure 10 : Modèle de prévision de la province du Sourou

3.1.1.5 Province du Mouhoun

Le modèle de prevision dans la province du Mouhoun est très performant dans la mesure ou le coefficient de determination R^2 de validation est élevé et superieur 0,5($R^2 = 0,80$). $R(s) = 5462,22 - 33,40 \cdot \text{ddn} - 15,04 \cdot \text{SWI3} + 2,58 \cdot \text{TSW4}$.

L'écart quadratique moyen relatif dans cette province est de 3,72% traduisant un faible écart entre la moyenne du rendement observé et simulé. Lorsque ce modèle est utilisé pour la

prévision, il y'a seulement une différence de 40,41Kg (RMSE=40,41Kg) entre les rendements observé et simulé (figure 11).

Les variables explicatives sont les métriques phénologiques du NDVI et les sorties du GeoWRSI en particulier Total Surplus Water à la phase maturation (**TSW4**), Water Index à la phase de maturation (**SWI4**), et relative date of (last) Adn (**ddn**).

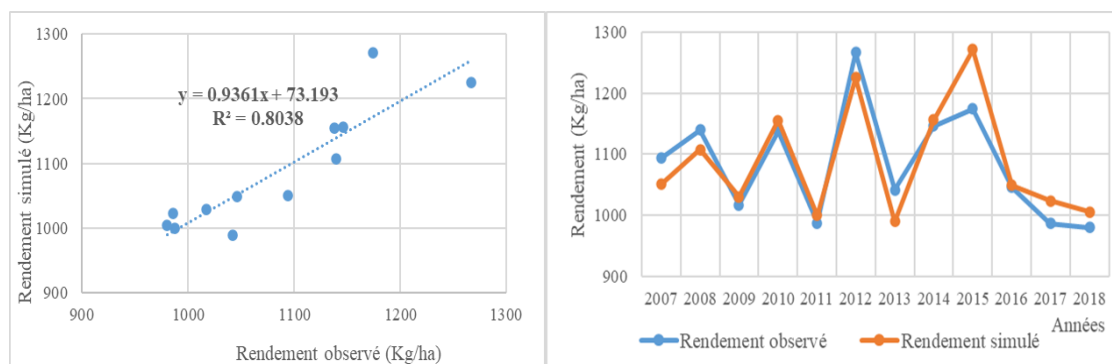


Figure 11 : Modèle de prévision de la province du Mouhoun

3.1.1.6 Province du Nayala

Dans la province du Nayala, le modèle de prevision est moins performant selon l'équation $R(s) = -1242,88 + 483,07 \cdot \text{adn} + 5669,25 \cdot \text{vav}$. Le R^2 de validation est de 0,27, traduisant une faible corrélation des variables explicatives au rendement. L'écart quadratique moyen (RMSE) est 159,30 Kg et l'écart quadratique relatif (RRMSE) vaut 16,8%. C'est-à-dire qu'en utilisant le modèle dans l'estimation de rendement du sorgho, une erreur de 16,8% est commise soit 159,30 Kg de différence entre la valeur observé et simulé (figur12). Dans la province du Nayala, seules les variables du NDVI expliquent le rendement du sorgho. Il s'agit de : Largest Decrease (angle) between subsequent periods (**adn**), Average value (**vav**).

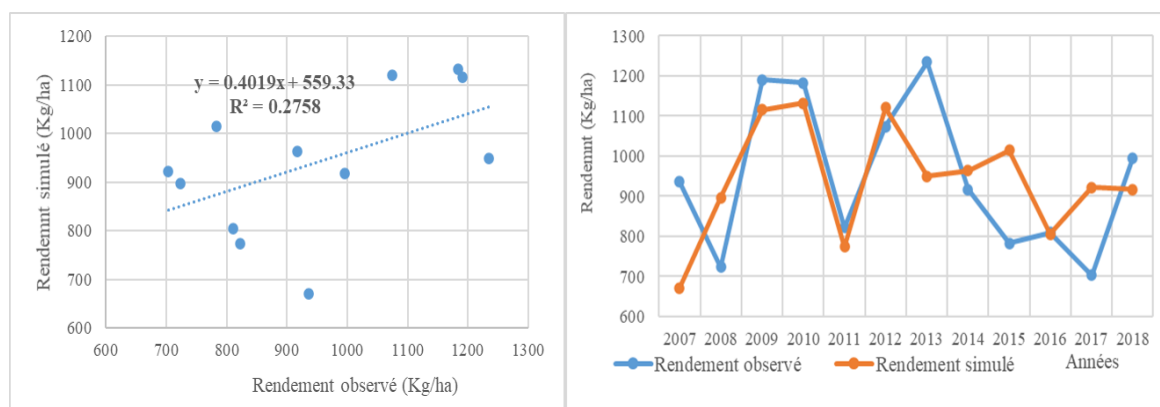


Figure 12 : Model de prévision de la province du Nayala

3.1.2 Prédiction dans la région du Centre-Ouest

3.1.2.1 Province du Boulkiemdé

Le modèle de prédiction de rendement du sorgho dans la province du Boulkiemdé, au regard de la valeur du coefficient de détermination, est moins performant ($R^2 = 0,41$). L'équation de la prédiction est $R(s) = 1885,54 + 10 \cdot \text{Pluies CHIRPS} - 28,82 \cdot \text{Evap1} - 8,54 \cdot \text{SWI3} + 8,02 \cdot \text{SWI2}$. L'écart quadratique moyen relatif vaut ($\text{RRMSE} = 16,59\%$). En effet, lorsque ce modèle est utilisé pour estimer le rendement du sorgho, il y'a un écart de 16,59% soit 116,94Kg ($\text{RMSE} = 116,94\text{Kg}$) (figure 13).

Dans la province de Boulkiemdé, quatre variables sont corrélées au rendement du sorgho : Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data **Pluies CHIRPS**), Evapotranspiration à la phase initiale (**Evap1**), Soil Water Index en phase de reproduction (**SWI3**), Soil Water Index en phase végétative (**SWI2**).

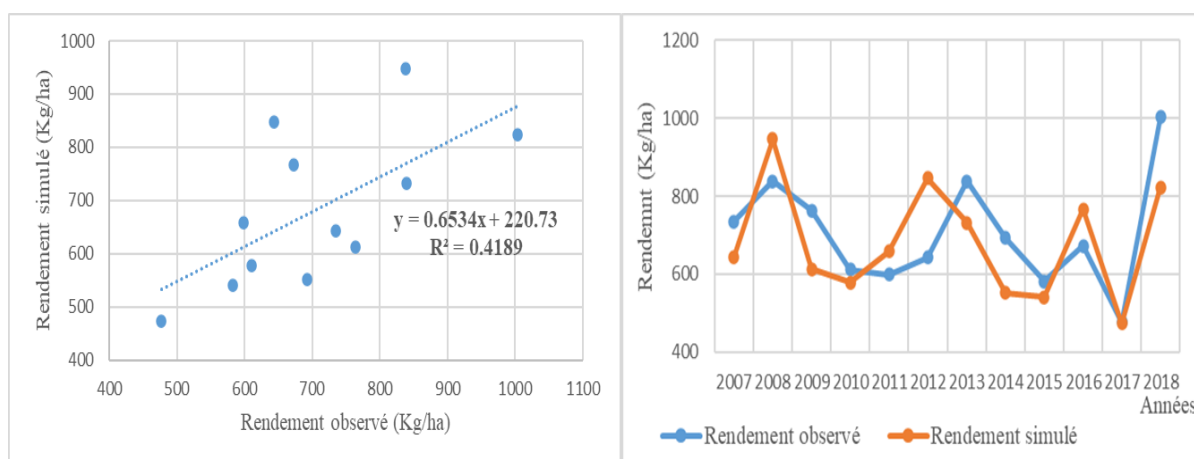


Figure 13 : Modèle de prédiction de la province du Boulkiemdé

3.1.2.2 Province du Sanguié

L'équation du modèle de prédiction du rendement du sorgho de la province du Sanguié est $R(s) = -2673,95 + 5,30 \cdot \text{TWS4} + 18,75 \cdot \text{WRSI2}$. Le R^2 de validation est de 0,30, le RMSE 144,78Kg et le RRMSE 17,21%. En appliquant ce modèle pour la prédiction de rendement du sorgho, une erreur de 10,59% est commise et le rendement simulé s'éloigne de celui observé de 85,01kg (figure 14).

Les variables explicatives du sorgho dans la province du Sanguié sont celle de GeoWRSI en particulier Total Water Surplus à la phase de maturation (**TSW4**) et le Water Requirement Satisfaction Index Inde à la végétative (**WRSI2**)

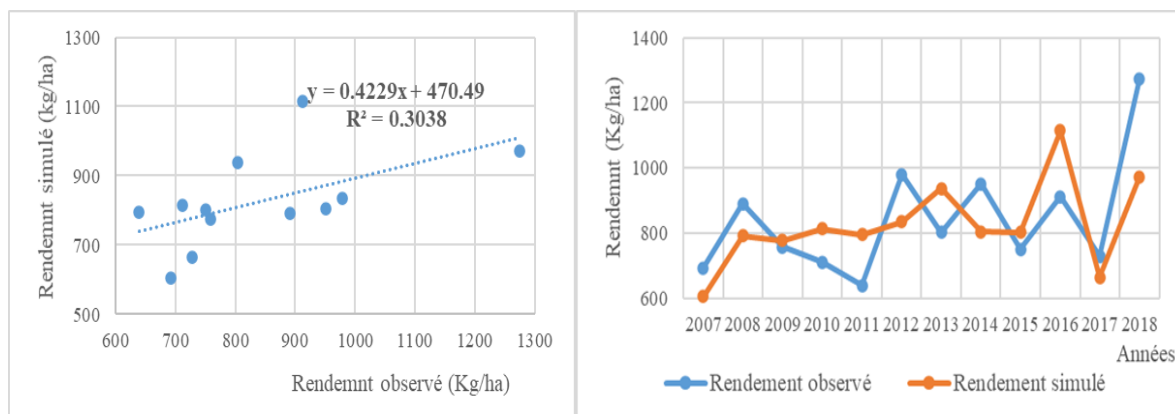


Figure 14 : Modèle de prévision dans la province du Sanguié

3.1.2.3 Province de la Sissili

L'analyse des données montre que le modèle de prévision dans la province de la Sissili est globalement performant avec un coefficient de détermination R^2 qui vaut 0,65. L'équation du modèle est $R(s) = 3392,71 - 33,51*Evap1 - 5,36*WRSI2 - 7,39*TSW2$. L'écart quadratique moyen (RMSE) est de 89,44 Kg et le RRMSE est de 8,06% (figure 15).

Les variables prédictives sont ceux de GeoWRSI, à savoir : Total Surplus Water à la phase végétative (TWS2), Total surplus water à la phase végétative (TWS2)

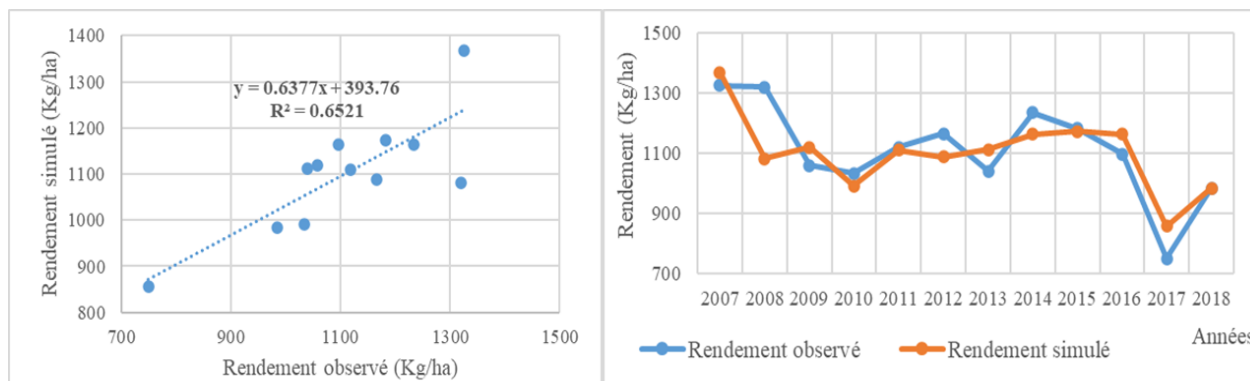


Figure 15 : Modèle de prévision de la province de la Sissili

3.1.2.4 Province de Ziro

Le modèle de prévision dans la province du Ziro, au regard de la valeur du coefficient de détermination est très performant ($R^2 = 0,82$). L'équation dudit modèle est la suivante $R(s) = 2517,15 + 310,58*adn - 60,43*WRSI1 + 6,85*WRSI3$. Le RMSE est 75,90Kg et le RRMSE 6,60%. Ces valeurs indiquent une bonne performance du modèle dans la mesure ou seulement une erreur de 6,60% est commise en utilisant ce modèle de prévision. Le rendement simulé s'éloigne de celui observé de 75,90Kg (figure 16). Le modèle est construit à travers les variables du GeoWRSI

et de NDVI en occurrence : Largest Decrease (angle) between subsequent periods (**adn**), Water Requierent Satisfaction Index en phase initiale (**WRSI1**), Water Requierent Satisfaction Index en phase de floraison (**WRSI 3**).

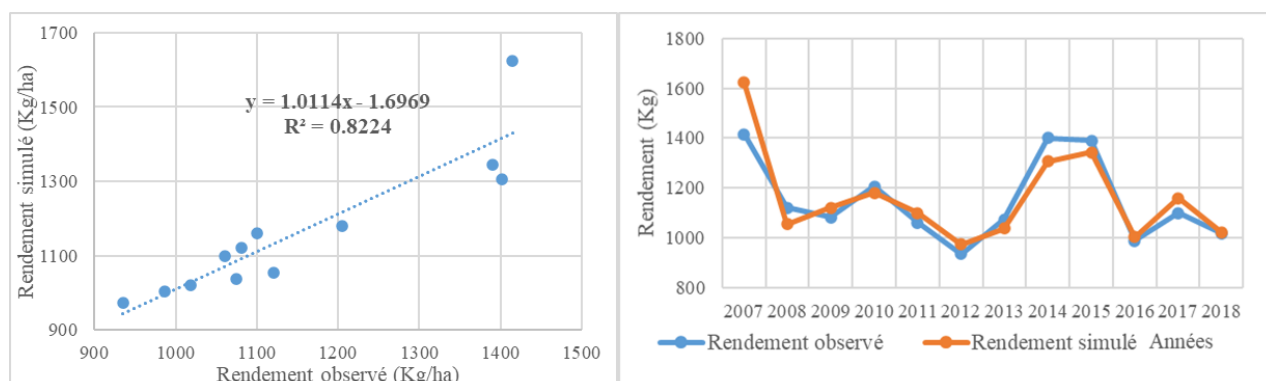


Figure 16 : *Modèle de prévision de la province de Ziro*

3.1.3 Prévision des rendements dans la région du Nord

3.1.3.1 Province de Louroum

Le modèle de prévision de rendement du sorgho dans la province de Louroum est performant selon l'équation $R(s) = 568,16 + 19,48 \cdot rrg + 70,44 \cdot vav$. Le coefficient de détermination R^2 est de 0,60. L'écart quadratique moyen (RMSE) du modelé est de 202,82 Kg et l'écart quadratique moyen relatif (RRMSE) 18,42%. Autrement dit, une erreur de 18,42% est commise lorsque ce modèle est utilisé pour prévoir le rendement du sorgho. Le rendement estimé s'éloigne de 202,82Kg du rendement mesuré (figure 12).

Dans la province du Louroum, , seuls les métriques phénologiques du NDVI expliquent le rendement du sorgho du relative range of NDVI (**rrg**) et du average value (**vav**).

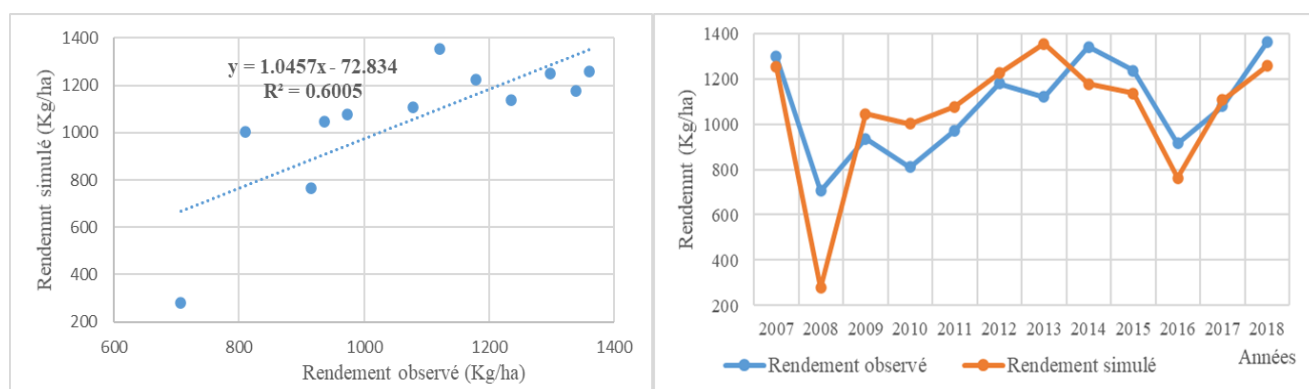


Figure 17 : *Modèle de prévision dans la province du Loroum*

3.1.3.2 Province du Yatenga

L'analyse des variables révèle que le modèle de prévision dans la province du Yatenga est globalement performant avec un coefficient de détermination R^2 de 0,68. L'équation du modèle est $R(s) = 4,56 + 7306,49*vmx - 30,56*SWI4 + 12,87*TSW2$. Le RMSE est égal à 113,41 Kg et le RRMSE vaut 15,37%. L'application de ce modèle induit une omission de 15,37% soit un écart de 135,64Kg entre le rendement observé et simulé (figure 18).

Les variables explicatives du rendement du sorgho dans la province du Yatenga sont celles de Maximum Value (**vmx**), Soil Water Index à la phase de maturation (**SWI4**) et Total Surplus Water en phase végétative (**TSW2**).

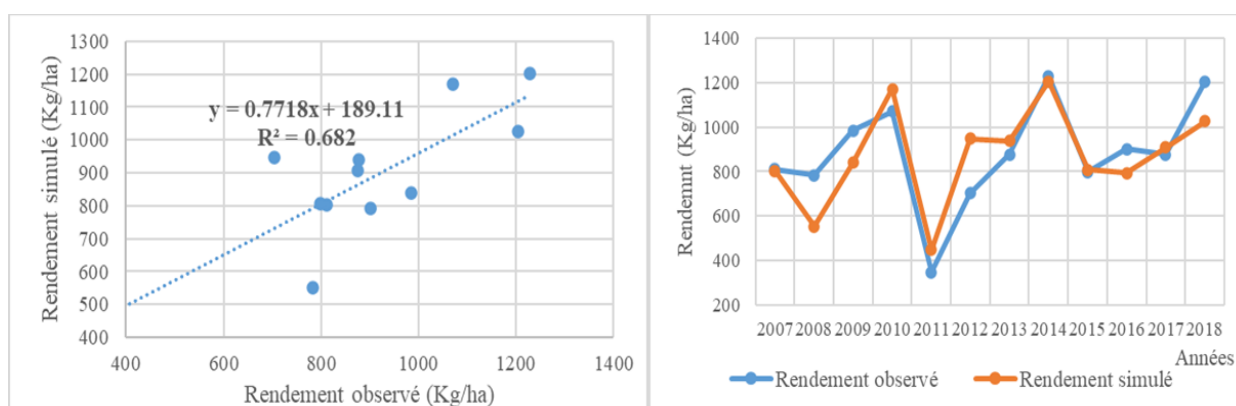


Figure 18 : Modèle de prévision de la province du Yatenga

3.1.3.3 Province de Zondoma

L'équation du modèle de prévision dans la province du Zondoma est $R(s) = - 9858,77 + 312,42*rsd + 28,63*WRSI4 + 36,57*TWS2$. Le coefficient de détermination R^2 évalué à 0,55. Les valeurs du RMSE (269,51 Kg) et le RRMSE (25,14%) restent élevés. Bien que le modèle soit globalement performant, il y'a une erreur relativement élevée (25,14%) lorsqu'il est utilisé dans la prévision du rendement du sorgho. Le rendement simulé s'éloigne de 269,51Kg de celui observé (figure 19)

Trois variables sont corrélées au rendement du sorgho dans la province du Zondoma. Il s'agit : : Relative Range (**rrg**) ; Water Requierent Satisfaction Index Index à la phase de maturation (**WRSI4**) et le Total Surplus Water à la phase végétative (**TSW2**).

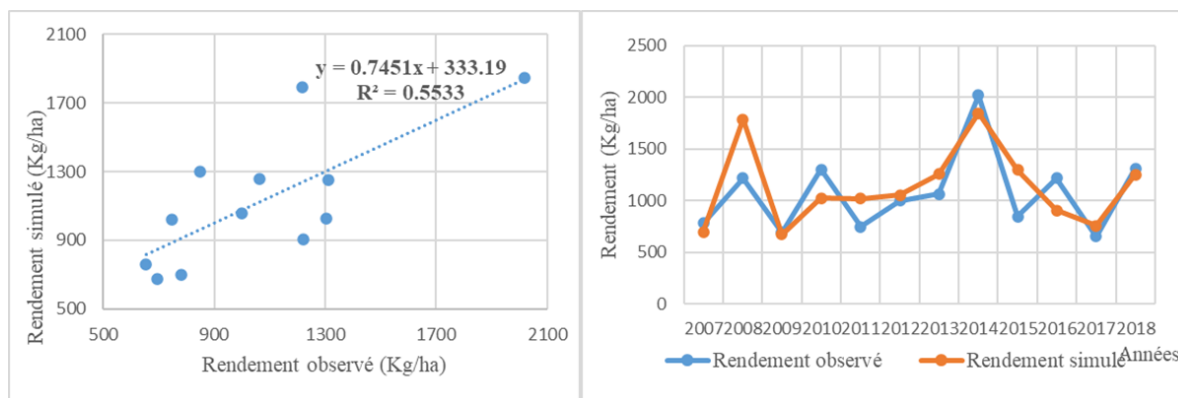


Figure 19 : Modèle de la province du Zondoma

3.1.3.4 Province du Passoré

Le modèle de prévision dans la province du Passoré est performant selon l'équation $R(s) = -2155,84 + 730,76 \cdot \text{adn} + 17,95 \cdot \text{dup} + 58,26 \cdot \text{rrg}$. Le R^2 de validation est de 0,75. L'erreur entre le rendement observé et simulé vaut 13,96% (RRMSE= 13,96%). Le rendement simulé s'éloigne de celui observé de 123,94 Kg (RMSE=123,94 Kg) (figure 20). Dans la province du Passoré, seules les variables du NDVI expliquent mieux le rendement du sorgho. Il s'agit de : Largest Decrease (angle) between subsequent periods (**adn**), Relative date of (last) Aup(**dup**), : Relative Range (**rrg**) .

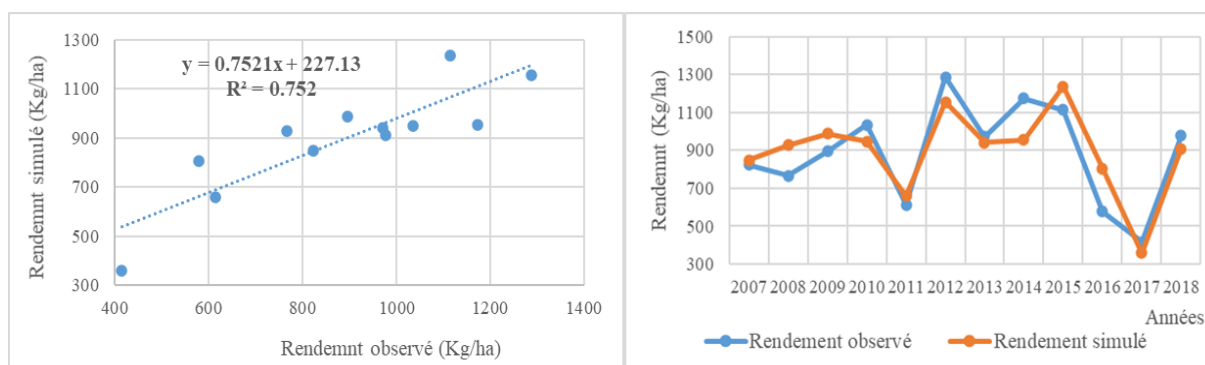


Figure 20 : Modèle de prévision dans la province du Passoré

3.1.4 Contribution des variables dans les différents modèles

Globalement, les résultats des modèles de prévision montrent que les variables suivantes sont significativement corrélées au rendement du sorgho : Largest Decrease (angle) between subsequent periods (**adn**), Total Surplus Water à la phase végétative (TSW2), Average value (**vav**). Cela se traduit par une apparition à une fréquence de 5 pour **adn**, et 4 pour les deux autres. Les autres variables sont moyennement ou faiblement corrélées au rendement, avec une fréquence de 2 et 3, soit faiblement corrélées avec une fréquence de 1. Le tableau 4 fait la synthèse de la fréquence d'apparition des variables.

Tableau 4: Fréquence d'apparition des variables

Provinces	adn	ddn	dup	rrg	rsd	vav	vmm	vmx	Pluie CHIRPS	Evap1	SWI4	SWI1	SWI3	SWI2	WRSI4	WRSI1	WRSI3	WRSI2	TSW4	TSW1	TSW3	TSW2
Balé		x			x				x													
Banwa	x					x														x		x
Boulkiémde									x	x			x	x								
Kossi						x					x										x	
Loroum						x	x											x				
Mouhoun		x											x						x			
Nayala	x					x																
Passoré	x		x	x																		
Sanguié																		x	x			
Sissili										x								x				x
Sourou	x							x												x		
Yatenga								x			x											x
Ziro	x															x	x					
Zondoma					x										x							x
Total	5	2	1	1	2	4	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	3	2	2	1	4

3.2 Discussion

3.2.1 Prédiction des rendements du sorgho

L'analyse des résultats révèle deux types de modèles à savoir les modèles **mixte** et **pur**. Le modèle mixte est constitué de trois catégories de données ; la première catégorie dont l'équation est formulée à travers la combinaison des métriques phénologiques du NDVI et les variables de GeoWRSI, comme ceux des provinces du Banwa, Kossi, Louroum, Mouhoun, Sanguié, Sourou, Ziro et le Zondoma. La seconde catégorie est constituée par la combinaison des métriques du NDVI, et les pluies CHIRPS c'est le cas du modèle de la province du Balé. La troisième catégorie est construite à travers la combinaison des variables issues de GeoWRSI et le pluies CHIRPS en occurrence le modèle de la province du Boulkiemdé. Les modèles **purs** sont spécifiquement construits à partir des variables phénologiques du NDVI comme celui des provinces du Nayala et Passoré, ou par les variables issues de GeoWRSI en l'occurrence les modèles du Sanguié et de la Sissili.

L'analyse des performances des modèles révèle qu'ils sont dans leur ensemble fiables et robustes. Les RRMSE sont, dans la majorité des provinces inférieur à 15%. L'analyse des données révèle que le rendement du sorgho est fortement corrélé aux variables phénologiques du NDVI et du bilan en eau. Dans l'ensemble, les modèles sont globalement performants. Toute fois les plus performant restent les modèles mixtes en occurrence ceux des provinces du Banwa, Mouhoun, et Ziro avec un R^2 de validation élevé soit respectivement 0,83 ; 0,80 et 0,82. Cela témoigne l'intérêt de coupler les variables issues de l'observation de la terre et les données agrométéorologiques. Quant à RRMSE, sa valeur reste faible pour ces trois provinces ; soit 6,82 % dans la province des Banwa; 3,72% au Mouhoun et 6,60% au Ziro . Autrement dit, lorsque ces modèles sont utilisés pour prévoir le rendement du sorgho une erreur de 6,82 %; 3,72% et 6,60% est commise respectivement dans la province des Banwa, Mouhoun et le Ziro. Le rendement simulé s'écarte de celui mesuré de 66, 37 kg dans les Banwa, de 40,44 Kg au Mouhoun, et de 75,90 Kg au Ziro.

Par ailleurs, les modèles des provinces du Sourou et du Zondoma enregistrent des moins bonnes performances avec des valeurs du RRMSE relativement élevé soit 27,48% pour le Sourou et 25,14% dans le Zondoma. Ces valeurs pourraient s'expliquer par une très grande variation interannuelle du rendement du sorgho.

3.2.2 Déterminants du rendement du sorgho

L'analyse des variables explicatives montre une forte corrélation des métriques phénologiques de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) au rendement du sorgho. Cela se

traduit par l'apparition récurrentes des variables comme : largest decrease (angle) between subsequent periods (**adn**), Average value (**vav**) dans les équations de prévision. Nos résultats corroborent à ceux de Aïssan, 2018 et Kane, 2019. En effet ces auteurs à travers leurs travaux ont montré que les métrique phénologiques du NDVI sont pertinents dans la prévision des rendements agricole surtout lorsqu'elles atteignent leur maximum. Ainsi, ils ont obtenu des modèles de prévisions performants du sorgho, l'arachide et le coton avec les métriques du NDVI. Selon *Balaghi et al., (2009)*, le NDVI reflète mieux l'état de la végétation dans les zones semi-arides où le climat agit fortement sur les plantes où les variations interannuelles du climat sont importantes. Bartholomé, (1990) dans ses travaux a montré que le NDVI décrit deux tiers (2/3) de la variabilité du rendement du sorgho au Burkina surtout lorsqu'il atteint son maximum au cours du mois de septembre.

Au niveau du bilan en eau du GeoWRSI, se sont les variables Water Requirement Satisfaction Index Index à la phase végétative (**WRSI2**), Total Surplus Water à la phase végétative (**TSW2**) qui sont plus corrélés au rendement du sorgho. Cela se traduisant par leur présence récurrente dans les équations de prévision. En effet, Peeters (2018) et Tossou (2018) dans leurs travaux ont montré que les variables de l'indice de satisfaction en eau des plantes de GeoWRSI sont fortement corrélées au rendement agricole. Les travaux de modélisation menés par Peeters (2018) sur le sorgho avaient conduit à des modèles fiables et robuste avec le bilan en eau de GeoWRSI. Ces résultats pourraient s'expliquer par le rôle essentiel que joue l'eau dans la croissance et le développement de la plante. En effet, l'eau assure le transfert des élément minéraux de la racine vers les autres organes de la plante. Elle participe également à la photosynthèse un processus physiologique responsable de la production de la matière sèche selon l'équation :



Selon *Benza (2013)*, la croissance cellulaire des plantes ne peut être assurée que si le potentiel hydrique de la plante est supérieur à un potentiel hydrique critique. Selon l'auteur, lorsque les besoins en eau de la plante ne sont pas satisfaits, cela peut compromettre son développement ainsi que le rendement, et cela en fonction du stade de développement. La FAO (1987), dans son livre « *la réponse des rendements à l'eau* » a montré que le déficit hydrique pendant la période de floraison du sorgho empêche la pollinisation et fait éclater les épis entraînant ainsi une baisse de rendement. Lorsque les besoins en eau du sorgho sont satisfaits, elle est capable de donner son potentiel agronomique qu'est le rendement.

Les variables du bilan en eau de GeoWRSI et les métriques phénologiques de NDVI étant obtenues bien avant les récoltes, cela assure une précocité des modèles très raisonnable. Cela veut dire que pour une saison non encore écoulée les rendements peuvent être obtenus au plus tard après la phase de maturation. De ce fait ces modèles peuvent contribuer à une alerte précoce, une composante essentielle dans la gestion des risque et catastrophe lié à l'insécurité alimentaire.

CONCLUSION

Au Burkina Faso, l'agriculture est pluviale et soumise aux effets néfastes des variabilités climatiques qui occasionnent des pertes de production dont la conséquence est l'insécurité alimentaire. La problématique de l'accès de la population à une alimentation se pose avec acuité au regard des risques climatiques auxquels le pays est confronté. Pour lutter efficacement contre l'insécurité alimentaire il faut un dispositif d'alerte précoce dont la prévision de rendement est une composante principale. Le rendement lorsqu'il est connu tôt, permet d'anticiper les mesures de résilience dans les zones de déficits céréaliers. Cette étude dont l'objectif est de prévoir le rendement du sorgho avec les outils GeoWRSI, SPIRITS et les images NDVI a permis de construire des modèles de prévision dans 14 provinces à savoir : Balé, Banwa, Boulkiemdé, Kosi, Louroum, Mouhoun, Nayala, Passoré, Sanguié, Sissili, Sourou, Yatenga, Ziro, Zondoma.

Dans l'ensemble, les modèles sont globalement performants. Toutefois les plus performants restent les modèles mixtes en occurrence ceux des provinces du Banwa, Mouhoun, et Ziro avec un R^2 de validation élevé soit respectivement 0,83 ; 0,80 et 0,82. Quant à RRMSE, sa valeur reste faible pour ces trois provinces ; soit 6,82 % dans la province des Banwa; 3,72% au Mouhoun et 6,60% au Ziro . Autrement dit, lorsque ces modèles sont utilisés pour prévoir le rendement du sorgho une erreur de 6,82 %; 3,72% et 6,60% est commise respectivement dans la province des Banwa, Mouhoun et le Ziro. Le rendement simulé s'écarte de celui mesuré de 66, 37 kg dans les Banwa, de 40,44 Kg au Mouhoun, et de 75,90 Kg au Ziro. Toutes fois les modèles des provinces du Sourou et du Zondoma enregistrent des moins bonnes performances avec des valeurs du RRMSE relativement élevées soit 27,48% pour le Sourou et 25,14% dans le Zondoma.

Au regard des résultats, nous concluons que les variables du NDVI et de GeoWRSI sont fortement corrélées aux rendements du sorgho et les modèles construits sont performants et robustes. Ces modèles peuvent contribuer à la lutte contre l'insécurité alimentaire à travers une alerte précoce. De ce fait, les recommandations formulées sont les suivantes :

- l'expérimentation de la méthode sur les cultures comme le mil, le maïs et le riz au Burkina Faso ;
- l'application de la méthode sur l'ensemble du pays, et au niveau décentralisé (les communes), pour plus d'efficacité en termes de prévision des risques liés à l'insécurité alimentaire;

BIBLIOGRAPHIE

- Bahol B., 2016.** Système informatique d'aide à la modélisation mathématique basé sur un langage de programmation dédié pour les systèmes dynamiques discrets stochastiques. Application aux modèles de croissance de plantes. 182p.
- Bronne, C. E., Wellens, J., Midekor, A. A., Diakité, M., Denis, A., & Tychon, B. (2011).** Prévion des rendements agricoles. Guide d'utilisation. 73 p.
- Challinor, A., Wheeler, T., Garforth, C., Craufurd, P., & Kassam, A. (2007).** *Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. Climate Change*, 83, 381–399. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9249-0>
- CILSS., 2004,** Vingt ans de prévention des crises alimentaires au Sahel, Bilan et perspectives, 88 p.
- CILSS, 2009,** Tableau de bord des indicateurs nationaux et régionaux de sécurité alimentaire, 7p.
- CCNUCC, 1992. Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques; articles et définitions, NU, New York
- Damska, I. 1959.** Le concept de modèle et son rôle dans les sciences. *Revue de synthèse*, 30, 39-51.
- MAAH, 2019:** Résultats de Enquête Permanente Agricole 2019
- FAO, 2008.** Introduction aux concepts de la sécurité alimentaire. Presented at the Sommet mondial de l'alimentation, 1996, FAO, p. 4
- FAO, 2011.** Stratégie de gestion des risques de catastrophe en Afrique de l'Ouest et au Sahel. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- EPA, 2008 ;** Manuel de l'enquête permanente agricole campagne 2007 – 2008. 113P
- EPA, 2009.** Méthodologie de l'enquête permanent agricole de la campagne 2008/2009.
- FAO et OCHA, 2014.** Système d'alerte Précoce au niveau communautaire, Pratiques clés pour les praticiens de la Reduction des Risques et Catastrophes, 36p.
- FAO, 2016.** Paix et sécurité alimentaire : investir dans la résilience pour soutenir les moyens d'existence en milieu rural en situation de conflit. 28p.
- FAO., 2017a.** Vue d'ensemble régionale de la sécurité alimentaire et la nutrition : le lien entre les conflits et la sécurité alimentaire et la nutrition : renforcer la résilience pour la sécurité alimentaire, la nutrition et la paix 116p.
- FAO., 2017b.** Les mécanismes communautaires de réduction des risques de catastrophe pour les moyens d'existence résilients au Sahel, 48 p.

FAO.,2018. Crop-water productivity model to simulate yield response to water. Aquacrop version 6.0-6.1 25p.

FAO., 1976. Déclaration de Rome sur la sécurité alimentaire mondiale et Plan d'action du SMA. Sommet Mondial de l'alimentation 13-17 Novembre 1996. Rome ;

FOA et ICRISAT., 1997. : L'économie mondiale du Sorgho et du Mil. 152p

Genovese, G., 1994, « Prévision des rendements et méthodes opérationnelles utilisant la télédétection : aperçu des méthodes et des applications opérationnelles en 1994 dans l'Union européenne » Méthodes de prévision agricole des rendements agricoles (Villefranche-sur-mer), 77-86 pp.

Guinko S., 1984. Végétation de la Haute-Volta. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III (France) 394 P.

GIEC, R., 2014. Changements Climatiques 2014 : Rapport de Synthèse.180p

GIEC., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Equipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.] (GIEC, ed.). Genève, Suisse 114p

Giere, R. N., 2004. How models are used to represent reality. Philosophy of Science, 71, 742-752

House, L., R., 1987 : Manuel pour la sélection du Sorgho. Deuxième édition. Patancheru, Crop Reserch, Institute for the Semi-Arid Tropics. 229p.

ISND, 2006 : Recensement Générale de la population et de l'habitat 175 p.

GARBA I., 2017. Modélisation spatiale de la production fourragère en zone pastorale nigérienne, thèse de doctorat 234p

Jacques C., Jean-François C.,Alain R.et Gilles T., 2013 Le sorgho, 267p.

Kane, A. H., 2019. Analyse du rôle de l'assurance dans la résilience des populations vulnérables aux chocs climatiques et à l'insécurité alimentaire : cas de la région de fatick au Sénégal. Mémoire de master 81p.

Kouadio A., L., 2007. Prévision de la production nationale d'arachide au Sénégal à partir du modèle agrométéorologique AMS et du NDVI. Mémoire de fin d'étude 54p.

MAAH, 2019. Comité de prévention sur la situation alimentaire et nutritionnelle, 2^{ème} session de l'année 2019

Loague K. & Green R.E., 1991. Statistical and graphical method for evaluating solute transport models: overview and application. J. Contam. Hydrol., 7, 51-73

MAHRH., 2011. Résultats définitifs de l'Enquête Permanente Agricole (EPA).

MASA, 2013. MASA, 2013. Situation de la filière riz au Burkina Faso, 12p. MASA, Ouagadougou, Burkina Faso

Ozer, P., Hountondji, Y. C., & Laminou Manzo, O. (2009). Evolution des caracteristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop*, 33, 11–30. 20p

MED, 2005. Cadre stratégique de lutte contre la pauvreté, 125p.

Pereters A., 2018. Alerte précoce et sécurité alimentaire : test de la modélisation de prévision de rendement agricoles via les logiciels GeoWRSI, Spirits et CgmsStat Tools. 72p.

PNUD. (2014). Reducing disaster risk: a challenge for development. UNDP global report. Washington DC, USA: United Nations Development Programme

PNSAN, 2013. Politique Nationale de Sécurité alimentaire et Notionnelle 2018-2027. 101p

PNUD, 2018. Indice et indicateurs de développement humain. 123p

SP/CONASUR: Plan multirisques 82p.

Sultant B. Janicot S, Dingkuhn M, Muller B, Traore S, Sarr B, 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sècheresse* 19 : 29-37. doi :10.1684/sec.2008.0122 ;

Tossou E., 2018. Vers une précision de la prévision des rendements cotonniers (*Gossypium hirsutum*) au Bénin : Cas d'étude dans le Département de l'Alibori à partir du modèle agro météorologique GeoWRSI et du NDVI. Mémoire de master 71p.

Traore S., Agali Alhassane, Bertrand Muller B. Kouressy M., Leopold Somé L., Benjamin Sultan B. Oettli P., Ambroise C. Laop S., Safiatou Sangaré S., Michel Vaksman M., Diop M., Dingkhun M., Baron C., 2010. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmos. Sci. Let.* (2010) DOI: 10.1002/asl.295

Tychon B, Ozer P., LONGUEVILL D. F., 2006. Bulletin agrométéorologique 7p.

Wellens J., Raes D., Antoine D., Djaby B., Tychon B., 2013. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. 8p.

Zolikpo S. A., 2011. Caractéristique agro morphologique des cultivars traditionnels du sorgho colorant (*Sorghum bicolor*) au Benin. Thèse d'ingénieur agronome, Université d'Abomey Calavi, Benin. 94p.

Zongo J.D., 1991. Ressources génétiques des sorghos (*Sorghum bicolor* L. Moench) du Burkina Faso : Evaluation agro-morphologique et génétique. Thèse de doctorat, Université d'Abidjan, 175 p.

Webographie

- Benza,2013 . <http://benaz1.e-monsite.com/blog/do/tag/role-et-importance-de-l-eau-chez-la-plante/>
- <https://www.unocha.org/burkina-faso>
- <https://fews.net/west-africa/burkina-faso>
- Scolab,2020. <https://lexique.netmath.ca/coefficient-de-determination/>
- OCHA,2019. <https://reports.unocha.org/fr/country/burkina-faso/>
- FEWNET, 2019. <https://fews.net/west-africa/burkina-faso>
- ONU., 1975. <http://www.fao.org/3/ab788f/ab788f07.htm>
- Maxelle, 1975. <http://www.fao.org/3/ab788f/ab788f07.htm>
- PAM., 1989 <http://www.fao.org/3/ab788f/ab788f07.htm>
- FAO., 1996. <http://www.fao.org/3/AA039F/aa039f05.htm>