



**CARTOGRAPHIE DU DEGRE DE VULNERABILITE AU STRESS
HYDRIQUE DES PRINCIPALES CEREALES CULTIVEES DANS
LE SAHEL BURKINABE**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE
OPTION : Infrastructures et réseaux Hydrauliques (IRH)

Présenté et soutenu publiquement par

Radegonde RUSAGARA

Le 29 juin 2016

Travaux dirigés par : Dr. Dial NIANG, Enseignant-Chercheur

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Dr. Vivien Chaim DOTO

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Amadou KEITA

Membres et correcteurs : Dr. Vivien Chaim DOTO

M. Bouraima KOUANDA

Promotion 2014/2015

DEDICACES

A toi Dieu Tout Puissant, de qui j'ai reçu grâce, bonté et bénédictions,
A mes parents, qui ont tout sacrifié pour mon instruction et mon éducation,
A mes frères et sœurs, pour leur amour et leur encouragement,
A Ivan KOUOHAM, pour son amour et son soutien.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu mes deux encadreurs, Dr. Dial NIANG et Dr. Chaim Vivien DOTO. Je leur suis reconnaissante pour le temps conséquent qu'ils m'ont accordé, leurs qualités pédagogiques et scientifiques, leur franchise et leur sympathie. J'ai beaucoup appris à leurs côtés et je leur adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants de 2iE et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques, ont guidé mes réflexions et ont acceptés de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, « vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fière. »

Je remercie mes sœurs, Hortense RUSAGARA, Germaine RUSAGARA, Stella RUSAGARA et mes frères Roger RUSAGARA et René RUSAGARA pour leur encouragement. Je remercie très spécialement Ivan KOUOHAM, pour son amour, son soutien inconditionnel et son encouragement. Je tiens à remercier Leslie Ingrid PEUWE TCHEUFFA, Vanessa Rosette T. KABORE, Maïmouna KANAZOE qui ont été toujours là pour moi.

Enfin, je remercie tous mes ami(e)s et compatriotes que j'aime tant pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

RESUME

Cette étude réalisée au Sahel Burkinabè avait pour objectif principal de cartographier le degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales céréales sèches cultivées dans cette zone. Dans un premier temps, la variabilité pluviométrique durant la campagne agricole de la zone d'étude a été caractérisée. A cet effet, l'approche climatique des pluies de deux stations synoptiques (Dori et Ouahigouya) basée sur des tests statistiques ainsi que la détermination de l'indice de sécheresse (SPI) a été utilisée. Dans un deuxième temps, la représentation spatiale du degré de vulnérabilité au stress hydrique des trois principales céréales de la zone d'étude (le mil, le maïs et le sorgho) a été réalisée. Pour ce faire, l'approche spatialisée basée sur le bilan hydrique et faisant appel au calcul de l'indice de satisfaction des besoins en eau des cultures (WRSI) a été utilisée. Le modèle utilisé pour la simulation et la spatialisation est le GeoWRSI. Les résultats obtenus ont montré que les pluies annuelles de la campagne agricole suivent une loi normale et ont un caractère aléatoire mais la nature de la rupture diffère selon la région climatique (le Sahel et le Subsahel). Pendant que le Sahel est soumis aux conditions progressives de sécheresse durant la campagne agricole depuis les années 1960 jusqu'à nos jours, le Subsahel a connu une période sèche entre 1967 et 1989 qui a été suivie par la reprise des années humides depuis 1990 jusqu'à nos jours. Ils montrent également que durant la campagne agricole, la zone d'étude est soumise en grande partie aux conditions de sécheresse mais qui se sont jusqu'à présent manifestées par des sécheresses légères à fortes (32% à 45%) et non par des extrêmes (2% à 4%). Les résultats de spatialisation montrent que le modèle a permis de représenter d'une façon raisonnable le degré de vulnérabilité au stress hydrique des cultures. En considérant la troisième décennie de juin comme date favorable de semis, toutes les cultures sont extrêmement vulnérables (indice WRSI < 50%) au stress hydriques durant les trois premières phases phénologiques (initiale, croissance et mi-saison) au Nord (Sahel). Elles sont fortement vulnérables (indice WRSI variant entre 50 et 59% ou entre 60 et 79%) au centre et faiblement vulnérables (indice WRSI variant entre 80 et 94% ou entre 95 et 99%) au Sud. Tout autre scénario de semis précoce ou tardif n'augmente que le risque de stress hydrique. Il est alors nécessaire d'adjoindre à la date favorable de semis d'autres alternatives comme la pratique de l'irrigation d'appoint pour atténuer les effets du stress hydrique.

Mots clés : Agriculture pluviale, stress hydrique, céréales, Sahel, Burkina Faso

ABSTRACT

This study carried out in Burkina Faso aimed to map the vulnerability to water stress of the main rainfed cereals grown in this area. Initially, rainfall variability during the growing season of the study area was characterized. To this end, the rainy climate approach of two synoptic stations (Dori and Ouahigouya) based on statistical tests and the determination of the drought index (SPI) was used. Secondly, the spatial representation of the degree of vulnerability to water stress of the three main cereals (millet, maize and sorghum) of the study area was conducted. To do this, the spatial approach based on the water balance and using the water requirements satisfaction index (WRSI) was used. The model used for the simulation and spatialization is the GeoWRSI. The results showed that the annual rains crop year follow a normal distribution and randomness but the nature of fracture differs according to climate regions (the Sahel and Subsahel). While the Sahel is subject to progressive drought conditions during the crop season since the 1960s until today, the Subsahel experienced a dry period between 1967 and 1989 which was followed by the resumption of wet years since 1990 until nowadays. They also show that during the crop season, the study area is subject largely to drought conditions but which have so far expressed by light to heavy drought (32% à 45%), not extreme (2% à 4%). Spatial results show that model allowed to represent a reasonable degree of vulnerability to crops water stress. Considering the third decade of June as favorable sowing date, all cultures are extremely vulnerable (index WRSI < 50%) to water stress during the first three phenological stages (initial, growth and mid-season) in the North (Sahel). They are highly vulnerable in the center (index WRSI ranged from 50 to 59% or from 60 to 79%) and slightly vulnerable (index WRSI ranged from 80 to 94% or from 95 to 99%) in South. Any other scenario of early or late sowing only increase the risk of water stress. It is then necessary to add to the favorable date of sowing other alternatives as the practice of supplemental irrigation to mitigate the effects of water stress.

Keywords: Agriculture, water stress, cereals, Sahel, Burkina Faso

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

AEDD: Agence de l'Environnement et du Développement Durable

AGRHYMET: Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle

BUNASOLS: Bureau National des Sols

EOS: End of Season

ET₀: Evapotranspiration de référence

ETM : Evapotranspiration maximale

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR: Evapotranspiration réelle

FAO: Food Agricultural Organization

FEWS NET: Famine Early Warning System Network

FIT: Front Intertropical

GEIC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GeoWRSI: Geospatial Water Requirements Satisfaction Index

INSD: Institut National de la Statistique et de la Démographie

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

K_c: Coefficient cultural

LGP: Length of Growing Period

MAHRH: Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PANA: Programme d'Action National d'Adaptation

PAW : Plant Available Water

PIB: Produit Intérieur Brut

PPT : Precipitation

RU : Reserve utile

Sept. : Septembre

SPI: Standardized Precipitation Index

SW: Soil Water

SWC: Critical Soil Water

USGS: United States Geological Survey

WHC: Water Holding Capacity

WRSI: Water Requirements Satisfaction Index

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques climatiques du domaine sahélien du Burkina Faso	9
Tableau 2: Superficies emblavées en mil, sorgho et maïs par province dans le domaine sahélien du Burkina Faso	9
Tableau 3 : Les indices de sécheresses issues d'une approche satellitaire.....	14
Tableau 4: Indices de sécheresses issues d'une approche traditionnelle	15
Tableau 5: Indices de sécheresses issues d'une approche combinée	15
Tableau 6: Superficie et population de la zone sahélienne du Burkina Faso	19
Tableau 7: Paramètres caractéristiques du maïs, mil et sorgho.....	19
Tableau 8: Valeurs de l'indice SPI et interprétations	24
Tableau 9: Probabilités d'occurrence des périodes sèches	24
Tableau 10: Typologie de l'indice WRSI (Frère et Popov, 1987)	27
Tableau 11: Déterminer du caractère normal et aléatoire et des périodes de rupture de deux stations du Sahel Burkinabè	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Migration des isohyètes au Burkina Faso (Direction de la Météorologie, 1998).....	7
Figure 2: Localisation de la zone sahélienne du Burkina Faso	18
Figure 3: Diagramme de calcul de l'indice SPI-3mois (SPI-3M) de juin à septembre	26
Figure 4: Structure générale de la méthode de détermination et de représentation cartographique de l'indice WRSI	28
Figure 5: Composantes du bilan hydrique sous GeoWRSI.....	30
Figure 6: Evolution temporelle de l'indice SPI-3M à la fin du mois d'août et de septembre de 1961 à 2009 sur la station de Dori et de Ouahigouya	35
Figure 7: Proportion du caractère humide et/ou sec de la zone sahélienne durant la campagne agricole sur la période 1961 - 2009	36
Figure 8: Evolution spatiale de l'indice WRSI pour le maïs	39
Figure 9: Evolution spatiale de l'indice WRSI durant les phases phénologiques du mil	40
Figure 10: Evolution spatiale de l'indice WRSI durant les stades phénologiques du sorgho ..	40
Figure 11: La cartographie des dates favorables au démarrage de la saison des pluies pour les trois principales céréales (mil, maïs et sorgho) cultivées dans la zone sahélienne du Burkina Faso.	44

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des abréviations et acronymes	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Table des matières	ix
I. INTRODUCTION	1
I.1. Contexte général de l'étude	1
I.2. Problématique	3
I.3. Objectifs de l'étude	4
I.4. Méthodologie générale et plan du document	5
II. ETAT DE L'ART	6
II.1. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA ZONE SAHELIENNE DU BURKINA FASO	6
II.1.1. Régime pluviométrique	6
II.1.2. Vents	7
II.1.3. Hygrométrie ou humidité de l'air	8
II.1.4. La température	8
II.1.5. Evapotranspiration	8
II.2. AGRICULTURE PLUVIALE DANS LE SAHEL BURKINABE	9
II.2.1. Importance des principales céréales cultivées dans la zone sahélienne	9
II.2.2. Contraintes pédoclimatiques à l'agriculture pluviale dans le Sahel Burkinabè	10
II.2.3. Vulnérabilité au stress hydrique des céréales dans le Sahel Burkinabè	11
II.2.4. Stratégies d'adaptation aux effets des changements climatiques dans le secteur agricole	16
III. MATERIEL ET METHODES	18
III.1. LOCALISATION ET DEMOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE	18
III.2. MATERIEL VEGETAL	19

III.3. COLLECTE DES DONNEES	20
III.3.1. Pluie et évapotranspiration	20
III.3.2. La pédologie	21
III.4. ETUDE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE.....	21
III.4.1. Comblement des données lacunaires	21
III.4.2. Test statistiques réalisés pour l'analyse des données pluviométriques	22
III.4.3. Détermination de l'indice de précipitations standardisé SPI	22
III.5. CARTOGRAPHIE DU DEGRE DE VULNERABILITE AU STRESS	
HYDRIQUE.....	26
III.5.1. Choix et justification de l'indicateur du degré de vulnérabilité au stress hydrique	26
III.5.2. Détermination et représentation cartographique de l'indice WRSI	27
IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....	33
IV.1. ETUDE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE.....	33
IV.1.1. Normalité, caractère aléatoire et détection de rupture dans les chroniques des stations de Dori et de Ouahigouya	33
IV.1.2. Evolution temporelle de l'indice SPI_3M.....	34
IV.2. ETAT DE VULNERABILITE DES PRINCIPALES CEREALES DANS LE SAHEL BURKINABE	38
IV.2.1. Evolution de l'indice WRSI du maïs, du mil et du sorgho	38
IV.2.2. Les dates de début de la saison.....	43
IV.3. STRATEGIES D'ATTENUATION DES DEFICITS HYDRIQUES	47
V. CONCLUSION.....	48
VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	50
ANNEXE	55
ANNEXE 1 : ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES MECANIQUES DANS LA ZONE SAHELIEENNE DU BURKINA FASO	55
ANNEXE 2 : ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES CULTURALES DANS LA ZONE SAHELIEENNE DU BURKINA FASO	56
ANNEXE 3: ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES BIOLOGIQUES DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LA ZONE SAHELIEENNE DU BURKINA FASO.....	57
ANNEXE 4 : ANALYSE CLIMATOLOGIQUE DES PLUIES (2008 -2015).....	58

ANNEXE 5: CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE MAÏS APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS.....	62
ANNEXE 6: LA CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE MIL APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS.....	63
ANNEXE 7: LA CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE SORGHO APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS.....	64

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte général de l'étude

Depuis les années 1970, le Burkina Faso, comme tant d'autre pays en développement, a été significativement affecté par les effets des changements climatiques, alors qu'il s'efforce de vaincre la pauvreté et de promouvoir sa croissance économique. Dans son rapport du Programme d'Action National d'Adaptation (PANA), le Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, annonce que le Burkina Faso fait partie du groupe des pays les moins avancés et les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques. Au cours de ces quatre dernières décennies, les études ont montré que le pays a enregistré une forte variabilité des paramètres caractéristiques du climat à savoir la pluie, la température et l'évapotranspiration (le Barbe *et al.*, 2002 ; L'hôte *et al.*, 2002 ; Ali et Lebel, 2009 ; Sircoulon, 1976 ; Servat *et al.*, 1999 ; Bodian, 2014, Ouoba, 2013 ; Cheick *et al.*, 2015). Aussi, les modèles prédictifs en matière de changement climatique s'accordent sur une augmentation probable de l'instabilité des conditions climatiques avec une occurrence accrue des poches de sécheresse. Dès lors, les travaux de recherche ont été effectués afin de comprendre l'évolution de la variabilité climatique et d'évaluer l'ampleur de ses conséquences sur les secteurs clés du développement économique du pays tels que l'agriculture et l'élevage.

En effet, le premier paramètre directement concerné par la variabilité climatique est la température dont son changement impacte la trajectoire des autres composantes du climat comme les précipitations et l'évapotranspiration. Par décennies, la température au Burkina Faso a évolué plus rapidement que la tendance mondiale variant de 0,2°C à 0,8°C (Field *et al.*, 2014). Suivant les zones agroclimatiques du Burkina Faso, l'analyse de la tendance générale de l'évolution des températures moyennes depuis les années 1961 montre une hausse progressive. Plus particulièrement, le sahel burkinabè connaît une grande hausse de +1,35°C par rapport à celle de la zone soudanienne et soudano-sahélienne qui est respectivement de +0,2°C et +1°C (Garane, 2010). Ce phénomène de réchauffement climatique renforce le cycle condensation-pluie-ruissellement. En effet, le réchauffement climatique accélère l'évaporation de l'eau et l'évapotranspiration provoquant par la suite une augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique. De cela résulte le développement d'évènements extrêmes climatiques comme les inondations et les cycles successifs de poches de sécheresse auxquels est confronté le Burkina Faso (Sarr, 2010).

Ce phénomène de dérèglement climatique combiné aux actions anthropiques entraîne la dégradation des ressources naturelles particulièrement les sols (Ndong, 2003) et peut avoir un impact négatif profond sur l'économie nationale du Burkina, qui dépend essentiellement du secteur agricole. En effet, l'agriculture occupe plus de 84,1% de la population active et contribue pour 40% à la formation du PIB (Brunel, 2007). Cependant, à l'heure actuelle, une tendance à l'aridification du climat au Burkina Faso accentue les périodes des sécheresses agronomiques ce qui a pour corollaire une baisse du rendement. Cette sécheresse agronomique se traduit par une dégradation du bilan entre la perte d'eau par transpiration et l'absorption d'eau du sol par les racines des plantes. Pendant cette période de sécheresse, les plantes sont susceptibles de se trouver dans un état de stress hydrique. C'est un environnement qui amène à ce que la quantité d'eau transpirée par la plante soit supérieure à la quantité qu'elle absorbe (Sener et Losel, 2012). Selon Kramer (1983), le stress hydrique ralentit la croissance des plantes et affecte leur productivité encore plus que les autres stress (azoté, parasitaire). Certaines cultures xérophiles sont naturellement capables de supporter le stress hydrique prolongées. Cependant, les céréales qui contribuent pour 70% à l'alimentation quotidienne des Burkinabè sont les plus sensibles au déficit hydrique (MAHRH, 2015) et plus particulièrement le maïs (du Plessis, 2003). Or, le Burkina Faso se consacre principalement sur la céréaliculture, avec pour objectif d'arriver rapidement à une complète autosuffisance alimentaire de ses populations. Ainsi, la majeure partie de ses terres cultivées est consacrée à la production de céréales. De plus, c'est une agriculture majoritairement pluviale et de ce fait tributaire des conditions agropédoclimatiques. Fort de cela, la quantité et les rendements des céréales varient selon les années, au gré des précipitations, de la température et de l'humidité du sol. Selon Gaufichon *et al.* (2010), le stress hydrique augmente le délai entre floraison mâle et femelle chez le maïs et le sorgho alors que le mil présente un stress hydrique durant quelques jours autour de la floraison. Cette situation limite la pollinisation et donc la production agricole. Un manque d'eau à ce stade de développement du cycle entraîne un avortement des grains. Ce dérèglement peut conditionner des baisses de plus de 60% de la production céréalière constituant ainsi une entrave au développement socioéconomique soutenu dans tout le pays en général (Watson *et al.*, 1998) et en particulier dans la zone sahélienne où la dégradation des conditions climatiques s'intensifie de plus en plus.

Au vu de l'importance de la filière céréalière au Burkina Faso et en particulier dans la zone sahélienne et sa vulnérabilité à la variabilité climatique, la mise en place de stratégies de mitigation est une nécessité et non une option afin d'augmenter la résilience des agriculteurs

sahéliens. Ces stratégies de mitigation sont conditionnées par une meilleure connaissance du degré de vulnérabilité des cultures selon les faciès pédoclimatiques et des moyens d'existence des agriculteurs. Ainsi, dans le but de proposer un outil d'aide à la gestion de l'agriculture pluviale, cette étude a été initiée dans la zone sahélienne, la plus sèche du Burkina Faso pour étudier le degré de vulnérabilité au stress hydrique des trois principales céréales les plus cultivées à savoir le sorgho, le mil et le maïs.

I.2. Problématique

La zone sahélienne du Burkina Faso est une zone rurale à climat semi-aride dont la céréaliculture pluviale est principalement représentée par le maïs, le sorgho et le mil (MAHRH, 2001). Malheureusement, c'est une agriculture qui est soumise à de nombreuses contraintes pédoclimatiques. En effet, cette zone est fortement exposée aux aléas climatiques se caractérisant par une tendance à l'aridification du climat, une diminution de la période de croissance végétale de 20 à 30 jours, le déplacement des isohyètes de 150 km vers le Sud par rapport aux années 1930 ainsi qu'une forte irrégularité interannuelle et spatio-temporelle de la pluviométrie (Diouf *et al.*, 2000). Par ailleurs, les sols de la zone sont soumis à une forte érosion hydrique et éolienne et montrent des signes d'épuisement. Ces sols sont en général peu profonds, avec des encroûtements superficiels favorisant le ruissellement, une faible capacité de rétention en eau et une faible teneur en matière organique. Sous ces conditions agropédoclimatiques, le mil, le sorgho et le maïs cultivés dans la zone sahélienne du Burkina Faso sont très vulnérables au stress hydrique. Pour atténuer les effets de la variabilité climatique, plusieurs stratégies ont été adoptées dans la zone sahélienne et se résument en la conservation d'eau à la parcelle (Roose *et al.*, 1999 ; Lahmar et Yacouba, 2012). Ces pratiques paysannes comme, le zaï, la demi-lune et les cordons pierreux constituent néanmoins des alternatives novatrices pour le développement d'une agriculture résiliente au Sahel. La réhabilitation des terres dégradées au Burkina Faso a consisté à la promotion de ces pratiques culturales favorisant l'infiltration de l'eau et réduisant par surcroît les sécheresses agricoles. Hormis leurs performances agronomiques dans l'amélioration des rendements céréaliers (Kabore et Reij, 2004 ; Pretorius *et al.*, 2005), ces techniques ont permis la récupération de nombreuses terres incultes et la réduction des impacts liés aux poches de sécheresse (Rockström *et al.*, 2004).

Cependant, ces techniques deviennent de plus en plus inefficaces en cas de longues poches de sécheresse. Ainsi, dans le but de mettre à disposition des producteurs sahéliens d'informations climatiques de précampagne, des études (Somé et Sivakumar, 1994 ; Maladona, 2012 ;

Ouédraogo, 2013) ont pu caractériser historiquement la campagne agricole. Mais ces informations climatiques de précampagne constituées des dates de début, de fin et la longueur de la campagne agricole ainsi que la longueur des séquences sèches ont été peu opérationnalisées en milieu réel. Ces études déjà peu accessibles aux développeurs du monde rural n'impliquent pas les caractéristiques agro pédologiques de la zone. Autrement dit, les caractéristiques climatiques sont plus importantes dans ces études que les caractéristiques agropédologiques. Or, la mise en place de stratégies d'adaptation à la variabilité climatique en agriculture pluviale au Sahel Burkinabè ne peut dissocier la réponse du sol à l'évolution des conditions climatiques concomitamment à la phénologie de la culture. Ainsi, à travers cette étude de cartographie du degré du stress hydrique des principales céréales, les acteurs du monde rural pourront disposer d'un outil robuste d'aide à la décision facile à utiliser et prenant en compte plusieurs composantes du système sol-plante-atmosphère. En plus de la prise en compte des faciès pédologiques, cette étude prend en considération une faible capacité économique et institutionnelle limitée à faire face aux changements climatiques dans la zone sahéenne du Burkina Faso.

I.3. Objectifs de l'étude

La présente étude vise à cartographier le degré de vulnérabilité au stress hydrique des trois céréales sèches les plus cultivées dans la zone sahéenne du Burkina Faso. L'objectif global de cette étude s'inscrit dans le Cadre Stratégique de Lutte Contre la Pauvreté (CSLP) pour le développement économique et social du Burkina Faso. En effet, une meilleure connaissance de la vulnérabilité du secteur agricole à la variabilité climatique va renforcer la résilience des producteurs par augmentation de leur capacité d'adaptation et de surcroît la réduction de la pauvreté dans le pays et plus particulièrement dans la zone d'étude.

Spécifiquement, cette étude vise à:

- ✓ étudier la distribution temporelle et spatiale des précipitations sur les quarante dernières années;
- ✓ déterminer et cartographier l'indice de satisfaction des besoins en eau du sorgho, du mil et du maïs;
- ✓ proposer des stratégies de mitigation des effets du stress hydrique sur la production céréalière en fonction des moyens d'existence des producteurs.

I.4.Méthodologie générale et plan du document

Cette étude repose sur une évaluation du comportement hydrique des céréales dans une approche où les trois (3) systèmes: climat, agriculture, pédologie sont cartographiés dans le contexte sahélien du Burkina Faso. Elle va de la collecte des données agropédoclimatiques et la caractérisation de l'état hydrique des céréales à la proposition des scénarii de mitigation des effets du stress hydrique sur la production céréalière de la zone d'étude.

Ainsi, pour atteindre les objectifs suscités, présent document a été subdivisée en cinq grandes parties. La première partie présente une introduction générale soulignant le contexte, la problématique et les objectifs de cette étude. La deuxième résume l'état des connaissances sur les caractéristiques de la zone d'étude (climat, végétation, vent, contexte pédologique, pluie, infrastructure hydraulique et population) et les stratégies d'adaptation développées dans la zone pour faire face à la variabilité climatique. Quant à la troisième partie, elle aborde l'approche méthodologique utilisée pour mener à bien cette recherche. La quatrième partie présente les principaux résultats obtenus et la discussion y afférente. Dans la cinquième partie, la conclusion synthétise les principaux résultats de l'étude et évoque les perspectives d'étude.

II. ETAT DE L'ART

II.1. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA ZONE SAHELIENNE DU BURKINA FASO

II.1.1. Régime pluviométrique

Selon Wellens (2004), le régime pluviométrique lié au climat de la zone sahélienne est caractérisé par l'alternance de deux saisons contrastes : la saison sèche et la saison des pluies. Ce rythme saisonnier est tributaire des vents sahariens et des moussons océaniques qui circulent des hautes pressions sahariennes à l'anticyclone de Sainte Helene. En saison sèche, l'alizé continental, vent chaud et sec appelé aussi Harmattan, souffle sur tout le Burkina Faso d'octobre à mars et en prenant une direction Nord-Est/Sud-Ouest. De novembre à février, le Harmattan est relayé par l'alizée boréal, le flux d'air humide soufflant dans le même sens que le Harmattan. A partir de mars, le Sahara surchauffé devient une zone de basses pressions aspirant les masses d'air océaniques. Le flux d'air humide ou l'alizé austral venant du Sud/Sud-Ouest appelé la mousson se glisse sous le Harmattan dont elle est séparée par un plan incliné du Sud vers le Nord (Front Intertropical). Le Front Intertropical (FIT) fait la navette entre la côte et le sud du Sahara. Dans la zone sahélienne du Burkina Faso, le passage du flux d'air chaud et sec à un flux d'air humide ou vice versa se produit deux fois par an, l'un en avril et l'autre en octobre. L'alternance des saisons dans la zone sahélienne dépend alors de la progression du FIT.

Tandis que la saison de pluies (avec une hauteur moyenne de pluie inférieure à 600 mm /an) s'installe dans la zone sahélienne en juillet et prend fin en septembre, la saison sèche dure neuf mois, et s'y installe d'octobre en juin (PANA, 2007). Actuellement, la zone sahélienne se caractérise par une grande variabilité du régime pluviométrique. Au cours du siècle dernier, le sahel burkinabè a connu une légère augmentation des précipitations vers 1950, suivie d'une sécheresse sans précédent de la fin des années 1960 à la fin des années 1980. Comme le montre la figure 1, la zone sahélienne du Burkina Faso s'élargit suite à une baisse tendancielle des hauteurs de pluies saisonnières, se traduisant par un glissement des isohyètes vers le Sud de la zone entre 1931 et 2000. Depuis 1931, l'isohyète 600 mm qui délimite la zone sahélienne s'est déplacée de 150 à 200 km vers le sud (Diouf *et al.*, 2000).

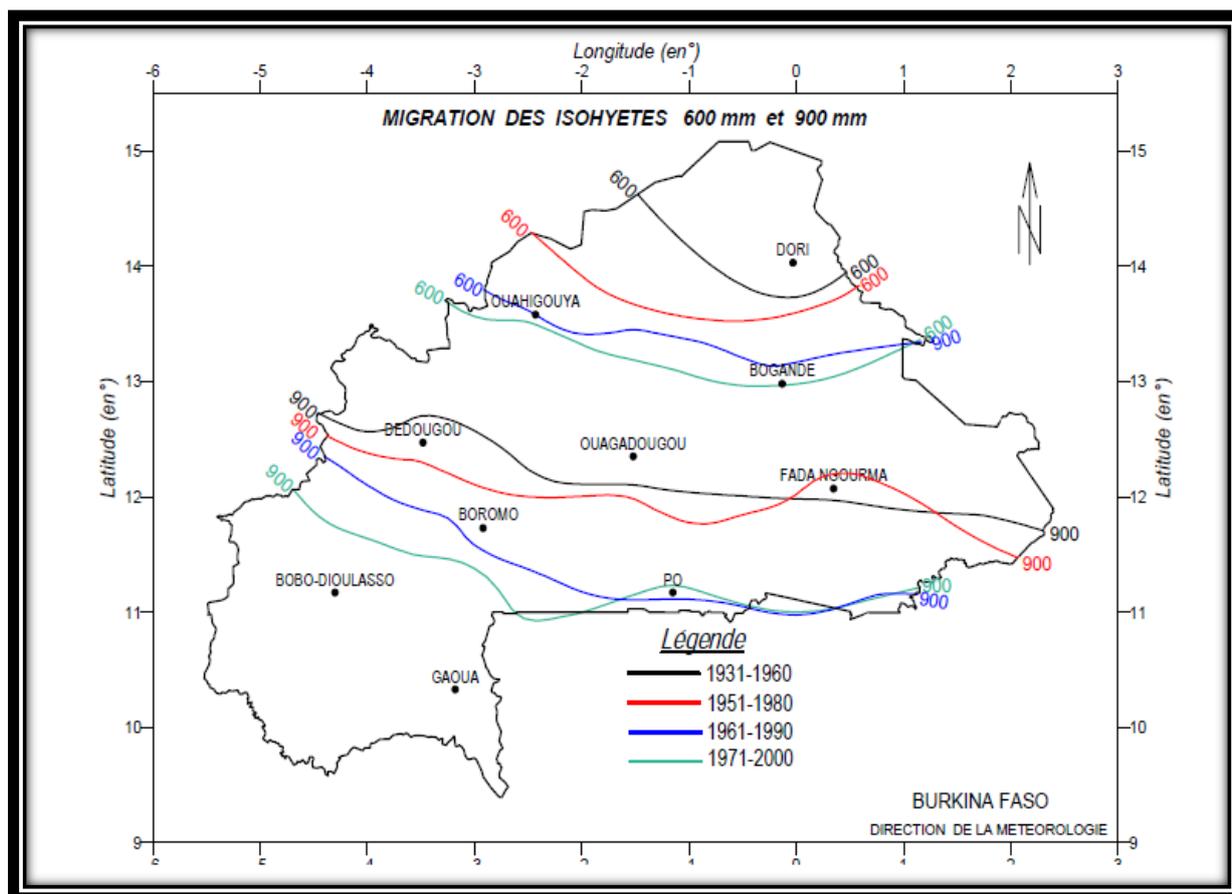


Figure 1: Migration des isohyètes au Burkina Faso (Direction de la Météorologie, 1998)

II.1.2. Vents

Les vitesses des vents sont relativement faibles (2 m/s) sauf en début et en fin de saison de pluies lors des manifestations pluvieuses et ils sont liés aux mouvements du FIT (Wellens, 2004). En saison sèche lorsque le FIT est redescendu vers la côte du Golfe de Guinée, la zone sahéenne est soumise au régime de l'alizé continental du Nord-Est, le Harmattan. Ce dernier est un vent chaud et sec qui engendre des vents de sable. L'effet desséchant de ce vent est accentuée en mars/avril par l'augmentation de la température. En saison de pluie, la zone est sous le régime de la mousson, avec un alizé austral humide du Sud-Ouest chargé de cumulus. Lors du passage du FIT, des cellules orageuses locales se développent et les cumulo-nimbus fusionnent parfois pour former de vastes masses cycloniques. Des vents violents les accompagnent et peuvent atteindre 120 km/h. Au début de la saison des pluies, ces vents provoquent des tempêtes de poussière intenses mais brèves. A la fin de la saison des pluies, ces vents peuvent occasionner des dégâts aux cultures, provoquant généralement la verse chez les céréales qui n'ont pas encore été récoltées.

II.1.3. Hygrométrie ou humidité de l'air

L'humidité de l'air fluctue beaucoup selon la saison et est fonction des vents et des masses d'air associées. Les alizés de la mousson amènent du Golfe de Guinée un air humide, avec une hygrométrie moyenne de 80%. En saison sèche, l'Harmattan fait descendre sur la zone sahélienne un vent très sec dont l'hygrométrie tombe à 20%. Selon le PANA (2007), les plus faibles valeurs mensuelles se situent entre novembre et février, tandis que les plus fortes valeurs se rencontrent entre mai et septembre avec un pic en août. Mais globalement l'humidité de l'air reste supérieure à 10% toute l'année.

II.1.4. La température

Au Burkina Faso, les valeurs de la température les plus élevées ainsi que les plus faibles se rencontrent dans la zone sahélienne, occasionnant de très grandes variations saisonnières et des amplitudes thermiques diurnes, mensuelles et annuelles élevées. Elles atteignent leurs fortes valeurs en mars, avril puis en octobre, leurs faibles valeurs en novembre, décembre, janvier et en février (Wellens, 2004). Les températures maximales ont une évolution similaire à celle des moyennes mais restent comprises entre 28 et 42°C. Exceptionnellement, la zone sahélienne a enregistré une valeur maximale absolue de 47,2°C à Dori en 1984 (PANA, 2007). Les températures minimales moyennes, à l'exception de la région du Nord, leur évolution reste comprise entre 16°C et 27°C. Notons que dans cette partie du pays, la température la plus basse enregistrée à nos jours est de 5°C et a été observée en 1975 à Markoye dans la Province de Oudalan.

II.1.5. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la combinaison de deux (2) processus distincts dans lesquels l'eau est perdue par l'évaporation directe à partir du sol d'une part et d'autre part par la transpiration de la culture. Les valeurs mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) restent très élevées toute l'année se situant au-dessus de 100 mm. Les valeurs les plus fortes sont observées entre février et mars, mois au cours desquelles elles atteignent 200 mm et les plus faibles en juillet, août et septembre. Le Tableau 1 résume les caractéristiques climatiques de la zone sahélienne.

Tableau 1: Caractéristiques climatiques du domaine sahélien du Burkina Faso

Paramètres climatiques	Valeurs
Pluie annuelle	300 à 600 mm
Durée de la saison des pluies (jours)	110
Nombre de jours de pluies	<45
Température moyenne annuelle	29°C
Amplitude saisonnière	11°C
Température moyenne annuelle	29°C
Humidité moyenne de l'air	
Saison sèche	20%
Saison humide	70%
Evaporation annuelle (bac classe A)	3200-3500 mm

Source : Adapté des données de la Direction de la Météorologie de 1961 à 1990

II.2. AGRICULTURE PLUVIALE DANS LE SAHEL BURKINABE

La zone sahélienne supporte beaucoup plus les cultures vivrières peu exigeantes en eau. Comme l'indique le tableau 2, la première céréale la plus cultivée dans la zone est le mil suivi du sorgho. Etant donné que le maïs exige une quantité importante d'eau lors de sa croissance, cette céréale est faiblement cultivée.

Tableau 2: Superficies emblavées en mil, sorgho et maïs par province dans le domaine sahélien du Burkina Faso

Région	Chef-lieu	Province	Superficie emblavées des céréales (km ²)		
			Mil	Sorgho	Maïs
Centre-Nord	Kaya	Bam	204	451	38
		Namentenga	248	569	47
		Sanmatenga	290	896	53
Est	Fada-N'Gourma	Gnagna	273	789	92
Nord	Ouahigouya	Loroum	340	115	9
		Yatenga	938	824	48
Sahel	Dori	Oudalan	943	86	82
		Seno	543	198	11
		Soum	1527	208	21
		Yagha	246	371	16
TOTAL			5 552	4 507	417

Source : Enquête agricole DSS/DGESS/MARH

II.2.1. Importance des principales céréales cultivées dans la zone sahélienne

Le mil est une céréale très rustique, à petits grains, cultivée dans toutes les zones sahéliennes et dont l'épi a la forme d'une chandelle. Dans les zones sahéliennes, il constitue l'aliment de base. Il est utilisé dans les préparations du tô (boule de pâte préparée à partir de la farine), du couscous, de la bouillie, du dolo (bière locale à base de mil fermenté), des beignets, etc.

Le sorgho, appelé gros mil en Afrique, est cultivé depuis des millénaires en zone sahélienne. C'est une grande graminée qui résiste à la chaleur et à la sécheresse. Il est utilisé dans les préparations du tô et du dolo. Le sorgho est très apprécié non seulement dans la zone sahélienne mais aussi toutes les zones du Burkina Faso. C'est la raison pour laquelle la production y est beaucoup plus importante que dans les autres pays du Sahel (Mali, Niger, etc.) où les populations préfèrent le mil.

Le maïs est une culture exigeante en eau. Dans le Sahel Burkinabè, la production est donc assez marginale. Il est cultivé dans les zones les plus humides. Il est utilisé dans les préparations de tô. Souvent, il est grillé frais, juste après la récolte et est consommé immédiatement. Les productions se sont fortement développées au Burkina Faso; en 30 ans, elles ont été multipliées par 10.

II.2.2. Contraintes pédoclimatiques à l'agriculture pluviale dans le Sahel Burkinabè

1. Contraintes climatiques

Le Sahel Burkinabè fait partie des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest les plus vulnérables aux impacts du changement climatique en raison de leur position géographique très proche du désert du Sahara et de la grande dépendance de leur population et de leur économie aux activités sensibles au climat comme l'agriculture pluviale, l'élevage, la pêche, etc. A cela s'ajoute une faible capacité économique et institutionnelle limitée à faire face aux impacts négatifs dus aux changements climatiques (Reid et Vogel, 2006). Dans la zone sahélienne du Burkina Faso, le facteur climatique le plus important affectant la productivité agricole est la variabilité spatiale et temporelle des précipitations. Prenant en considération les échelles de temps très différents, peu d'autres régions du monde présentent une variabilité du régime pluviométrique aussi marquée que celle des zones sahéliennes. Cette variabilité se caractérise par une perturbation du cycle des saisons des pluies et intensifie des phénomènes de sécheresses dans la région.

L'apparition, la cessation, et la longueur de la saison des pluies sont des variables les plus importantes pour la gestion agricole (Ingram *et al.*, 2002). Elles accentuent la probabilité d'occurrence de poches de sécheresses agricoles et affectent directement les pratiques de gestion agricole en particulier la plantation qui, à son tour, affecte de manière significative le rendement des cultures. En effet, pour le semis, il est important de savoir si les pluies sont bien réparties et suffisantes pour assurer suffisamment l'humidité du sol lors de la plantation et si ce niveau sera maintenu, voire augmenté au cours de la période de croissance pour éviter une défaillance totale de la récolte. Planter trop tôt pourrait conduire à l'échec des cultures et,

à son tour, la plantation trop tard pourrait réduire le temps de plus en plus précieux et le rendement des cultures. Dans la zone sahélienne du Burkina, on note aujourd'hui un retard dans l'installation de la saison, une réduction de la durée de la saison aboutissant à un abandon des variétés traditionnelles remplacées par des variétés améliorées à cycles courts, qui elles-mêmes ont du mal à exprimer leur potentiel de production. Les rendements sont en baisse et la production agricole par habitant décroît pendant que la population s'accroît de manière à doubler la demande en nourriture dans les trois prochaines décennies (Davidson et al., 2003).

2. Contraintes pédologiques

A partir des travaux de l'ORSTOM synthétisés par Fontès et Guinko (1995) et ceux de BUNASOLS (2015), la zone sahélienne est caractérisée par quatre (04) principaux types de sols. Il s'agit des sols ferrugineux tropicaux (au centre), les sols peu évolués (à l'est), les sols hydromorphes vertiques (à l'ouest) et les sols bruns eutrophes (au nord). Ces sols se caractérisent par une texture variable, généralement à tendance sableuse dans les horizons de surface et argileuse dans les horizons plus profonds (> 40 cm). Ils ont un régime hydrique imparfait, en rapport avec de mauvaises propriétés physiques (porosité et perméabilité) dont la capacité et l'imperméabilité jouent un rôle néfaste pour l'enracinement et l'alimentation hydrique des cultures. De plus, ces types de sols rencontrés dans la zone sahélienne ont une valeur agronomique médiocre s'expliquant par leur pauvreté naturelle en éléments minéraux de base (azote, potassium et phosphore). Cette situation est aggravée par la pratique d'une agriculture extensive et la dégradation des terres rendant les sols infertiles. En effet, les sols de la zone sahélienne présentent souvent des encroûtements superficiels qui favorisent le ruissellement. Par conséquent, ils sont significativement exposés à une dégradation accélérée liée à des facteurs aussi bien naturels (érosion hydrique, érosion éolienne) qu'anthropiques (coupe abusive de bois, pratiques culturelles inadaptées).

Le résultat en est une tendance à la baisse de la fertilité des sols, à la perte rapide des surfaces cultivables, à l'accroissement du ruissellement, à l'ensablement des cours d'eau, à la baisse de la nappe phréatique, etc. Ainsi, l'agriculture pluviale en zone sahélienne est touchée non seulement par des déficits hydriques mais aussi par l'infertilité du sol.

II.2.3. Vulnérabilité au stress hydrique des céréales dans le Sahel Burkinabè

1. Notions de vulnérabilité

La vulnérabilité se dit d'un être ou d'un lieu, qui localement ou globalement, présente des effectifs en diminution, ou connaît des conditions d'existence de plus en plus défavorables,

sans pour autant être considérés déjà comme en voie de disparition (AEDD, 2013). Plus précisément, le concept de vulnérabilité est étroitement lié à la notion de risque. La vulnérabilité représente la mesure dans laquelle un système est sensible aux dommages et incapable de faire face aux effets défavorables du risque. Dans le cadre de cette étude le risque est représenté par le stress hydrique). La vulnérabilité est en fait une notion qui met en exergue l'inégalité des dommages et pertes des différents écosystèmes, des sociétés humaines et des infrastructures face à un phénomène donné. Pour une même exposition, l'impact peut être différent. La vulnérabilité d'une unité d'exposition est une fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme du risque, de l'exposition à ce risque, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation.

2. Vulnérabilité au stress hydrique des céréales

Lorsqu'on parle de l'alimentation hydrique d'une culture, le stress hydrique est l'un des termes utilisés pour caractériser les relations au sein du continuum sol- plante-atmosphère et se manifeste pour les cultures par une baisse de leur teneur en eau affectant tout le métabolisme de celles-ci. La demande climatique communément appelée évapotranspiration potentielle ETP engendre une perte d'eau au niveau des stomates. En l'absence d'une ressource en eau suffisante et accessible aux racines, la culture perd une partie de son eau interne et le potentiel hydrique des cellules s'abaisse. Les conséquences sont multiples mais la principale d'entre elles est une réduction de la photosynthèse qui se traduit par :

- ✓ une réduction de l'expansion cellulaire;
- ✓ une réduction de l'afflux du gaz carbonique (CO₂) ;
- ✓ un détournement des nutriments destinés aux organes en croissance ;
- ✓ une élévation de la température des tissus des végétaux.

Dans un environnement semi-aride que présente le sahel burkinabè, la vulnérabilité au stress hydrique des céréales résulte d'une variabilité des précipitations se caractérisant par des périodes plus ou moins longues de sécheresse.

En effet, la sécheresse se définit comme un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée (Ouédraogo, 2013). Selon leurs domaines d'application, il existe trois types de sécheresses à savoir la sécheresse météorologique, la sécheresse hydrologique et la sécheresse agronomique. Le stress hydrique des cultures résulte directement de la sécheresse agronomique. Cependant, la sécheresse agronomique relie diverses caractéristiques de la sécheresse météorologique ou hydrologique à l'agriculture.

En effet, la demande en eau des cultures dépend des conditions météorologiques, des caractéristiques biologiques des cultures, de leurs stades de croissance, ainsi que des propriétés physiques et biologiques du sol. Une bonne définition de la sécheresse agricole devrait être en mesure de prendre en compte la vulnérabilité au stress hydrique des cultures pendant leurs différentes phases de développement, c'est-à-dire de la levée à la maturité. En effet, la vulnérabilité au stress hydrique des cultures n'est pas seulement liée à une insuffisance du volume pluviométrique pendant une période de temps donnée, mais un manque d'eau sur une période suffisamment longue pour être ressentie par la culture. Ainsi, le sol joue le rôle de tampon, en conservant l'eau entre deux épisodes pluvieux et en la mettant à la disposition de la plante. Le stress hydrique est donc ressenti par la plante en absence de pluie lorsque l'humidité du sol reste insuffisante et que la plante a épuisé toute l'eau mise à sa disposition pour son alimentation hydrique.

3. Indicateurs du degré de vulnérabilités au stress hydrique des cultures

Dans le système des assurances agricoles, les indicateurs permettant d'identifier le degré de vulnérabilité au stress hydrique des cultures sont connus sous le nom des indices agroclimatiques. L'assurance agricole basée sur les indices agroclimatiques est de plus en plus considérée comme un outil d'adaptation au changement climatique (Sarr, 2010). Elle consiste à agir en réaction à l'aléa pour compenser à posteriori la perte de revenus liée à la baisse de la production. L'utilisation des indices agroclimatiques comme outils de travail dans le secteur agricole est relativement récente car l'agroclimatologie a fait son apparition vers les années 1920 avec l'avancement des travaux de recherche en climatologie, mais est devenue une science à part entière dans les années 1950. L'agroclimatologie peut être définie comme l'étude des interactions « climat - sol - plante ». Plus précisément, il s'agit de l'étude de l'action des facteurs du climat sur le comportement des plantes, et dans le cas qui nous intéresse sur la vulnérabilité au stress hydriques des céréales.

Ainsi, les indices climatiques sont des dérivés des éléments climatiques et l'agroclimatologie procèdent par leur traitement fréquentiels et statistiques pour décrire le milieu et évaluer des besoins et des disponibilités en eau des cultures.

En Afrique, les indices agroclimatiques les plus utilisés sont des indices contre la sécheresse. Durant la saison de croissance des cultures, ces indices permettent d'évaluer les différents paramètres liés à la température et la pluviométrie et garantissent une gestion efficace de l'eau et la prévention des dommages dus aux stress hydriques. De plus, ces indices agroclimatiques sont utilisés en gestion de production agricole pour estimer la date de certains stades

phénologiques ou pour faciliter la sélection d'hybrides ou cultivars adaptés à une région donnée. Issue de la revue bibliographique, une liste des indices de sécheresse pouvant être utilisés en Afrique est présentée dans les tableaux 3, 4 et 5. C'est une synthèse des indices de sécheresse basés sur la pluie, le bilan hydrique et la végétation utilisés ou pouvant être utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indiciaires en Afrique. Ces indices sont classés suivant trois approches différentes à savoir l'approche traditionnelle, approche satellitaire et l'approche combinée. Premièrement, l'approche traditionnelle regroupe les indices issus de tests statistiques avec des données météorologiques ainsi que les indicateurs météorologiques et hydrologiques. Parmi ces indices on peut citer l'indice de précipitations standardisé (SPI) ; l'indice pluviométrique saisonnier ou annuel, etc. Deuxièmement, Les méthodes satellitaires utilisent des données mesurées à partir de capteurs éloignés de la surface pour laquelle ils mesurent l'information. L'exemple est l'indice de végétation normalisé (NDVI –Normalized Difference Vegetation Index). Et enfin, les approches combinées font appel aux données in-situ et aux données satellitaires. Dans cette catégorie, il y a l'indice I de satisfactions des besoins eau des cultures ou en anglais Water Requirements Satisfaction Index (WRSI), l'indice de déficits hydrique, en anglais, Water Deficit Index (WDI), etc.

Tableau 3 : Les indices de sécheresses issues d'une approche satellitaire

INDICES	ATOUTS	FAIBLESSES	UTILISATION / OPPORTUNITES
NDVI	-Existence d'images satellitaires et de centres spécialisés dans la sous-région dans le traitement et l'analyse des données des Satellites	-Nécessite des cultures sur des grandes surfaces -Relation NDVI et rendement en grain n'est pas toujours établi -NDVI est souvent peu compréhensible par les assurés	Est en cours de test dans des pays comme le Burkina Faso

Tableau 4: Indices de sécheresses issues d'une approche traditionnelle

INDICES	ATOUTS	FAIBLESSES	UTILISATION / OPPORTUNITES
Indice de précipitations standardisé (SPI)	-Simplicité des calculs -Présence d'une échelle significative de ses valeurs	-Ne prend pas en compte la sensibilité critique hydrique des cultures -Ne prend pas en compte la sensibilité critique hydrique des cultures	Déjà utilisé dans plusieurs études en Afrique et dans le monde entier
Indice pluviométrique saisonnier ou annuel	Simplicité des calculs	- Peut cacher des disparités pluviométriques locales si le réseau des pluviomètres n'est pas suffisamment dense - Ne tient pas compte des risques liés aux excès pluviométriques dont la fréquence pourrait augmenter avec le changement climatique	Déjà appliqué dans des pays du Sud (Ethiopie)

Tableau 5: Indices de sécheresses issues d'une approche combinée

INDICES	ATOUTS	FAIBLESSES	UTILISATION / OPPORTUNITES
Indice paramétrique sécheresse à trois phases	-Prise en compte des besoins en eau pendant les phases critiques de la culture - Simplicité des calculs -Prises en compte des excès et des déficits d'eau	-Sensibilités aux tendances dans les séries climatiques -principe n'est pas toujours aisé à comprendre par les usagers	- A été déjà testé dans de nombreux pays d'Afrique australe (Malawi, Tanzanie, Kenya) et au Sénégal sur différentes cultures
Indice de déficit hydrique	-Prise en compte de la sensibilité des cultures au déficit hydrique - Bornage des pluies pour ne retenir que de la pluie efficace	-Requiert des données historiques des rendements	-A été testé au Maroc
Indice de satisfaction des besoins en eau des cultures (WRSI en anglais)	-Prise en compte des besoins en eau pendant les phases -Existence d'une échelle de Signification des valeurs de WRSI -Prise en compte à la fois du déficit et de l'excès d'eau	- -Faible adaptabilité dans les zones subhumides et humides	-Existence de logiciels pour le calcul de l'indice WRSI (GEO Water Requirement Satisfaction Index, Instat+ v. 3.36)

Source : Sarr *et al.* (2012)

II.2.4. Stratégies d'adaptation aux effets des changements climatiques dans le secteur agricole

La vulnérabilité au stress hydrique des céréales cultivées dans le Sahel Burkinabè s'accroît par la nature de la variété cultivée (génétique), la conduite technique (agronomique) et par les caractéristiques du milieu naturel (environnement). Comme le milieu naturel est difficile à modifier à l'échelle du champ cultivé, les producteurs, les structures de recherche et de développement au Burkina ont entrepris des stratégies d'adaptation aux effets néfastes du changement climatique par l'utilisation des variétés résistantes à la sécheresse et des techniques agronomiques économes en eau appelées aussi les techniques de conservation des eaux et des sols.

1. Utilisation des semences améliorées

La pratique de production et d'utilisation des semences améliorées consiste à la création des variétés adaptées aux conditions climatiques et naturelles de la zone sahélienne et de tout le pays en général. Le maïs, le mil et le sorgho sont les spéculations les plus concernées. Avec la persistance de l'aridification du climat, les paysans ont tendance à abandonner les variétés locales de céréales (sorgho, petit mil, maïs, etc.) qui n'arrivaient plus à boucler convenablement leur cycle végétatif alors que la durée de la saison pluvieuse se réduit considérablement. Selon les producteurs, ces anciennes variétés ont été remplacées par de nouvelles variétés extra précoces (60 jours) qui contribuent au moins à 40 % à l'expression du rendement (Ouédraogo, 2012). Cependant, la production des semences améliorées est très coûteuse, ce qui les rend inaccessibles à tous les paysans. L'adoption de celles-ci se heurte également aux poches de sécheresse intra-saisonnières durant la campagne agricole (Doto *et al.*, 2015).

2. Les Techniques de conservation des eaux et des sols

Les techniques de conservation des eaux et des sols peuvent être subdivisées en trois. On a les techniques mécaniques, les techniques culturales et les techniques biologiques. Une technique est qualifiée de mécanique si elle mobilise une main d'œuvre importante destinée à gérer les flux hydriques. Les techniques mécaniques de la zone sahélienne regroupent les diguettes antiérosives en terre et en pierre, la *zai*, demi-lune, digues filtrantes et les fossés antiérosifs. Les mesures complémentaires utilisées concernent l'application de la fumure organique. Ces techniques procurent essentiellement l'augmentation des rendements agricoles, la conservation de l'eau et la régénération du tapis herbacé et ligneux.

D'autres techniques sont qualifiées de culturales car elles concernent principalement la

gestion de la matière organique. Elles regroupent l'ensemble des techniques d'intensification agricole (compostage, fumure organique) et de travail du sol qui créent une fissuration en vue d'augmenter la porosité des horizons superficiels du sol Nicou *et al.* (1987). Ils affirment que même un faible accroissement (10 à 20 %) de la porosité globale, apporte des avantages très remarquables tels que, l'infiltration de l'eau dans le sol, réduction de l'évaporation, amélioration de la structure du sol et donc, un meilleur enracinement et une bonne absorption des éléments nutritifs par les plantes. Enfin, la dernière catégorie de techniques biologiques consiste à gérer la végétation des zones à réhabiliter.

Les techniques biologiques concernent principalement la régénération du couvert végétal avec une amélioration de la production primaire et une modification de la structure de la végétation, l'amélioration des propriétés hydrodynamique du sol (porosité et bilan hydrique) et la réduction du ruissellement et de l'érosion. Cependant, ces trois techniques présentent des atouts et des faiblesses (voir annexes 1, 2, 3).

III. MATERIEL ET METHODES

III.1. LOCALISATION ET DEMOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

Cette étude porte sur la zone sahéenne du Burkina Faso. Comme le montre la figure 2, la zone sahéenne du Burkina Faso est située au Nord de la 13^{ème} parallèle. Elle est subdivisée en deux grandes régions climatologiques à savoir le Sahel (limité au sud par l'isohyète 400 m et le Subsahel (limité au sud par l'isohyète 600 m).

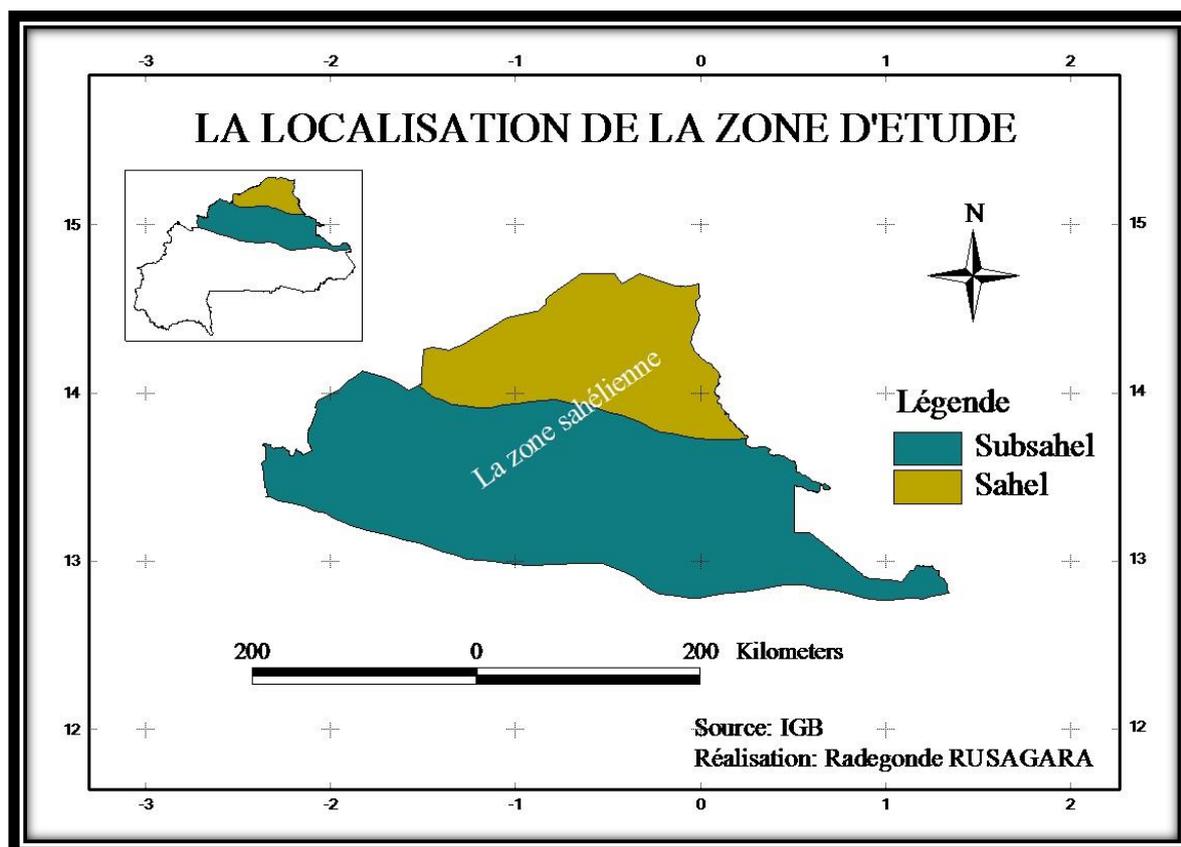


Figure 2: Localisation de la zone sahéenne du Burkina Faso

Actuellement, cette zone occupe environ 25% du territoire Burkinabè. Elle comptait 3 275 153 habitants sur une superficie de 74 244 km² selon le dernier recensement général effectué en 2006 par l'INSD. Dans le tableau 6, la projection de la population de la zone sahéenne montre que la population actualisée de 2015 est de 4 181 259 habitants répartis dans les différentes régions de la zone (tableau 6).

Tableau 6: Superficie et population de la zone sahéenne du Burkina Faso

Région	Chef-lieu	Province	Superficie	Populations par an	
			(km ²)	2006	2015
Centre-Nord	Kaya	Bam	4 084	275 191	348 685
		Namentenga	6 466	328 820	416 693
		Sanmatenga	9 290	598 014	751 378
Est	Fada-N’Gourma	Gnagna	8 470	408 669	528 090
Nord	Ouahigouya	Loroum	3 587	142 853	178 775
		Yatenga	6 987	553 164	673 414
		Oudalan	9 832	195 964	270 166
Sahel	Dori	Seno	6 866	264 991	338 678
		Soum	12 205	347 335	461 982
		Yagha	6 457	160 152	213 398
Total			74 244	3 275 153	4 181 259

Source : INSD, 2006

III.2. MATERIEL VEGETAL

Les cultures considérées dans le cadre de cette étude et représentant celles les plus pratiquées dans la zone d’étude sont le mil, le sorgho et le maïs. Les caractéristiques assorties d’une revue bibliographique sont consignées dans le tableau 7.

Tableau 7: Paramètres caractéristiques du maïs, mil et sorgho

Céréales	Durée du cycle en jours (j)	Coefficient cultural				Enracinement considéré Zr (m)
		Initial	Croissance	Mi saison	Arrière- saison	
Maïs <i>Barka</i>	80 (10-30-25-15)*	0,3	0,84	1,15	0,53	1
Mil	105 (15-25-40-25)*	0,35	0,7	1,1	0,65	1
Sorgho	120 (20-30-40-30)*	0,35	0,75	1,1	0,65	1

Source : Doorenbos et Kassam (1987) ; Doto *et al.* (2015)

* durée de chaque phase phénologique de la culture en jours

III.3. COLLECTE DES DONNEES

Dans le cadre de ce travail, il a été nécessaire de réunir des données de multiples sources afin de mener à bien la recherche. Il s'agit essentiellement de:

- ✓ données météorologiques : les pluies et les évapotranspirations
- ✓ données pédologiques: la réserve utile des sols de la zone d'étude.

III.3.1. Pluie et évapotranspiration

Deux types de données ont fait l'objet de cette étude: les données ponctuelles des hauteurs de pluies ainsi que les données continues des précipitations et des évapotranspirations potentielles (ETP). Les données ponctuelles des hauteurs de pluies aux pas de temps mensuel de deux (02) stations synoptiques (Dori et Ouahigouya) représentatives de la zone d'étude ont été utilisées pour l'étude de la variabilité pluviométrique (figure 6). Ces données couvrent la période allant de 1961 à 2009 et ont été obtenues auprès de la Direction Générale de la Météorologie Nationale du Burkina Faso sis à Ouagadougou. Elles devaient respecter deux critères importants : d'une part, la longueur des chroniques (couvrir la plus grande période de temps possible) et, d'autre part, la qualité des données (le moins possible des données manquantes). Au but de l'étude, seules les données mensuelles de la campagne agricole du Sahel Burkinabè ont fait l'objet de l'analyse de la variabilité pluviométrique. En d'autres termes, il n'a été pris en compte que les données pluviométriques allant du mois de juin au mois de septembre de chaque année et de chaque station synoptique.

En ce qui concerne la cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique, ont été utilisées les données continues (de type raster) des pluies et des évapotranspirations potentielles aux pas de temps décennaires. Ce sont des données images qui ont été téléchargées gratuitement en ligne sur le site web de FEWS-NET sous le lien <http://chg.geog.ucsb.edu/wb/geowrsi.php> et couvrent la période allant de 2008 à 2016. Les données publiées sur ce site web sont simulées et mises à jour chaque dix (10) jours par différents organismes internationaux (FAO, FEWS NET et USGS) pour les différentes régions de l'Afrique dont le Sahel. Le calcul des valeurs des évapotranspirations journalières à une résolution spatiale de 1,0 degré pour l'Afrique est effectué d'une part par FEWS-NET en utilisant l'équation de Penman-Monteith. D'autre part, les données satellitaires des précipitations pour le continent Africain sont simulées par la NOAA à une résolution spatiale de 0,1 degrés (1km). Ces données sont produites en utilisant une méthode d'interpolation qui combine les données provenant de Meteosat Cold Cloud Duration (CCD), Special Sensor Microwave/ Imager (SSM/I), Defense Meteorological Satellite Program, Advanced Microwave

Sounding Unit (AMSU) et les rapports des données pluviométriques du système mondial de télécommunications (Global Telecommunication System (GTS)).

III.3.2. La pédologie

Les types des sols rencontrés dans la localité influent directement sur l'alimentation hydrique des cultures, car selon le type de sol, la réserve utile (RU) est différente, de même que la vitesse d'infiltration ou encore le coefficient de ruissellement. Dans le cadre de cette étude, on s'est uniquement intéressé à la capacité de rétention de l'eau dans le sol (Water Holding Capacity: WHC) et la quantité d'eau disponible dans le sol pour les plantes (Soil Water : SW) ou la réserve utile RU. De même que celles des pluies et des ETP, les données des réserves utiles des sols prises en compte pour la cartographie sont continues et ont été téléchargées et sauvegardées en même temps lors de l'installation du logiciel GeoWRSI qui sera décrit ultérieurement. Ces données ont été générées grâce à la base mondiale des sols compilée par la FAO en 1988. La réserve utile représente le volume d'eau du sol utilisable par les plantes. Elle correspond à la différence entre le volume total d'eau qu'un sol peut stocker dans les pores fins après drainage (ou humidité à la capacité au champ) et le volume d'eau au flétrissement. Les sols de la zone d'étude sont majoritairement constitués par des sols sableux et argilo-sableux et ont une réserve utile faible. Selon Withers et Vipond (1974), cette réserve utile varie entre 55 mm et 120 mm sur 1 mètre de profondeur.

III.4. ETUDE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE

III.4.1. Comblement des données lacunaires

Durant la période de la campagne agricole, l'inventaire des données manquantes par jour et par station synoptique a montré que les deux stations présentent des données pluviométriques lacunaires (ici une lacune correspond à un jour sans mesure disponible). Cependant, les lacunes que présentent Dori et Ouahigouya ne dépassent pas un taux de 20% et par conséquent elle a fait l'objet de l'étude après le comblement des lacunes. Le comblement des données journalières manquantes de chaque station a été assuré par une méthode qui consiste à remplacer les données manquantes par celles observées à la station la plus proche. Cette méthode exige que la station comportant des lacunes et celles utilisées pour les combler doivent être soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone climatique. A cet effet, le comblement des données lacunaires a été effectué après avoir vérifié la proximité et la position en altitude des deux stations. Ainsi les données manquantes de la station de Dori ont été comblées par celle de la station de Ouahigouya et vice-versa.

III.4.2. Test statistiques réalisés pour l'analyse des données pluviométriques

Après avoir comblé les lacunes dans les données de pluie, une nouvelle phase qui est celle des tests statistiques portant sur l'analyse de tendance et de rupture en moyenne a été réalisée. Ceci en vue de mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques des précipitations. Le terme « tendance » fait référence au changement dans les propriétés d'un processus aléatoire qui survient graduellement à l'échelle de la période d'échantillonnage alors qu'une rupture correspond à une modification qui survient subitement, étant entendu que les propriétés demeurent stables de part et d'autre de l'année de rupture. A l'aide du logiciel Khronostat version 1.01 (logiciel libre d'accès), développé par l'IRD et déjà employé dans de nombreuses études (Paturel *et al.*, 1996 ; Abdoulaye *et al.*, 2014, Bodian, 2014, Doto *et al.*, 2015) les chroniques de pluies annuelles de la campagne agricole ont été soumises aux différents tests disponibles dans ce logiciel. La description de ces tests peut être trouvée dans l'aide de Khronostat. Les tests statistiques appliqués sont :

- **test de vérification du caractère aléatoire** (hypothèse aléatoire : tendance) : test sur le rang (Kendall et Stuart) ;
- **tests de détection de rupture** : Test de Buishand, méthode de Pettitt (évolution du test de Mann-Whitney) et segmentation de Hubert ;
- **test de normalité** pour la vérification du caractère aléatoire de la chronique.

III.4.3. Détermination de l'indice de précipitations standardisé SPI

1. Définition et calcul pratique

Afin de mettre en évidence les fluctuations des régimes pluviométriques, il a été procédé au calcul de l'indice de précipitations standardisé ou en anglais Standardized Precipitation Index (SPI). Il a été mis au point par McKee *et al.* (1993) dans le but de quantifier le déficit de précipitations à de multiples échelles de temps (décadaires, mensuelles, trimestrielles, etc.). L'indice SPI sert aussi bien à l'expérimentation qu'à l'exploitation dans plus de 70 pays. Il est utilisé dans divers instituts de recherche, des universités et des services météorologiques et hydrologiques nationaux du monde entier dans le cadre d'activités de suivi et d'alerte précoce de la sécheresse (Bodian, 2014 ; cheikh *et al.* 2015 ; Wu *et al.*, 2001 et Giddings *et al.*, 2005). En effet, le SPI permet de traduire les incidences de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau aux pas de temps raisonnables. En d'autres termes, la période sur laquelle porte l'indice SPI variera en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses et applications envisagées.

Par exemple, l'humidité du sol réagit relativement vite aux anomalies de précipitations, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme. Par conséquent l'indice SPI sur des pas de 1 à 2 mois est adapté pour l'étude de la sécheresse météorologique, 1 à 6 mois pour la sécheresse agricole et 6 à 24 mois, voire plus pour la sécheresse hydrologique.

Dans le cadre de cette étude, le choix et l'utilisation de l'indice SPI reposent sur ses 3 avantages majeurs:

- ✓ il est simple à calculer car il nécessite uniquement des données de pluie ;
- ✓ il est souple d'utilisation car il peut- être calculé pour des pas de temps variables ce qui permet d'adapter la fenêtre temporelle au but de l'étude (dans le domaine agricole, des pas de temps courts sont les plus adaptés) ;
- ✓ sa normalisation, issue de sa méthode de calcul, assure que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes est la même partout.

Cependant cet indice présente quelques inconvénients :

- ✓ il ne permet de quantifier que le déficit de précipitations puisqu'il ne repose que sur les relevés de précipitations;
- ✓ les valeurs basées sur des données préliminaires peuvent changer et celles-ci varient si la durée de la période des relevés s'allonge ;
- ✓ l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ETR/ETP) car le bilan hydrique du sol n'est pas pris en compte.

Il est à noter que les inconvénients que présentent l'indice SPI n'influenceront en aucun cas l'analyse de la sécheresse dans le cas de cette étude car le but du calcul de cet indice est d'étudier la variabilité pluviométrique de la zone sahélienne du Burkina Faso. Du coup, la prise en compte du bilan hydrique n'est pas la priorité à cette étape.

A la base, l'indice SPI est fondé sur la probabilité de précipitations sur un laps de temps donné. Pour une station quelconque, la probabilité des précipitations observées sur les laps de temps est transformée en un indice. Sa détermination nécessite un historique de précipitations sur une longue durée (au moins 30 ans) à laquelle il faut ajuster une distribution de probabilité, puis la transformer en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, de la station considérée et pour le laps de temps étudié, soit égal à zéro (Edwards et McKee, 1997).

Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives, des précipitations inférieures à la médiane. Étant donné que l'indice est

normalisé, il est possible de représenter de la même manière les climats humides et les climats arides. Une sécheresse sévit quand l'indice montre de façon continue une valeur négative de -1,0 ou moins et se termine lorsque l'indice devient positif. Fort de cela, on distingue pour chaque épisode de sécheresse une durée, avec un début et une fin, et une intensité pour chaque décennie ou mois durant lequel l'épisode se poursuit (tableau 8).

De plus, le fait que l'indice SPI soit normalisé permet de déterminer le caractère peu fréquent d'un épisode de sécheresse en cours ainsi que la probabilité d'une précipitation suffisante pour y mettre fin (McKee *et al.*, 1993). Cela permet aussi d'évaluer selon quelle fréquence un épisode de sécheresse donné se produit et de comparer par la suite des sécheresses passées et actuelles entre des zones climatiques et géographiques différentes. En se basant sur le système de classification que McKee *et al.* (1993) ont utilisé, l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice et leur probabilité d'occurrence sont définis dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8: Valeurs de l'indice SPI et interprétations

Indice SPI	Caractéristiques
2 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de 0 à 0,99	Proche de la normale
de 0 à -0,99	Légère sécheresse
de -1 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Source : Organisation Météorologique Mondiale ((OMM-N° 1090), 2012)

Tableau 9: Probabilités d'occurrence des périodes sèches

Indice SPI	Catégorie	Nombre de fois	
		sur 100 ans	
de 0 à -0,99	Légère sécheresse	33	1 fois pour les 3 ans
de -1 à -1,49	Modérément sec	10	1 fois pour les 10 ans
de -1,5 à -1,99	Très sec	5	1 fois pour les 20 ans
-2 et moins	Extrêmement sec	2	1 fois pour les 50 ans

Source : Organisation Météorologique Mondiale ((OMM-N° 1090), 2012)

2. Application à cette étude

L'indice SPI a été obtenu en utilisant la dernière version de son programme de calcul (SPI_SL_6.exe). Ce dernier ainsi que ses fichiers types et ses instructions pour un environnement Windows sur PC ont été téléchargées gratuitement en ligne sur le site web de

National Drought Mitigation Center (NDMC) à l'adresse suivante:

<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

Le programme ajuste une distribution de probabilité à une longue série de relevés, puis il la transforme en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, de la station considérée et pour le laps de temps étudié, soit égal à zéro (Edwards et McKee, 1997). En effet, grâce au programme SPI_SL_6.exe, il est possible de calculer l'indice SPI pour un lieu donné et sur un nombre de fenêtres temporelles pouvant aller jusqu'à six simultanément. Rappelons que cette étude se veut d'étudier la variabilité pluviométrique au Sahel Burkinabè afin de comprendre par la suite l'évolution temporelle et spatiale de la sécheresse dans le domaine agricole (la céréaliculture). Ce qui est ici intéressant est d'étudier les sécheresses pendant la saison des pluies qui est également celle pendant laquelle poussent les cultures et ce à un pas de temps relativement court. Des valeurs élevées peuvent être observées durant les 3 ou 4 mois de pluie, et négatives pendant la saison sèche, ce qui n'apporte rien. Etant mentionné dans le volet «collecte des données », la campagne agricole utile dans la zone d'étude est supposée débutée dès le mois de juin et prend fin au mois de septembre. Donc pour étudier les sécheresses mensuelles relatives à la campagne agricole, le calcul de l'indice SPI a été fait sur les 4 mois que dure la campagne agricole (juin-septembre) avec une « fenêtre glissante » de 3 mois.

L'indice SPI a été calculé à partir des relevés des précipitations de toutes les deux stations synoptiques (Dori et Ouahigouya). Une fenêtre glissante de 3 mois sur les 4 mois et pendant 49 années donne donc un jeu de 98 valeurs pour chaque station. Ces valeurs ont permis d'établir une comparaison entre le total des précipitations sur la période de la campagne agricole et les totaux des précipitations pour cette même période de 4 mois de toutes les années (1961-2009) pour lesquelles on dispose les relevés. Autrement dit, l'indice SPI sur quatre mois se terminant fin septembre nous permet de comparer le cumul des précipitations des mois de juin à septembre de toutes les années figurant dans l'historique des observations des stations de Dori et de Ouahigouya.

Comme le montre la figure 3, l'analyse de l'indice SPI sur une fenêtre glissante de 3 mois se terminant fin août et fin septembre a permis de détecter les tendances des précipitations au cours des stades phénologiques importants à la fois du maïs, sorgho et mil. Quant aux indices SPI-3mois (SPI-3M) se terminant fin juin et fin juillet, leur détermination demande de prendre en compte les mois d'avril et mai. Etant donné que la prise en compte des mois non pluvieux pouvait fausser l'analyse, ils n'ont pas été considérés. L'indice SPI déterminé sur une fenêtre

glissante de 3 mois (indice SPI-3mois) et se terminant fin août prenant en compte les mois de juin, juillet et août, est utile pour analyser l'évolution des pluies pendant les phases de croissance et de la mi-saison. L'indice SPI se terminant en fin septembre prend en compte le mois de juillet, août et septembre. Cet indice permet de détecter l'évolution temporelle et spatiale des précipitations pendant la phase de la mi-saison et de l'arrière-saison pour la céréaliculture de la zone sahélienne du Burkina Faso.

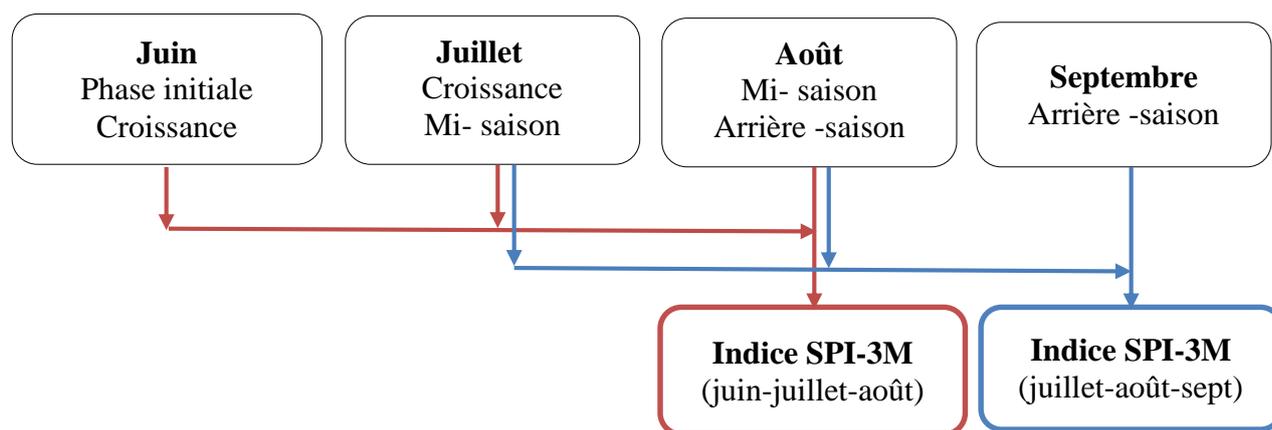


Figure 3: Diagramme de calcul de l'indice SPI-3mois (SPI-3M) de juin à septembre

III.5. CARTOGRAPHIE DU DEGRE DE VULNERABILITE AU STRESS HYDRIQUE

III.5.1. Choix et justification de l'indicateur du degré de vulnérabilité au stress hydrique

L'indicateur du degré de vulnérabilité au stress hydrique utilisé est l'indice WRSI de satisfaction des besoins en eau des cultures, aussi appelé en anglais Water Requirements Satisfaction Index (WRSI). Son choix s'explique par plusieurs avantages indéniables qu'il offre par rapport à d'autres indices. L'indice WRSI peut être appliqué à des aires géographiques de grande taille et prend en compte aussi bien les déficits hydriques que les excès d'eau dommageables aux cultures (Frère et Popov, 1987) et ce pendant leurs phases phénologiques critiques. Il fonctionne donc parfaitement dans les zones semi arides (tel est le cas de la zone visée par cette étude) confrontées aux poches de sécheresses récurrentes pendant le cycle des cultures.

A cela s'ajoute qu'il est simple à calculer grâce à son programme de calcul et de représentation géospatiale appelé GeoWRSI (Geospatial Water Requirements Satisfaction Index). Ce modèle a été conçu par Senay *et al.* (2013) de l'USGS et il est disponible et téléchargeable gratuitement en ligne sous le lien : <http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/>. Grâce à une échelle de signification de ses valeurs, l'indice WRSI exprime le degré auquel ont été satisfaits les besoins en eau cumulés de la culture à un moment donné ou pour la

totalité de son cycle phénologique (Tableau 10). Dans ce même tableau, les différents degrés de vulnérabilité ont été estimés en se basant sur l'échelle significative des valeurs de l'indice WRSI obtenues. Par exemple lorsque WRSI est compris entre 95 et 99 %, la culture est très faiblement vulnérable au stress hydrique. Tandis que toute valeur de l'indice WRSI inférieure à 50% marque une très forte vulnérabilité au stress hydrique de la culture.

Tableau 10: Typologie de l'indice WRSI (Frère et Popov, 1987)

Valeur de l'indice WRSI (%)	Qualification du point de vue alimentation hydrique	Degré de vulnérabilité
100	Très bon	Pas vulnérable
95-99	Bon	Faible
80-94	Moyen	Moyenne
60-79	Médiocre	Elevée
50-59	Mauvais	Très élevée
<50	Echec complet*	Très élevée

*Cet état implique un resemis puisque l'analyse de la vulnérabilité est faite par stade de développement considéré de façon indépendante.

Cependant, l'indice WRSI de satisfaction des besoins en eau de la plante est faiblement adapté dans les zones humides et subhumides.

III.5.2. Détermination et représentation cartographique de l'indice WRSI

La détermination et la représentation indicielle indiquant le degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales céréales cultivées dans la zone d'étude ont été effectuées à l'aide de deux logiciels à savoir GeoWRSI (Geospatial Water Requirements Satisfaction Index) et ArcView GIS. Le calcul de WRSI combine les données de pluies, d'évapotranspiration de référence (ET_o) et les données pédologiques (RU) pour évaluer l'état hydrique dans une aire géographique donnée. La structure générale de cette méthode de calcul a été résumée à la figure 4.

1. Brève description du modèle GeoWRSI

Initialement, la méthode d'estimation de l'indice WRSI a été mise au point par la FAO dans les pays où l'eau constitue un facteur limitant à l'agriculture pluviale (Frère et Popov, 1987). En élaborant le logiciel GeoWRSI, l'USGS (United States Geological Survey) a améliorée et élargie cette méthode comme une application géospatiale pour surveiller l'état hydrique des cultures pendant les périodes de croissance ou pour prédire les productions. Le programme GeoWRSI permet de calculer et de représenter spatialement l'indice WRSI ainsi que les autres paramètres de sorties secondaires. Pour ce faire, GeoWRSI utilise un modèle de bilan

hydrique pour une culture spécifique, sélectionnée par l'utilisateur dans une région spécifique du monde en utilisant les données d'entrée en format raster.

Outre le WRSI, le programme produit également d'autres résultats de sorties qui peuvent être utilisés pour aider à déterminer quantitativement/qualitativement et à surveiller l'état hydrique des cultures pendant les périodes de croissance ou pour prédire les productions. On peut citer :

- ✓ la date de début de la saison agricole (SOS);
- ✓ l'indice de l'eau dans le sol (SW);
- ✓ la progression de la durée de croissance de la culture (% de LGP) ;
- ✓ l'excès d'eau et le déficit d'eau.

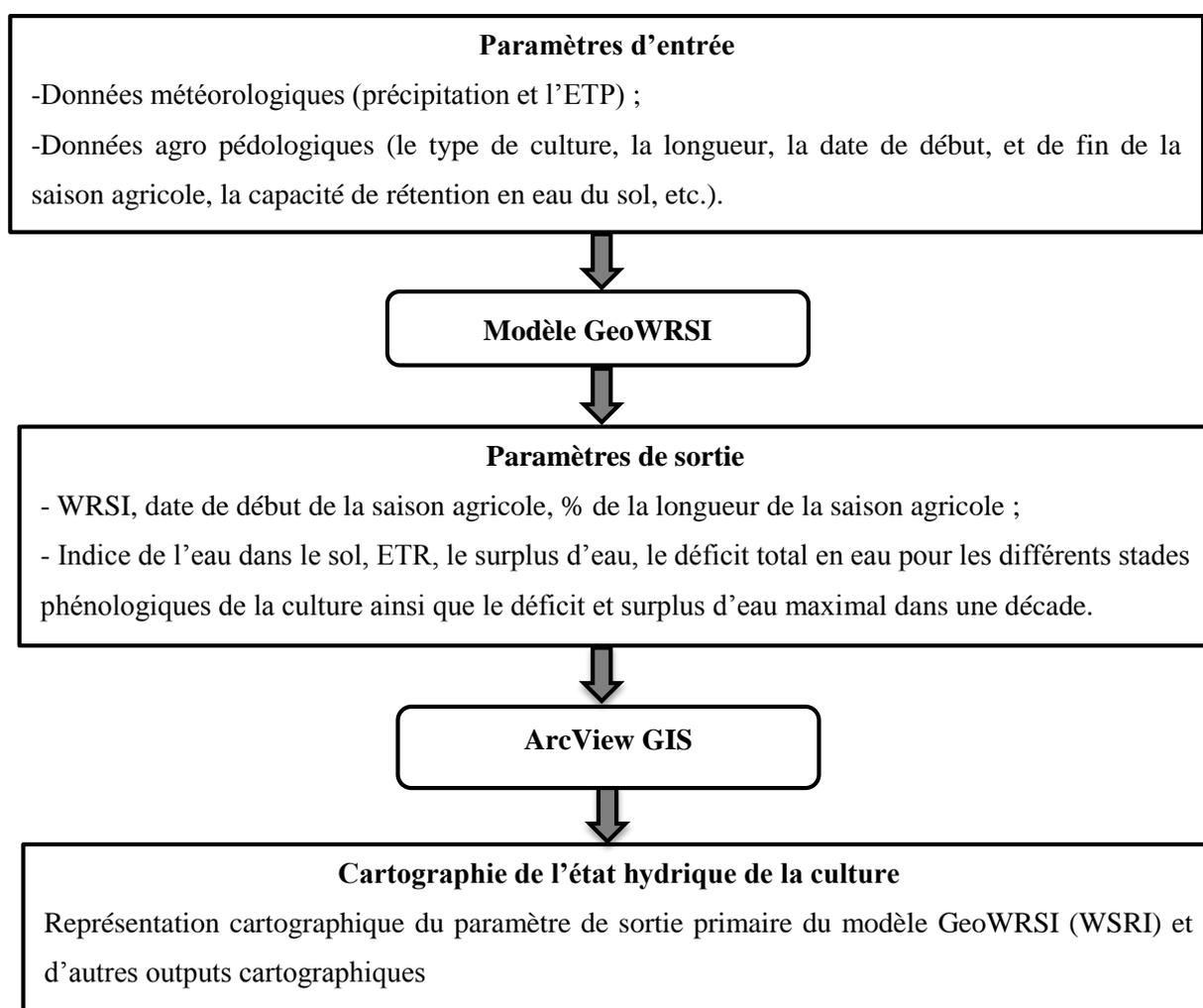


Figure 4: Structure générale de la méthode de détermination et de représentation cartographique de l'indice WRSI.

2. Calcul théorique de l'indice WRSI

Techniquement, l'indice de satisfaction des besoins en eau (WRSI) est le rapport entre l'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR) et ses besoins en eau, ce qui équivaut à l'évapotranspiration maximale (ETM).

$$WRSI = \frac{\sum ETR}{\sum ETM} * 100 \quad (1)$$

Les besoins en eau de la culture ETM à un moment donné pendant la saison de croissance est obtenue par la formule suivante :

$$ETM = \sum_{i=1}^n k_{C_i} * ETP_i \quad (2)$$

Où n est le nombre de décades que comporte la phase, ETP_i (en mm) est l'évapotranspiration potentielle de la décade i et k_{C_i} , le coefficient cultural de la décade i (le modèle découpe le cycle de la plante en décades et les phases font une ou plusieurs décades). Les valeurs de k_{C_i} définissent le modèle d'utilisation de l'eau d'une culture tout au long de sa croissance. Elles ont été définies pour chaque culture et suivant les quatre (04) grandes stades phénologiques (voir figure 5).

Quant à l'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR), elle représente la quantité d'eau réellement disponible pour la plante. Elle est calculée par une fonction qui prend en compte la quantité d'eau disponible dans le sol (SW). Le SW est estimée par une simple équation où le volume total est défini par la capacité de rétention d'eau (WHC) du sol dans la zone racinaire efficace de la culture. C'est la quantité d'eau du sol disponible à un pas de temps donné. Les valeurs de SW varient d'un minimum de 0 à un maximum égal à WHC (mm). Il faut noter qu'après avoir déterminé ETR à chaque pas de temps, une nouvelle valeur de SW est obtenue.

Pour déterminer ETR, le modèle ajoute d'abord les précipitations décadaires (PPT) à la valeur de SW existant pour donner une valeur de la quantité d'eau disponible pour la plante (PAW).

$$PAW_i = SW_{i-1} + PPT_i \quad (3)$$

Suivant la quantité d'eau disponible pour la plante (PAW), la valeur de l'ETR est déterminée par l'ensemble des équations suivantes (un diagramme schématique des composants du modèle est illustré à la figure 5):

Si :

$$PAW \geq SWC, \text{ alors } ETR = ETM \quad (4)$$

$$PAW < SWC, \text{ alors } ETR = \frac{PAW}{SWC} * ETM \quad (5)$$

$$PAW = ETR, \text{ alors } ETR = PAW \quad (6)$$

SWC (mm) est le niveau critique de l'eau dans le sol en dessous duquel ETR sera inférieure à ETM. SWC varie selon les cultures et le stade phénologique selon l'équation suivante:

$$SWC = WHC * SW_f * D_f \quad (7)$$

SW_f est la fraction de WHC qui définit le niveau d'eau disponible dans le sol au-dessous duquel ETR devient inférieure à ETM au cours de l'arrière-saison, c'est-à-dire à une profondeur racinaire $D_f = 1$ m. En céréaliculture, la SW_f a été supposée égale à 0,45. La littérature indique que cette valeur peut être estimée comme le complément à l'unité du coefficient de déplétion ρ (FAO, 1998). La profondeur racinaire D_f varie entre 0,1 et 1,0 m tout au long de la durée de croissance de la céréale de la zone d'étude. Elle augmente linéairement de l'état initial jusqu'à la mi-saison où elle atteint 1 m. Par exemple pour le maïs, la profondeur racinaire initiale a été supposée égale à 0,1 m au début du stade initial à un maximum de 1 m au début de la mi-saison (c'est-à-dire après 48% de la saison de croissance).

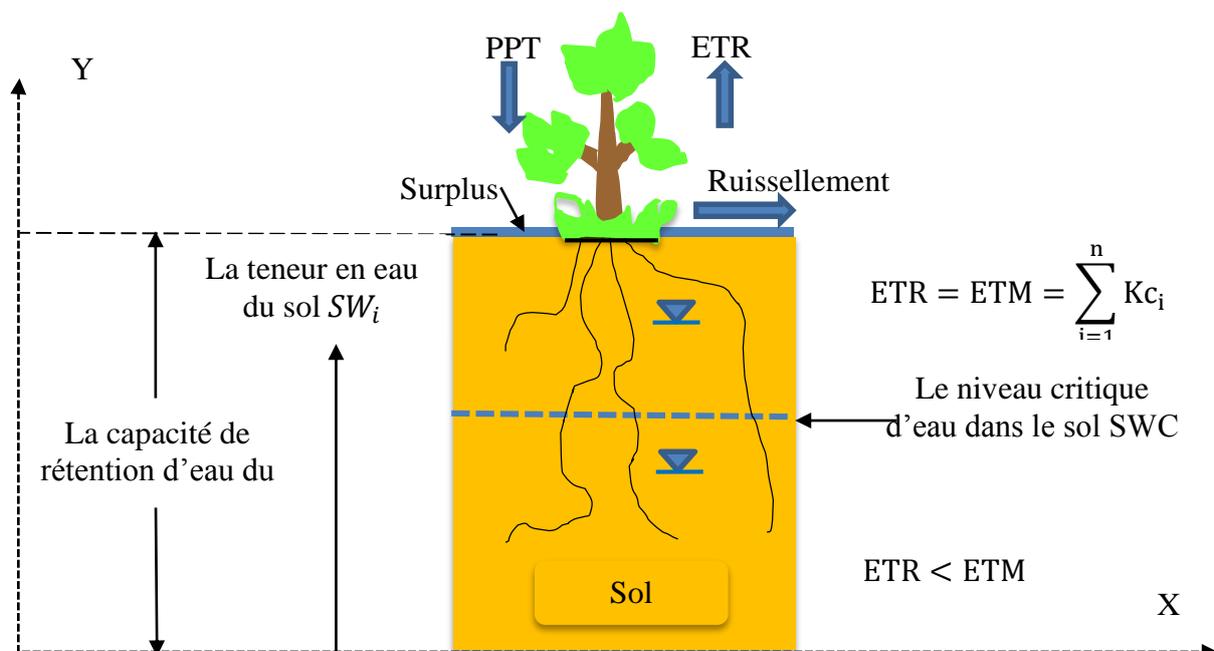


Figure 5: Composantes du bilan hydrique sous GeoWRSI

3. Détermination de l'indice WRSI par GeoWRSI

L'initialisation du modèle exige la définition de la région spécifique et les paramètres caractéristiques de chaque culture en question. Dans GeoWRSI, une région représente un ensemble de paramètres déjà configuré dans le modèle et qui définissent son emplacement et ses caractéristiques générales à savoir la latitude, la longitude, la date de début et de fin de la saison climatologique (SOS_{clim} et EOS_{clim}), etc. Ces données sont déjà incorporées dans le logiciel et s'installent automatiquement lors de l'exécution du modèle pour chaque région

spécifique. Par défaut, le programme GeoWRSI est configuré avec cinq (05) grandes régions dont la ceinture sahéenne de l'Afrique de l'Ouest où se trouve la zone d'étude en cause. Par conséquent, c'est d'abord toute la zone sahéenne de l'Afrique de l'Ouest qui a fait l'objet de l'étude et à partir de celle-ci, les paramètres de sorties ne concernant que la zone sahéenne du Burkina Faso ont été extraits avec Arc GIS.

Quant aux paramètres caractéristiques de chaque culture, il s'agit de définir ses coefficients culturaux k_c pour les pourcentages de la longueur de croissance correspondant aux quatre phases de développement de ladite culture. Par exemple, pour le maïs, ont été utilisées les valeurs de k_c de 0,3; 0,84; 1,15 et 0,53 pour les moments correspondant respectivement à 0%, 19%, 48%, 80% et 100% de sa longueur de croissance. De plus, il a été défini les profondeurs racinaires initiale et maximale qui ont été respectivement prises égales à 0,1 et 1 m pour chaque céréale étudiée. En plus des paramètres caractéristiques de la culture et de la définition de la région de travail, l'exécution du modèle requiert un certain nombre des paramètres d'entrées dont les plus importants sont les précipitations et l'évapotranspiration de référence ou potentielle.

Les données étant déjà téléchargées et sauvegardées, le modèle les a utilisées pour le calcul de WRSI et ses autres paramètres de sorties (% LGP, l'indice de l'eau dans le sol, etc.). Il convient de préciser que l'exécution correcte du programme nécessite les données d'au moins six (06) décades de données précédentes avant que le programme ne commence à tourner. Ceci est primordial pour initialiser la teneur en eau du sol. A cette fin, en considérant que la saison de pluies de la zone sahéenne commence en juin, soit à la décade 18 de l'année i , le modèle a commencé à calculer la teneur en eau dans le sol (SW) à la décade 12, c'est-à-dire en avril pour chaque année de la période allant de 2008-2016. Dans ce cas la campagne agricole 2016-2017 a été exclue de l'étude car nous ne disposons pas des données de la douzième décade au moment de l'étude.

Le calcul de l'indice WRSI nécessite également la définition de la date de début (SOS) et de fin (EOS) de la saison agricole. D'après les études réalisées par Doto *et al* (2015), la date de début favorable de la saison agricole dans la zone sahéenne du Burkina Faso a été située en juin plus précisément à la dix-huitième (18^{ème}) décade. Il a été donc spécifié dans le modèle la date de début de la saison agricole (SOS) comme étant la décade 18 de chaque campagne agricole afin d'appréhender un probable effet des semis précoces ou tardifs sur le comportement hydrique de la plante. Ainsi, pour étudier la robustesse de cette décade, la décade favorable au semis a été également déterminée à partir du logiciel pour chaque année

suivant le critère des précipitations enregistrées sur une période de 3 décades utilisé par AGRHYMET. Ce dernier stipule que le temps de semis est favorable s'il y a au moins 25 mm de pluies mesurées durant la première décade et une hauteur de pluie totale de 20 mm enregistrée durant les deux décades suivantes. Ensuite, pour déterminer la date de fin de saison agricole, le modèle GeoWRSI requiert d'abord la durée de croissance de la culture (LGP). Par défaut, le GeoWRSI est livré avec une configuration de la durée de croissance de 120 jours pour le maïs. Ceci a été modifié en spécifiant dans le modèle, une durée de croissance de 80 jours de l'une des variétés rustiques de maïs cultivées dans la zone sahélienne et dont les paramètres caractéristiques sont consignés dans le tableau 7. Donc la culture du maïs nécessite 8 décades pour terminer sa phase phénologique. Pour le mil et le Sorgho, il a été également spécifié dans le modèle les périodes de croissance respectivement de 105 et 120 jours correspondant chacune à 11 et 12 décades. Ainsi, la longueur de fin de saison agricole, EOS est obtenue en ajoutant LGP en décade à celle de SOS.

En ce qui concerne la capacité de rétention d'eau dans le sol WHC, elle a été prise par défaut. En effet, dans le programme GeoWRSI, la FAO incorpore les cartes de WHC à une échelle de 1/500 000 pour chaque zone spécifique.

A l'aide de ces paramètres d'entrées, les sommes respectives des évapotranspirations réelles (ETR) et des évapotranspirations maximales (ETM) sont utilisées par le modèle pour calculer WRSI à la fin de la durée de croissance des cultures, ou jusqu'à une certaine décade dans le cycle pour chaque année (équation 1).

4. Représentation cartographique de l'indice WRSI

Le modèle GeoWRSI génère les paramètres de sorties pour toute la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Pour masquer les autres zones et ne prendre en compte que la zone sahélienne du Burkina Faso, le logiciel ArcView GIS a été utilisé. En effet, les sorties que produisent GeoWRSI sont déjà une représentation géospatiale en extension bil pouvant être exploitée et arrangée dans ArcView GIS.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

La présentation des résultats de cette étude et leur discussion a été faite en trois phases. La première a porté sur l'étude de la variabilité pluviométrique. Quant à la deuxième, elle concernait la cartographie du degré de stress hydrique des céréales. Dans la troisième partie, quelques stratégies d'atténuation de l'effet du stress hydrique en céréaliculture ont été proposées en fonction des moyens d'existence des populations de la zone d'étude.

IV.1. ETUDE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE

Cette étude a été rendue possible grâce aux résultats des différents tests statistiques réalisés sous le logiciel Khronostat et le calcul de l'indice SPI.

IV.1.1. Normalité, caractère aléatoire et détection de rupture dans les chroniques des stations de Dori et de Ouahigouya

Le tableau 11 présente les résultats des tests statistiques pour les deux stations références de la zone sahéenne du Burkina Faso. L'analyse montre que les données de ces deux stations suivent une loi normale et présentent un caractère aléatoire. La nature de la rupture (simple ou multiple) varie suivant les zones climatiques du Sahel Burkinabè. Dans sa partie Nord, les chroniques pluviométriques de la station de Dori montrent une rupture en 1967. Cette rupture confirme ou marque l'évolution de la sécheresse dans cette partie de la zone sahéenne du Burkina Faso. Ceci corrobore les résultats des travaux de Sircoulon (1976) et Servat *et al.* (1999) portant sur l'identification et l'évaluation des sécheresses au fur et à mesure qu'elles apparaissent. Depuis le début des observations, ils ont conclu que la période de 1967 à nos jours fait partie des trois principales périodes sèches que connaissent le Sahel (les deux autres étant 1911-1913 et 1940 -1943). Dans sa partie Sud ou le Subsahel, les chroniques pluviométriques de la station de Ouahigouya montrent deux ruptures, l'une en 1970 et l'autre en 1991. La première rupture montre une évolution d'une grande sécheresse tandis que la deuxième marque le début de la reprise des années humides mais toujours sèches par rapport aux années 1960. Cette observation a été déjà obtenue par Bodian (2014) sur la caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Certains auteurs comme Sene et Ozer, (2002) et Ozer *et al.* (2003) traduisent ces évènements comme un signe d'un retour progressif à des conditions pluviométriques plus favorables dans le Subsahel. Egalement, ces résultats sont en accord avec les travaux de Ali *et al.* (2008), Ali et Lebel (2009) sur le domaine sahéen, de Ouoba (2013) sur le Burkina Faso et de Ozer *et al.* (2009) sur le Niger.

Tableau 11: Déterminer du caractère normal et aléatoire et des périodes de rupture de deux stations du Sahel Burkinabè

Station	Normalité	Corrélation sur le rang	Absence de rupture		Segmentation (Hubert)	
			Pettitt	Buishand	Début	Fin
Dori	Oui	Aléatoire	Non	Non	1961	1966
					1967	2009
					1961	1969
Ouahigouya	Oui	Aléatoire	oui	Non	1970	1990
					1991	2009

IV.1.2. Evolution temporelle de l'indice SPI_{3M}

La figure 6 montre l'évolution de l'indice SPI pour une fenêtre glissante de 3 mois durant la campagne agricole sur les deux stations pluviométriques (Ouahigouya et Dori). Cet indice SPI des pluies trimestrielles de la campagne agricole révèlent une variabilité assez importante des pluies. Tout d'abord on s'est intéressé à la répartition ainsi qu'à l'évolution globale des différents types de sécheresses ou des humidités sur la période 1961-2009. La figure 6 montrent que les valeurs de l'indice SPI-fin août et de l'indice SPI-fin septembre de la station de Dori, ont été globalement positives sur les périodes 1961-1967 et 1989-1992 alors qu'elles ont été globalement négatives sur la période 1968-1988 avec une valeur extrême de -3,03 en 1984. Cependant, la période 1993-2009 présente une alternance brusque entre les années sèches et les années humides avec une valeur extrême de 2,1 en 2003. Globalement, l'analyse des courbes de tendance de l'indice SPI de la station de Dori confirme une tendance à la baisse. Ces résultats corroborent un bon nombre de travaux antérieurs (L'hôte *et al.*, 2002 ; Ali et Lebel, 2009 ; Ali, 2010). Ces auteurs estiment que la pluviométrie évolue peu depuis la fin des années 1960 et reste déficitaire. Mais ces résultats sont en contradiction avec les résultats obtenus au niveau de la station de Ouahigouya située dans la zone la plus arrosée du sud du domaine sahélien. Cette observation peut être due au fait que la station de Ouahigouya se trouve dans la zone de transition entre le domaine sahélien et celui soudano-sahélien.

En effet, la figure 6 indique que les valeurs de l'indice SPI de la station de Ouahigouya se terminant fin août ont été globalement négatives sur la période 1971-1990 avec des valeurs extrêmes de -2,17 en 1977 et -2,22 en 1984. Elles ont été positives sur tout le reste des années avec une valeur extrême de 2,09 en 2007. Par ailleurs, les valeurs de l'indice SPI se terminant fin septembre ont été globalement négatives sur la période 1972-1994 avec des valeurs extrêmes de -2,48 en 1982 et positives sur tout le reste des années avec une valeur extrême de 2,29 en 2007. A cet effet, contrairement à la station de Dori, la série chronologique de Ouahigouya est d'une tendance à la hausse.

Ainsi, en accord avec les travaux de Ali *et al.* (2008) ; de Ali et Lebel (2009), de Ouoba (2013), de Sene et Ozer, (2002) et Ozer *et al.*, (2003), l'évolution temporelle du SPI de la station de Ouahigouya montre que le Sahel est caractérisé par un retour à des conditions humides. Ces auteurs suggèrent donc que la sécheresse sahélienne aurait pu se terminer durant les années 1990. Il faut signaler que même si les résultats de ces auteurs vis-à-vis de l'évolution temporelle de la sécheresse apparue au Sahel et au Subsahel sont contradictoires, ils affirment tous que la zone d'étude (le Sahel et le Subsahel) est caractérisée par une plus forte variabilité interannuelle des précipitations. Autrement dit, la zone sahélienne (domaine sahélien) est souvent marquée par les années des humidités extrêmes ou de sécheresses extrêmes. Ceci favorise l'existence de risques hydro climatiques (inondations et sécheresses) dans ladite zone.

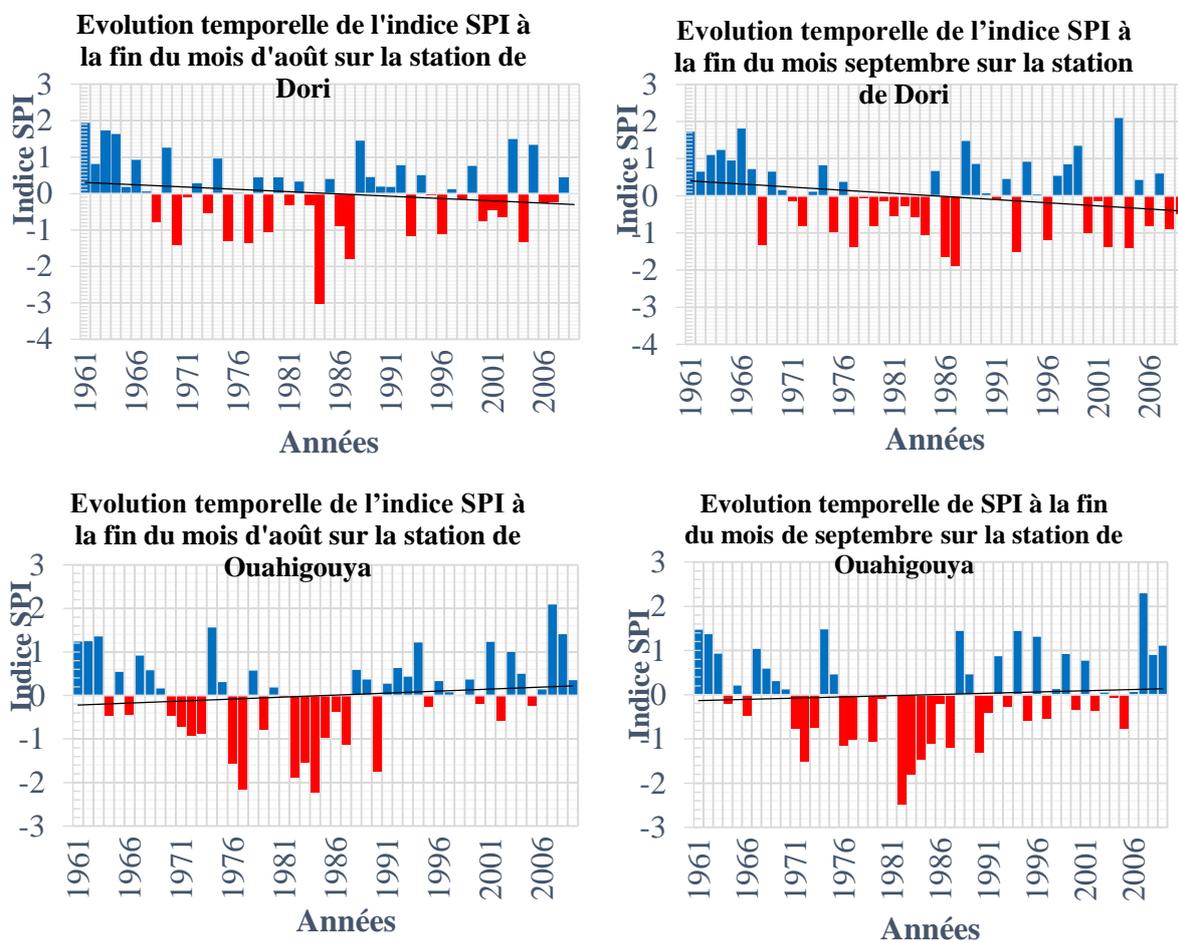


Figure 6: Evolution temporelle de l'indice SPI-3M à la fin du mois d'août et de septembre de 1961 à 2009 sur la station de Dori et de Ouahigouya

Par la suite, un bilan de l'évolution temporelle sur l'ensemble de la zone a été présenté en se basant sur le système de classification de McKee *et al.* (1993). Cette approche est la plus

efficace pour donner en fonction des intensités des différents épisodes, une idée précise sur le nombre des années normales, sèches ou humides qu'a connu la zone d'étude (Abdoulaye *et al.*, 2014). Dans ce sens, un graphique représentative de la proportion des années sèches, humides et proches de la normale a été tracé pour chaque station et pour chaque mois sur lequel l'indice a été calculé. Cette proportion a été obtenue en relevant pour chaque station synoptique et pour chaque fenêtre glissante, le nombre des années ayant les mêmes caractéristiques vis-à-vis de l'intensité de la sécheresse et de l'humidité. Cette somme a été divisée par le nombre total des années sur lequel l'indice a été calculé, soit 49 ans. Ainsi, les proportions des années humides, sèches ou proches de la normale ont été déterminées et portées à la figure 7.

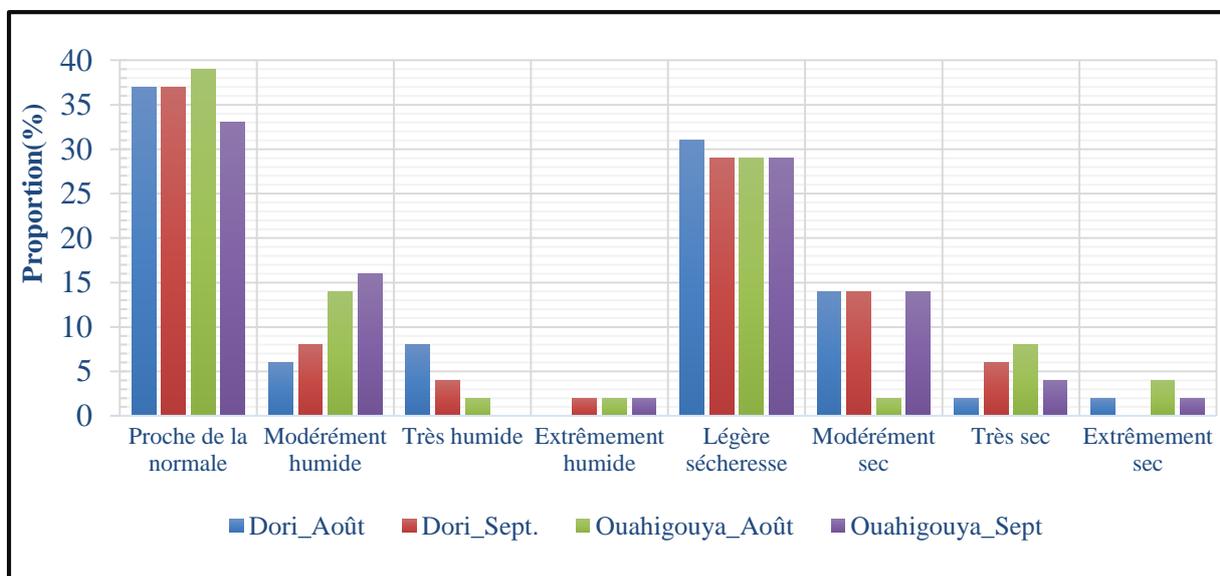


Figure 7: Proportion du caractère humide et/ou sec de la zone sahéenne durant la campagne agricole sur la période 1961 - 2009

En se basant sur le système de classification que propose McKee *et al.* (1993), la figure 7 montre que la zone d'étude a connu des épisodes humides ou secs aux intensités variées (allant des extrêmes aux modérées). Parmi ces intensités, les conditions normales ($0 \leq SPI \leq 0,99$) arrivent en premières position car elles représentent une proportion variant entre 33% et 39% sur toutes les stations synoptiques et pour tous les mois sur lesquels l'indice SPI a été calculé. Ces conditions sont définies comme étant une période où la moyenne des précipitations annuelles tend vers la moyenne de la pluviométrie totale avec une fluctuation inégalement répartie de part et d'autre de zéro (Abdoulaye *et al.*, 2014). Elles sont suivies par les conditions de légères sécheresses ($-0,99 \leq SPI \leq 0$) avec une proportion variant entre 29% et 31% pour chaque chronique. Ceci rejoint la probabilité d'occurrence des périodes de légères

sècheresses définit par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). En effet, les conditions de légères sécheresses ont une probabilité d'apparaître une fois tous les trois (03) ans. Les années humides ne sont pas nombreuses par conséquent elles sont moins représentées. Ce qui confirme les prévisions annoncées dans le rapport publiés par la FAO (1999). Dans ce rapport, la FAO prévoyait qu'il y aurait une probabilité dominante pour des conditions proches de la normale par rapport aux conditions intenses (de sécheresse ou d'humidité).

Malgré la grande proportionnalité des années proches de la normale par rapport aux années de légères sécheresses, les autres intensités définissant la sécheresse sont mieux représentées que les années humides et les années normales. Ainsi, les deux stations sont prédominées par les épisodes de sécheresse qu'aux épisodes humides et proches de la normale. En effet, l'indice SPI-fin août et l'indice SPI-fin septembre de chaque série chronologique ont indiqué respectivement que la station de Dori a été représenté à 14% par des années humides et celle de Ouahigouya à 18%. En ce qui concerne les conditions proches de la normale et celles de sécheresse, la station de Dori a été représentée à 49% par des années sèches et à 37% par les années normales. Quant à la station de Ouahigouya, elle a été représentée de 43% à 49% par des années sèches et de 33% à 37% par les années normales. Par conséquent, sur toutes les stations et sur la période considérée, les conditions humides sont les moins représentées parmi les trois conditions globales (humides, sèches et proches de la normale) que proposent McKee *et al.* (1993). Suivies par les conditions les plus proches de la normale, les conditions de sécheresses l'emportent dans tous les cas sur toutes les deux séries chronologiques des stations synoptiques. Ainsi, tous ces résultats vont dans le même sens que les résultats des travaux effectués par Cheick *et al.*, (2015) qui affirment que le domaine sahélien a été frappé en grande partie par les crises climatiques de sécheresses qui ne sont jusqu'à présent manifestée par une augmentation des sécheresses légères à fortes, et non par des sécheresses extrêmes.

De cette analyse il ressort donc que, les cultures de la zone sahélienne sont en grande partie soumises à des conditions de sécheresse durant les stades phénologiques les plus critiques à savoir les stades de la mi- saison. Ces conditions sont également renforcées par l'apparition fortuite et fréquentes des poches de sécheresse intra- et inter-décadaires dans la zone comme l'ont récemment montré Agali *et al.* (2013), Doto *et al.* (2015). Dans cette situation, une cartographie du degré de stress hydrique faisant objet de la deuxième partie des résultats de

cette étude est nécessaire pour assurer la mise en place et l'application des systèmes d'alerte précoce.

IV.2. ETAT DE VULNERABILITE DES PRINCIPALES CEREALES DANS LE SAHEL BURKINABE

Cette partie de l'étude présente du point de vue cartographique, le degré de vulnérabilité des principales céréales cultivées au Sahel Burkinabè et retenues dans le cadre de cette étude. Toutefois, il n'a été pris en compte que l'année la plus déficitaire et présentant des trous pluviométriques mais permettant de boucler la campagne agricole. D'après l'analyse cartographique des hauteurs de pluies annuelles (voir Annexe 4), il ressort que les années 2011 et 2014 sont les plus déficitaires. Cependant, l'année 2011 a été exclue de l'étude car elle a connu les extrêmes se caractérisant par les inondations et les sécheresses. Aussi, les pluies se sont brusquement arrêtées durant la campagne compromettant ainsi toute initiative de production. Ainsi, seule l'année 2014 a été utilisée et semble être la plus déficitaire de toutes et de surcroît présente beaucoup plus des trous pluviométriques. Ce choix optionnel d'une seule année émane du nombre important de cartes à représenter par année.

IV.2.1. Evolution de l'indice WRSI du maïs, du mil et du sorgho

L'évolution spatiale des valeurs de l'indice WRSI de satisfaction des besoins en eau des céréales de l'étude est représentée sur les figures 8, 9 et 10. Globalement, ces trois figures montrent une extrême vulnérabilité au stress hydrique dans la partie nord (le Sahel) que dans la partie Sud (le Subsahel) de la zone d'étude quel que soit la culture. En effet, les valeurs de l'indice WRSI de satisfaction des besoins en eau des cultures ont été généralement inférieures à 50% au Sahel. Ce qui traduit un échec complet des cultures. Au fur et à mesure qu'on évolue vers le Sud du Sahel Burkinabè, ces conditions s'améliorent de mauvaises (50 à 59%) aux moyennes (80 à 94%). Quant à l'alimentation hydrique des cultures au Subsahel, elle n'est pas aussi très bonne mais elle est mieux par rapport à celle du Sahel. Contrairement aux maïs, mil et sorgho cultivés au Sahel, ceux du Subsahel sont soumis souvent à des conditions hydriques bonnes (95 à 99%) voir même très bonnes (100%) durant certains stades phénologiques et beaucoup plus vers le Sud. Ce comportement hydrique observé peut être expliqué par des faibles pluviosités accentuant plus les déficits hydriques dans le Sahel que dans le Subsahel (Agali *et al.*, 2013). Naturellement, le climat de la zone sahélienne se caractérise par une pluviométrie annuelle décroissante du Sud au Nord et par une grande variabilité interannuelle (avec un gradient de 1 mm/km/an). De plus, il a été prouvé lors de la caractérisation de la variabilité pluviométrique durant la campagne agricole de la zone

d'étude, que les tendances pluviométriques sont à la hausse au Subsahel depuis les années 1990 et à la baisse au Sahel depuis les années 1967.

Au vue de ces conditions pluviométriques, la région du Subsahel est la plus propice au développement de ces trois céréales étudiées comme ont évoqué Kabore *et al.* (2015).

Rappelons que l'étude de zonage agroclimatique basée sur l'indice WRSI fournit aussi les caractéristiques de l'état hydrique des cultures durant les différents stades phénologiques de la plante. En effet, le comportement aussi bien morphologique que physiologique d'une plante donnée dépend de l'espèce ou de la variété, de la durée et de la sévérité de la sécheresse ainsi que du moment de son application. Les phénomènes tels que la floraison et le remplissage de grains qui ont lieu durant les stades phénologiques nécessitent un minimum d'eau pour qu'ils se réalisent dans de bonnes conditions. Cela veut dire que toutes les phases de la période de reproduction ou de la mi-saison sont relativement sensibles à un manque d'eau mais à des degrés différents. Ainsi, il a été montré au cours de cette étude que le comportement hydrique des cultures est fonction du stade de développement de la plante confirmé par les cartes des figures 8, 9 et 10).

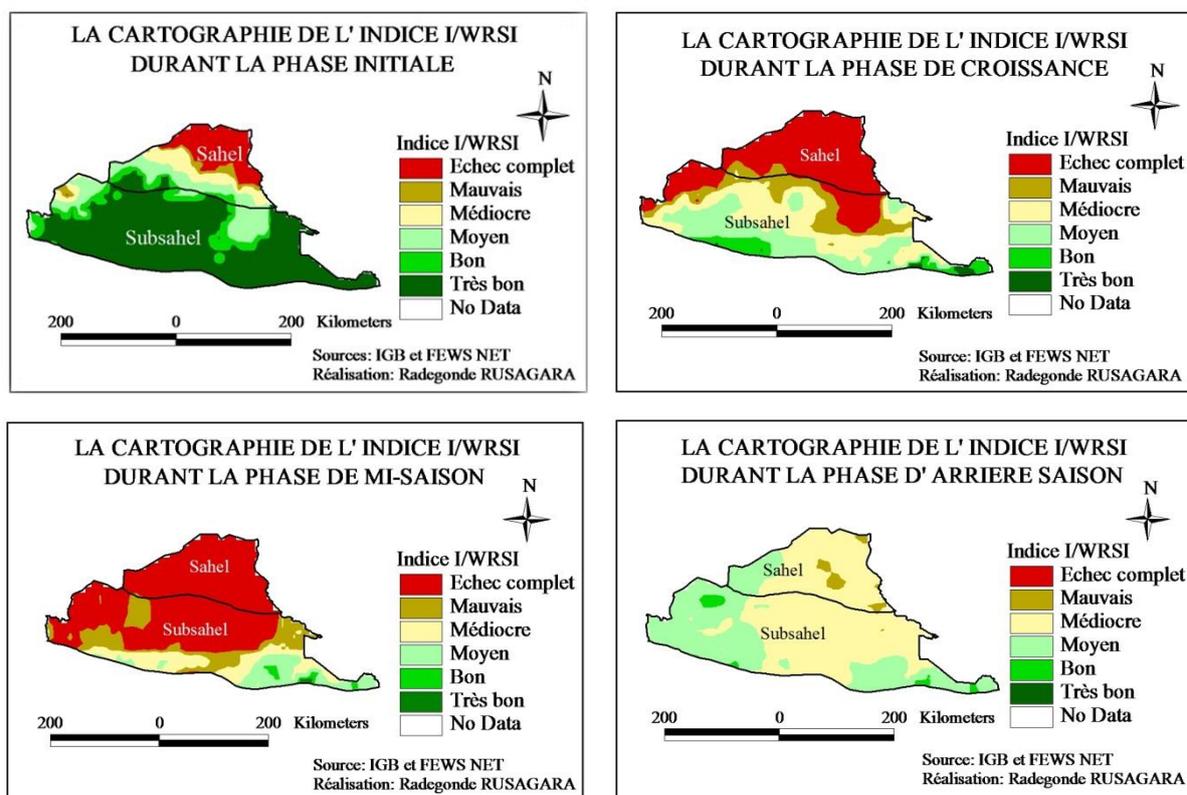


Figure 8: Evolution spatiale de l'indice WRSI pour le maïs

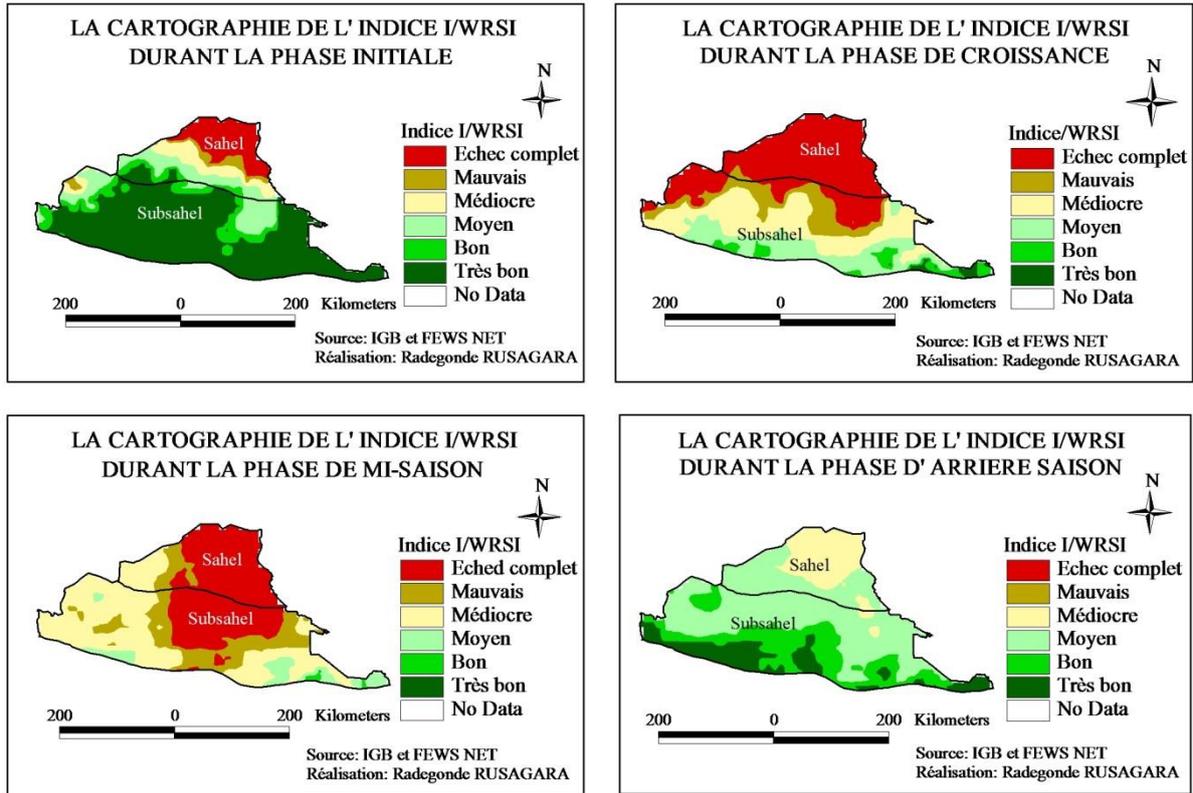


Figure 9: Evolution spatiale de l'indice WRSI durant les phases phénologiques du mil

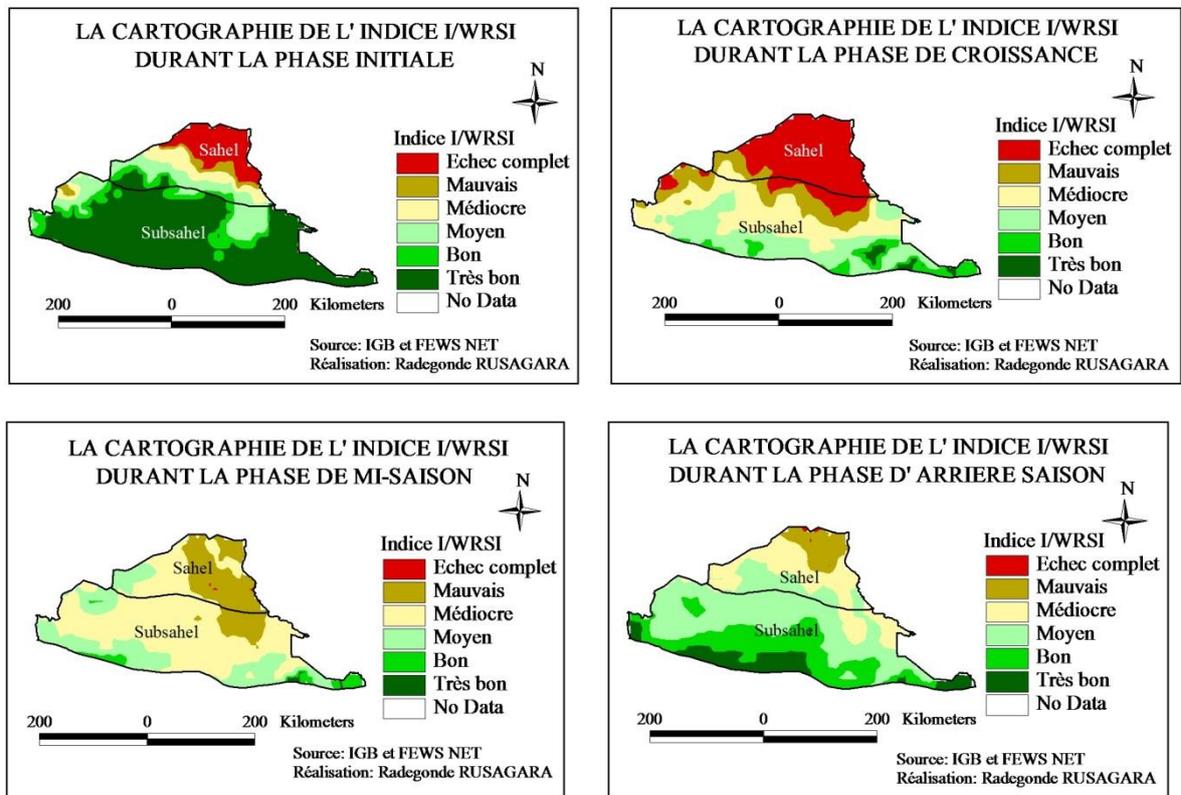


Figure 10: Evolution spatiale de l'indice WRSI durant les stades phénologiques du sorgho

Ces figures montrent que les conditions d'humidité ont été plus favorables aux céréales de l'étude durant l'arrière-saison. En outre, l'évolution de l'indice WRSI montre que le mil et le sorgho présentent un comportement hydrique identique durant cette phase. Cependant, au Nord du Sahel, les conditions hydriques sont mauvaises (WRSI variant de 50 à 59 %) pour le sorgho et médiocres (WRSI variant de 60 à 79 %) pour le mil. Par ailleurs, le mil et le sorgho sont en conditions hydriques moyennes dans la zone de transition entre le Sahel et le Subsahel, bonnes au Sud du Subsahel et très bonnes au Sud de la zone d'étude. Ainsi, la vulnérabilité au stress hydrique du mil et du sorgho durant l'arrière-saison est très élevée au nord et devient faible au sud de la zone.

Il faut également remarquer, les besoins en eau du maïs ont été satisfaits en grande partie de 60 à 79 % et de 80 à 94 % à l'Ouest des deux domaines de la zone d'étude. Ces deux échelles des valeurs de l'indice WRSI signifie respectivement que le maïs est en grande partie soumis à des conditions hydriques médiocres à l'Est et moyennes à l'ouest du Sahel Burkinabè. Et ce durant une année déficitaires et marquée par une variabilité pluviométrique comme celle de 2014. Ce qui traduit une vulnérabilité élevée au stress hydrique du maïs cultivée à l'Est de la zone et une vulnérabilité moyenne de celui cultivé à l'Ouest. Cependant, la représentation cartographique montre que les conditions hydriques du maïs cultivé dans les petites parties se trouvant au Nord-Est, au centre et au Sud-Est du Sahel sont soumises à des conditions hydriques mauvaises (WRSI variant de 50 à 59 %). Par contre, il existe les petites parties au Nord-Ouest et au Sud-Est du Subsahel où les conditions hydriques du maïs sont bonnes (WRSI variant entre 95 et 99 %).

Durant les autres stades phénologiques, l'insatisfaction des besoins en eau ont conduit les cultures en échec complet dans certaines zones sauf le sorgho durant la phase de mi-saison. Pourtant selon Doorenbos et Kassam (1980), cette phase de la mi-saison est la plus critique pour les céréales. Cependant, Radhouane *et al.* (2014) affirment que le sorgho supporte mieux les contraintes hydriques par rapport aux autres céréales. En effet, il semble que ce dernier est doté de mécanismes physiologiques de rattrapage de la croissance végétative après un stress hydrique. Mais cela n'empêche qu'il présente en grande partie une vulnérabilité très élevée (conditions hydriques mauvaises) au Nord-Est de toute la zone sahélienne et une vulnérabilité élevée (conditions hydriques médiocres) sur presque tout le reste de la zone. Quant aux petites parties se trouvant au Sud-Est et au Sud-Ouest, la vulnérabilité du sorgho est faible (conditions hydriques bonnes).

Par ailleurs, les figures 8 et 9 illustrent que le mil et le maïs ont un comportement hydrique presque identique durant la mi-saison. Le mil et le maïs cultivés sur plus de la moitié de la zone surtout au Nord ont complètement échoué ou sont soumis aux conditions hydriques mauvaises et médiocres. Ce qui n'est pas le cas pour le maïs et le mil cultivés sur une infime partie se trouvant au Sud-Est qui semble être mieux alimentée. Ils présentent des degrés de satisfactions des besoins en eau moyens, bons ou très bons. Mais parmi ces deux cultures, le maïs est plus vulnérable au stress hydrique que le mil comme l'a déjà montré Doto *et al.* (2015). Contrairement aux conditions d'alimentation hydrique se traduisant par l'échec complet du maïs au Sahel, le mil est soumis à des conditions hydriques mauvaises. En effet, le mil s'adapte plus à des contraintes du milieu sahélien que le maïs. Il se caractérise par une forte aptitude à mettre en place des mécanismes physiologiques qui lui permettent de tolérer la sécheresse (Winkel *et al.*, 1997). En outre, cette aptitude permet au mil de ralentir des pertes en eau au niveau des feuilles supérieures et de maintenir un niveau hydrique favorable au bon remplissage des grains. Ainsi, le maïs et le mil cultivés sur trois quart de la zone sahélienne sont extrêmement vulnérables au stress hydrique durant la mi-saison.

L'autre phase la plus critique après la mi-saison est celle de la croissance ou la phase végétative. Le comportement hydrique de toutes les trois céréales évolue de la même manière sur toute la zone. Durant la phase de croissance, les déficits hydriques au Nord provoquent en grande partie un échec complet des cultures ou le soumettent à des mauvaises conditions hydriques vers le Sud de la partie sahélienne de la zone d'étude. Quant au Subsahel, les conditions hydriques des cultures s'améliorent de mauvaises à très bonnes au fur à mesure qu'on avance vers le Sud du Subsahel et ce sur des étendues presque égales. En effet, l'évolution spatiale de l'indice WRSI montre que les céréales cultivées dans la partie Nord-Est et Nord-Ouest sont extrêmement vulnérables au stress hydrique. Leurs besoins en eau n'ont pas été satisfaits conduisant ainsi la culture en échec complet. Ces conditions sont suivies par les mauvaises au centre. Enfin, la dernière phase plus ou moins critique est la phase initiale. Comme pour la phase de croissance, l'évolution des valeurs de l'indice WRSI montre que les conditions d'alimentation hydriques des trois céréales sont identiques pour les trois cultures. L'état hydrique des cultures est bon ou très bon sur presque tout le Subsahel. Ce qui n'est pas le cas pour le Sahel qui présente en grande partie des conditions d'alimentation en eau insatisfaisantes (mauvaise, médiocre ou moyenne) ou d'échec complet. Mais une infime partie se situant vers le Sud du Sahel, c'est-à-dire la zone de transition entre le Sahel et le Subsahel connaît quand même les conditions hydriques bonnes voir même très bonnes.

De cette approche spatialisée, le comportement hydrique de ces différentes céréales durant les cycles phénologiques peut être expliqué en se basant sur deux plans à savoir le plan pédologique et le plan climatologique (pluie). A la base, la simulation de l'indice WRSI de satisfaction des besoins en eau des cultures requiert l'initialisation de la teneur en eau dans le sol (SW). Cette initialisation prend en compte six (06) décades de données précédentes. Pour un début de la saison agricole (SOS) pris en juin, l'initialisation de la teneur en eau concerne le mois d'avril et le mois de mai. Durant ces deux mois, les hauteurs de pluies tombées dans la zone d'étude sont très faibles (PANA, 2007). Par conséquent, lors de l'installation des cultures, la quantité d'eau disponible pour la culture dépend des hauteurs des pluies tombées en juin et des propriétés hydrodynamiques du sol. En effet, la quantité d'eau de pluies absorbée par le sol est fonction de sa vitesse d'infiltration de l'eau. Pourtant, les analyses effectuées par Fontès et Guinko (1995) et BUNASOLS (2015) ont montré que les sols de la zone sahélienne présentent des encroûtements superficiels favorisant beaucoup plus le ruissellement. Ainsi, les vitesses d'infiltration de ces sols sont faibles. Donc au début de la saison agricole (en juin), les sols n'ont pas eu le temps de stocker la quantité d'eau suffisante pour les cultures (Davidson *et al.*, 2003). Toutefois, le calcul de l'indice WRSI par phase phénologique implique que la quantité d'eau disponible pour les cultures durant la phase actuelle est obtenue en additionnant la teneur en eau du sol à la fin de la phase précédente. Ainsi, ce déficit hydrique s'installe tout au long du cycle de développement des cultures phase par phase. Ceci pourrait expliquer le comportement hydrique déficitaire des cultures durant les quatre phases phénologiques d'une part.

De cette analyse, on en déduit qu'il se pourrait que la campagne agricole ait commencée trop tôt ou qu'il y ait eu les apparitions des séquences sèches comme l'ont démontré (Forest, 1984). Au cours de chaque saison pluvieuse, il peut y avoir une variabilité des pluies, qui peut avoir des conséquences désastreuses sur les cultures même quand le total annuel est satisfaisant, soit en cas de pluies tardives soit d'arrêt précoce.

IV.2.2. Les dates de début de la saison

Les décades probables proposées pour le démarrage de la saison sous le critère du centre AGRHYMET incorporé au logiciel sont représentées sur la carte de la figure 11. Cette figure illustre que dans les zones les plus arrosées du Sud, la campagne agricole débiterait dès la première décade d'avril. Pour les zones moyennement arrosées du centre, la saison peut débiter dès la première décade de mai à l'Ouest et la deuxième décade de juin à l'Est. Ce qui corrobore les résultats des travaux de Sarr *et al.* (2011) portant sur l'identification des risques

climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. Cependant, dans les zones les moins arrosées du Nord, les dates de semis sont fixées soit à la troisième décennie de juin ou à la première décennie de juillet. Ainsi, ces résultats corroborent les travaux de Doto *et al.* (2015) au Sahel Burkinabè à partir d'une étude statistique de la campagne agricole sur les 40 dernières années et des besoins en eau du maïs *Barka*. Donc la troisième décennie de juin qui a été utilisée comme la date de début de la saison pour cartographier WRSI est l'une des dates probables de semis des principales céréales de la zone d'étude (maïs, mil, sorgho). Aussi, ces résultats corroborent les travaux réalisés par Forest (1984) sur une approche probabiliste de la satisfaction des besoins en eau des cultures en fonction des premières pluies de la saison dans les zones sahéliennes strictes. Il concluait que c'est entre le 25 juin et le 1 juillet qu'on a 8 chances sur 10 de disposer de deux à trois jours de pluie conduisant à un indice élevé de satisfaction des besoins en eau des cultures. Il faut signaler que le critère utilisé pour définir les dates de semis ne prend en compte que la pluviométrie sur trois décades mais il ne garantit pas une teneur en eau du sol suffisante pour les cultures sur une longue durée (FAO, 2003).

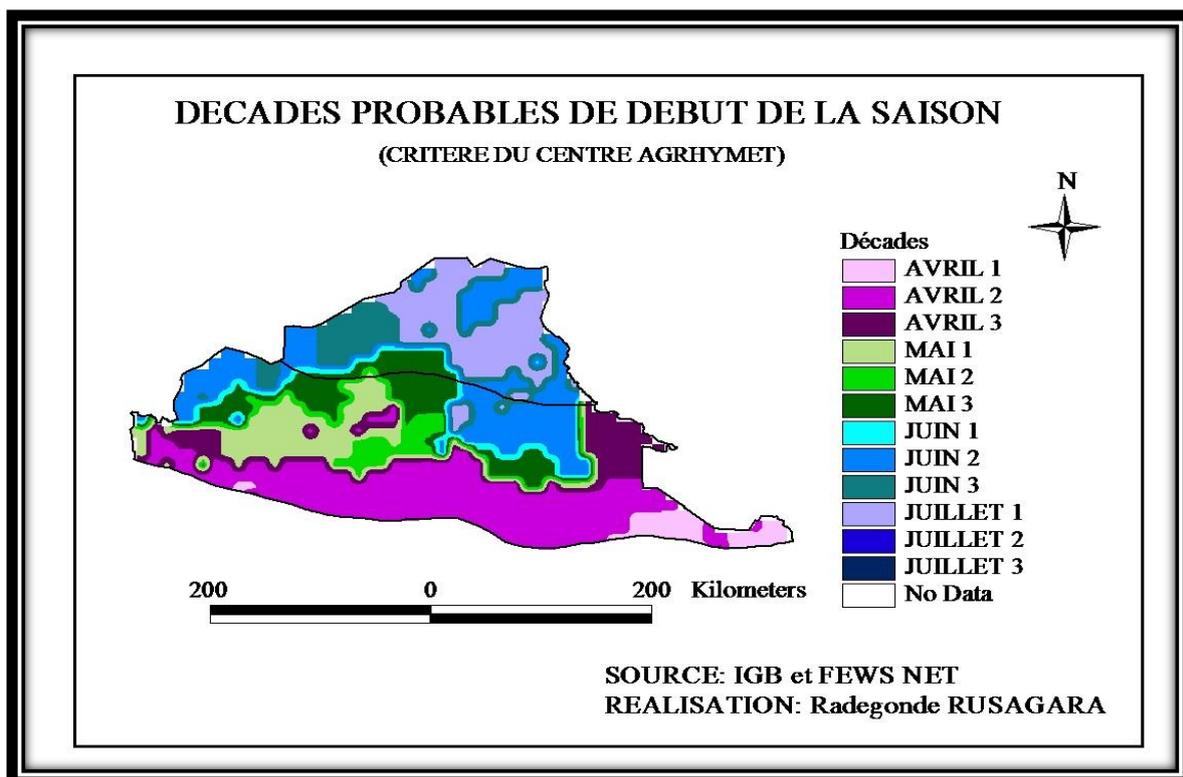


Figure 11: La cartographie des dates favorables au démarrage de la saison des pluies pour les trois principales céréales (mil, maïs et sorgho) cultivées dans la zone sahélienne du Burkina Faso. Ainsi, pour étudier la robustesse de ces dates de semis, les représentations cartographiques de l'indice WRSI des besoins en eau des cultures par phase phénologiques ont été faites sur la base des dates probables au semis (voir annexe 5). Cette représentation montre qu'en

comparaison avec l'état hydrique des cultures dont la date de semis était fixée à la troisième décennie de juin (cartographie du WRSI), les cultures du Sahel deviennent plus vulnérables au stress hydrique que celles du Sahel. Les cultures du Sahel qui étaient soumises aux conditions hydriques très bonnes ou bonnes lors de la première simulation sont soumises à des conditions hydriques mauvaises pouvant même les conduire en échec complet lors de la deuxième simulation. Par contre, les cultures du Sahel qui étaient soumises aux conditions mauvaises pouvant les conduire en échec complet lors de la cartographie du WRSI pour un semis effectué dans la troisième décennie de juin sont soumises aux conditions moyennement bonnes durant la deuxième simulation. Cette situation est due au fait que les dates probables de démarrage de la campagne agricole ont été situées dans les mois d'avril et de mai pour le Sahel alors que pour le Sahel elles ont été pour la plupart situées en juin (2^{ème} et 3^{ème} décennie) et en juillet (1^{ère} décennie).

Ainsi, sous les scénarii de semis probables, les céréales deviennent moins vulnérables au stress hydrique durant les trois premières phases phénologiques (initiale, croissance et mi-saison) et très vulnérables au stress hydrique durant la dernière phase qui est l'arrière-saison. Durant les trois premières phases phénologiques, les conditions hydriques des trois céréales évoluent de la même manière sur toute la zone mais toujours à des degrés différents. Durant la phase initiale, les besoins en eau des cultures cultivées sur toutes les deux parties de la zone d'étude (Sahel et Sahel) ont été satisfaits soit de 95 à 99% ou à 100%. Ce qui matérialise respectivement les bonnes et les très bonnes conditions hydriques traduisant une faible vulnérabilité au stress hydrique durant cette phase. Ceci n'est pas le cas pour l'état hydrique des cultures durant la phase de mi-saison et de croissance. Lors de ces deux phases, les conditions hydriques des cultures sont en grande partie mauvaises (indice WRSI variant entre 50 et 59 %), médiocres (indice WRSI variant entre 60 et 79 %) ou ont conduit la culture en échec complet (indice WRSI variant entre 0 et 49 %) au Sahel. Quant au Sahel, la majeure partie de la zone est soumise à des conditions hydriques moyennes (indice WRSI variant entre 80 et 94 %) suivies par les médiocres (indice WRSI variant entre 60 et 79%).

Durant la dernière phase qui est l'arrière-saison, toutes les trois cultures sont fortement vulnérables au stress hydrique mais n'évoluent pas de la même manière sur toute la zone. Tandis que le maïs est soumis à des conditions hydriques moyennement satisfaisantes au Sahel et a complètement échoué au Sahel, le mil et le sorgho, eux ont complètement échoués au Sahel. De plus, ils sont soumis aux conditions moyennement satisfaisantes au Sahel à cause de l'allongement de leur cycle cultural. En effet, les conditions d'échec

complet du maïs sont observées au Sud de la zone sahélienne (le Subsahel) où les dates de semis sont fixées à l'une des décades d'avril ou de mai. Ces mois ne matérialisent pas en aucun cas la date de début de la saison agricole car ils représentent les faux départ des pluies tout comme l'a évoqué Marteau (2013). En semant avec les premières pluies d'avril ou de mai, Sarr *et al.* (2011) ont confirmé que la probabilité d'apparition de séquences sèches (> 10 jours) après semis est très élevée entre le mois d'avril et de juin. Ils ajoutèrent que cette probabilité chute après la deuxième décade de juin dans le Subsahel. Ce qui a pour corollaire l'épuisement à la longue de la quantité d'eau du sol disponible pour les cultures entre les mois d'avril et de juin. Ainsi, pour la variété du maïs étudiée d'une durée de croissances de 8 décades (80 jours), la réserve en eau du sol était déjà épuisée lors de l'arrière-saison soit en juin. Pour le mil et le sorgho qui ont une durée de croissance respectivement de onze décades (110 jours) et de douze décades (120), ils sont moyennement vulnérables au stress hydrique au Subsahel durant l'arrière-saison. En effet, la phase d'arrière-saison commence dès la première décade de juillet pour le mil et la deuxième décade de juillet pour le sorgho. Or, au Subsahel, le mois de juillet est le mois le plus pluvieux après le mois d'août, donc le sol a eu le temps nécessaire pour reconstruire sa réserve en eau utile. Par contre, ce comportement hydrique déficitaire devrait être observé durant la mi-saison et la phase de croissance pour ces deux cultures. Mais puisqu'elles sont naturellement dotées de mécanismes de résistances aux déficits hydriques, elles sont seulement très vulnérables au stress hydrique sur une infime partie du Subsahel.

En ce qui concerne le mil et le sorgho du Sahel, les dates de semis sont fixées en grande partie soit à la troisième décade de juin ou à la première décade de juillet. Pourtant, les variétés du mil et du sorgho cultivées dans cette zone ont respectivement une longueur de croissance de onze décades et douze décades. Donc, la date de fin de la saison agricole est la troisième décade du mois d'octobre pour le mil et la première décade du mois de novembre pour le sorgho. Or, cette zone est naturellement caractérisée par une longueur de saison de pluies assez courte et souvent par des arrêts précoces de pluies (Billaz, 2012). Ce qui ne leur permet pas de boucler leur cycle de croissance en de très bonnes conditions hydriques d'où l'échec complet des cultures due à une forte vulnérabilité au stress hydrique dans la partie Nord du Sahel Burkinabè durant l'arrière-saison. Ceci n'est pas le cas du maïs au Sahel qui est soumis à des conditions hydriques moyennes (faible vulnérabilité). Étant donné que la variété du maïs (*Barka*) utilisée pour cette zone d'étude est une variété précoce de 80 jours, la date de fin de la saison agricole est la troisième décade du mois de septembre ou la première décade du mois

d'octobre. Donc lors de l'arrière-saison (courant septembre) et des autres stades phénologiques, le maïs est toujours soumis à des bonnes conditions hydriques au Sahel.

IV.3. STRATEGIES D'ATTENUATION DES DEFICITS HYDRIQUES

Cette étude a montré de long en large que les principales céréales cultivées dans le Sahel Burkinabè (Subsahel et Sahel) sont vulnérables au stress hydrique durant leur cycle de développement. Les cultures dans les conditions climatiques du Sahel Burkinabè ont moins de chance de boucler convenablement leur cycle cultural comme l'ont montré les indices pluviométriques et le WRSI déterminés durant cette étude. Ainsi, il est alors nécessaire que des stratégies d'atténuation soient identifiées afin de pérenniser la production agricole dans cette zone très vulnérable du Burkina Faso.

La première approche proposée concerne l'adoption des variétés précoces et des dates de semis favorable permettant aux cultures de boucler convenablement leur cycle cultural. Cette information climatique est très capitale pour les paysans sahéliens afin qu'ils puissent mieux planifier leur campagne agricole. A cet effet, cette étude propose comme dates appropriées au semis celles situées dans la troisième décade de juin et au pire des cas la première de juillet. Ainsi, l'adoption de ces décades réduirait les effets du stress hydrique à la mi-saison, période très sensible au déficit hydrique et qui pénalise fortement le rendement final. La robustesse de ces décades a été déjà prouvée par Doto *et al.* (2015) à travers une étude expérimentale de plein champ réalisée dans la zone.

La deuxième approche que peut proposer cette étude est la pratique de l'irrigation d'appoint. Cependant, étant donné que le réseau hydrographique du Sahel Burkinabè est peu dense, l'implémentation de cette approche est peu réaliste à l'échelle des parcelles des exploitations agricoles. Néanmoins les paysages sahéliens sont favorables à la mise en place des structures de collecte des eaux de ruissellement puisque le taux de ruissellement avoisine les 40% d'après Niang *et al.* (2006). Ces structures peuvent être des bassins de collecte des eaux de ruissellement ou des boulis. Dans ce sens, des études récentes ont montré l'importance de ces bassins dans la mitigation des effets des poches de sécheresse auquel est confronté le système d'agriculture familiale au Sahel Burkinabè. Ces études à l'image de celles de Doto *et al.* (2015) ont montré une contribution moyenne de 24% à l'augmentation du rendement quand le *Barka* est cultivé sous irrigation de complément et sous la date favorable de semis, c'est-à-dire la troisième décade de juin. Donc cette étude propose l'implémentation de la technologie des bassins de collecte des eaux de ruissellement au Sahel Burkinabè pour la promotion d'une agriculture durable.

V. CONCLUSION

De nos jours, le développement économique des pays sahéliens comme le Burkina Faso est fonction d'une meilleure connaissance des facteurs climatiques et du degré de vulnérabilité à la variabilité et au changement climatique dans le secteur agricole. Cette étude a permis d'appréhender les conditions hydriques des trois principales céréales sèches cultivées dans la zone sahélienne du Burkina Faso. Cette appréhension a été rendue possible grâce à une représentation cartographique par phase phénologique de l'indice WRSI basé sur la notion du bilan hydrique. Les résultats de cette étude sur la variabilité pluviométrique durant la campagne agricole et de certaines études antérieures portant sur l'analyse climatique au Sahel sont en parfait accord avec l'évolution spatiale de cet indice. En effet, les résultats de toutes ces études montrent que la variabilité des paramètres clés de la saison de pluies tels que les dates de démarrages, de fin et la longueur de saison ainsi que la variabilité accrue des précipitations et des séquences sèches représentent une menace sérieuse pour la céréaliculture au Sahel Burkinabè. Les résultats de l'évolution de l'indice WRSI sur l'année 2014 considérée comme année de référence du point de vu déficit hydrique corroborent les études agroclimatiques antérieures qui définissent la troisième décade de juin et au pire des cas la première de juillet comme la date favorable au semis au Sahel Burkinabè.

Spécifiquement, cette étude a permis donc de savoir qu'en considérant autre décade de semis que celle de la troisième décade de juin comme date favorable au semis, les cultures dans la partie Nord de la zone d'étude sont extrêmement vulnérables au stress hydrique. Celles du centre sont moyennement vulnérables et celles cultivées au Sud de la zone sont faiblement vulnérables. En adoptant le critère utilisé par le centre AGRHYMET, le semis précoce n'est pas favorable pour les trois cultures. Ainsi, les dates de semis les plus favorables sont: la troisième décade de juin dans les zones les plus arrosées du sud et la première décade de juillet dans les zones faiblement et moyennement arrosées du Nord. En respectant ces dates favorables au semis, la variété du maïs *Barka* peut boucler convenablement son cycle cultural dans le Sahel et le Subsahel. Mais les variétés du mil et du sorgho cultivées dans la partie Nord du Sahel Burkinabè seront toujours extrêmement vulnérables au stress hydrique à cause du cycle plus long.

VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce travail a apporté un grand nombre d'informations pédoclimatiques pour les acteurs de la filière céréalière dans le Sahel Burkinabè. Cependant, il est souhaitable d'adopter les variétés précoces du mil et du sorgho au Nord de la zone d'étude (Sahel) compte tenu de leur extrême vulnérabilité au stress hydrique. De plus, il serait nécessaire de pratiquer une irrigation de complément durant les stades critiques des cultures. Par ailleurs, dans l'objectif d'approfondir l'ensemble de ces analyses, il serait indispensable qu'une étude expérimentale soit menée pour la validation et l'adoption des dates des semis par les paysans sahéliens. En effet, les résultats ont été obtenus sur un modèle théorique du bilan hydrique (GeoWRSI) permettant de contrôler la teneur en eau disponible pour les cultures. Il serait donc nécessaire de valider les résultats de ce modèle en étudiant le comportement hydrique des trois céréales en plein champ sur le terrain à travers des champs écoles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdoulaye, B., Clobite, B.B., Mbanghoguinan, A., Issak, A. et Laohote B., 2014. Impact de la variabilité pluviométrique et de la sécheresse au sud du Tchad : Effets du changement climatique. 23. Tchad, p13-30.
- AEDD, 2013. Gestion intégrée de la terre et de l'eau pour l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au mali. Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques. Mali, 39p.
- Agali, A., Seyni, S., Mohamed, L., Seydou, B.T. et Sarr, B., 2013. Evolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. 24 : 282-293.
- Ali, A., Lebel, T., Amami, A., 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. Sécheresse, 19 (4) : 227-235.
- Ali, A. et Lebel, T., 2009. The Sahalian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (12) : 1705-1714.
- Billaz, R., 2012. La lutte contre les aléas climatiques au Burkina Faso, Acquis et défis de l'agro-écologie : le cas de la Région Nord. 14p.
- Bodian, A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest), 8. Laboratoire Leïdi (Dynamique des territoires et développement), Université Gaston Berger (UGB). Sénégal. 17p.
- Brunel, V., 2007. Quelques caractéristiques de l'agriculture pluviale au Burkina Faso. Volta Basin Focal Project Report No 9. IRD, Montpellier, France and CPWF, 21p.
- BUNASOLS, 2015. Les caractéristiques physico-chimiques des sols par zone climatique. Workshop on West African Soil, Nigeria.
- Cheick, F., Amadou, A., Ndong, J.B., 2015. Etude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : Caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. 8. Sénégal, pp17-35.
- Davidson, O., Halsnæs, K., Huq, S., Kok, M., Metz, B., Sokona, Y. et Verhagen, J., 2003. The development and climate nexus: the case of sub-Saharan Africa. *Climate Policy*, 3 : 97-113.
- Diouf, M., Nonguierma, A., Abou, A., Royer, A., Somé, B., 2000. Lutte contre la sécheresse au Sahel: acquis et perspective au Centre Régional Agrhymet. *Sécheresse* 11 : 257-266.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1987. Réponse des rendements à l'eau, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n°33 : 32-35 et 169-172.
- Du Plessis, J., 2003. Maize production Department of Agriculture and obtainable from Resource Centre Directorate Agricultural Information Services Private Bag X144, Pretoria, 0001 South Africa. 38p.

- Edwards, D.C. McKee, T.B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Climatology Report*, 97 (2), Department of Atmospheric Science, Colorado state University, Fort Collins.
- FAO, 1999. Situation météorologique et état des cultures en 1999. Système d'information et d'alerte précoces. 6p.
- FAO, 2003. Situation météorologique et état des cultures en 2003. Système mondial d'information et d'alerte rapide sur l'alimentation et l'agriculture. Rapport Sahel 1, 6p.
- Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., White, L.L., 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University press, United Kingdom and New York, USA, 1132 P.
- Fontès, J., Guinko, S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative. Toulouse, Institut de la Carte Internationale de la Végétation; Ouagadougou, Institut du Développement Rural - Faculté des Sciences et Techniques, 67p.
- Forest, F., 1984. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. BIP IRAT-CIRAD Montpellier.
- Frère, M., Popov, G.F., 1987. Suivi agrométéorologie des cultures et prévision des rendements. Etude FAO Production végétale et protection des plantes 73. Rome : FAO.
- Garane, A.J., 2010. Les conséquences physiques des changements au Burkina Faso. 4eme Edition. Ouagadougou, 14p.
- Gauffichon, L., Prioul, J. L., Bachelier, B., 2010. Quelles sont les perspectives d'amélioration génétique de plantes cultivées tolérantes à la sécheresse ? Fondations FARM, Paris, 59.
- Giddings^, L., Soto, M., Rutherford, B.M., Maarouf, A., 2005. Standarized Precipitations Index zones for México. *Atmosfera*. 18 (1) : P 33-56.
- Ingram, K.T., Roncoli, M.C., Kirshen, P.H., 2002. Opportunities and constraints for farmer of west Africa to use season precipitations forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural system*, 74 : 331-347.
- Kabore, D. Reij, C., 2004. The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso. International Food Policy Research Institute, Washington.
- Kabore, N. P., Amade, O., Somé, L. Millogo, J. R., 2015. Les facteurs déterminants de la production des céréales sèches en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International journal of innovation and applied studies*, 1 (1) : 214-230.
- Kabore', D., Reij, C., 2004. The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso. EPTD Discussion, pp114-125.
- Kramer, P.J. 1983. Water Relation of plants. Water deficits and plants growth. Academic press, New York, pp342-389.
- L'Hote, Y., Gil, M., Somé, B., Triboulet, J.P., 2002. Analysis of a sahalian annual rainfall index from 1896 to 2000 drought continues. *Hydrological sciences journal*, 47 (4) : 563-573.

- Lahmar, R., Yacouba, H., 2012. Zaï et potentiel de l'association cultures annuelles arbustes natifs In: La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux [en ligne]. Montpellier: IRD Editions. <http://books.openedition.org/irdeditions/3298>.
- Le Barbé, L., Lebel, T. and Tapsoba, D., 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950- 1990. *Journal of climate* 15(2) : 831-836.
- Maladona, I., 2012. Elaboration d'une information climatique de pré-campagne pour l'adaptation des producteurs à la variabilité et au changement climatique au Burkina Faso. *Mémoire master en Ingénierie de l'eau (Institut International d'Ingénierie)*. Ouagadougou.
- Marteau, R., 2010. Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intra saisonnière de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne. Application à la culture du mil dans la région de Niamey. Thèse de doctorat de géographie, Université de Bourgogne, Dijon, 212p.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration at time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, *American Meteorological Society*, Jan 17-23, Anaheim CA, pp179-186.
- Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire (MAHRH), 2015. Résultats définitifs de la campagne agricole 2014/2015 et perspective de la situation alimentaire et nutritionnelle. Ouagadougou, Burkina Faso, 70p.
- Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, 2007. Rapport du programme d'Action National d'Adaptation (PANA). Ouagadougou, Burkina Faso, 75p.
- Ndong, J., 2003. Caractérisation de la saison des pluies dans le centre-ouest du SENEGAL. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 15 : 326-331.
- Nicou, R., Ouattara, B., Somé, L., 1987. Etude des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières (Sorgho, mil et maïs) au Burkina Faso. INERA, 77p
- Niang, D., 2006. Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel burkinabé. Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne, Suisse, thèse n°3667, 167p
- Ouédraogo, L., 2013. Prédétermination des séquences sèches et intérêt de l'information climatique sur la production céréalière en zone sahéenne. *Mémoire pour l'obtention du master en ingénierie*, 2iE, Burkina Faso, 73p
- Ouédraogo, S. J., 2012. Bonnes pratiques agro-sylvo-pastorales d'amélioration durable de la fertilité des sols au Burkina Faso. Ouagadougou, 194 P.
- Ouoba, A.P., 2013. Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 305p
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G., Vandiepenbeck, M., 2003. The Sahalian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48 (3) : 489-492.

- Ozer, P., Houtondji, Y.C., Laminou Manzo, O., 2009. Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop, Revue de Géographie et d'Écologie Tropicale*, 33 : 11 - 30.
- Paturel, J.E., Morelle, M., Kouamé, B., Boyer, J.F., Lubés-Niel, H., Masson, J., M., 1996. Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques; modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *Hydrologie tropicale: Géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris.)*, pp99-110.
- Pretorius, E., Woyessa, Y.E., Slabbert, S.W., Tetsoane, S., 2005. Impact of rainwater harvesting on catchment hydrology: a case study of the Modder River basin, South Africa. *Trans. Ecol. Environ.* 80, 59p.
- Radhouane, L., Nesrine, A. et Romdhane, L.2014. Effet d'un stress hydrique appliqué à des différents stades de développement sur l'aspect quantitatif et qualitatif des semences chez un écotype autochtone de sorgho grain (sorgho bicolore). *Journal of applied biosciences*, 74: 6149 – 6156.
- Reid, P., Vogel, C., 2006. Living and responding to multiple stressors in South Africa—glimpses from KwaZulu-Natal. *Global Environmental Change*, 16 : 195–206.
- Rockström, J., Folke, C., Gordon, L., Hatibu, N., Jewitt, G., Penning de Vries, F., Rwehumbiza, F., Sally, H., Savenije, H., Schulze, R., 2004. A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through Water System Innovations: an integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Physic and Chemistry of Earth* 29 : 1109–1118.
- Roose, E., Kabore, V. and Guenat, C., 1999. Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil* 13 (4) : 343–355.
- Sarr, B., 2010. Le réchauffement climatique. Centre Regional Agrhymet, Département Formation et Recherche, Niamey, Niger, 43p.
- Sarr, B., Sanoussi, A., Kafando, L., 2012. Revue des indices climatiques utilisés dans le système d'assurances agricoles indiciaires en Afrique. Centre régional Agrhymet., Département Formation et Recherche, Niamey, Niger, 6p.
- Sarr, B., Sanoussi, A., Kafando, L., 2011. Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. Centre Regional Agrhymet, Département Formation et Recherche, Niamey, pp1659-1675.
- Senay, G., Verdin, J., Klaver, B., Magadzire, T., Funk, C. and Jones, D., 2013. Implémentation de GeoWRSI. USGS and FEWS NET.
- Sene, S. et Ozer, P., 2002. Évolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42 : 27-33.
- Sener, A. and Losel, D., 2012. Water stress. Plant water stress response mechanisms. Marmara University, Turkey and University of Sheffield, U.K., 300p.

-
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubés-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.M., Treviglio, M., Marieu, B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12 (2) : 363-387.
- Sircoulon, J., 1976. Les données hydro pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*. XIII (2) : 75-174.
- Somé, L., Sivakumar, M.V.K., 1994. Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Burkina Faso. *Compte rendu des travaux n°1 : Division du sol et Agroclimatologie*. INERA, Burkina Faso, 43p.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., 1998. *The Regional Impacts of Climate change: An assessment of Vulnerability. A special report of IPCC Working group*. Cambridge University Press: Cambridge United Kingdom and New York.
- Wellens, J., 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin de Kou. *Rapport Technique N° 1*. Burkina Faso, pp15-22.
- Winkel, T., Renno, J.F., Payne, W., 1997. Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., grown in Sahelian conditions. *Journal of Experimental Botany*, 48: 1001-1009.
- Withers, B., Vipond, S., 1974. *Irrigation: Design and practice*. Batsford London, 306p.
- Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., Hu, Q., 2001. An evaluation of the Standardized Precipitations Index, the china z-index and the statistical z-score. *International journal climatology*, 216 (6) : 747-758.

ANNEXE

ANNEXE 1 : ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES MECANIQUES DANS LA ZONE SAHELIENNE DU BURKINA FASO

Techniques	Atouts	Faiblesses
Diguettes anti érosives	-Conservation de l'eau -Facilité de réalisation	-Nécessité d'un entretien constant -Faible efficacité -Nécessité du gros matériel -Risque d'engorgement
Zai	-Augmentation des rendements agricoles -Restauration de la végétation -Travail en saison sèche -Augmentation de l'infiltration de l'eau	-Longue durée des temps de travaux -Inadaptation aux sols sableux -Efforts physiques importants -Insuffisance de la matière organique et de moyens de transport
Demi-lune	-Absorption de l'eau de ruissellement -Augmentation des rendements agricoles -Restauration de la végétation	-Gros efforts de la main d'œuvre -Insuffisance de la matière organique -Risque d'insécurité foncière
Les fosses anti érosives	-Canalisation de l'eau de ruissèlement -Résorption de l'érosion en ravines	-Problème d'arrosage d'eau pendant la saison sèche pour faciliter la décomposition
Diguettes filtrantes	-Récupération les terres dégradées -Augmentation les terres cultivables -Permettre une meilleure alimentation en eau des cultures -Favoriser l'infiltration pour l'alimentation de la nappe	-Coût de réalisation très élevé -Fort besoin en main d'œuvre abondante
Cordons pierreux	-Récupération des terres dégradées -Amélioration les rendements des cultures -Contribution à la remontée de la nappe -Amélioration l'infiltration des eaux	-Rareté et éloignement des pierres -Insuffisance des moyens de transport -Nécessité de la main d'œuvre et entretien -Risque d'engorgement en année pluvieuse

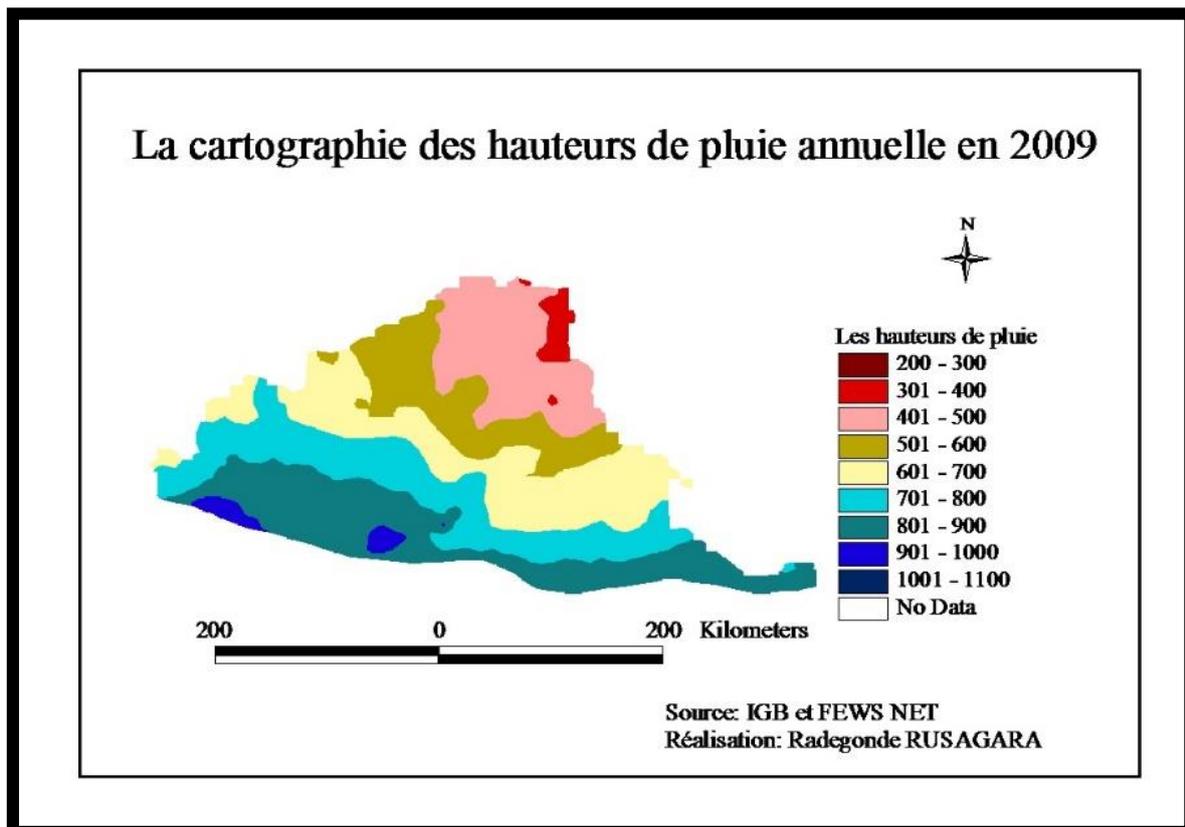
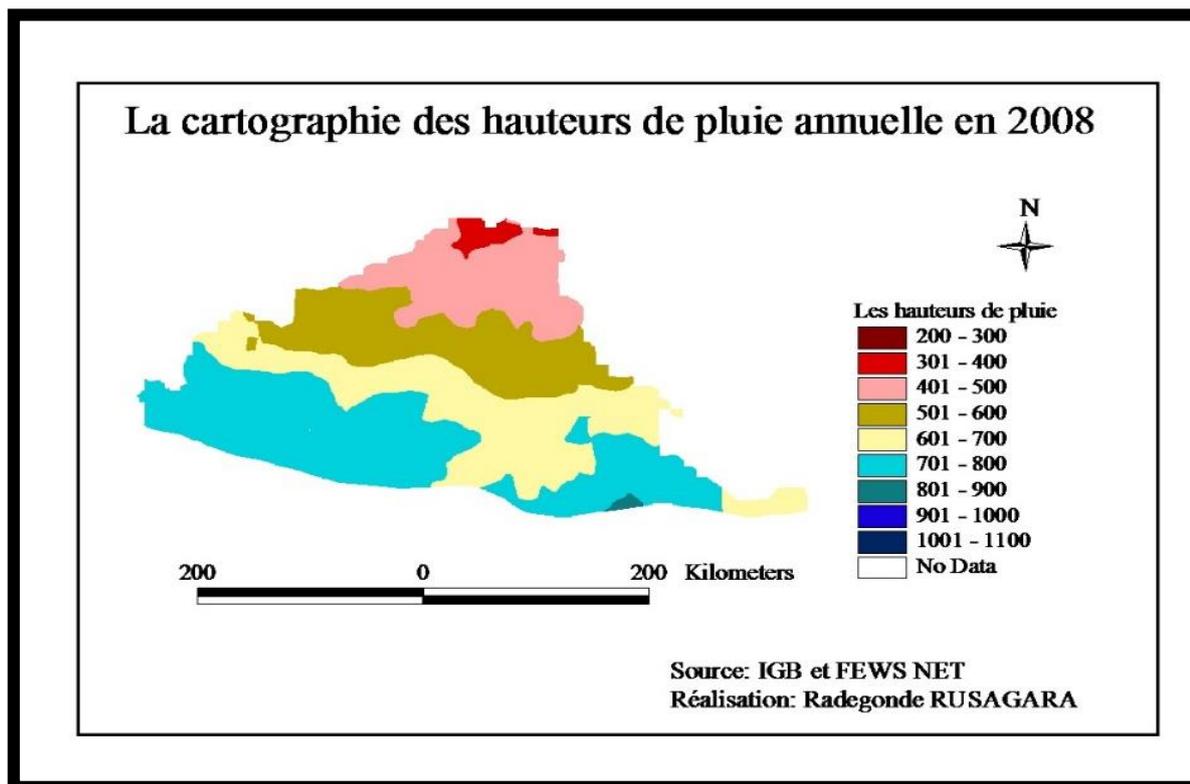
ANNEXE 2 : ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES CULTURALES DANS LA ZONE SAHELIENNE DU BURKINA FASO

Techniques	Atouts	Faiblesses
Zaï associée au paillage	-Réduction de l'évapotranspiration -Travail en saison sèche -Conservation de l'humidité du sol -Stimulation de l'activité biologique des termites	-Disponibilité limitée des résidus -Problème de transport -Efforts physiques importants -Longue durée de temps de travaux
Fumure organique	-Amélioration de la fertilité du sol et des rendements des cultures -Favorise l'infiltration des eaux	
Le compostage	-Amélioration de la fertilité du sol -Favorise l'infiltration des eaux	-Difficulté de creuser et vider les fossés une fois le compost obtenu -Problème d'eau d'arrosage lié à la profondeur des puits -Manque de moyen de transport du compost au champ
scarifiage et sous solage	-Augmentation la capacité d'infiltration du sol -Augmentation de rendement assez important -Evite le développement des adventices	-Difficulté de la mise en œuvre -Disponibilité limitée des tracteurs -Investissement et cout élevées
Labour	-Amélioration l'infiltration du sol -Economie de l'eau -Diminution le ruissellement	-Élévation légère au niveau de l'érosion (6%) -Travaux physiques et consommateurs de temps -Nécessité d'avoir l'équipement agricole
Buttage et billonnage	-Eviter l'évaporation rapide -Protéger les tiges contre le vent -Rétention d'eau dans les parcelles	-Erosion hydrique -Techniques non adaptées aux pentes irrégulières -Risque de glissement de billons

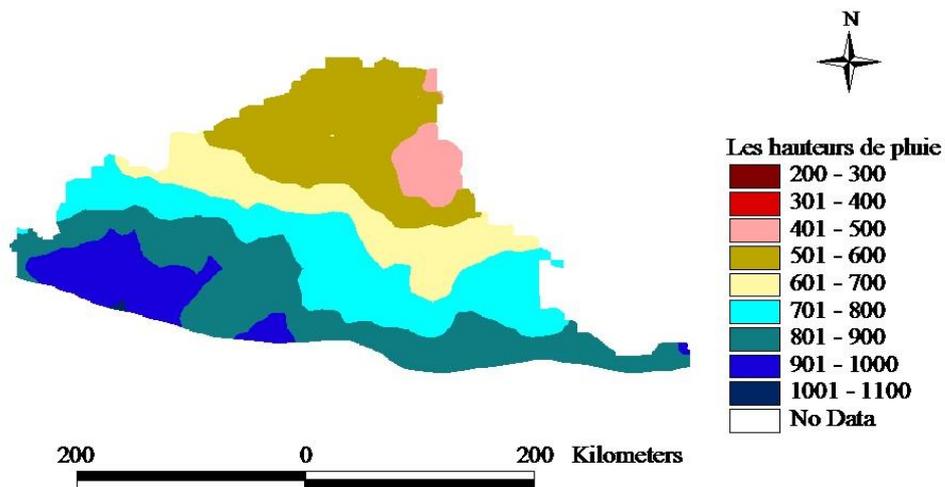
**ANNEXE 3: ATOUTS ET FAIBLESSES DES TECHNIQUES BIOLOGIQUES DE CONSERVATION
DES EAUX ET DES SOLS DANS LA ZONE SAHELIENNE DU BURKINA FASO**

Techniques	Atouts	Faiblesses
Paillage	-Réduction de l'évapotranspiration -Facilitation l'infiltration des eaux de pluies -Conservation de l'humidité du sol -Stimulation de l'activité biologique des termites	-Faible disponibilité de paille (résidus) -Manque de moyen de transport
Mis en défens	-Protection de la parcelle contre les animaux -Régénération du couvert végétal -Réduction de ruissèlement et l'érosion -Augmentation du bilan hydrique	-Nécessité de négocier entre les communautés riveraines -Limite en aménagement régional ou de bassin versant -Pas d'effet sur les sols nus et encroûtés Gestion nécessaire
Végétalisation	-Amélioration du système filtrant des cordons pierreux -Fixation des diguettes -Enrichissement du parc agroforestier	-Mauvaise qualité des plantes -Eau insuffisante en saison sèche -Taux de survie faible -Lenteur des cycles de développement
haie défensive	-Lutte contre le saccage par les animaux -La mise en compartimentation en aire agricole -Renforcement les objectifs de lutter contre la désertification	-Empiètement sur les parcelles Organisation collective -Difficulté de mis en défens ou d'entretien -Concurrence avec les activités agricoles
Bandes enherbées	-Lutte contre la dégradation continue du sol -Amélioration de L'infiltration du sol en ralentissant le ruissellement	-Disponibilité limitée des souches d'herbes -Forte emprise sur le sol -Menace par le bétail -Concurrence avec les cultures situées à proximité

ANNEXE 4 : ANALYSE CLIMATOLOGIQUE DES PLUIES (2008 -2015)

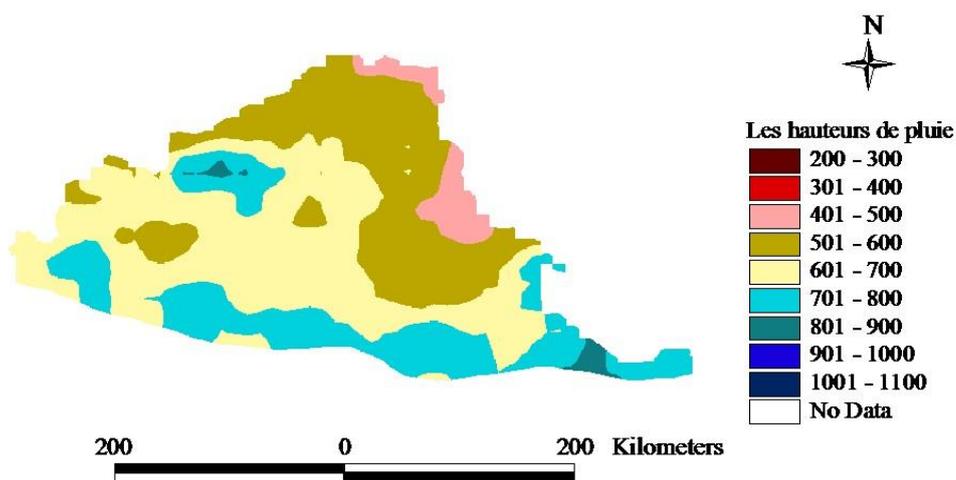


La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2010



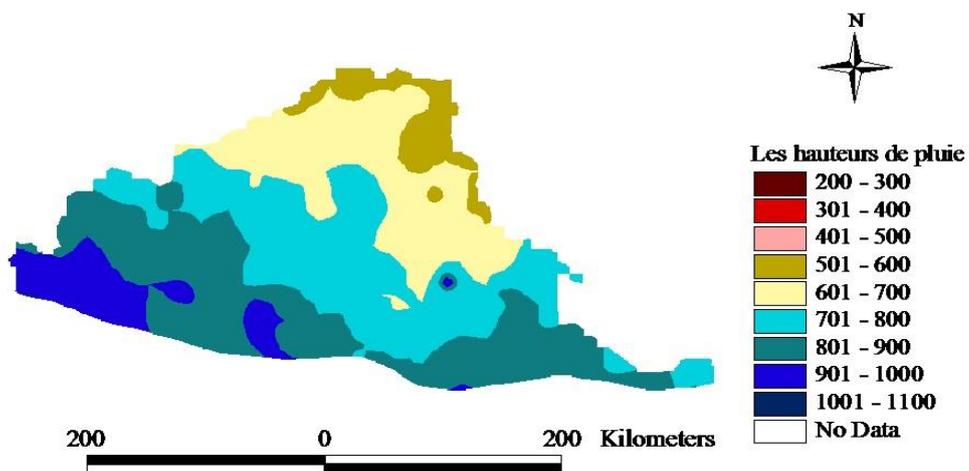
Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2011



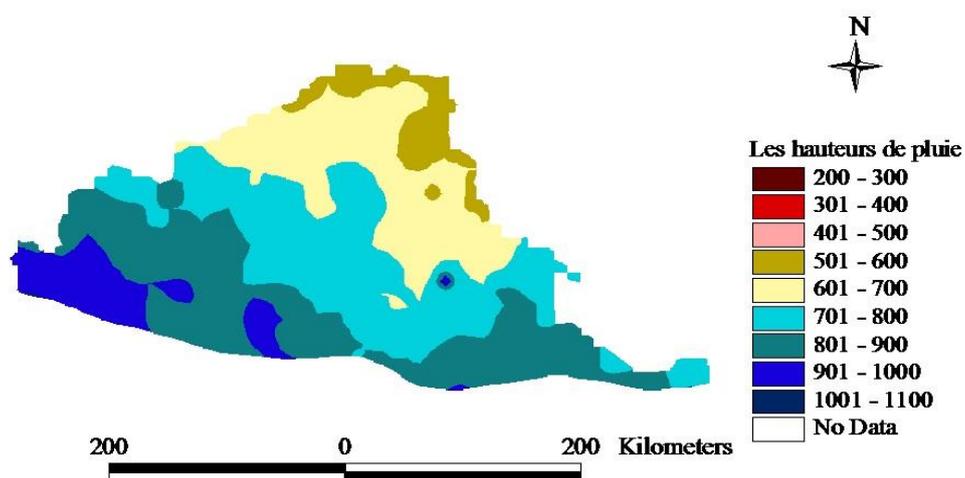
Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2012



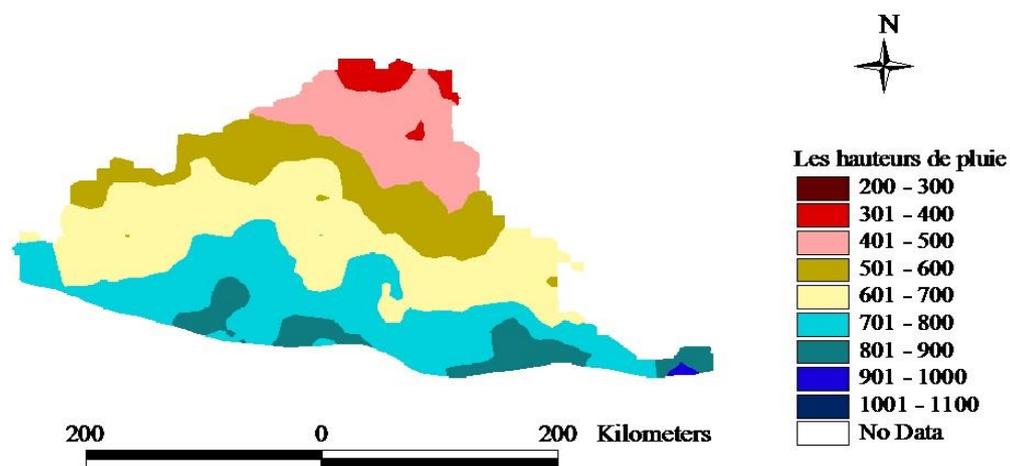
Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2013



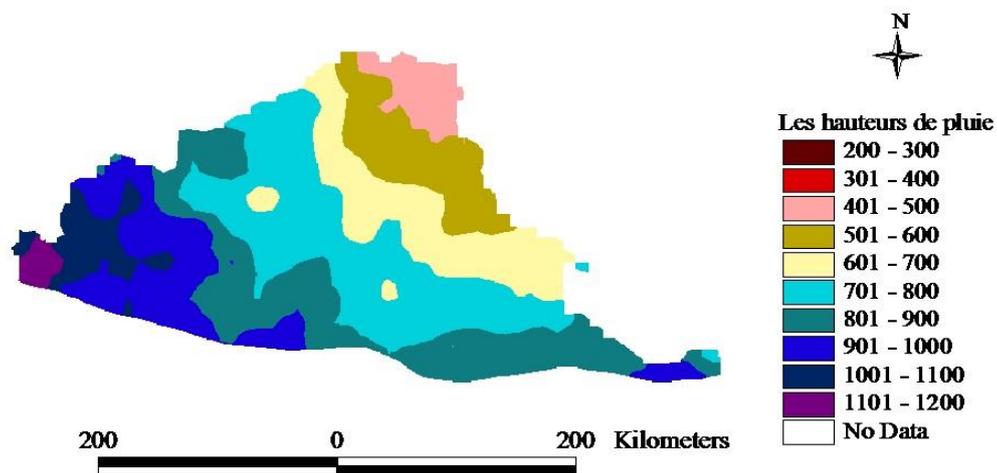
Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2014



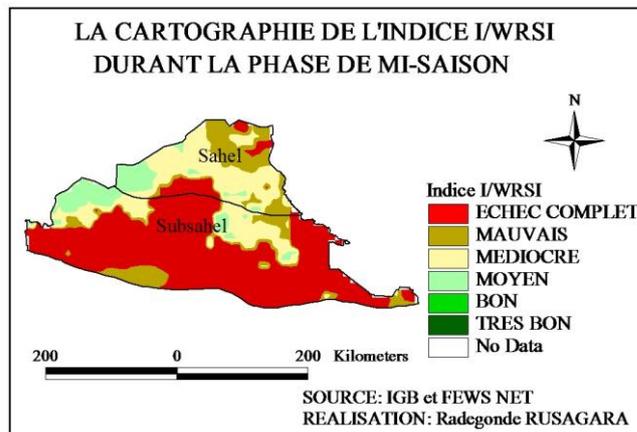
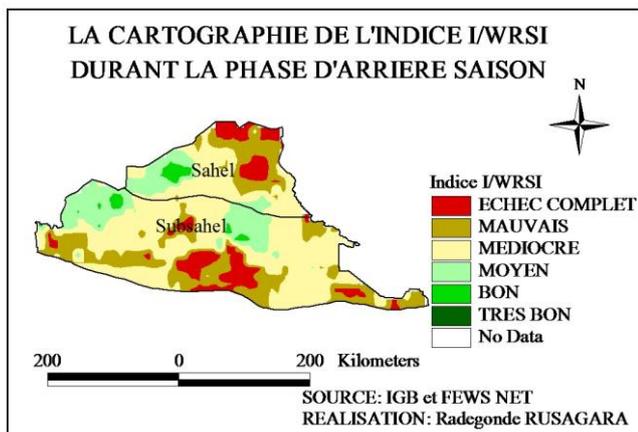
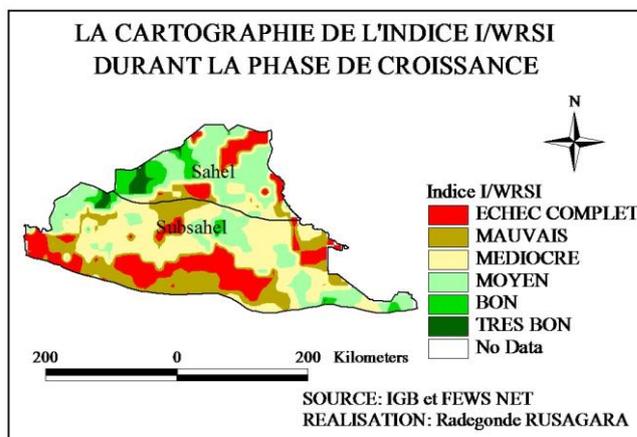
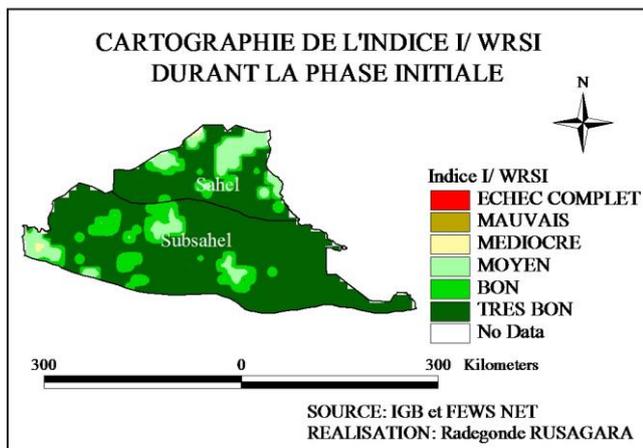
Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

La cartographie des hauteurs de pluie annuelle en 2015

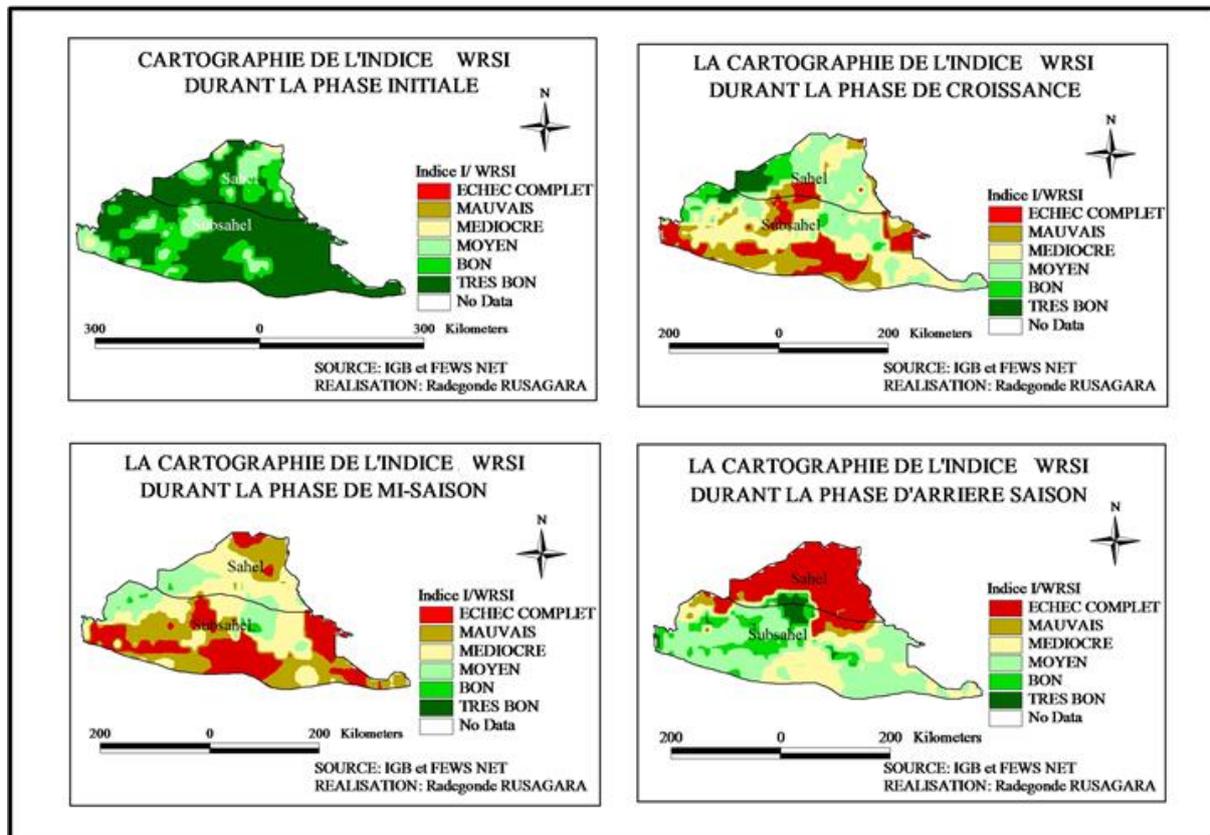


Source: IGB et FEWS NET
Réalisation: Radegonde RUSAGARA

**ANNEXE 5: CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE MAÏS
APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS**



ANNEXE 6: LA CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE MIL APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS



ANNEXE 7: LA CARTOGRAPHIE DE L'INDICE WRSI PAR PHASE PHENOLOGIQUE POUR LE SORGHO APRES LA DETERMINATION DE LA DATE FAVORABLE AU SEMIS

