

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : **CENTRE DE BIOTECHNOLOGIES VEGETALE ET MICROBIENNE, BIODIVERSITE ET ENVIRONNEMENT**

Structure de Recherche : **EQUIPE DE BOTANIQUE ET VALORISATION DES RESSOURCES VEGETALES ET FONGIQUES**

Discipline : **Biologie**

Spécialité : **Environnement, Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection**

Présentée et soutenue le 13 juillet 2020 par :

Mamane Barkawi MANSOUR BADAMASSI

Développement d'un nouvel indice pour détecter et surveiller la sécheresse agricole par télédétection en Afrique de l'Ouest : Cas de la zone agricole du Niger

JURY

Moustapha ARAHOU	PES, Faculté de Sciences, Université Mohammed V Rabat	Président du jury
Ahmed EL-ABOUDI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V Rabat	Directeur de thèse
Bouabid BADAOU	PH, Faculté de Sciences, Université Mohammed V Rabat	Rapporteur et Examineur
Mohamed CHIKHAOU	PH, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassane II (IAV), Rabat	Rapporteur et Examineur
Laila RHAZI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V Rabat	Rapporteur et Examineur
Noureddine BIJABER	Docteur Ingénieur, Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS), Rabat	Invité
Salissou ADA	Ambassadeur de la République du Niger au Maroc	Invité

Année Universitaire : 2019-2020

Avant-propos

Les travaux de recherche de cette présente thèse sur le Développement d'un nouvel indice pour détecter et surveiller la sécheresse agricole par télédétection en Afrique de l'Ouest : Cas de la zone agricole du Niger, ont été effectués au sein de la structure de recherche : Equipe de botanique et valorisation des ressources végétales et fongiques du centre de recherche de biotechnologies végétale et microbienne, biodiversité et environnement du département de Biologie de la Faculté des Sciences Rabat de l'Université Mohammed V Rabat.

Le choix de cette thématique de recherche m'est venu après une longue réflexion suite aux épisodes de sécheresses agricoles chroniques que vit presque chaque deux ans mon cher pays, le Niger. Ainsi, dès la fin de ma formation en Master spécialisé en Système d'Information Géographique (SIG), Télédétection en Juin 2016 à la Faculté de Sciences Rabat, je m'étais engagé avec le professeur Ahmed El-ABOUDI afin d'entamer des recherches doctorales pour apporter ma contribution au développement de mon pays avec comme objectif principal de proposer un outil (ou un indice) capable de pouvoir détecter et surveiller la sécheresse agricole par télédétection spatiale. L'idée est de prendre en compte les principaux paramètres pouvant conduire à la sécheresse agricole pour ensuite les combinés et mettre en place cet outil de détection et de surveillance de ladite sécheresse qui sera d'une grande utilité pour le Niger.

Une fois l'indice développé, nous avons effectué une visite terrain sur des zones pilotes réparties sur l'ensemble du territoire dans le souci de mieux comprendre le phénomène de ladite sécheresse. Néanmoins, du fait que nos travaux de recherches n'ont aucun financement, nous avons rencontrés quelques difficultés pour le déplacement du Maroc vers le Niger, puis vers les zones pilotes (en particulier dans le département de Tillabery).

Dédicaces

Ma mère

Affable, honorable, aimable : vous représentez pour moi une bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du développement qui ne cesse de m'encourager et de prier pour moi. Je vous dédie ce travail témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant vous préserve et vous accorde santé, longue vie et bonheur.

A mon défunt père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'avais toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit des sacrifices que vous aviez consentis pour mon éducation et ma formation. Que votre âme repose en paix, Amen !

Remerciements

Ce projet de thèse a été réalisé au sein de l'Equipe de Botanique et Valorisation des Ressources Végétales et Fongiques du Centre de Biotechnologies Végétale et Microbienne, Biodiversité et Environnement du Centre d'Etudes Doctorales de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V Rabat/Maroc.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Mr. Ahmed EL-ABOUD, Professeur de l'Enseignement Supérieur (PES) à la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V Rabat, qui m'a offert la possibilité d'effectuer ce travail de thèse sous sa tutelle. Vos conseils et votre soutien m'ont beaucoup guidé dans l'élaboration et la concrétisation de ce travail de recherche. Votre rigueur et générosité m'a donné de l'espoir et du courage pour la réalisation de ce rêve. Mes sincères remerciements.

Je remercie également le président du jury, Mr. Moustapha ARAHOU, Professeur de l'Enseignement Supérieur (PES) à la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V Rabat, pour avoir accepté de présider la soutenance de mes travaux de recherches.

Mes sincères remerciement à l'endroit de Mr. Badaoui BOUABID, Professeur Habilité (PH) à la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V Rabat, pour avoir rapporté et examiné ce présent travail de recherche.

Je remercie également Mr. Chikhaoui MOHAMED, Professeur Habilité (PH) à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassane II (IAV) Rabat, pour avoir rapporté et examiné ce présent travail de recherche.

Mes sincères remerciement à l'endroit de Mme. Laila RHAZI, Professeur de l'Enseignement Supérieur (PES) à la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V Rabat, pour avoir rapporté et examiné ce présent travail de recherche.

Je tiens à remercier également Mr. Noureddine BIJABER, Docteur Ingénieur au Centre Royal de de Télédétection Spatiale (CRTS) Rabat, pour avoir participer avec le jury en tant qu'invité.

Je remercie également Mr. Ali OUMAR Et Mr. Issoufou SOFO respectivement attaché académique et attaché des affaires consulaires à l'ambassade du Niger au Maroc, représentant de Mr Salissou ADA, ambassadeur du Niger au Maroc, pour avoir participer au membre du jury en tant qu'invité.

Je tiens à remercier également toutes les personnes et institutions qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, à commencer par le Doyen de la Faculté de Sciences Rabat ainsi que le CeDoc, pour m'avoir accueilli au sein de la Faculté afin de poursuivre mes études doctorales.

Je remercie également l'Ambassade du Niger au Maroc et l'Agence Marocaine de Coopération Internationale (AMCI) qui m'ont facilité la procédure d'inscription. Je tiens à remercier énormément mon école, le Centre Africain de Sciences et Technologie de l'Espace-en Langue Française (CARSTE-LF), pour m'avoir formé en Master spécialisé en Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection.

J'aimerais aussi remercier Dr Mahamadou HAROUNA, enseignant chercheur et maître de conférences à la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni (UAM) de Niamey pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité à mon égard depuis ma licence jusqu'à l'accomplissement de cette présente thèse.

Je tiens à remercier aussi mon collègue de travail et ami, GBETKOM Paul Gérard, pour tous les échanges d'informations, le soutien mutuel, et l'inter-aide dont nous avons fait preuve. Mes sincères remerciements vont à l'endroit de Mahaman kané MANSOUR BADAMASSI, beaucoup plus connu sous le surnom de Mainassara pour tout son soutien, sa disponibilité et aide qu'il a toujours fait preuve. Mes amis m'ont aussi beaucoup encouragé, je tiens à leur exprimer mes vifs remerciements. J'exprime également toute ma reconnaissance à mes compatriotes et amis résidents au Maroc pour leur soutien.

Résumé

Ce projet de recherche a pour objectif de développer un indice adéquat et fiable nommé indice de condition de sécheresse agricole (en anglais, Agricultural Drought Condition Index, ADCI) basé sur la télédétection afin de mieux détecter et surveiller la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger.

L'approche méthodologique adoptée pour le calcul de ADCI repose sur la première analyse en composante principale (ACP_1) des indices : PCI (indicateur sur la sécheresse météorologique), VCI (indicateur de la santé de végétations), TCI (indicateur sur l'humidité du sol), et ETCI (indicateur de l'évapotranspiration). ADCI est calculé sur les 5 mois de la campagne agricole (juin à octobre) sur 15 ans (2003 à 2017). Afin d'évaluer la fiabilité de l'indice ADCI, un test de validation a été effectué à travers une comparaison statistique (par test de corrélation) entre le ADCI, le VHI, le SPI-1, et le rendement agricole et une comparaison spatiale (par cartes d'indices) entre le ADCI, le VHI et le SPI-1, puis finalement par une visite terrain sur des zones pilotes.

A l'issus des résultats, ADCI est fortement corrélé avec le SPI-1 mais aussi avec le rendement des cultures et VHI. Partant des résultats de l'indice ADCI sur la période d'étude (2003 à 2017), les années de sécheresse les plus sévères dont le Niger a connu sont 2004, 2009, 2011, 2013 et 2014, qui sont en accord avec les sécheresses qui ont eu lieu dans le passé. Les régions les plus vulnérables et généralement touchées par la sécheresse agricole sont la partie centrale (régions de Maradi et de Zinder) et la partie orientale (région de Diffa).

Mots clés : Analyse en composante principale (ACP), indice de condition de sécheresse agricole (ADCI), sécheresse agricole, télédétection, Mil, Niger, surveillance.

Abstract

The objective of this research project is to develop an adequate and reliable agricultural drought condition index (ADCI) based on remote sensing to better detect and monitor agricultural drought in the Niger agricultural area.

The methodology used for the calculation of DTIA is based on the first principal component analysis (PDA_1) of the indices: PCI (Weather Drought Indicator), VCI (Vegetation Health Indicator), TCI (Soil Humidity Indicator), and ETCI (Evapotranspiration Indicator). ADCI is calculated over the 5 months of the crop year (June to October) over 15 years (2003 to 2017). In order to assess the reliability of the ADCI index, a validation test was performed by a statistical comparison (by correlation test) between ADCI, HPV, SPI-1, and agricultural yield and a spatial comparison (by index maps) between ADCI, HPV and SPI-1, and finally by a field visit to pilot areas.

Based on the results, ADCI is strongly correlated with SPI-1, but also with crop yields and HPV. Based on the ADCI index results over the study period (2003 to 2017), the most severe drought years in Niger were 2004, 2009, 2011, 2013 and 2014, which are in line with the droughts that occurred in the past. The most vulnerable and generally drought-affected regions are the central part (Maradi and Zinder regions) and the eastern part (Diffa region).

Keywords: Principal component analysis (PCA), Agricultural drought condition index (ADCI), Agricultural drought, Remote Sensing, CHIRPS, MODIS, Millet, Niger, Monitoring.

Liste des publications

- Mamane Barkawi, M.B., E.A. Ahmed, and G. Paul Gérard. 2019. “A New Agricultural Drought Index to Better Detect and Monitor Millet Crop by Remote Sensing in West Africa: Case of Niger.” *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems* 11 (11-Special Issue): 1023–33. <https://doi.org/10.5373/JARDCS/V11SP11/20193132>.
- Mamane Barkawi, M.B., E.A. Ahmed, and G. Paul Gérard. 2020. “A New Index to Better Detect and Monitor Agricultural Drought in Niger Using Multisensor Remote Sensing Data.” *The Professional Geographer* 0 (0): 1–12. <https://doi.org/10.1080/00330124.2020.1730197>.
- Mamane Barkawi, M.B., E.A. Ahmed, D. Tahiri, A. TAOUSS, and G. Paul Gérard. 2018. “Étude Par Télédétection de La Dynamique Urbaine de La Ville de Niamey (Niger) de 1985 à 2016 et Variations Concomitantes de La Pluviométrie.” *PHOTO INTERPRÉTATION EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED REMOTE SENSING* 54 (3). https://filedn.com/lv1iOb7va73JWJ6oJWisgl7/PI_54_3/art3_page1.pdf.
- Paul Gérard, G., Sébastien Gadai, E.A. Ahmed, Alfred Homère Ngandam Mfondoum, and M.B. Mamane Barkawi. 2019. “Mapping of Built up Areas in the Cameroonians Shores of Lake Chad and Its Hinterland through Based Object Classification of Sentinel 2 Data.” *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems* 11 (11-special issue): 1034–40. <https://doi.org/10.5373/JARDCS/V11SP11/20193133>.
- Paul Gerard, G., Sébastien Gadai, E.A. Ahmed, A.H. Ngandam Mfondoum, and M.B. Mamane Barkawi. 2018. “Mapping Change Detection of LULC on the Cameroonian Shores of Lake Chad and Its Hinterland through an Inter-Seasonal and Multisensor Approach.” *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 7 (1): 2835–49. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.381>.
- Alfred Homère, N. M., G. Paul Gérard, Cooper Ryan, Hakdaoui Sofia, and M.B. Mamane Barkawi. 2020. “Improving the Land Surface General Drought Index Model.” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-3/W11.

Liste des Communications

Communications Orales

- Journée ARCUS E2D2 (Environnement, Énergie & Développement Durable) : Communication orale sous le thème l'Environnement à travers les Sciences du 9 au 11 avril 2018 à l'Université Mohammed V, Rabat au Maroc.
- National PhD Students Days 2019 (NPSD'19) 2nd Edition, December 12-15, 2019. Communication orale sous le thème : New way to better detect and monitor Agricultural drought by remote sensing in the agricultural area of Niger.

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone agricole (zone d'étude) du Niger. Source : Terpend et FAO & SFW.....	33
Figure 2 : Zonage climatique du Niger en fonction des isohyètes réalisé par (Justice and Hiernaux 1983) et reproduite dans le cadre de notre étude.....	35
Figure 3 : Exemple de plante de mil cultivée dans la zone agricole du Niger.	43
Figure 4 : Classifications de la pression agricole dans la zone agricole du Niger.	Error! Bookmark not defined.
Figure 5 : Différents types de sols du Niger.....	41
Figure 6 : Carte de densité de la population du Niger 2014. Reproduite.....	48
Figure 7 : Système de carrelage sinusoïdal MODIS utilisé pour télécharger les tuiles (h18v07-h19v07) du NDVI.....	53
Figure 8 : Organigramme des données utilisées.....	60
Figure 9 : Processus d'identification des zones vulnérables à la sécheresse agricole à travers la fonction de superposition par intersection	71
Figure 10 : Chaîne de calcul et de validation de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI)	72
Figure 11 : Évolution mensuelle et annuelle de l'ADCI dans la zone agricole du Niger de 2003 à 2017	Error! Bookmark not defined.
Figure 12 : Evolution annuelle des indices ADCI, VHI et rendement des cultures de millet de 2003 à 2017	78
Figure 13 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2004 et 2009.....	80
Figure 14 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2011 et 2013.....	82
Figure 15 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2014.....	83
Figure 16 : (a) Diagramme de dispersion entre le ADCI & le rendement du mil et (b) diagramme de dispersion entre le VHI & le rendement du mil pendant la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017	86
Figure 17 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2004 et 2009.....	88
Figure 18 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2011 et 2013.....	90

Figure 19 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2014.....	91
Figure 20 : Diagramme de dispersion et valeurs du coefficient de corrélation R entre l'indice ADCI et le SPI-1 pendant la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017	93
Figure 21 : Zones vulnérables à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger à partir de l'indice ADCI.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 22 : Zones à haut risque de vulnérabilité à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger.....	96

Liste des tableaux

Tableau 1 : Calendrier culturel du Mil et du Sorgho au Niger.....	43
Tableau 2 : Caractéristiques du capteur MODIS TERRA	51
Tableau 3 : Caractéristiques des données NDVI MODIS téléchargés.....	52
Tableau 4 : Caractéristiques des données de températures de surface du sol (LST) téléchargées	54
Tableau 5 : Caractéristiques des données de précipitation CHIRPS téléchargés.....	55
Tableau 6 : Caractéristiques des données d'évapotranspirations réelles téléchargés.....	56
Tableau 7: Rendement annuel en kg/ha de la culture du mil de 2003 à 2017.....	57
Tableau 8 : Rééchantillonnages des données spatiales utilisées	59
Tableau 9 : Classification des indices de sécheresses	67
Tableau 10 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Alberkaram	98
Tableau 11 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Damagaram Takaya.....	99
Tableau 12 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Chadakori	101
Tableau 13 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Sofo.....	101

Liste des planches

Planche 1 : Visite et enquête sur le site de la commune rurale de Alberkaram le 30 septembre 2018.....	97
Planche 2 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Alberkaram.....	98
Planche 3 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Damagaram Takaya.....	99
Planche 4 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Chadakori	100
Planche 5 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Chadakori	102

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	125
Annexe 2 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	126
Annexe 3 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017	126
Annexe 4 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	127
Annexe 5 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	127
Annexe 6 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017	128
Annexe 7 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	128
Annexe 8 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	129
Annexe 9 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017	129
Annexe 10 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	130
Annexe 11 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	130
Annexe 12 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	131
Annexe 13 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	131
Annexe 14 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	132
Annexe 15 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2012 à 2017	132
Annexe 16 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007	133
Annexe 17 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012	133
Annexe 18 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2012 à 2017	134

Annexe 19 : Résultat du rééchantillonnage des données de précipitation CHIRPS de 5 km à 1 km, cas du mois d'août 2003.....	135
Annexe 20 : Article N°1 scopus publié dans la revue The Professional Geographer en tant qu'auteur principale.....	136
Annexe 21 : Article N°2 scopus publié dans la revue Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems en tant qu'auteur principale.....	137
Annexe 22 : Article N°3 non scopus publié dans la revue Photo Interprétation et Télédétection en tant qu'auteur principale.....	138
Annexe 23 : Article N°4 non scopus publié dans la revue International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS en tant que co-auteur.....	139
Annexe 24 : Article N°5 scopus publié dans la revue Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems en tant que co-auteur	140

Liste des singles et acronymes

ACP : Analyse en composante principale

ADCI : Agricultural Drought Condition Index

ADM : Ader Doutchi Magia

AMSR-E : Radiomètre à balayage micro-ondes avancé

CCR : Centre Commun de Recherche (de la Commission européenne)

CDI : Composite Drought Index

CEDEAO : Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest

CHIRPS : Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station

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

CRTS : Centre Royal de Télédétection Spatiale.

DSA : Direction de la Statistique Agricole

ECOAGRIS : Système Régional Intégré d'Information Agricole de la CEDEAO.

ET : Evapotranspiration

ETCI : Indice de condition d'évapotranspiration

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FAPAR : Fraction de rayonnement photo-synthétiquement actif

FEWS-NET: Famine Early Warning Systems Network

FIT : le front intertropical

HDF : Hierarchical Data Format.

IES : Institute for Environment and Sustainability

INRAN : Institut National de la Recherche Agronomique du Niger

LPDAAC : Land Processes Distributed Active Archive Center

LST : Land Surface Température

MENA : Middle East and North Africa.

MERIS : Medium Resolution Imaging Spectrometer

METRIC : Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration

MODIS : Moderate Spectro-radiomètre imageur à résolution moyenne

MSG : Météosat Seconde Génération

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

NDMC : National Drought Mitigation Center

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NOAA - AVHRR : National Oceanic and Atmospheric Administration's - Advanced Very High Resolution Radiometer.

NSD : Niamey Square Degree.

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OVDI : Optimized Vegetation Drought Index

PANACC : Programme d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques

PASP : Projet Agro-Sylvo-Pastoral

PDRT : Projet de Développement Rural de Tahoua

PCI : Indice de condition de précipitation

PIB : Produit Intérieur Brute

PIK : Projet Intégré Keïta

RGP/H : Recensement Général des Populations et de l'Habitat

RPCA : Réseau de Prévention des Crises Alimentaires au Sahel et en Afrique de l'Ouest.

RWC : Relative Water Content.

S.A : Sécheresse Agricole.

S.M : Sécheresse Météorologique.

SAS : Système d'Alerte à la Sécheresse.

SDCI : Scaled Drought Condition Index

SDI : Synthesized Drought Index

SEVERI : Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

SMCI : Soil Moisture Condition Index

SPI : Indice de précipitation standardisé

SPOT/VGT : Système probatoire d'observation de la Terre ou Satellite pour l'observation de la Terre / Végétation.

SSEB : Simplified Surface Energy Balance

TCI : Indice de condition de température

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

USGS : United States Geological Survey

UTM: Universal Transverse Mercator

VCI : Indice de condition de végétation

VHI : Indice de santé de végétation

WGS84 : World Geodetic System 1984

ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

Table des matières

Avant-propos	ii
Dédicaces	iii
Remerciement.....	iv
Résumé	vi
Abstract	vii
Liste des publications	viii
Liste des Communications	ix
COMMUNICATIONS ORALES.....	IX
Liste des figures	x
Liste des tableaux.....	xii
Liste des planches.....	xiii
Liste des annexes.....	xiv
Liste des singles et acronymes	xvi
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index	xvii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 :	7
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET CADRE DE L'ETUDE	7
1.1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES OUTILS DE SURVEILLANCE DE LA SECHERESSE AGRICOLE	8
1.2 CADRE DE L'ETUDE.....	17
1.2.1. <i>La télédétection pour la surveillance des cultures</i>	17
1.2.2. <i>Choix des indicateurs à l'étude</i>	21
1.2.2. <i>Objectifs de la thèse</i>	22
CHAPITRE 2 :	25
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	25
2.1. HISTORIQUE DES SECHERESSES AU SAHEL EN GENERAL ET AU NIGER EN PARTICULIER... 26	
2.1.1. <i>Le Climat au sahel</i>	26
2.1.2. <i>La sécheresse au sahel</i>	27
2.2. GENERALITE SUR LE NIGER	31
2.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE AGRICOLE DU NIGER (ZONE D'ETUDE)	32
2.3. CLIMAT ET VEGETATIONS	33
2.4. RELIEF	36
2.5. RESSOURCES EN EAU.....	37
2.6. TYPES DE SOL	38
2.7. PRESSION AGRICOLE SUR LA ZONE D'ETUDE	41

2.8. LE MIL	42
2.9. SYSTEME DE PRODUCTION DE LA CULTURE DU MIL	44
2.10. SYSTEME DE CULTURE DU MIL	46
2.11. DEMOGRAPHIE.....	47
CHAPITRE 3 :	50
DONNEES UTILISEES ET PREPARATIONS DES DONNEES.....	50
3.1. DONNEES UTILISEES.....	51
3.1.1. <i>Indice de Végétation par Différence Normalisé de MODIS</i>	52
3.1.2. <i>Température de surface du sol jour (Land Surface Temperature, LST-MODIS)</i> ...	53
3.1.3. <i>Données de précipitation CHIRPS</i>	54
3.1.4. <i>Données d'évapotranspiration réelle</i>	55
3.1.5. <i>Données vectorielles</i>	56
3.1.6. <i>Logiciels utilisés</i>	56
3.1.7. <i>Données de rendement de la culture du mil</i>	56
3.2. PREPARATIONS DES DONNEES	57
3.2.1. <i>Extraction des données MODIS (NDVI et Température de surface jour)</i>	57
3.2.2. <i>Extraction des données de précipitations CHIRPS et de l'évapotranspiration réelle</i>	58
3.2.3. <i>Rééchantillonnage</i>	58
3.2.4. <i>Regroupement des images (Layers-stack)</i>	59
CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE	62
4.1. PRINCIPE DE CALCUL DE L'INDICE DE CONDITION DE SECHERESSE AGRICOLE (ADCI)	63
4.1.1. <i>Indice de condition de végétation (VCI)</i>	65
4.1.2. <i>Indice de condition de précipitation (PCI)</i>	66
4.1.3. <i>Indice de condition de température (TCI)</i>	66
4.1.4. <i>Indice de condition d'évapotranspiration (ETCI)</i>	67
4.2. VALIDATION DE L'INDICE DE CONDITION DE SECHERESSE (ADCI)	68
4.2.1. <i>Validation de l'indice ADCI par comparaison avec le VHI</i>	68
4.2.2. <i>Validation de l'indice ADCI en utilisant les données du rendement des cultures</i> ..	69
4.2.3. <i>Validation de l'indice ADCI en utilisant l'indice de précipitation standardisé calculé à l'échelle mensuelle (SPI-1)</i>	69
4.3. PROCESSUS DE DETECTION DES ZONES VULNERABLES A LA SECHERESSE AGRICOLE	70
CHAPITRE 5 :	74
RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	74
5.1. SURVEILLANCE DE LA SECHERESSE AGRICOLE DE 2003 A 2017 PAR L'INDICE ADCI.....	75
5.2. VALIDATION DE ADCI A TRAVERS UNE COMPARAISON ANNUELLE AVEC LE VHI DE 2003 - 2017	76
4.3. VALIDATION DE ADCI PAR COMPARAISON DES CARTES DE SECHERESSES AVEC LE VHI	78
4.4. VALIDATION DE ADCI EN UTILISANT LE RENDEMENT AGRICOLE DE 2003 A 2017.....	84
4.5. VALIDATION DE ADCI PAR COMPARAISON DES CARTES DE SECHERESSES AVEC LE SPI-1	87

4.6 VALIDATION DE L'INDICE ADCI EN UTILISANT UNE ANALYSE DE CORRELATION AVEC LE SPI-1	92
4.7. DETECTIONS DES ZONES VULNERABLES A LA SECHERESSE AGRICOLE DANS LA ZONE AGRICOLE DU NIGER A TRAVERS L'INDICE ADCI	93
4.8. VISITE SUR LE TERRAIN POUR CONFIRMATION DES RESULTATS DE L'INDICE ADCI	96
4.8.1. <i>Région de Zinder</i>	97
4.8.1.1. Commune rurale de Alberkaram	97
4.8.1.2. Commune rurale de Damagaram Takaya.....	99
4.8.2. <i>Région de Maradi</i>	100
4.8.2.1. Commune rurale de Chadakori	100
4.8.2.2. Commune rurale de Sofo.....	101
CONCLUSIONS GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	104
CONCLUSION GENERALE.....	105
LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS	107
<i>Avantages et limitations de l'indice ADCI</i>	107
<i>Avantages et limitations de la méthode ACP</i>	108
Bibliographies	111
ANNEXES	124

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Depuis quelques années, plusieurs études ont porté sur les changements planétaires, dont beaucoup d'auteurs se sont attardés aux sécheresses (Wilhite & Glantz, 1985 ; Kogan & Sullivan, 1993 ; Kogan, 1997 ; Park et al., 2004 ; Jang, 2004). Les conséquences de la sécheresse peuvent être désastreuses même dans les pays très développés. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes (Obassi, 1994). La sécheresse de 1988 a causé aux Etats-Unis d'Amérique et au Canada des dégâts estimés respectivement à 40 milliards de dollars américains (Wilhite, 1993) et 1,8 milliard de dollars canadiens (Bootsma et al., 1996). En France, les conséquences des sécheresses de 1985, 1986 et 1989 ont beaucoup pesé sur l'économie (Ollivier, 1989).

En Afrique, plus précisément en Afrique de l'Ouest, la sécheresse des années 1970 a entraîné un rétrécissement des pâturages, obligeant les troupeaux à des déplacements de plus en plus longs au cours desquels les bêtes sont mortes de faim et d'épuisement. Toutes les cultures, mêmes irriguées, ont été touchées provoquant la famine pour les hommes et les bétails. Un puissant exode vers les vallées moins défavorisées s'est produit, créant des problèmes humains (Durand, 1977).

les conséquences de la sécheresse se ressentent encore plus dans les environnements arides et semi-arides, qui dépendent de manière critique des conditions météorologiques pour maintenir leur niveau de production alimentaire primaire (Maselli et al., 1993). L'exemple le plus typique de tels environnements est le Sahel, qui couvre une large bande de terre correspondant à la zone de transition entre le désert du Sahara au nord et la savane africaine au sud (Tucker, 1985). Selon (Yann, 2003), plus de 20 millions d'hectares de sol autrefois productifs se transforment chaque année en désert stérile (sol nu) à cause des sécheresses.

Le Niger, situé dans le Sahel avec une superficie de 1.267.000 km² (dont ¾ de la superficie sont occupés par le désert) est très souvent confronté à des sécheresses agricoles chroniques conduisant à des crises alimentaires d'envergure nationale qui affectent non seulement beaucoup de nigériens, en particulier les enfants mais aussi les animaux et l'environnement. C'est le cas des graves crises alimentaires des années 2001, 2005, 2010 et 2012 (Denis et al., 2012) qui ont amenés le pays à faire appel à l'aide humanitaire internationale (World Bank, 2011). Par exemple, au Niger, la sécheresse de 2004 a créé un déficit céréalier de -21% sur la production agricole nationale, celle de 2009 a créé un déficit céréalier de -12% et celle de 2011 un déficit de -18% (World Bank, 2011). La sécheresse de 2009 a entraîné la perte de 2,7 millions de têtes de bétail, et 357 000 autres animaux ont été touchés. Les éleveurs ont vendu 1,48 million d'animaux en détresse. La valeur totale du capital perdu lors de cette crise imputable à

Introduction Générale

la sécheresse est d'environ 805 millions de dollars américains (Fintrac/BEST, 2011). D'après (Denis et al., 2012), en général, les principales causes de ces crises alimentaires résultent d'une part, d'une baisse de production céréalière suite à une mauvaise campagne agricole et d'autre part, d'un déficit élevé de production fourragère suite à une campagne pastorale déficitaire. Dans un pays comme le Niger où les précipitations sont concentrées sur une période de quatre mois (juin à septembre) et sont très variables peu fiables et fluctuent considérablement par rapport à la moyenne année après année (Douglas & Sally, 2014), l'insuffisance des précipitations à des périodes cruciales du cycle de production des cultures (semis, floraison et remplissage du grain) affecte les rendements des cultures, même lorsque les précipitations globales sont comparables à la normale sur le long terme. Au Niger, la culture pluviale la plus affectée est le mil du fait qu'elle est la plus importante et couvre 70% des terres cultivables (Douglas & Sally, 2014). Les terres agricoles les plus productives, recevant environ 600 mm / an, ne représentent que 1% de la superficie totale. Partant de ces conditions, l'agriculture pluviale se retrouve caractérisée par une vaste entreprise, dont la production et les rendements sont très variables et qui, pour la plupart des ruraux, ne répondent pas à leurs besoins alimentaires annuels.

Le concept de la sécheresse diffère selon le domaine considéré. Selon le « National Drought Mitigation Center » des États-Unis (NDMC, 2005), les sécheresses peuvent avoir deux types de définitions. Le premier type, dit conceptuel, aide à mieux saisir la notion de la sécheresse.

« La sécheresse est une période de temps prolongée où, un manque de précipitation provoque des dégâts sévères aux cultures et entraîne une perte de rendement » est un exemple de définition conceptuelle. Le second type, dit opérationnel, sert à mieux cerner le début, la fin et la sévérité des sécheresses. Ces définitions qualifient généralement la condition actuelle d'une variable climatique par rapport à une condition normale historique afin de déterminer des seuils, plus ou moins arbitraires, du début, de la fin et de l'intensité d'une période de sécheresse. Selon les définitions opérationnelles, il existe quatre grands types de sécheresse approuvés de manière large dans la littérature scientifique (WMO, 1975 ; Alley, 1984, 1985 ; Wilhite & Glantz, 1985 ; White, 1990) : les sécheresses météorologiques, hydrologiques, agricoles et socio-économiques.

1), la sécheresse météorologique, elle se caractérise par un déficit voire une absence pluviométrique par rapport à la normale (valeur moyenne de trois décennies) pendant une certaine période relativement longue (Bootsma et al., 1996). Ces définitions doivent être considérées spécifiques à une région puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre.

Introduction Générale

2), la sécheresse hydrologique : elle est liée à tout déficit pluviométrique prolongé entraînant une baisse de l'alimentation des cours d'eau et de la recharge des réservoirs d'eau de surface ou souterrains (Wilhite, 1993b). La fréquence et la sévérité de ce type de sécheresse sont souvent calculées pour la région d'un bassin versant. Même si leur origine est un déficit pluviométrique, les hydrologues sont surtout intéressés à l'effet de la carence en eau sur les systèmes hydrologiques tels que les sols, les cours d'eau et les réservoirs. Ce type de sécheresse sont pour la plupart décalées des sécheresses météorologiques et agricoles, car les propriétés physiques des sols et des aquifères produisent un effet tampon qui freine la perte en eau des systèmes hydrologiques. Elles sont de plus influencées par l'utilisation humaine du territoire. Parce que les régions hydrographiques sont souvent interconnectées entre elles, les effets d'un déficit en eau d'une région peuvent se faire sentir dans une autre région. La construction de barrages ou une utilisation du sol en amont peuvent affecter les terres en aval. Par exemple, le Bangladesh a démontré une augmentation des pénuries en eau à la suite de changements dans l'utilisation du sol au pays et dans les pays avoisinants (Beaudin, 2007).

3), la sécheresse agricole : elle est liée à un déficit provenant des précipitations et de l'eau stockée dans le sol marqué et suffisant pouvant entraîner une réduction significative de la production agricole (McVicar & Jupp, 1998). Ce type de sécheresse portent sur l'insuffisance des précipitations, la différence entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, et le manque en eau des sols et des réserves hydriques.

4), la sécheresse socio-économique : elle se traduit par une production insuffisante de biens essentiels (énergie hydroélectrique, approvisionnement en eau potable, récolte, etc.) et a un impact significatif sur la vie des communautés à cause d'un manque hydrique relié au climat (Wilhite, 1993b). Cette catégorie de sécheresse définit le lien entre l'offre et la demande d'un bien économique et certains éléments des sécheresses météorologiques, hydrologiques ou agricoles. L'occurrence d'un tel type de sécheresse dépend de la variation temporelle et spatiale de l'offre et de la demande de ce bien économique. Ce bien dépend toujours des conditions climatiques et peut tout aussi bien être l'eau, une récolte ou de l'électricité. Il y a sécheresse socio-économique lorsque la demande pour un bien excède l'offre à cause d'un manque hydrique relié au climat.

Parmi ces quatre catégories de sécheresse, la sécheresse agricole reste de loin la plus destructrice. Lorsqu'elle survient, cela sous-entend que nous sommes en face d'une sécheresse météorologique couplée à une sécheresse du sol (déficit de l'eau stockée dans le sol) (Jasmien et al., 2015). Ses impacts atteignent non seulement les humains (crise alimentaire) et

Introduction Générale

leurs bétails (pénurie des parcours) mais aussi notre environnement (stérilisation du sol par manque d'eau).

Compte tenu du contexte climatique actuel et des prévisions futures, il est plus qu'important de prendre au sérieux les conséquences de cette sécheresse afin de pouvoir minimiser ses dégâts. De plus, pour beaucoup de pays à l'instar du Niger, l'agriculture représente le secteur le plus important de l'économie du pays. Pour le Niger, le secteur agricole représente plus de 40% du produit intérieur brute (PIB) national et constitue la principale source de revenus pour plus de 80% de la population (Abdoul Habou et al., 2016). Une sécheresse agricole à petite intensité soit-elle, représente une grande menace potentielle pour le pays et sa population. Raison pour laquelle, notre travail de recherche porte sur le développement d'un indice qui pourra détecter, caractériser l'état, l'ampleur spatiale, l'intensité et la durée des conditions de la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger.

Les indicateurs dérivés des observations météorologiques sont utiles dans l'agriculture pluviale (Rockström et al., 2002). Ces observations proviennent de sources ponctuelles, qui sont préférables pour la surveillance temporelle à un emplacement ponctuel, mais qui faillissent lorsqu'il s'agit d'une surveillance à dimension spatiale. Une condition nécessaire au calcul de certains indicateurs de sécheresse à partir des données de stations météorologiques, est un historique de longue durée, habituellement de 30 ans. Seulement quelques stations météorologiques possèdent un tel historique. Il en résulte donc que, seul un petit nombre de stations peuvent être utilisées dans le calcul de ces indicateurs de sécheresse. Si une station ayant un historique plus court est utilisée, les résultats seront alors moins représentatifs des tendances à long terme. Pour espérer avoir des bons résultats spatiaux dans une vaste région à partir des paramètres météorologiques (données ponctuelles), une répartition des points d'observation dense s'exige, ce qui est difficile à atteindre (Padhee et al., 2017). Les conditions de sécheresse spatiale à partir de ces données doivent être estimées à l'aide des techniques d'interpolation spatiale, comme le modèle de Krigeage ordinaire ou la pondération par l'inverse de distance (Du et al., 2013). Cependant, de fortes incertitudes peuvent exister parce que de nombreux facteurs peuvent affecter le processus d'interpolation.

Ainsi, la télédétection, qui peut être utilisée pour extraire les caractéristiques météorologiques ou biophysiques des surfaces terrestres, a suscité une attention accrue pour la surveillance de la sécheresse (Rhee et al., 2010). Les indicateurs dérivés de la télédétection par satellite présentent de nombreux avantages. Ils offrent une vue synoptique de la surface de la terre et un contexte spatial pour mesurer les impacts de la sécheresse, qui se sont avérés être une source précieuse

Introduction Générale

de données opportunes et spatialement continues, avec des informations améliorées sur la surveillance de la sécheresse. Les indicateurs dérivés des images satellitaires ont la capacité de quantifier directement les conditions qui existent en surface, que ce soit la température, l'état de la végétation...etc. De plus, ces images reconstituées représentent les conditions qui prévalent en tout point du territoire au moment où les images ont été prises. En ce sens, elles peuvent être considérées plus représentatives que les valeurs associées à l'interpolation spatiale des indicateurs de sécheresse météorologiques (Beaudin, 2007). D'où, ce qui nous a poussé à opter le choix de la télédétection dans le cadre du développement de ce nouvel indice pour la détection et le suivi de la sécheresse agricole au Niger.

D'après ce qui précède, ces considérations mettent en évidence la nécessité d'un outil opérationnel, opportun et précis de surveillance de la sécheresse agricole qui peut évaluer correctement le début, la gravité et les zones affectées par un événement de sécheresse pour aider les décideurs à mieux prendre les décisions adéquates. Lorsqu'elle survient, elle porte un coup aux revenus des ménages, à la performance du secteur agricole, à l'équilibre budgétaire de l'État et au taux de croissance économique du pays.

Ainsi, en tenant compte des mauvaises expériences vécues suite aux conséquences de la sécheresse agricole, il est plus qu'urgent de se doter d'outils capables de détecter et suivre les conditions de sécheresse afin de pouvoir tenir informés les décideurs d'une éventuelle sécheresse pour atténuer ses conséquences. La sécheresse est un phénomène climatique qui ne peut être éliminé, néanmoins ses effets néfastes peuvent être réduits si les décideurs disposent d'outils leur fournissant des informations en temps réel sur les conditions de la sécheresse afin de pouvoir prendre les bonnes décisions au bon moment. D'où la nécessité de mettre en place un outil de détection et de surveillance de la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger, en vue d'établir un Système d'Alerte Précoce Agricole (SAPA) efficace et efficient pour aider la communauté à mieux gérer et s'adapter aux risques d'une éventuelle sécheresse.

CHAPITRE 1 :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET CADRE DE L'ETUDE

1.1 Synthèse bibliographique des outils de surveillance de la sécheresse agricole

Comme les sécheresses sont des phénomènes complexes pour lesquels il existe plusieurs définitions (Vogt & Somma, 2000), les outils qui peuvent être utilisés pour leur suivi sont également nombreux. Alors que certains quantifient le bilan hydrique ou énergétique de surface, d'autres font tout simplement état de la condition de la végétation. De façon optimale, ces indicateurs doivent être en mesure de détecter le début, la durée, la sévérité et la fin des périodes sèches afin d'être utilisés comme aide décisionnel auprès des autorités qui ont à effectuer des choix relativement aux sécheresses.

En ce qui concerne la sécheresse agricole qui est l'objet de notre recherche, des initiatives ont été menées à travers le monde pour la détection et la surveillance de ladite sécheresse. Plusieurs indices de sécheresse agricole ont été établis à partir de diverses formes de données de télédétection spatiale à travers l'utilisation des satellites. En effet, les indices obtenus par les méthodes satellitaires utilisent des données mesurées à partir de capteurs éloignés de la surface pour laquelle ils mesurent l'information. Ces capteurs peuvent être montés sur des avions ou à bord de satellite. Les satellites imageurs, comme NOAA AVHRR, SPOT VGT, Landsat TM ou les plus récents capteurs comme MODIS ou MERIS, sont très utiles pour la caractérisation à grande échelle de l'état des surfaces terrestres, particulièrement celles couvertes de végétation. Ces capteurs perçoivent les longueurs d'ondes réfléchies ou émises par les surfaces terrestres. Ces indices dérivés des informations satellitaires ont des exigences de données différentes, utilisent des méthodes uniques pour quantifier la sécheresse et chacun a ses propres caractéristiques (Zhang et al., 2017).

La végétation verte possède une signature spectrale distincte. En condition favorable, la chlorophylle présente dans la végétation verte absorbe la portion rouge (R) du spectre électromagnétique. Cependant, dans la portion du proche-infrarouge (NIR), les ondes sont fortement diffusées par la structure spongieuse du mésophylle des feuilles. Il s'ensuit un fort retour du NIR vers le capteur satellitaire (McVicar and Jupp 1998 ; McVicar and Bierwirth 2001). En situation de stress hydrique, le retour du NIR vers le capteur est plus faible alors que la réflectance du R est plus élevée. La différence NIR-R est donc plus faible en périodes de sécheresse.

La différence de réflectance entre ces deux portions du spectre électromagnétique a été exploitée depuis plusieurs décennies afin de caractériser la végétation (Huete 1988 ; Pinty and Verstraete 1992 ; Qi et al. 1994). Différentes combinaisons de ces deux bandes spectrales ont été utilisées afin de développer plusieurs indices de végétation. Dans une revue des indices de

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

végétation effectuée par (Bannari et al., 1995), ces auteurs ont recensé environ 35 indices de végétation différents. Ces indices tentent de percevoir les changements de réflectance du couvert végétal, causés par un déficit ou un surplus hydrique ou encore une maladie. L'avantage des indices de végétation se situe au niveau de la facilité de leurs calculs. Ils offrent un outil de comparaison rapide et efficace de l'état de la végétation pour une surface et non en un point du territoire. Leurs applications sont possibles de manière instantanée jusqu'à une échelle temporelle annuelle, et de manière régionale ou continentale. Comme la végétation possède une réponse anisotropique, les indices de végétation sont tous influencés à différents degrés par l'angle d'illumination et l'angle de vue. Ils sont aussi influencés par les changements de la couleur du sol ainsi que par les changements du signal au satellite causés par les composantes atmosphériques (McVicar & Jupp, 1998).

Les combinaisons les plus communes sont certainement le NDVI et le ratio simple de l'infrarouge sur le rouge (NIR/R) (Bannari et al., 1995). L'Indice de végétation normalisé (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), proposé pour la première fois par (Rouse et al., 1973), le NDVI est un des indices de végétation bien connus et très utilisés. Comme les autres indices de végétation, le NDVI est sensible à la présence de végétation verte. C'est un outil efficace pour la surveillance des cultures mais aussi pour la surveillance des précipitations et des sécheresses (Kogan 1990 ; Unganai and Kogan 1998 ; Viau, Vogt, and Beaudin 2000 ; McVicar and Bierwirth 2001 ; Boyd et al. 2002). Il est obtenu par la différence entre la réflectance de la région spectrale du proche infrarouge et la réflectance de la région spectrale du rouge, divisé par la somme de la réflectance de la région spectrale du proche infrarouge et de la réflectance de la région spectrale du rouge. Comme cet indice est normalisé, les effets de l'angle d'illumination et de l'angle de vue sont réduits. La normalisation permet aussi de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie (Bannari et al., 1995).

Même s'il est normalisé, cet indice reste sensible à la géométrie de vue et d'illumination, plus spécialement dans les régions où la densité de végétation est faible et où la présence de sol est importante (Bannari et al., 1995). Le NDVI souffre aussi d'une rapide saturation en milieu de végétation dense et la contribution du sol en région de faible densité de végétation rend son interprétation douteuse. Ainsi, son interprétation peut donc être biaisée dans les régions arides ou sujettes aux sécheresses. Le NDVI n'en demeure pas moins un indice efficace pour identifier les zones de stress hydrique, plus spécialement dans les milieux homogènes comme en agriculture. Dans les régions hétérogènes où les ressources varient grandement sur de courtes distances, son interprétation devient plus difficile (Kogan, 1990).

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

L'Indice de Condition de Végétation (VCI) a été mis au point par (Kogan, 1990) à travers une transformation du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), en utilisant les valeurs minimales, maximales et courantes du NDVI.

Le VCI tente de séparer le signal climatique à court terme du signal écologique à long terme (Kogan & Sullivan, 1993). Il reflète donc la distribution climatique et non les différences de végétation dues aux différents écosystèmes. En ce sens, il est un meilleur indicateur de la distribution des précipitations que le NDVI (Kogan, 1990). Il permet aussi de comparer l'effet du climat sur des aires d'études différentes. Le VCI apporte donc une amélioration dans l'analyse de la condition de la végétation pour des aires non homogènes (Kogan, 1990). D'abord créé pour suivre les conditions de sécheresse du Mid-Ouest américain, le VCI a été utilisé sur plusieurs continents afin de détecter les situations de sécheresse agricole à grande échelle (Layelmam, 2015). Ainsi, plusieurs équipes ont exploité le VCI pour suivre les conditions de sécheresse agricole en Afrique du Sud (Unganai & Kogan, 1998), en Inde (Singh et al., 2003) et en Grèce (Domenikiotis et al., 2004).

Le VCI, tout comme les autres indices de végétation satellitaires comporte les mêmes limitations associées à la méthode d'acquisition des données. L'application du VCI est fortement liée au nombre d'images disponibles ainsi qu'à la qualité de ces images. Comme cet indicateur utilise des images composées, il est important de considérer les jours d'acquisition associés à chaque pixel puisque l'angle de vue et l'angle d'illumination peuvent varier grandement d'un pixel à l'autre.

D'autres indices de végétation estiment le contenu en eau de la végétation, qui caractérise l'état santé du feuillage, à l'aide des ondes de l'infrarouge moyen (SWIR), comprises entre 1,2 et 2,5 μm . Dans cette partie du spectre électromagnétique, l'eau et la structure spongieuse du mésophile des feuilles diffusent les ondes et le retour du signal vers le capteur est fort. La différence entre la réflectance du SWIR et du NIR peut, de la même manière que pour le R et le NIR, être utilisée pour caractériser la végétation. Quoique les premiers indices de végétation exploitant ces deux bandes existent depuis longtemps (Raymond Hunt et al., 1987), ces indicateurs n'ont reçu que peu d'attention jusqu'à récemment. Une raison pour cette impopularité est probablement la faible fréquence de passage de Landsat TM, le premier capteur à comporter une bande spectrale SWIR.

Un des premiers indices utilisant ces deux bandes spectrales est sûrement l'Indice du contenu en eau des feuilles (LWCI - Leaf Water Content Index). Utilisant les bandes 4 et 5 de Landsat TM, le LWCI estime, comme son nom l'indique, le contenu relatif en eau des feuilles ou d'un couvert végétal, de manière journalière ou hebdomadaire. En combinant le proche infrarouge

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

(TM4) et l'infrarouge moyen (TM5), le LWCI tente de détecter le stress en eau causé par les conditions de sécheresse. Il est obtenu par la formule $LWCI = -\log[1 - (TM_4 - TM_5)]/\log[1 - (TMft_4 - TMft_5)]$. Avec TM4, la réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM, TM5 la réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen (SWIR) de Landsat TM et ft la Pleine turgescence. Introduit par (Raymond Hunt et al., 1987), le LWCI a été testé uniquement au laboratoire et ne semble pas être applicable sur le terrain selon l'auteur.

L'Indice de stress en humidité (MSI - Moisture Stress Index) utilise aussi le ratio de l'infrarouge moyen (SWIR) sur le proche infrarouge (Hunt et Rock, 1989). Cet indicateur est hautement corrélé au contenu en eau de la végétation et des sols et donc aux conditions de sécheresse. Le MSI est aussi fortement lié au NDVI (Raymond Hunt et al., 1987). Le MSI est déterminé à partir de la formule ci-après : $MSI = TM_4/TM_5$. Avec TM4, la réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM, TM5 la réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen (SWIR) de Landsat TM. Cependant, le MSI est par contre peu sensible au changement hydrique. Un couvert végétal pleinement hydraté doit perdre 50% de son contenu relatif en eau pour que le MSI détecte cette différence afin de définir les conditions de sécheresse. Ce qui entraîne une certaine limitation dans son application.

L'état des conditions de la végétation et de sa productivité peuvent aussi être caractérisés par la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif (FPAR - Fraction of Photosynthetically Active Radiation). Cet indicateur illustre la fraction de l'énergie solaire (400 - 700 nm) absorbée par les feuilles vertes. C'est un indicateur qui est reconnu comme un des paramètres de surface fondamental pour les études environnementales qui peut aussi être utilisé comme estimation quantitative des facteurs principaux qui contrôlent la productivité de la végétation. Pour cette raison, le FPAR est un produit calculé mensuellement ou annuellement et distribué pour plusieurs pays, dont le Canada (NRC, 2006) et Les pays européens. Comme les sécheresses ont un impact sur la vigueur de la végétation, il est possible d'utiliser le FPAR pour détecter les changements de l'état de la végétation. Entre autre, (Gobron et al., 2005) ont utilisé les données du capteur MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) pour évaluer l'état de la végétation à l'aide du FPAR suite à la sécheresse qui a sévi en Europe en 2003.

La température de l'air est un paramètre météorologique important dans plusieurs domaines environnementaux tel que la climatologie et l'agrométéorologie où elle sert entre autres à estimer l'évapotranspiration. La connaissance de sa distribution dans le temps et dans l'espace est par contre difficile à obtenir de manière précise avec la méthode présentement utilisée ;

l'interpolation spatiale. Une possibilité pour contourner ce problème est l'utilisation de données satellitaires pour extraire une température apparente à la surface. Cette température reflète les conditions qui prévalent à la surface, en tout point du territoire. Il existe une forte relation entre la température maximale de l'air et la température de surface perçue au capteur.

L'énergie solaire reçue à la surface est divisée en trois composantes : le flux de chaleur dans le sol, le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère et le flux de chaleur latente qui est utilisé pour l'évapotranspiration. Lorsque la demande en eau des plantes est plus grande que l'eau disponible pour les plantes, un stress hydrique se produit. Afin de conserver l'humidité, les stomates de feuilles ferment afin de minimiser les pertes par transpiration. Comme le bilan énergétique doit demeurer équilibré, une partie de l'énergie qui est normalement utilisée pour l'évapotranspiration est alors répartie entre le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère. Il y a alors une hausse de la température apparente du couvert végétal (Crago 1996 ; Mader 1987 ; McVicar and Jupp 1998). Le flux de chaleur sensible qui est capté par le satellite est donc plus élevé en situation de stress hydrique et peut être utilisé pour détecter l'état de stress hydrique des plantes et donc les conditions de sécheresse.

Ainsi, il existe plusieurs méthodes de calcul de la température de surface (Jang, 2004). Une d'entre elle fait appel à l'utilisation d'une seule bande thermique afin de calculer la température de surface. Un modèle de transfert radiatif et une connaissance de l'état atmosphérique au moment de l'acquisition de l'image sont nécessaires. Ces données sont indispensables afin de corriger l'absorption et l'émission de l'atmosphère. Cette information, toujours difficile à obtenir, est pour le moment obtenue à l'aide de sondes atmosphériques.

Une seconde méthode est basée sur la différence d'absorption atmosphérique due à une différence de longueur du trajet optique lorsqu'un objet vu à deux ou plusieurs angles différents. Il est malheureusement difficile avec la technologie présente d'obtenir une vue simultanée à différents angles d'un même objet.

Finalement, la méthode la plus utilisée est appelée « Split Window ». Elle est basée sur la différence d'absorption entre deux bandes voisines dans le domaine infrarouge compris entre 8 et 14 μm . Cette méthode donne lieu à deux équations. Comme le nombre d'inconnu (émissivité spectrale et absorption atmosphérique) est égal au nombre d'équation, il est nécessaire de supposer certaines hypothèses, comme la linéarité de l'équation de Planck, l'égalité de l'amplitude des températures incluses, l'invariabilité spatiale de l'émission des surfaces et la faible absorption de la vapeur d'eau.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

L'intérêt de l'utilisation de la température de surface dans le cadre de la surveillance des conditions de sécheresse est qu'à partir des températures de surface, il est possible de calculer l'Indice de condition thermique (TCI - Temperature Condition Index) mis au point par (Kogan, 1995) en utilisant les valeurs minimales, maximales et courantes de la température de Brillance (TB). Comme pour les indices de végétation, il est applicable à l'échelle régionale ou continentale, de manière instantanée ou pour des périodes variant du jour jusqu'à une année. Le TCI permet d'avoir des informations utiles concernant le stress de la végétation dû à une désaturation du sol en eau (Layelmam, 2015). Dans certaines parties du globe, le VCI et TCI ont donné de bons résultats lorsqu'ils étaient utilisés pour la détection et le suivi de la sécheresse agricole, la surveillance de l'humidité excessive des sols, l'évaluation des impacts météorologiques sur la santé de la végétation et la productivité de la végétation (Unganai & Kogan, 1998). Tout comme le VCI, le TCI fait appel à des images composées. Il est donc important de tenir compte de l'angle de vue car celui-ci fait varier la grandeur des pixels. Comme la végétation possède une réponse anisotropique, il faut aussi considérer l'heure de passage du satellite puisqu'elle influence la géométrie de vue.

Le TCI et le VCI, développés parallèlement (Kogan & Sullivan, 1993), sont généralement utilisés soit en pair, soit séparément, soit de façon à former un indicateur unique. Ainsi, plusieurs auteurs (Kogan 1995b ; Kogan et al. 2004 ; Unganai and Kogan 1998) ; ont développé un indice prenant la forme « $\alpha\text{VCI} + \beta\text{TCI}$ », où α et β sont les poids de chacun des indicateurs. Les poids sont généralement obtenus par une analyse de corrélation entre le VCI et le TCI et un paramètre physique (rendement d'une culture, précipitation, etc). Le but est de donner un poids plus important au paramètre qui explique le mieux les changements de l'état de la végétation causés par la sécheresse. Finalement, la combinaison du TCI et VCI pour obtenir le VHI par (Kogan, 2002) fut une autre avancée dans le monde scientifique. En effet, le VHI est aussi un outil utile afin de surveiller presque en temps réel les conditions de la végétation et l'impact du climat sur celle-ci. Combiné aux données recueillies sur le terrain, cet indice semble être d'excellents outils pour la surveillance des conditions de sécheresse, plus spécialement en agriculture (Layelmam, 2015). Le VHI s'est trouvé être plus efficace par rapport aux autres indices (VCI et TCI) dans la surveillance de la sécheresse agricole (Singh et al., 2006).

En 2010, (Rhee et al., 2010) ont développé l'Indice de Condition de Sécheresse à Echelle (SDCI-Scaled Drought Condition Index) par la combinaison des données de la température de surface du sol (LST) des données d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) du capteur du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS), des données de précipitation du satellite Mission de mesure de précipitations tropicales (TRMM) pour la

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

surveillance de la sécheresse agricole dans les régions arides et humides à l'aide de données multi-capteurs (Zhang et al., 2017). Lorsque le SDCI a été comparé à l'indice de Palmer (PDSI) et à l'indice Z de Palmer (indice Z), à l'indice SPI et à l'indice VHI sur une période de dix ans (2000-2009) dans les régions arides d'Arizona et du Nouveau-Mexique, ainsi que dans les régions humides de Caroline du Nord et de Caroline du Sud, le SDCI a donné des meilleurs résultats que ces indices (Rhee et al., 2010). Les changements et les distributions spatiales du SDCI d'une année à l'autre dans les régions arides et humides ont généralement été conformes aux changements documentés par les cartes du moniteur de la sécheresse des États-Unis (USDM) (Rhee et al., 2010).

Suite aux menaces de la sécheresse en Europe, un groupe de chercheurs (Sepulcre-Canto et al., 2012) de l'Institut pour l'environnement et le développement durable (IES) du Centre Commun de Recherche (CCR) de la Commission européenne, ont développé un Indicateur Combiné de sécheresse (CDI-Combined Drought Indicator) uniquement au niveau européen pour détecter la sécheresse agricole. Cet indice est obtenu par la combinaison de trois indices individuels : l'indice de précipitation standardisé (SPI-3, calculé sur 3 mois), l'anomalies de l'humidité du sol et l'anomalies de la fraction de rayonnement photo-synthétiquement actif (FAPAR). Le CDI donne un aperçu synthétique et synoptique de la situation de la sécheresse agricole à l'aide d'un schéma de classification (à travers un système de seuillage) qui est composé de trois niveaux : niveau d'alertes : « Watch » lorsqu'un manque important de précipitations est observé, niveau « Warning » lorsque ce manque de précipitation se traduit par une anomalie d'humidité du sol, et niveau « Alert » lorsque ces deux conditions sont accompagnées d'une anomalie dans l'état de la végétation (Sepulcre-Canto et al., 2012). Le CDI (Combined Drought Indicator) a donné de meilleurs résultats lors de son application en Europe. Cependant, dans le souci d'améliorer cet indice, les auteurs recommandent pour les futures recherches la possibilité d'inclure des indicateurs supplémentaires tels que SPI-1 (calculé sur 1 mois) et des indicateurs basés sur la température de brillance du sol, extraites par satellite pour une meilleure caractérisation du stress hydrique de la végétation.

Certains auteurs comme (Du et al., 2013) intègrent des données multi-capteurs à distance provenant de MODIS et de TRMM pour développer l'indice de sécheresse synthétisé (SDI - Synthesized Drought Index) dans la province de Shandong en Chine de 2010 à 2011. Cet indice synthétise le déficit en précipitations, le stress thermique du sol et l'état de la croissance de la végétation tout au long du processus de sécheresse. Après validation, les résultats de l'indice SDI montrent non seulement une forte corrélation avec l'indice de précipitation standardisé), mais aussi avec des variations de rendement et des superficies cultivées touchées par la

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

sécheresse. Il a été prouvé que cet indice peut contenir non seulement les informations météorologiques sur la sécheresse, mais également refléter l'influence de la sécheresse sur l'agriculture (Du et al., 2013).

En 2015, (Hao et al.) ont présenté l'indice optimisé de sécheresse de la végétation (OVDI - Optimized Vegetation Drought Index), en combinant le VCI, le SMCI (Soil Moisture Condition Index), le TCI et le PCI pour analyser les données de MODIS, TRMM et AMSR-E et pouvoir surveiller la sécheresse végétative dans trois régions bioclimatiques du sud-ouest de la Chine. Les résultats ont montré que l'indice OVDI était corrélé à l'indice SPI à 3 mois (SPI-3) et présentait une tendance similaire avec la teneur en eau relative du sol (RWC) à l'échelle temporelle, ce qui suggère un indicateur potentiel de sécheresse agricole (Hao et al., 2015).

(Svoboda & Fuchs, 2017) ont développé l'Indice Composite de Sécheresse (CDI – Composite Drought Index) pour les régions de MENA (Middle East and North Africa) dans le cadre de la surveillance de la sécheresse agricole. Ils combinent 4 paramètres avec un facteur de pondération relatif : les précipitations, l'anomalie de l'indice NDVI, l'anomalie de l'évapotranspiration et l'anomalie de l'humidité du sol. L'objectif du développement de cet indice était d'élaborer un Système d'Alerte à la Sécheresse (SAS) basé sur des indicateurs environnementaux en vue de réduire la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques (Bijaber et al., 2018). Cet indice est aujourd'hui utilisé par le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS) du Maroc pour la surveillance de la sécheresse agricole.

Au Niger, la recherche bibliographique a montré que la plupart des études réalisées (Scott, 1988 ; Sivakumar, 1992 ; Sivakumar et al., 1993 ; Douglas & Sally, 2014 ; Okpara & Tarhule, 2015 ; Abdoul Habou et al., 2016) sur la sécheresse portent essentiellement sur la sécheresse de type météorologique ou l'impact de celle-ci sur l'agriculture. Quelques auteurs et centres de recherche ont menés des études dans le cadre de la sécheresse agricole.

Suite aux grandes sécheresses qui ont frappé le Sahel dans les années 70, le Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) a été créé en septembre 1973 pour 13 pays de l'Afrique de l'Ouest avec plusieurs objectifs dont celui de s'investir dans la recherche de la sécurité alimentaire et dans la lutte contre les effets de la sécheresse et de la désertification, pour un nouvel équilibre écologique au Sahel (CILSS, 1973). 10 ans après la création du CILSS, suite aux conséquences directes de la grave crise agricole et alimentaire de 1984 et 1985 qui faisait suite à une sécheresse marquée, le Réseau de Prévention des Crises Alimentaires au Sahel et en Afrique de l'Ouest (RPCA) fut créé en 1985 par les pays du Sahel afin d'être informés de la situation agricole et des risques de déficits alimentaire pouvant conduire à une crise, voire une famine (RCA, 1985). Par la suite le projet ECOAGRIS

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

« Système Régional Intégré d'Information Agricole de la CEDEAO a été créé en 2015 pour une durée de 54 mois, il a été conçu pour la production d'informations sur la sécurité alimentaire des 17 pays du Sahel (ECOAGRIS, 2015). Malgré l'existence de tous ces projets, le Niger ne cesse de vivre des périodes de crise agricole et alimentaire.

Selon une étude de (Sivakumar, 1992) sur les implications du changement climatique pour l'agriculture au Niger en prenant l'exemple de la culture du mil, il conclut que la culture du mil est fortement liée aux précipitations. En effet, le rendement du mil est passé d'environ 500 kg / ha en 1963 à environ 400 kg / ha en 1987. Le déclin observé de la production du mil au Niger a commencé à peu près au même moment que la diminution des précipitations dans la région sahélienne (Sivakumar, 1992). (Maselli et al., 1993) ont mis au point une méthode de traitement des données NDVI sur quatre ans (1986 à 1989) à partir des scènes NOAA / AVHRR de la première partie des saisons de pluies successives pour certains départements du Niger. Ils estiment le rendement en grains final (mil) pour les zones étudiées avec une erreur moyenne d'environ 0,08 tonne par hectare. Cependant, (Maselli et al., 1993) concluent que la nature statistique de la relation permet de prédire le rendement en grains final dès le milieu de l'été, mais avec une certaine incertitude. Selon (Jasmien et al., 2015), la sécheresse agricole est principalement causée par la sécheresse météorologique et la sécheresse du sol. Ainsi, afin d'atténuer les conséquences de cette sécheresse, ils étudient l'étendue de la sécheresse météorologique et hydrique sur les sols « latéritiques » de la région de Tillabery au Niger et leurs effets sur la croissance du mil en combinant une analyse pluviométrique mensuelle (1905-1996) et une analyse journalière (1989-2010) avec une analyse de la répartition de l'eau dans la zone racinaire selon différentes pratiques de gestion. Le but de cette combinaison est d'accroître la production agricole sur des sols dégradés en latérite en augmentant le stockage d'eau dans le sol. Cependant, ce traitement semble toujours faire face à un stress hydrique vers la fin de la saison de croissance, malgré les caractéristiques de récupération de l'eau du traitement (Jasmien et al., 2015).

En 2016, (Leroux et al., 2016) ont développé un modèle statistique empirique entre le NDVI et la Température de Surface du sol (LST) pour le suivi des cultures pluviales sur une période de 11 ans (2000 à 2011) à l'échelle du Degré Carré de Niamey, NSD (Niamey Square Degree). La faiblesse de ce modèle est que cette zone (NDS) est principalement dominée par des activités agro-pastorales, avec un mélange d'élevage et de culture (FEWS NET, 2011). Par conséquent, la probabilité d'avoir un mélange de la végétation et de prairies dans un pixel recadré MODIS est élevée, ce qui explique une performance inférieure du modèle (Leroux et al., 2016).

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

Après l'analyse de ces travaux de recherche notamment ceux réalisés sur le Niger, des améliorations restent encore à apporter pour les raisons qui suivent. (1), la plupart de ces études remontent à de nombreuses années et reposent uniquement sur l'utilisation du NDVI, soit pour estimer la production des cultures ou pour surveiller les cultures. Cependant, l'utilisation du NDVI seul, peut constituer un défaut de discrimination des cultures par rapport à d'autres formes de végétation, car cet indice met en évidence toute forme de végétation. (2), ces études ne présentent pas aussi des outils de surveillance des conditions de sécheresse agricole surtout quand il s'agit de la culture du mil. (3) certains projets portent sur 13 voire 17 pays, avec une résolution spatiale des données très grossière, ce qui remet en doute la fiabilité et l'efficacité du modèle qu'ils utilisent car malgré ces modèles le Niger subit constamment des périodes de crises agricoles. (4), en plus, la principale limite de ses modèles ou outils mis en place dans les précédents travaux repose sur le fait qu'il est parfois difficile de savoir exactement les types de cultures qu'ils arrivent à mettre en évidence. Puisqu'il ne suffit pas juste de dire il y'a sécheresse, mais plutôt de dire : il y'a sécheresse, et ce sont telles cultures qui sont les plus affectées.

Par conséquent, pour une question de fiabilité dans le suivi et la détection de la sécheresse agricole, il est judicieux de combiner plusieurs indicateurs prenant en compte les principales composantes susceptibles de provoquer cette sécheresse agricole pour créer un indice unique qui permettra un meilleur suivi de la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger.

1.2 Cadre de l'étude

1.2.1. La télédétection pour la surveillance des cultures

Une grande partie de notre alimentation est assurée par les produits issus de l'agriculture. La production de denrées alimentaires de qualité et en quantité suffisante est essentielle pour le bien-être des gens partout dans le monde. Les plantes cultivées, tout comme les êtres vivants, ont besoin d'eau et de nutriments pour croître. Elles sont également sensibles aux phénomènes météorologiques extrêmes, aux maladies et aux prédateurs.

A cet effet, la télédétection peut fournir des données très utiles pour identifier et surveiller les cultures. Quand ces données sont organisées avec d'autres types de données dans un Système d'Information Géographique (SIG), elles deviennent un outil puissant d'aide à la décision pour tout ce qui touche aux cultures et aux pratiques culturelles.

Les gouvernements peuvent utiliser des données satellitaires pour prendre des décisions importantes à propos des politiques agricoles qu'ils vont adopter ou pour résoudre les crises ou les problèmes agricoles nationaux. Les fermiers peuvent aussi récolter de nombreuses

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

informations utiles par le biais d'images d'observation de la Terre. Ils peuvent ainsi mieux gérer leurs propres cultures, mieux suivre l'état de santé de leurs plantes et mieux réagir en cas de problème.

La télédétection utilise la signature spectrale propre à chaque objet terrestre pour l'identifier et le caractériser. En ce qui concerne les cultures en particulier et la végétation en générale, elle couvre une énorme portion de la surface émergée de la Terre. Les rôles de la végétation dans la régulation de la température globale, dans l'absorption de CO₂ et dans d'autres fonctions importantes en font un type de couvert du sol particulièrement important et intéressant. Ainsi, la télédétection profite de la manière particulière dont la végétation réfléchit le rayonnement électromagnétique incident pour obtenir de l'information sur la végétation (Deshayes, 1991).

Les végétaux ont une façon particulière de réfléchir le rayonnement électromagnétique. Cette caractéristique unique est appelée la 'signature spectrale' de la végétation. Ses végétaux contiennent des pigments comme la chlorophylle, la caroténoïdes, les anthocyanes et bien d'autres. Ces pigments absorbent la lumière solaire. Grâce à eux la plupart de la partie visible du rayonnement électromagnétique est absorbée, surtout dans les régions bleue et rouge. L'absorption dans le vert est légèrement moins forte, ce qui explique le fait que la végétation nous apparaisse verte. Néanmoins, la lumière proche infrarouge n'est pas affectée par ces pigments et pénètre presque complètement au travers du parenchyme palissadique (couche de cellule supérieure de l'épiderme supérieur qui contient la chlorophylle). Arrivée dans le parenchyme lacuneux (couche de cellule inférieure de l'épiderme supérieur qui favorisent la circulation des gaz), la présence de cavités remplies d'air provoque une réfraction de ce rayonnement dans toutes les directions. Au total, environ la moitié du rayonnement proche infrarouge ressort de la feuille par l'épiderme inférieur et l'autre moitié par l'épiderme supérieur, vers le ciel (Deshayes, 1991). Les capteurs qui enregistrent l'énergie réfléchi dans les régions du visible et du proche infrarouge du spectre vont donc capter un signal très faible dans les régions du bleu et du rouge, un signal un peu plus important dans le vert et un signal fort dans le proche infrarouge.

La télédétection ne se limite pas simplement à identifier et caractériser les cultures, elle peut également contribuer à identifier certains facteurs qui peuvent nuire à la croissance des plantes. Dans la majorité des cas, la croissance normale d'une plante est perturbée quand celle-ci traverse une période de stress. Le métabolisme d'une plante stressée ne fonctionne pas correctement pour différentes raisons. Lorsqu'une plante est stressée, elle présente généralement certains symptômes visibles mais aussi d'autres symptômes invisibles à l'œil nu. Les symptômes de

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

stress peuvent apparaître chez toutes les plantes d'un champ ou seulement dans certaines portions et ce, en fonction de la cause (ou des causes) du stress. A titre d'exemple, une invasion d'insectes commence à une extrémité d'un champ et va graduellement s'étendre sur tout le champ. Un phénomène comme la compaction du sol peut seulement affecter une partie du champ et aura donc une influence uniquement sur les plantes poussant sur cette portion. Par contre, un évènement comme la sécheresse agricole commencera par priver la plante d'eau des racines aux feuilles jusqu'à asséché complétement la plante (Deshayes, 1991).

Le manque de certains éléments nutritifs empêche la plante de poursuivre une croissance normale. Certains nutriments sont directement ou indirectement liés à la production de chlorophylle et leur déficit se remarquera par une différence de couleur des feuilles. La carence en azote, par exemple, provoque d'abord le jaunissement de la feuille autour des vaisseaux (qui constituent le réseau de transport des nutriments dans la plante). Le jaunissement s'étend ensuite progressivement au reste de la feuille, qui devient rouge et puis brune. La chlorophylle est une composante essentielle du processus de photosynthèse. Elle est le pigment qui absorbe l'énergie solaire et produit l'énergie suffisante pour que la réaction photosynthétique ait lieu. Comme elle absorbe de l'énergie, la chlorophylle a un impact important sur la quantité d'énergie qui sera réfléchi.

L'avantage de l'utilisation de la télédétection dans la surveillance des cultures est qu'elle permet d'estimer directement la quantité de chlorophylle présente dans une plante. En combinant plusieurs bandes d'une image de télédétection (plusieurs enregistrements simultanés dans différentes régions du spectre électromagnétique), on peut créer des indices de végétation et les utiliser pour estimer l'état des cultures (Abdessadek & Omama, 2015). En utilisant les indices de végétation, les images de télédétection peuvent être traitées pour produire des images classifiées qui montrent directement les plantes stressées. En fonction de la réflectance dans le visible et le proche infrarouge, les indices de végétation donnent une indication de la quantité de chlorophylle présente dans les plantes. Avec cette information, il sera possible d'estimer si les plantes sont stressées et, dans l'affirmative, à quel point elles sont atteintes.

Avant que la concentration en chlorophylle ne chute dans les plantes stressées, le facteur de stress a déjà commencé à affecter la structure cellulaire des feuilles. Ce premier stade de stress influence la réflectance de la plante dans l'infrarouge, avant que la perte de chlorophylle ne modifie la réflectance dans le visible. Les techniques de la télédétection permettent de voir ces changements dans le proche infrarouge (qui n'est pas visible à l'œil nu) avant même que les symptômes chlorotiques ne commencent à apparaître. C'est ainsi que ces techniques permettent de détecter précocement si les plantes sont ou non soumises à un stress.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et cadre de l'étude

Au-delà d'estimer la quantité de chlorophylle dans les plantes, les techniques de la télédétection peuvent également permettre d'estimer la teneur en eau dans les plantes. Tout comme de nombreux organismes, les plantes ont besoin d'eau pour survivre. L'eau est utilisée dans de nombreux processus biochimiques essentiels mais elle est aussi le "moyen de transport" des éléments nutritifs, depuis le sol vers toutes les parties de la plante. L'eau rentre dans la plante par les racines, passe par les tissus conducteurs (vaisseaux) de la tige principale et des branches et termine son voyage dans les feuilles. L'eau est ensuite relâchée dans l'atmosphère en passant par des petits pores situés sur les feuilles, appelés les stomates. Ce processus est décrit comme la transpiration végétale. Tous les processus biologiques qui ont lieu dans une plante produisent de la chaleur. Cette chaleur est captée par l'eau et évacuée hors de la plante quand elle transpire par ses feuilles. Quand il n'y a pas assez d'eau et que la plante est en situation de stress, elle ne parvient plus à perdre de la chaleur assez rapidement par la transpiration. Le résultat est que la température de la plante monte. Cette augmentation de température peut être détectée par télédétection, en utilisant les parties du spectre électromagnétique qui sont sensibles à la chaleur. Néanmoins, quand la végétation ne recouvre pas totalement le sol, la température du sol affecte fortement le signal thermique enregistré par le capteur. Quand cela arrive, on peut facilement confondre les zones de sol chaud à faible couvert végétal et les zones de plantes souffrant de stress hydrique. Cependant, si on a une idée de la quantité de végétation présente et, plus particulièrement, de la quantité de surface de feuilles par unité de sol (mesuré par l'indice de surface foliaire ou 'LEAF area index', LAI), on peut corriger les mesures effectuées par télédétection et réduire les effets du sol quand la couverture végétale est partielle.

En plus de pouvoir identifier les plantes souffrant d'un manque d'eau ou de nutriments, la télédétection peut aussi aider à protéger les cultures des attaques de ravageurs (dont les insectes), de champignons ou de bactéries. En combinant le savoir agricole et les images de télédétection, il est possible de générer des alertes précoces qui préviennent de la présence de ravageurs ou de maladies. Ces alertes vont permettre d'agir de façon adéquate à un stade précoce de l'attaque et ainsi éviter que les cultures ne soient détruites. Les symptômes des attaques de ravageurs ou de maladies sont généralement la perte de chlorophylle, qui peut être repérée par télédétection. En plus de la perte de chlorophylle, les ravageurs, les maladies et les sécheresses peuvent aussi provoquer la destruction de feuilles entières, ce qui génère une réduction de la surface foliaire totale et donc, une réduction de la capacité de la plante à pratiquer la photosynthèse. En estimant le LAI (indice de surface foliaire) de groupes de plantes, il est possible de repérer très tôt les attaques d'insectes et de prévenir les agriculteurs pour qu'ils

réagissent à temps (Abdessadek & Omama, 2015). La télédétection permet d'aider à identifier les plantes ou les zones qui ont le plus besoin de fertilisants ou de pesticides. Ce faisant, elle permet de diminuer la quantité de produits chimiques agricoles déversés dans l'environnement. La télédétection peut fournir des données dans la région du proche infrarouge du spectre, non visible à l'œil nu. Ces données peuvent être combinées avec celles du spectre visible, dans lequel la chlorophylle absorbe de l'énergie à certaines longueurs d'ondes spécifiques. La combinaison de ces données nous permet d'extraire de l'information pour identifier les plantes soumises à un stress avant même que les symptômes ne soient visibles. La détection précoce de ces plantes permet aux agriculteurs de réagir rapidement pour réduire les dégâts et pour limiter toute perte de rendement.

1.2.2. Choix des indicateurs à l'étude

Le choix des indicateurs satellitaires a été fait en fonction de la capacité de ces indicateurs à mettre en évidence les conditions de sécheresse. Vu que le but de cette présente étude est de développer un nouvel indice de détection et de surveillance de la sécheresse agricole par télédétection spatiale tout en essayant d'apporter une amélioration vis-à-vis des indices déjà existant, certains des indicateurs ayant fait preuve d'efficacité dans la surveillance de la sécheresse agricole ont donc été retenus.

Ainsi, de tous les indices de végétation, le VCI est celui qui était le mieux adapté, car il situe l'état de la végétation d'une période par rapport aux conditions historiques. De plus, les études précédentes utilisant cet indicateur ont permis d'établir un seuil en deçà duquel une sécheresse est supposée sévir. Cet indicateur permet donc de connaître le début, l'intensité et la fin des sécheresses. Comme le VCI et le TCI ont été conçus et utilisés en paire par Kogan, spécialement dans le but de suivre les conditions de sécheresses aux Etats-Unis, les deux indices ont donc été retenus. D'ailleurs, il a été démontré que la combinaison de ces deux indices, offre une caractérisation efficace des situations de sécheresse (Felix N. Kogan, 1997). Ils sont applicables régionalement et permettent de caractériser les aires non-homogènes.

Le VHI a également été retenu pour servir de référence quant à la validation du nouvel indice ADCI.

Le SPI est un indicateur simple à calculer, applicable localement ou régionalement. Son utilisation à des échelles de temps variables (1, 2, 3, 6 mois, etc.) permet également de caractériser les sécheresses de différents types. De plus, il permet de bien définir le début, l'intensité et la fin des périodes sèches. Finalement, les données pluviométriques nécessaires à son calcul étaient facilement accessibles.

1.2.2. Objectifs de la thèse

L'objectif principal visé par ce travail de recherche est de développer un nouvel indice de sécheresse agricole, appelé indice de condition de sécheresse agricole, en anglais « Agricultural Drought Condition Index, (ADCI) » afin de mieux identifier et surveiller la sécheresse agricole liée à la principale culture pluviale (mil, en anglais, millet) de la zone agricole du Niger. Ce nouvel indice est basé sur la combinaison de quatre indices de condition, à l'aide de la méthode d'Analyse en Composante Principale (ACP). (1) Indice de condition de précipitation (Precipitation Condition Index, PCI), (2) indice de condition de végétation (Vegetation Condition Index, VCI), (3) indice de condition de température (Temperature Condition Index, TCI) et (4) indice de condition d'évapotranspiration, (Evapotranspiration Condition Index, ETCI). L'indice PCI est utilisé pour fournir des informations sur le déficit de précipitation (Du et al., 2013), l'indice VCI est utilisé pour refléter les changements dans l'état de santé de la végétation (Kogan, 1995), l'indice TCI est utilisé pour détecter le stress végétal causé par des températures élevées ou une humidité excessive (Kogan, 1995) et l'indice ETCI est utilisé pour refléter la pénurie en eau des cultures (Senay et al., 2012). Cet indice a été calculé pendant le cycle phénologique de la culture du mil (juin à octobre) sur un intervalle d'étude de 15 ans (2003 à 2017). Le mois de juin correspond au début de la campagne agricole et le mois d'octobre à la fin de celle-ci.

Pour atteindre l'objectif principal, ce dernier est décliné en cinq objectifs spécifiques dont les trois premiers sont des tests de validation de l'indice ADCI.

- Test de validation de l'indice ADCI en utilisant un indice existant, l'indice de santé de végétation (Vegetation Health Index, VHI). Le VHI est un indice de sécheresse agricole qui est très souvent utilisé à travers le monde. Ainsi, une analyse de comparaison a été effectuée entre les deux indices de juin à octobre sur 15 ans (2003-2017) ;
- Test de validation de l'indice ADCI en utilisant un deuxième indice existant, l'indice de précipitation standardisé (Standardized Precipitation Index, SPI). Le SPI est aussi un indice reconnu mondialement pour sa capacité à mettre en évidence la sécheresse météorologique. Ainsi, un test d'analyse de corrélation a été réalisé de juin à octobre sur 15 ans (2003-2017) pour déterminer d'une part si le ADCI est capable de ressortir les conditions de sécheresse météorologique et d'autre part, pour valider le nouvel indice ADCI.
- Test de validation de l'indice ADCI en utilisant le rendement de la culture du mil. Une analyse de corrélation statistique entre l'indice ADCI et le rendement annuel de la culture du mil de juin à octobre sur 15 ans (2003 à 2017) a été aussi mis au point. Ce

test statistique permettra de déterminer la nature, l'intensité et la significativité de la relation qui existe entre le ADCI et le rendement du mil. Cela permettra aussi de déterminer si le ADCI pourra être utilisé pour détecter la sécheresse agricole liée à la culture du mil d'une part, et d'autre part, valider le nouvel indice ADCI ;

- Evaluer l'indice ADCI afin de déterminer s'il est capable de ressortir ou de mettre en évidence les années de sécheresse dont le Niger a connu pendant l'intervalle d'étude (2003 – 2017). Cette évaluation permettra de connaître la force et la faiblesse de l'indice ADCI. S'il arrive à mettre en évidence les sécheresses agricoles qu'avait connu le Niger, nous pouvons déduire qu'il pourra être utilisé pour la surveillance de ladite sécheresse ;
- Détection des zones les plus vulnérables à la sécheresse agricole dans la zone d'étude. Vue que la sécheresse ne se manifeste pas de la même intensité, là il s'agit de déterminer les zones les plus sensibles à la sécheresse agricole pour aider les autorités à mieux définir les zones prioritaires en cas d'intervention sur le terrain.
- Enfin, les zones vulnérables à la sécheresse agricole identifiées par l'indice ADCI nous ont servi de zones pilotes, afin d'effectuer des visites et enquêtes terrain sur ces mêmes zones vulnérables (zones pilotes) pour mieux comprendre pourquoi ces zones vivent des sécheresses agricoles chroniques.

CHAPITRE 2 :
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Historique des sécheresses au sahel en général et au Niger en particulier

2.1.1. Le Climat au sahel

Le Sahel ou bande Sahélienne correspond à la région qui traverse le continent Africain d'Est en Ouest entre les 12 et 20 degrés de latitude Nord, cette région se caractérise par une seule saison des pluies qui atteint son maximum en août, et dont la quantité est fonction de trois processus déterminants : le flux d'air humide de la mousson en provenance du Sud du continent ; le déplacement du Front Inter Tropical (FIT) lié aux mouvements saisonniers de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) et le déplacement des masses d'aires sèches en provenance des zones sèches du désert du Sahara (Met Office, 2010). La bande du Sahel également caractérisée par un fort gradient de pluies et de températures est l'une des régions du monde les plus sensibles aux changements du climat (Niasse et al., 2004). L'impact souvent désastreux des variabilités des conditions du climat sur les écosystèmes et ses conséquences sur le mode de vie des populations de la région au cours des cinquante dernières années en est une parfaite illustration. A partir du début des années 1970, la région est en effet soumise à des variations chroniques importantes de son climat et qui vont durer sur plusieurs décennies. Pendant ces décennies les problèmes environnementaux consécutifs à ces changements, et auxquels les écosystèmes sahéliens vont être confrontés sont les nombreuses sécheresses, la désertification, l'avancée du front agricole et la perturbation des régimes des cours d'eau principaux de la région (Marega, 2016). L'expansion des activités humaines comme moyen d'adaptation à l'accroissement de la démographie et aux changements du climat accentuent les effets des conditions climatiques et biogéographiques déjà défavorables.

Le climat du Sahel diffère de celui du Sahara par ses précipitations saisonnières, même si elles sont très faibles, alors qu'au Sahara elles prennent un caractère exceptionnel (Ooohemd & Branquin, 1967). Compte tenu de son caractère important et de son implication directe dans les interactions entre les Hommes et leur environnement particulièrement dans ce milieu, le climat exige que l'on s'y intéresse sérieusement (Vischel et al., 2015). Non pas dans le but de refaire toute l'histoire du climat sahélien, mais davantage dans le souci de souligner ses particularités en termes de variabilités temporelles et spatiales dans le contexte de son évolution récente à partir des années 1950. Dans l'histoire contemporaine du Sahel, les années 1950 correspondent aux dernières périodes humides. A l'échelle régional le climat sahélien qui marque la transition entre celui du Sahara au nord (isohyète 200 mm) et celui des régions tropicales humides au sud (isohyète 700 mm), est très vulnérable à la variabilité naturelle (Met Office, 2010) et marqué par de fortes disparités spatiales et temporelles (Hiernaux et al., 2006 ; Dardel et al., 2014). Plusieurs études dédiées à l'analyse de climat au Sahel ont pu mettre en lumière les différences

de variabilités inter annuelles entre le centre du Sahel et l'ouest en s'appuyant particulièrement sur les évolutions des précipitations.

Au niveau de la zone intertropicale (où se trouve le Sahel), l'apport en énergie solaire qui conditionne la circulation générale de l'air à l'intérieure de l'atmosphère est maximal. Cette circulation est à l'origine de la variation des éléments atmosphériques tels que la température, le vent, l'humidité relative, les précipitations etc., qui en retour détermineront le climat à l'échelle régionale. En ces lieux, la convergence entre les masses d'air alizés sèches du nord-est africain et les masses d'air humides du sud-ouest, va contribuer avec l'antagonisme dynamique et thermique entre l'anticyclone des Açores au nord-ouest et l'anticyclone austral humide de Sainte Hélène, à former autour de la frange sahélienne un flux convergent appelé Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) ou équateur météorologique. Le front intertropical (FIT), qui correspond à la trace au sol de la ZCIT, définit une aire de basses pressions repérable par une bande de nuages convectifs à fort développement vertical (les nuages cumulonimbus). La position de la ZCIT varie très sensiblement au cours de l'année et son activité n'est ni continue ni régulière en étendue ou en intensité. Le déplacement latitudinal du FIT détermine les saisons. La durée de celle des pluies par exemple est d'autant plus tardive et brève que l'on s'éloigne de l'équateur en direction du nord du sahel. En Janvier, le FIT atteint sa position la plus méridionale (figure 3) et se situe en moyenne à 4° de latitude nord. Cette position induit le prolongement saharien de l'anticyclone des Açores et favorise l'installation des masses d'air tropicales stables, chaudes et sèches dont les vents sont dominés par les alizés continentaux d'Est encore appelés harmattan (Seignobos & Iyébi-Mandjek, 2000).

2.1.2. La sécheresse au sahel

Au cours du Quaternaire, des périodes sèches ont permis le développement de grands ergs qui ont recouvert tous les reliefs anciens et particulièrement les cuirasses. Les sables qui les constituent ont été ensuite plus ou moins remaniés par le vent et les pluies et les sols qui se sont formés sont des sols ferrugineux tropicaux. Et des sols bruns rouges iso-humiques. Ces sols peuvent se gorger d'eau en période de pluie abondante mais Hs ne la conservent pas en raison de leur faible capacité de rétention.

En de nombreux points, la cuirasse ferrugineuse affleure, dénudée par le vent ou le ruissellement, formant de vastes plateaux de sols minéraux bruts. Ils constituent une dalle continue, subhorizontale d'oxydes de fer souvent hématies, recouverte d'un manteau discontinu de cailloux d'hématite donnant un « reg à ferraille » imperméable ou l'eau ruisselle vers les vallées voisines. La cuirasse de Bourem (Mali) en est un bon exemple.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Les vallées sont encombrées d'alluvions plus ou moins grossières donnant des sols peu évolués, plus ou moins hydromorphes, à texture grossière ou moyenne, parcourus de marigots argileux bordés d'arbres. Au moment des crues, l'eau envahit le lit majeur et va déposer dans les bas-fonds une argile de décantation évoluant en vertisols topo-morphes non grumosoliques. Les sols peu évolués retiennent mieux l'eau que les sols des anciens ergs et ils peuvent être irrigués facilement. Les vertisols sont très imperméables et ne peuvent stocker l'eau qu'après une longue submersion qui permet alors certaines cultures de décrue.

L'élevage est tributaire des points d'eau : rivière ou fleuve, mare, puits ; il profite de la couverture herbacée des sables en saison des pluies et de la végétation des bas-fonds et des vallées en saison sèche.

L'agriculture est soumise au régime des pluies, le mil est cultivé, en saison des pluies, à partir de l'isohyète 300 mm, au-dessous de cette hauteur de pluie, sa culture n'est plus possible que dans les thalwegs qui collectent les eaux de ruissellement. Cette culture occupe les terrains des anciens ergs lorsque leur épaisseur est suffisante. Elle doit accomplir son cycle végétatif au cours de la saison des Pluies avec tous les aléas qui peuvent découler de l'irrégularité des précipitations. Autour des points d'eau pérennes et en bordure des cours d'eau, une agriculture irriguée peut s'installer, mais elle ne prend de l'extension qu'aux abords des villes et villages. Les fleuves, Niger et Sénégal, sortent de leur lit mineur au moment des crues (Pierre, 1973). Leurs eaux recouvrent tous les terrains et stagnent dans les cuvettes argileuses. Si leur submersion est suffisamment longue, ils peuvent stocker assez d'eau pour permettre la culture de décrue du sorgho. Les paysans suivent, le retrait des eaux et déposent. Les graines de sorgho dans la boue, souvent ils y mettent aussi des graines de niébé (*Vigna iniguiculata*) qui apporte un complément de nourriture non négligeable (Capot-Rey, 1973). Il est aussi possible de profiter de la crue pour cultiver du riz flottant dans des casiers spécialement aménagés (Korioume, près de Tombouctou), ou de cultiver du riz irrigué normalement par pompage de l'eau des fleuves (Richard-Toll au Sénégal, Ségou, Mopti au Mali, environs de Niamey au Niger, etc.).

En Mauritanie, quelques barrages ont été construits pour stocker l'eau des crues des oueds et noyer les terrains d'amont. Au bout d'un certain temps, les barrages sont vides, tandis que la culture du sorgho s'installe dans l'ancienne retenue, dont l'eau va alimenter des lacs ou des mares pour l'abreuvement des troupeaux (cas du barrage de Mal).

Une agriculture fragile peut ainsi s'installer et subvenir aux besoins de la population, mais que les pluies viennent à manquer ou que les crues soient faibles, une grande partie de l'agriculture

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

devient impossible, le manque de nourriture est alors catastrophique si des réserves n'ont pu être constituées.

Au cours du Quaternaire, l'Afrique occidentale a connu deux périodes de grande sécheresse, une à l'Ogolien entre 14 000 et 20 000 ans B.P. et au cours de l'Holocène 2 000 ans, ces deux périodes n'ont d'intérêt qu'à titre documentaire. Depuis qu'il y a des relevés météorologiques, une sécheresse très importante existe autour de l'année 1913 ; à Tombouctou elle s'étend de 1910 à 1913, à Zinder de 1910 à 1915, à Niamey de 1910 à 1913. Elle s'estompe vers le Sud et ne paraît pas avoir touché le centre de la Haute-Volta, bien qu'à Ouagadougou la période 1910-1916 ait été nettement déficitaire. Lorsque les relevés existent, il semble donné bien que l'année 1913 ait été aussi déficitaire que les années 1968-1973.

En plus de l'irrégularité de la pluie, le graphique des pourcentages des précipitations par rapport à la moyenne des stations synoptiques du Niger permet un certain nombre de constatations (Poncet, 1974) :

- La station où l'irrégularité des pluies est la plus importante est celle de Bilma qui, comme Agades, participe du climat du Sahara et, à ce titre, n'intéresse pas le Sahel.
- Le plus fort déficit des précipitations ne s'est pas produit la même année pour toutes les stations étudiées au Niger. Il s'est produit en 1969 à Maine Soroa : 56,2 %, en 1970 à Agadez : 25,4 % en 1971 à Tillabéri : 56,5 %, en 1972 à Niamey-aéroport : 57,4 % à Maradi : 48,8 % à N'Guigmi : 31,9 %, à Zinder : 59,9 %, en 1973 pour les autres stations et Zinder.
- Les années humides sont : 1961 où 10 sur 12 des stations dépassent la moyenne, onze 90 % et douze 75 % ; 1964 où 9 sur 12 stations dépassent la moyenne, dix 90 % et douze 80 % ; 1962 où six stations dépassent la moyenne, onze 90 % et douze 80 % ; 1974 où 3 stations dépassent la moyenne, onze 80 % et douze 75 %. Viennent ensuite, dans l'ordre, les années 1967, 1959, 1960, 1966, 1963, 1965, 1968. Les années les plus sèches commencent avec 1969 et 1970 où 8 stations seulement dépassent 75 %, la sécheresse devenant alors de plus en plus sévère, les stations dépassant 75 % de la moyenne n'étant qu'au nombre de 4 en 1971, 3 en 1972 et 1 en 1973, année la plus sèche. Le graphique montre donc que, pendant les 16 années considérées, la pluie a été faible mais suffisante de 1968 à 1970, elle a été très faible à partir de 1971 et catastrophique en 1973. En 1974, elle a été suffisamment abondante pour permettre la constitution d'une réserve de 3 ans de mil. Pourtant la sécheresse aurait commencé en 1968 ; il est probable que de 1968 à 1970 la pluie a été, en réalité, globalement suffisante mais mal répartie dans le cours des saisons pluviales.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

- La quantité de pluie nécessaire et suffisante pour que le mil hâtif produise une récolte étant de 300 mm, cette isohyète a été tracée sur la carte pour les valeurs moyennes, une année humide, 1964, et les années sèches 1968 et 1973. Elles permettent de voir la sécheresse envahir progressivement presque tout, le territoire du Niger. Ces isohyètes 300 sont pratiquement affines pour les valeurs moyennes, l'année humide et l'année sèche 1968. En 1968, la sécheresse progresse vers l'Ouest par le creusement du golfe de Madaoua, sa progression vers le Sud est réelle mais relativement limitée, Zinder restant privilégié puisque les courbes de la moyenne et celle de 1968 y sont pratiquement tangentes. En 1973, par contre, l'isohyète 300 épouse pratiquement le cours du Niger, remonte le long du Sokolo (au Nigeria), puis le Goulbi de Maradi, revient tangenter la frontière du Nigeria près de Gangara, remonte à Zinder et pénètre au Nigeria par l'axe Yamia-Kumaganum. La forme de l'isohyète 300 de 1973 ne commence réellement à se manifester que vers 1971, puis la progression vers le Sud se poursuit rapidement.
- La première conséquence de la sécheresse a été la disparition des végétaux herbacés et, faute de conditions favorables à la formation des graines et à leur germination, les pâturages se sont rétrécis de plus en plus, obligeant le bétail à parcourir des distances de plus en plus grandes entre les points d'eau et ce qui en restait. Sur ces parcours les bêtes, surtout les bovins, sont mortes d'épuisement et de faim (Roche, 1973). Les cultures sèches pratiquées à la saison des pluies : mil, sorgho, niébé, arachide, ont besoin d'une répartition des pluies régulière au cours de la période pluviale en raison des mauvaises propriétés hydrauliques des sols. En 1973, cette répartition a été désastreuse : fortes pluies en juin, arrêt fin juillet, début août. Toutes les cultures sèches ont été fortement réduites ou même complètement détruites dans le Nord. Même les cultures irriguées ont été touchées. Dans la vallée des grands fleuves : Niger, Sénégal, les pluies déficitaires dans les hauts bassins versants et les débits très réduits qui se sont écoulés n'ont pas permis à la crue de ces fleuves d'inonder normalement leur lit majeur. Les cultures de décrue (sorgho, niébé) et les cultures irriguées ont été impossibles. Les jardins irrigués cultivés autour des points d'eau ont disparu. La totalité des ressources agricoles a donc été touchée par la sécheresse qui a privé les habitants d'une grande partie de leurs aliments. Il en résulte une famine, alors que l'eau de boisson pour les hommes et les bêtes n'a pas manqué. Ce manque de nourriture a provoqué un exode des populations du Nord vers les vallées moins atteintes, avec tous les inconvénients qui ont pu résulter de cette migration.
- Les résultats de l'étude de la pluviométrie de quelques stations météorologiques importantes du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal, permettent de constater que l'année la plus sèche

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

n'a pas été partout la même : au Sénégal, 1972 a été l'année la plus sèche, en Mauritanie l'année la plus sèche dépend de la station considérée ainsi qu'au Mali ou d'ailleurs 1974 a pu être l'année la plus sèche. Les conséquences de la sécheresse ont été les mêmes qu'au Niger et l'exode des populations vers les vallées du Sénégal et du Niger s'y est aussi produit. Au Mali cependant, les Touaregs ont émigré vers le Niger.

2.2. Généralité sur le Niger

Le Niger est un vaste pays se trouvant dans le sahel avec une superficie de 1 267 000 km² et situé en Afrique de l'ouest. Il est limité au nord par l'Algérie et la Libye, au sud par le Nigeria et le Bénin, à l'est par le Tchad et à l'ouest par le Mali et le Burkina Faso (figure 1). Le territoire est divisé en huit (8) régions, trente-six (36) départements et deux cent soixante-cinq (65) communes réparties en cinquante-deux (52) communes urbaines et deux cent treize (213) communes rurales. Il est traversé par le fleuve Niger sur une longueur de 550 km. Le pays est enclavé, la capitale administrative est Niamey et se trouve à 1 035 km de Cotonou (Bénin), port maritime le plus proche. La capitale économique est la ville de Maradi.

Le Niger compte parmi les pays les plus vulnérables au monde en raison du contexte lié à son climat, ses institutions, ses sources de revenus, son économie et son environnement. Au fil des ans, il a dû faire face à une fréquence élevée d'épisodes de sécheresse, de famine, d'invasion acridienne, d'instabilité politique, de conflits violents, d'inondations et d'épidémies de choléra et de méningite. Il est classé comme étant le pays le plus exposé aux risques et le deuxième pays le plus vulnérable, juste après l'Afghanistan, parmi 173 pays examinés dans le Rapport sur les risques dans le monde (World Bank, 2011).

L'agriculture est le secteur le plus important de l'économie du Niger. Elle représente plus de 40 pour cent du le produit intérieur brut national et constitue la principale source de revenus pour plus de 80 pour cent de la population. La performance du secteur agricole est néanmoins très instable du fait de sa forte exposition aux risques. Au cours des 30 dernières années, le Niger a subi de nombreux chocs, largement induits par les risques agricoles qui pèsent lourdement sur le bien-être, en raison de leur lien avec la disponibilité et l'accessibilité des produits alimentaires et la malnutrition. Ces chocs portent également un coup aux revenus des ménages, à la performance du secteur agricole, à l'équilibre budgétaire de l'État et au taux de croissance économique du Niger (World Bank, 2011). Plus de 80 pour cent (80%) des adultes en âge de travailler sont employés dans le secteur agricole, qui affiche pourtant le plus faible niveau de productivité dans l'économie. La majorité des pauvres chroniques sont des cultivateurs et près de 8 sur 10 d'entre eux vivent dans des ménages dont l'activité principale

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

est l'agriculture. En revanche, le secteur de l'élevage se porte légèrement mieux, avec 2 pour cent seulement des pauvres chroniques qui s'y consacrent.

L'insécurité alimentaire est une source de préoccupation majeure pour le Niger, et selon les estimations, plus de 50 pour cent (50%) de la population était en insécurité alimentaire chronique en 2006, 22 pour cent (22%) souffrant d'insécurité alimentaire chronique extrême (consommation en calories inférieure à 1 800 calories par personne et par jour). Par ailleurs, une grande partie de la population souffre assez fréquemment d'insécurité alimentaire saisonnière et conjoncturelle.

La zone des cultures est soumise à l'instabilité et à la précarité du régime pluviométrique à l'origine de sécheresse sévère et périodique presque tous les dix ans La frange sud du territoire soit 25% de la superficie, recèle l'essentiel des ressources naturelles (sol, eau, végétation, faune,) et supporte plus des $\frac{3}{4}$ de la population estimée à plus de 22 000 000 d'habitants en 2020 par l'organisation des Nation Unis.

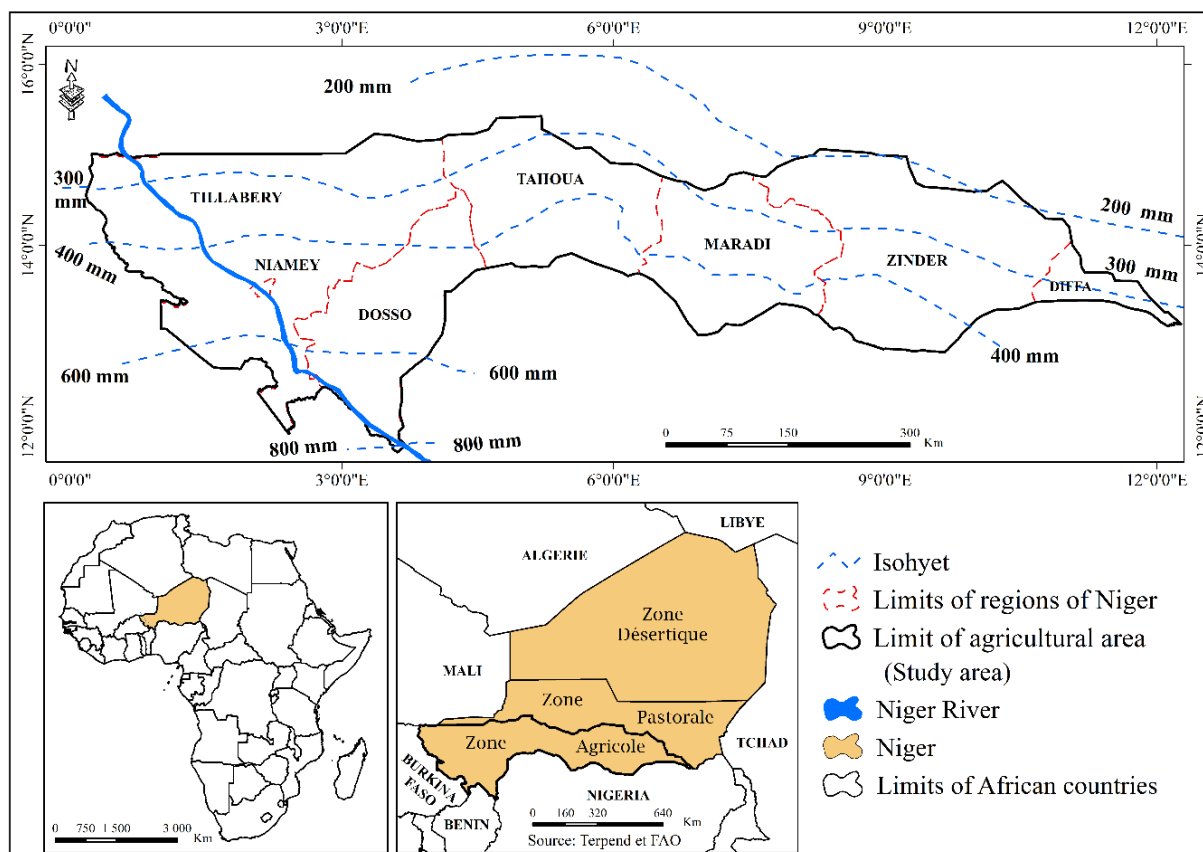
Conscientes de la nécessité de s'attaquer spécifiquement aux risques agricoles dans tous leurs aspects, les autorités nigériennes, par le biais du haut-commissaire à l'Initiative « 3 N », ont invité la Banque mondiale à réaliser une évaluation des risques dans le secteur agricole du Niger. Cette évaluation enrichit la somme de connaissances existantes sur le secteur agricole nigérien. Elle y contribue grâce à : (1) une analyse systématique de tout un ensemble de risques agricoles et de leurs effets sur une longue période (1980-2012) ; (2) une étude qui aide à déterminer le poids de la sécheresse par rapport aux autres risques agricoles ; (3) une hiérarchisation des risques agricoles les plus importants pour le pays fondée sur des critères objectifs ; (4) la proposition d'un cadre de gestion des risques pour les atténuer, les transférer et les gérer suivant les priorités ; et (5) la proposition d'un mécanisme de filtrage permettant de sélectionner les interventions efficaces en matière de gestion de risques agricoles.

2.2. Situation géographique de la zone agricole du Niger (zone d'étude)

Notre zone d'étude correspond à la zone agricole du Niger définie par le Ministère de l'Elevage, des Pêches et des Industries Animales (FAO & SFW, 2010) à travers l'étude de (Terpend & Saley, 2005). Cette zone est située dans la bande sud du Niger et s'étend d'Ouest en Est entre 12° et 15° de latitude Nord et entre 0° et 12° de longitude Est (figure 1). Elle est traversée par le fleuve Niger à l'Ouest sur une longueur de 550 km et est subdivisée en 7 régions dont Niamey, la capitale administrative et Maradi la capitale économique. Au-dessus de la zone agricole se trouve la zone pastorale puis la zone désertique. Cette subdivision du pays en 3 zones agro-écologiques est survenue suite à un conflit majeur entre agriculteurs et éleveurs

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

nomades ou semi-nomades en 2010, faisant d'énorme perte de vie humaine qu'animale ainsi que la destruction de centaines d'hectares de champs de cultures. Ainsi, en 2010 le gouvernement nigérien a révisé une ancienne loi divisant les zones agricoles et pastorales et renforcer la reconnaissance des droits des éleveurs. D'après cette loi, la culture est formellement interdite dans la zone pastorale et vis-versa (Douglas & Sally, 2014). Raison pour laquelle, notre zone d'étude porte essentiellement sur la zone agricole du Niger où les activités agricoles sont exercées pour le développement de l'indice de sécheresse agricole.



2.3. Climat et végétations

Le climat de type aride, est caractérisé par une courte saison humide de trois à quatre mois, donnant lieu à des précipitations dans le premier tiers sud du pays, variant entre 200 mm et 800 mm du nord au sud (plus de 600 mm sur 1% du territoire seulement), et une saison sèche de huit à neuf mois sur l'ensemble du pays, qui du reste est désertique sur 67 % de sa superficie.

La zone agricole est caractérisée par une forte variabilité spatiotemporelle des précipitations (Sivakumar et al., 1993) avec un pic en août en raison de la pénétration de l'air humide de la mousson atlantique dans les alizés secs (Marshall et al., 2011). Le climat de la zone est de type

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

tropical semi-aride, caractérisé par deux saisons : une saison sèche allant d'octobre à mai et une saison pluvieuse allant de juin à septembre. Cette pluviométrie permet en année normale la recharge des nappes, la formation des plans d'eau et le développement du couvert végétal (PANACC, 2006). Les principales zones climatiques sont délimitées en fonction de la répartition pluviométrique (Justice & Hiernaux, 1983). Notre zone d'étude (zone agricole) enregistre une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre les isohyètes 250 mm et 800 mm (figure 2). Elle peut être subdivisée en 4 zones climatiques :

- La zone saharo-sahélienne : représente 10% de la superficie totale du pays (1 267 000 km²) et reçoit 200 mm à 300 mm de pluie en moyenne par an. La végétation naturelle est composée principalement d'épineux xérophytes dont la densité moyenne augmente vers l'isohyète 300 mm ;
- La zone sahéenne : (8% de la superficie du pays) avec une pluviométrie moyenne annuelle de 300 à 400 mm. La végétation est caractérisée par la présence des savanes claires : savane arbustive à couverture lâche ou moyenne et des savanes arborées moyennement dégradées (World Bank, 2011) ;
- La zone sahélo-soudanienne : (7% de la superficie du pays) reçoit 400 à 600 mm de pluie en moyenne par an. La végétation se compose par des savanes arbustives ou arborées avec des taux de recouvrement assez variés ;
- La zone soudanienne : (1% de la superficie du pays) avec 600 à 800 mm de pluie en moyenne par an. La végétation est constituée de savane arborée ou boisée qui de plus

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

en plus recule face à la croissance démographique et à l'extension agricole (RECA, 2004).

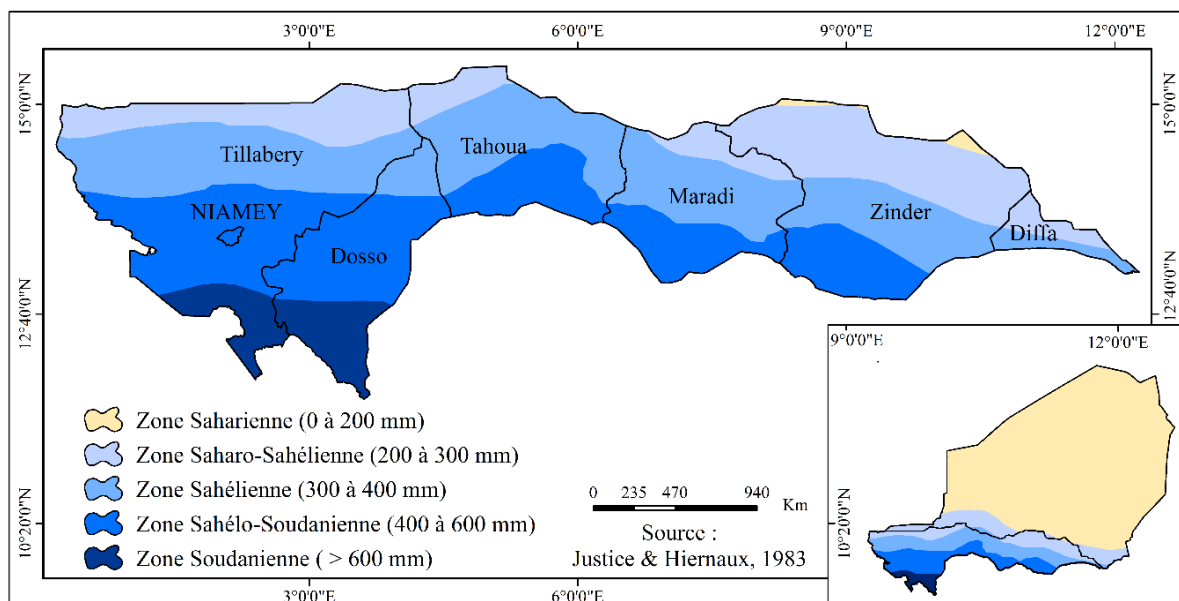


Figure 2 : Zonage climatique du Niger en fonction des isohyètes réalisé par (Justice & Hiernaux, 1983) et reproduite dans le cadre de notre étude

D'après une étude réalisée par (JAICAF, 2009), les données disponibles montrent que les isohyètes qui délimitent ces zones agro-climatiques se sont déplacées vers le sud de 100 à 200 kilomètres entre 1950 et 1990, à la suite d'une baisse des précipitations, avec une période prolongée (1970 à 1990) de pluviométrie inférieure à la moyenne. Une analyse récente de l'évolution de la pluviométrie sur le long terme montre que cette tendance s'est aujourd'hui inversée, la moyenne des précipitations étant à nouveau en augmentation depuis les années 1990. Cette situation donne à penser que les isohyètes 350 à 400 millimètres, qui délimitent les zones où la production végétale est viable, glissent à nouveau vers le nord. La superficie des terres propices à la production végétale pourrait par conséquent avoir augmenté depuis les années 1990.

Autre facteur climatique, les principaux vents saisonniers au Niger sont l'harmattan et la mousson. L'harmattan est un vent violent, chaud et sec provenant du nord du Sahara d'Octobre à Mai, et il se disait être provoqué par le rayonnement solaire matinal qui perturbe la masse d'air refroidi par la radiation de l'environnement continental. Suit ensuite la mousson (vent accompagné de pluie) est un vent sud-ouest qui souffle dans la partie sud de Juin à Octobre, entraînant avec lui une masse d'air humide qui provoque des pluies calmes pendant quelques semaines en août lorsque le front tropical tarde, au nord de la latitude 18 ° N (JAICAF, 2009).

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

En outre, l'alizé continental peut souffler à plusieurs reprises, pendant quelques jours, de Décembre à Février. Dans la zone climatique Sahara, des tempêtes de sable se produisent de Juin à août, causant des brumes sèches en raison de poussière flottant sur de vastes zones (JAICAF, 2009). Pendant la saison sèche, la température moyenne fluctue entre 28,1° et 33,1°C tandis que pendant la saison des pluies, elle varie entre 18,1° et 31,7°C (PANACC, 2006).

En ce qui concerne la végétation, elle est une steppe arbustive en général avec des espèces comme le *Guiera senegalensis*, le *Combretum nigricans*, le *Combretum micranthum*, l'*Acacia albida*, l'*Acacia nilotica*, le *Balanites aegyptiaca*.

2.4. Relief

De façon générale, il est relativement plat et a une pénéplaine (altitude 200 m - 300 m) s'étendant de la région occidentale avec le désert du Sahara (qui couvre deux tiers du pays) au bassin du Tchad. Cependant l'altitude atteint autour de 1 000 m dans la région du nord-est faisant frontière avec le Tchad et la Libye (JAICAF, 2009) mais du fait que la partie nord-est du Niger ne fait pas partie de notre zone d'étude (figure 1), cette partie ne sera pas représenté dans notre étude.

Les principaux reliefs de la zone agricole du Niger sont décrits comme suit :

➤ La région du Liptako

Elle est située sur la rive droite du fleuve Niger, c'est un plateau bas et rocailleux. La zone nord est couverte par des dunes de sable tandis que le sud est entouré de débris rocheux.

➤ La région du Zarmaganda

Il s'agit d'un plateau avec une altitude de 250 à 300 m sur la rive gauche du fleuve Niger, et traversé par de vastes vallées fossilifères et fertiles comme le Bosso, le Maouri, etc.

➤ Les régions d'Ader Doutchi de du Majia

Elles s'étendent à l'est de la région du Zarmaganda. Elles sont formées d'un plateau rocheux assez élevé avec une altitude de 400 à 600 m et traversées par plusieurs grands oueds comme le Majia.

➤ La région du Goulbi

Elle se trouve à l'est de l'Ader Doutchi, Formée d'une vaste plaine de dunes de sable, elle est fertile et peu parcourue par les oueds.

➤ La région montagneuse de l'est

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Elle se trouve à l'est de la région du Goulbi et parsemée de nombreuses collines isolées avec une altitude d'environ 500 m, telles que les collines Damagaram, Mounio et Koutous, toutes couvertes de sable.

2.5. Ressources en eau

Le bassin versant du fleuve Niger, situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, couvre une superficie de près de 2.2 millions km² comprenant environ 1.5 million km² de bassin hydrologiquement actif (ABN, 2007). Il est le neuvième système fluvial le plus important du monde et couvre neuf pays Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Niger, Nigeria et Tchad. Ainsi, le bassin actif du Niger est subdivisé en quatre zones aux caractéristiques physico-géographiques plus ou moins homogènes (Niger Supérieur, Delta Intérieur, Moyen Niger et Niger Inférieur) et traverse du sud au nord trois zones climatiques distinctes (Sahélienne, Soudanienne et Guinéenne) (ABN, 2007). Il constitue la dorsale de l'économie ouest-africaine, mais depuis plus de trois décennies, le système fluvial du Niger est menacé par la désertification et les pratiques inadéquates d'exploitation de ses ressources naturelles. Cette situation peut accentuer la variabilité spatiale de pluies au sein du bassin du Niger.

L'étude réalisée par l'Association pour la Collaboration Internationale en matière d'Agriculture et des Forêts du Japon (JAICAF, 2009), fait ressortir les grands traits sur les ressources en eau qui constituent la zone agricole du Niger.

Le fleuve Niger (longueur totale 4 180 km), qui est le 13^{ème} long cours d'eau dans le monde et le troisième en Afrique, traverse le Niger et continue sa course sur la côte sud-ouest en direction du sud-est sur une distance d'environ 550 km, allant de Mali à la frontière avec le Bénin et au Nigeria (figure 1). Il est pour le Niger le seul fleuve qui ne tarisse pas toute l'année. D'ailleurs, l'eau du fleuve Niger provient principalement des précipitations pendant la saison des pluies en Guinée, au Mali et dans les pays qu'il traverse au cours de son trajet.

Bien que les affluents de la rive droite du fleuve Niger comme la Sirba ainsi la rivière Komadougou Yobe qui se jettent dans le lac Tchad ne s'assèchent que pendant quelques mois dans l'année, les oueds, notamment Ighazer originaires du Massif de l'Aïr et de Maradi Goulbin qui s'écoulent dans la rivières Sokoto n'ont de l'eau d'écoulement que pendant quelques jours après la pluie, et dans le cas extrême du Dallol Bosso et du Dallol Maouri, ils sont appelés vallées de fossiles de nos jours puisqu'ils n'ont plus d'écoulement. Dans les années 1960, ledit lac Tchad avait une superficie de 26 000 km² (le 12^{ème} au monde à cette époque) et une profondeur d'eau de 7 m. A cette époque déjà c'était un lac peu profond. Elle a perdu par les années 1990, 45 % de sa superficie. Deux fois dans le passé, en 1908 et en 1984, il a

complètement séché et la profondeur moyenne actuelle est de 1,5 m. À la suite de ces sécheresses, toute la surface du lac à l'intérieur du territoire du Niger a été perdu, et il n'est donc plus un lac sur lequel Niger peut dépendre pour son approvisionnement en eau. D'ailleurs, un certain nombre de marais existant plus ou moins en permanence après la pluie, y compris la Madarounfa et la Keita, servent de sources d'eau aux hommes et aux animaux. Pour le Niger, la nappe phréatique constitue une riche et précieuse source d'approvisionnement en eau. Au cours de ces dernières années, la population exploite soit l'eau qui provient de la saison des pluies et a été confinée dans l'aquifère de strates imperméables de faible profondeur, soit l'eau fossile qui, ayant été accumulée dans la nappe aquifère des strates imperméables de profondeur relativement grande, abondante, mais qui ne peut être renouvelée, au moyen de puits artésiens (puits d'écoulement naturel) ou de puits creusés. Dans les vallées situées dans les régions de l'est et du nord-ouest, y compris les régions d'Agadez et de Manga, l'on trouve un certain nombre de puits artésiens. La profondeur des puits varie largement selon les lieux et, dans certains cas, ils atteignent une profondeur de 1 000 m.

2.6. Types de sol

Les sols du Niger sont classés à peu près dans les catégories suivantes (JAICAF, 2009) :

➤ Les sols minéraux grossiers

Les sols de ce type se sont formés dans des conditions de climat désertique avec des précipitations irrégulières annuelles inférieures à 200 mm, et avec une grande variation de température diurne. Ils sont répartis sur plus de la moitié de la superficie du pays. Ils sont subdivisés en lithosols faiblement érodés et peu profonds avec une profondeur de moins de 10 cm. Les sols abrasés ont une couche légèrement jaunâtre, et des sols charriés qui contribuent à la formation de dunes de sable grâce à l'action des intempéries.

➤ Les sols peu développés

C'est le type de sols présentant un déficit en matières organiques, et classés dans la catégorie de « sols climatiques » qui se forment dans les zones entourant la grande région des dunes de sable du Ténéré et la catégorie de « sols non-climatiques » qui, elle, se forme dans la région de Liptako. Celle-ci, comme la première, contient des graviers dans les matériaux principaux, lesquels graviers ont une surface érodée par les pluies, et sont donc inadaptés à l'agriculture.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

➤ Les sols semi-arides

Les sols de ce type se sont formés à partir de sols sablonneux dans des conditions climatiques de type steppe avec des précipitations annuelles se situant entre 200 et 350 mm. Ils ont un horizon A très développé, qui se produit généralement dans la ceinture formant la zone s'étendant de la frontière avec le Mali jusqu'au lac Tchad. Ce type de sols, comprend aussi le « front du sol rouge » qui paraît rouge à cause de l'oxyde de fer et qui est très largement répandu, le « sol bruns » généré à partir de l'argile et du grès, les sols argileux qui se trouvent autour du lac Tchad et provoquent facilement l'hydromorphisme et la salinisation.

➤ Les sols ferriques tropicaux

Les sols de ce type sont des sols rouges brunâtres qui développent un horizon B formé d'accumulation d'argile sous des conditions climatiques semi-humides, ils sont riches en oxydes de fer qui se forment généralement sur le plateau de grès naturel dans la partie sud du Niger. En raison de leurs propriétés physiques ils facilitent les opérations culturales et sont adaptés à la culture du mil, du sorgho et de l'arachide. Malheureusement, leur caractère sablonneux les rend vulnérables à l'érosion. En outre, on y trouve de temps en temps des sols graveleux extrêmement dégradés en raison du lessivage et contenant des agrégats de nodules blanchis et des sols ayant été soumis à l'hydromorphisme et à la salinisation.

➤ Hydromorphie (Sols sédimentaires aqueux)

Ces sols sont caractérisés par la présence d'horizons gleyifiés sous l'influence de la nappe phréatique présente dans les terrains alluviaux le long des rivières au sud. Ils sont propices à la culture du riz.

➤ Vertisols

Ce sont des sols argileux lourds de couleur sombre présents principalement dans la région de Diffa du lac Tchad. Ils sont riches en minéraux argileux semblables aux montmorillonites et composés de particules fines peu touchés par le lessivage. L'absorption de l'eau les fait gonfler et la dessiccation les fait rétrécir et se solidifier. Ils sont relativement fertiles, mais très mal drainés, et présente des problèmes de salinisation pendant la saison sèche.

D'après (Garba, 2002), les travaux de l'ORSTOM font ressortir 14 classes de sols qui sont inégalement réparties à travers toute l'étendue du Niger (figure 5).

Sur le plan agricole, seuls les sols bruns et les sols ferrugineux sont utilisés pour l'agriculture pluviale. Les sols peu évolués d'apport, les sols hydromorphes et les vertisols sont réservés

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

surtout pour l'agriculture irriguée. Les sols à dominance sableuse supportent le mil, le sorgho, le niébé et l'arachide alors que les sols hydromorphes et les sols peu évolués sont occupés surtout par le riz et les cultures maraîchères. Les sols ferrugineux sont les plus dominants et occupent presque la quasi-totalité de la zone agricole. Presque tous ces sols ont la même contrainte, à savoir le faible niveau de fertilité et sont, en particulier, très sensibles à l'érosion éolienne. Les fermiers, du Niger classent par ailleurs les sols se trouvant dans leurs domaines selon la couleur et la textures, et emploient des mots de cette classification pour exprimer le niveau de fertilité. Selon (Hayashi, 2005), les principaux sols sont classifiés grosso modo en 3 catégories, Labu-tjirey (sable rouge), Labu-kwarey (sable blanc), et Labu-Bi (sable noir), et ceux-ci sont des concepts partagés par les fermiers pour identifier les différences dans la fertilité du sol. Ces expressions sont de la langue Zarma et ont été confirmée par « enquête de terrains dans l'étude sur les cultures de subsistance comme faisant partie du projet de collecte d'informations de base pour l'aide aux pays en voie de développement, en septembre 2008 ». Le mil et le sorgho sont cultivés sur des sols "dunaires" ou sols ferrugineux tropicaux qui représentent 85% des superficies agricoles cultivables (République du Niger, 2000). Ces sols sableux, d'origine éolienne pour la plupart, sont pauvres en azote, en phosphore et en matière organique. Dans le meilleur des cas, certains agriculteurs les fertilisent en apportant dans les champs proches des habitations de déchets domestiques, des déjections d'animaux parqués dans les concessions ou en laissant ces animaux y pâturer, après les récoltes. Par contre les champs éloignés des villages ne connaissent aucune fertilisation véritable, sinon en y laissant les résidus des récoltes (Idrissa, 2001).

Moins de 5% de ces types de sols se trouvent dans la zone soudanienne où le potentiel pluviométrique annuel est très important (600 mm à 800 mm). La plupart des sols destinés à l'agriculture se situent dans la zones sahélienne (300 mm à 400 mm) et la zone sahélo-soudanienne (400 à 600 mm) où les précipitations sont faibles et irrégulières (World Bank, 2011). Ainsi, pour réduire le risque de mauvaises récoltes, les agriculteurs cultivent le mil mélangés à du niébé (Haricot africain, *Vigna unguiculata*) ou des arachides (Marshall et al., 2011).

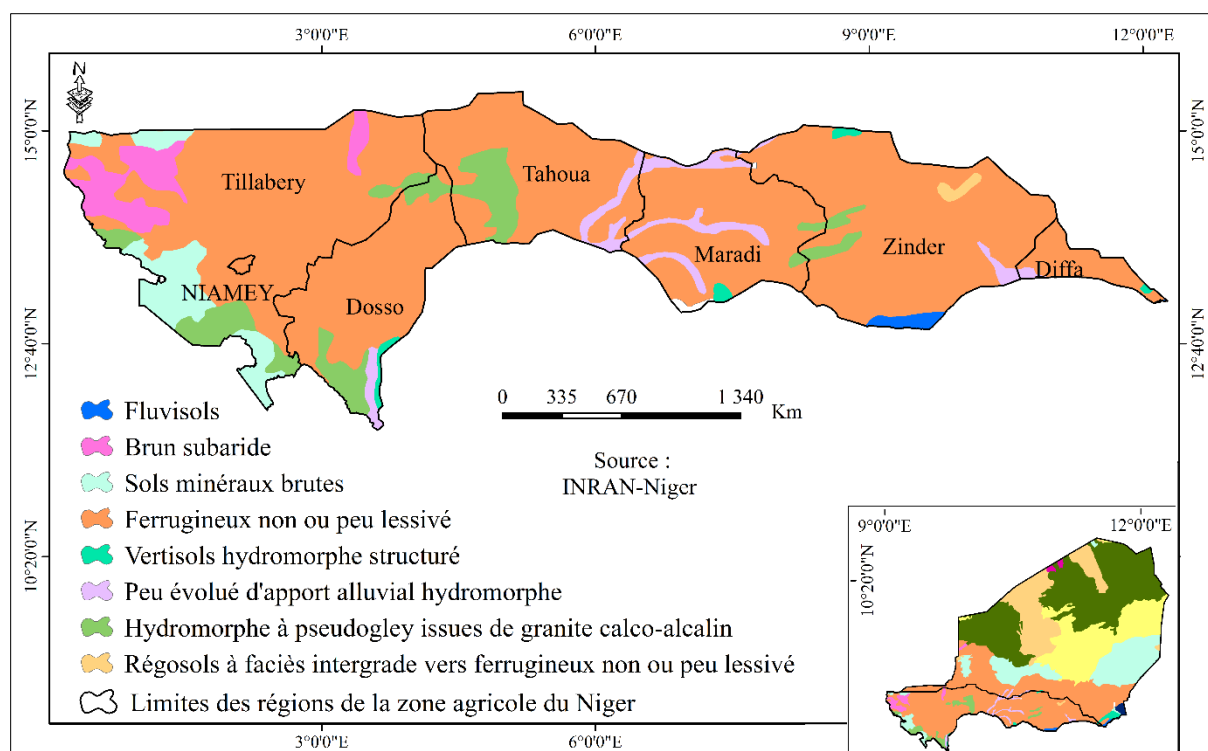


Figure 3 : Différents types de sols du Niger.
Source : Institut national de la recherche agronomique du Niger (INRAN 2013)

2.7. Pression agricole sur la zone d'étude

D'une manière globale, le Niger est subdivisé en trois zones agro-écologiques comme le présente la figure 1 (zone agricole, zone pastorale et zone désertique). La majorité de la population du Niger vit dans la zone agricole où les conditions climatiques sont beaucoup plus favorables pour la survie humaine et animale ainsi que pour les activités agricoles. Par conséquent cette forte densité de population conduit à une forte exploitation du sol, pour l'urbanisme et surtout pour l'agriculture. D'après la figure 4, nous pouvons constater que la quasi-totalité de la zone agricole est dominée par une forte pression agricole partant de l'est vers l'ouest de la zone d'étude. Par contre, la zone soudanienne qui reçoit la plus forte pluviométrie du Niger (800 mm par an) est dominée par une faible pression agricole, ce qui ne reste pas sans conséquence sur la production nationale.

Malgré l'accroissement régulier des surfaces cultivées, l'occupation des terres par habitant est en recul. Les exploitations sont de petite taille (4,1 hectares en moyenne) et elles s'amenuisent parce que le taux de croissance démographique élevé du Niger (près de 3,5 pour cent par an) dépasse celui de l'accroissement des surfaces exploitées. La pression qui est par conséquent exercée sur les ressources en terres agricoles a augmenté au cours des décennies écoulées et est maintenant très forte (World Bank, 2011). Par conséquent, la production végétale se pratique

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

dans un contexte marqué par une pression forte et croissante exercée sur les terres arables qui, dépend aussi par un régime pluvial faible et variable. La production pâtit en outre de la prédominance des systèmes de gestion traditionnels, à faible intensité de semences améliorées, d'engrais et de machines. La forte pression exercée sur les terres limite également les possibilités de mise en jachère comme mesure de préservation et de rétablissement de la fertilité des sols, 5 pour cent seulement des terres ayant été mises en jachère en 2005 (Recensement général de l'agriculture et du cheptel du Niger [RGAC]).

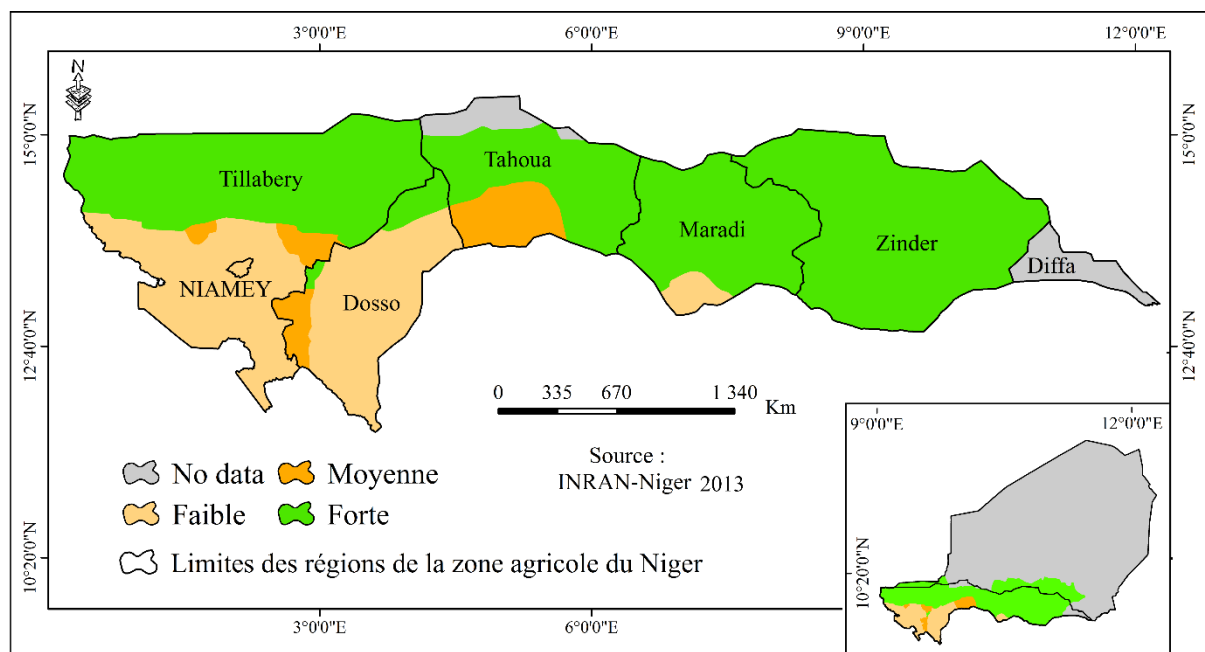


Figure 4 : Classifications de la pression agricole dans la zone agricole du Niger.

Source : Institut national de la recherche agronomique du Niger (INRAN) 2013.

2.8. Le mil

Le mil à chandelle ou simplement mil (*Pennisetum glaucum*) est une espèce de plantes annuelles de la famille des *Poaceae* (*Graminées*) (figure 3). Au Niger, il est généralement planté au début de la saison des pluies (Juin) et récolté en Octobre (tableau 1) (JAICAF, 2009). Sa durée du cycle de croissance est d'environ 70 à 100 jours (Rasmussen, 2007), et il en existe diverses variétés caractérisées par la longueur des panicules allant de 30 à 90 cm. Pour une bonne production du mil, son besoin en eau se situe entre [350 et 500 mm] (Allen et al., 1998) mais au Niger il est cultivé dans les zones à pluviométrie annuelle située entre 250 mm et 650 mm (JAICAF, 2009). Il possède des caractéristiques propres à la plante qui permettent sa culture dans le sahel : enracinement important, forte capacité à donner un nombre important de tiges, sensibilité à la longueur du jour (Bezanson et al., 1995). Au Niger, le rendement moyen au niveau des champs des paysans est très faible, de l'ordre de 0,4 à 0,45 t / ha seulement

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

(JAICAF, 2009). Après la récolte du mil, les grains sont battus avec un maillet et au mortier, ou pilé avec un moulin à farine. Les amandes et la farine sont en général pour la préparation d'une bouillie cuite qui, une fois refroidi forme une nourriture d'un type appelée « patte » ou « too » pour la consommation humaine. Les cosses sont utilisées comme aliments de volaille et les tiges comme matériaux de construction pour les maisons (toit et murs), ou comme fourrage pour les animaux (cela montre à quel point cette plante est plus que bénéfique que ça soit pour les humains, les animaux ou pour les constructions). Le Niger est le deuxième pays producteur du mil en Afrique après le Nigéria (JAICAF, 2009).

Tableau 1 : Calendrier cultural du Mil et du Sorgho au Niger

Mil	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> Semis <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: gray; margin-left: 20px; margin-right: 5px;"></div> Récolte </div>											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc

Source : Référentiel commenté des prix des produits agricoles du Niger, Août 1999 (JAICAF, 2009)

Le mil est de loin, la culture la plus dominante et la plus importante (FAO, 1989). Il est cultivé sur la quasi-totalité de la zone agricole partant de la zone saharo-sahélienne jusqu'à la zone soudanienne.

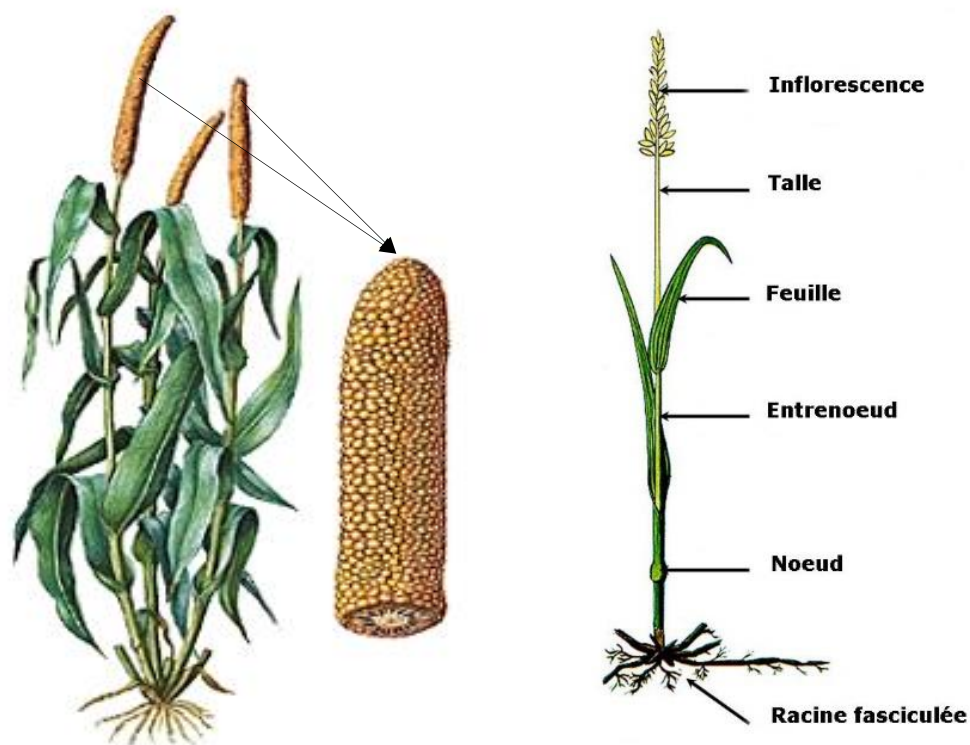


Figure 5 : Exemple de plante de mil cultivée dans la zone agricole du Niger.

Source : encyclopédie des céréales

2.9. Système de production de la culture du mil

Les systèmes de production agricole du Niger sont de type agro-sylvo-pastoraux. Ils sont caractérisés par les cultures pluviales (mil, sorgho, niébé), les cultures irriguées (riz ; légumes et arbres fruitiers) et l'élevage. Les performances du secteur agricole restent globalement insuffisantes compte tenu des rendements en régression consécutifs à la baisse progressive de la fertilité, à la mise en culture des terres marginales, à l'absence de jachère et au déficit du bilan hydrique (Abdoul Habou et al., 2016). L'agriculture est essentiellement pluviale et les cultures vivrières céréalières constituent la base de la production.

La répartition des terres arables au Niger est limitée à des régions du sud et seul 12 % environ de la superficie totale du pays est propice à l'agriculture. Ainsi, afin de répondre aux taux de croissance rapide de la population supérieure à 3 %, la superficie cultivée des principales cultures vivrières a été augmentée, le rendement également. Cependant, du fait que l'agriculture est essentiellement de régime pluvial, la production dépend principalement des précipitations. Par exemple, en 2004 en particulier, une petite sécheresse survenue et, partant, la superficie cultivée, ainsi que le rendement ont diminué considérablement (JAICAF, 2009). Les plantes légumineuses comme le niébé et l'arachide sont principalement plantées comme intercalaires d'accompagnement pour la culture du mil et/ou du sorgho. Le maïs et le riz sont cultivés dans les zones où l'eau est plus facilement disponible, y compris dans les zones situées le long du fleuve Niger, et dans les régions du sud avec une pluviométrie abondante.

Parmi les cultures citées ci-haut, le mil est la culture la plus importante, présente sur 88% des terres cultivées en 1984 (Swinton, 1985). Le mil est cultivé sur les deux tiers de la superficie totale des terres arables (15 millions d'hectares) (JAICAF, 2009). Raison pour laquelle, seule la culture du mil a été retenue dans le cadre de notre étude, du fait qu'elle constitue l'alimentation de base au Niger.

D'après (Idrissa, 2001), au Niger, le mil est produit dans trois des cinq systèmes de production végétales à savoir :

- **Systèmes septentrionaux à faible densité de population**

Mis en œuvre dans les régions septentrionales où la pluviométrie est inférieure à 400 mm et la densité de population inférieure à 20 habitants/km², ces systèmes se caractérisent par :

- Leur état dégradé et extensif, la quasi permanence des sécheresses et leur « adaptation aux aléas » ;
- un système de culture mil

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

- Jachère de plus en plus rare, avec la réduction de la durée de la jachère ou sa disparition totale de cette jachère, mais présentant l'intérêt à la fois de « limiter les pertes en cas de mauvaise pluviométrie et l'inconvénient de ne pas valoriser les bonnes années pluviométriques du fait des caractères rudimentaires des techniques de production » ;
- Des glacis et des sols de plateaux exploitables moyennant le traitement de l'érosion régressive par reboisement, réalisation de diguettes et mis en défens temporaire.
- Des bas-fonds, dallols et mares ou des formes d'intensification par irrigation d'appoint de cultures céréalières pourrait être envisagées.

Aujourd'hui, les actions d'amélioration de ces systèmes sont la récupération des plateaux dégradés au moyen de zaï et diguettes pierreuses renforcées par des plantations forestières dans les départements de Tahoua et de Tillabéry. Respectivement par le Projet de Développement Rural de Tahoua (PDRT) et le Projet Agro-Sylvo-Pastoral (PASP).

L'amélioration de la fertilité des champs, dans ces systèmes de production, consiste simplement en quelques apports d'ailleurs « symboliques » de fumier par quelques paysans, en déjections laissées çà et là, par les animaux après les récoltes et les débris végétaux dispersés dans des parties jugées très pauvres des champs, après élagage d'arbres et d'arbustes.

- **Systèmes de l'Ader Doutchi Magia (ADM)**

Avec la forte densité de population et une pluviométrie inférieure à 400 mm, ils comportent :

- Des systèmes qui sont en crise avec un espace agricole limité, une population très dense et des aménagements ensablés et abandonnés ;
- Des périmètres irrigués et les barrages coûteux et dont la réhabilitation n'est pas évidente, vu le coût et les risques d'ensablement et les fortes crues.

Ces systèmes sont spécialisés dans la production de sorgho dans les bas-fonds aménagés par le Projet Intégré Keïta (PIK). Dans ces systèmes, la récupération des terres selon les techniques du PIK adaptées notamment par la PDRT (Projet de Développement Rural de Tahoua), mérite un suivi scientifique pour en connaître l'évolution pédologique, technique et économique, en un mot déterminer leur durabilité, c'est à dire leur maîtrise sur le long terme par les populations bénéficiaires. C'est tout un programme pour la recherche agronomique et la vulgarisation agricole et aussi pour la politique agricole car tout ce qui peut concourir à la conservation du patrimoine sol doit constituer l'un des axes de la vulgarisation agricole qui accompagne généralement tout projet (République du Niger, 1991).

- **Systèmes en sec à densité moyenne et forte**

Ces systèmes sont généralement représentés dans le département de Zinder dans la partie Est du Niger. Ils connaissent un accroissement rapide de la densité de la population, une réduction de la jachère dans le temps et dans l'espace et une occupation des terres encore disponibles, mais déjà très rares. Ces terres, en cas de sécheresse sont souvent vendues par les familles les plus pauvres. "De tels systèmes à la limite de leurs capacités actuelles d'exploitation constituent un véritable enjeu pour la recherche agricole et la politique agricole".

2.10. Système de culture du mil

Dans tous ces systèmes de production, les pratiques culturales appliquées aux deux céréales sont pratiquement les mêmes (Idrissa, 2001).

Les champs sont préparés au 7ème mois du calendrier traditionnel qui correspond généralement au mois d'avril. Lorsqu'il s'agit d'un nouveau champ, la principale opération est le défrichage qui consiste en l'élimination des arbustes les plus petits et à élaguer les plus grands. Les résidus sont généralement brûlés, mais de plus en plus ils sont dispersés sur le champ pour être attaqués et enfouis par les termites ou exportés.

Les outils agricoles sont la hache et/ou le coupe-coupe pour le défrichage, la houe à longue manche pour le semis et la hilaire ou la daba pour le sarclage et le couteau pour la récolte de ces céréales.

Les semis sont réalisés lorsque la pluie est appréciée suffisante, c'est à dire lorsque le sol est humide à une profondeur égale à la taille d'une main. Le semis se fait en poquets distants d'un pas d'adulte et chaque poquet reçoit une pincée de grains de mil. Cette plante est généralement cultivée en association avec le niébé ou l'arachide et dans certaines régions du centre du pays avec le sésame. Quelques fois, mais de plus en plus rares, des semis en sec sont réalisés dans l'espoir de profiter, avec les sécheresses, au maximum de « la moindre goutte de pluie ». Souvent, dans un souci de parer aux sécheresses de plus en plus fréquentes ou afin de marquer leur présence sur des champs, dans les zones de forte demande de terres à cultiver, les paysans emblavent plusieurs champs même s'ils n'arrivent pas à les cultiver.

Les opérations culturales se limitent au sarclage, généralement 2 à 3 interventions, souvent à la demande et au démariage dans certaines régions.

La lutte contre les insectes ennemis consiste, lorsque les attaques sont estimées graves, en un enfumage du champ en jetant dans le feu quelques insectes attrapés. Quant aux oiseaux, ils sont chassés des champs par placement d'épouvantails et par des cris ou des bruits en tapant sur des

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

boîtes métalliques. L'usage de pesticides, insecticides en fait, est aujourd'hui le fait des services techniques de la Direction de la Protection des Végétaux (DPV), lorsque l'invasion est estimée grave et pouvant compromettre les récoltes. La récolte intervient à la maturité et les produits sont engrangés selon les régions dans des greniers faits de tiges de mil ou en banco implantés dans les champs proches des habitations.

Dans l'est du pays, de petits greniers en banco sont installés dans les concessions familiales. C'est, dès la récolte que le paysan sélectionne les épis bien chargés de gros grains et non attaqués comme fournisseurs de semences. En cas de sécheresse et de production insuffisante, les semences sont généralement achetées sur les marchés ou obtenues en don ou prêts auprès de parents ou d'amis.

2.11. Démographie

Le Niger dispose de l'indice de fécondité le plus élevé au monde (6 enfants par femme) avec un taux de natalité de 46,6% et un taux de mortalité de 9,12%. Selon les résultats du Recensement Général des Populations et de l'Habitat (RGP/H) de 2001, le Niger compte 10.790.352 habitants et 17 138 707 habitants d'après le RGP/H de 2012. En 2014, la population était à 18 736 296 millions d'habitants (INS-Niger, 2018) et aujourd'hui (2020) d'après le département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, elle est estimée à 22 millions d'habitants.

Le peuplement humain est inégalement réparti sur le territoire. La majeure partie de la population est concentrée dans environ 15% de la superficie du pays, le long de la frontière sud avec le Nigéria et dans la partie sud-ouest du pays, la vallée du fleuve Niger (Douglas & Sally, 2014), en gros dans la zone agricole où les pluies sont assez favorables (figure 6).

La majorité de la population vit dans les zones rurales et s'adonne principalement à l'agriculture (y compris l'élevage, la pêche et la foresterie).

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

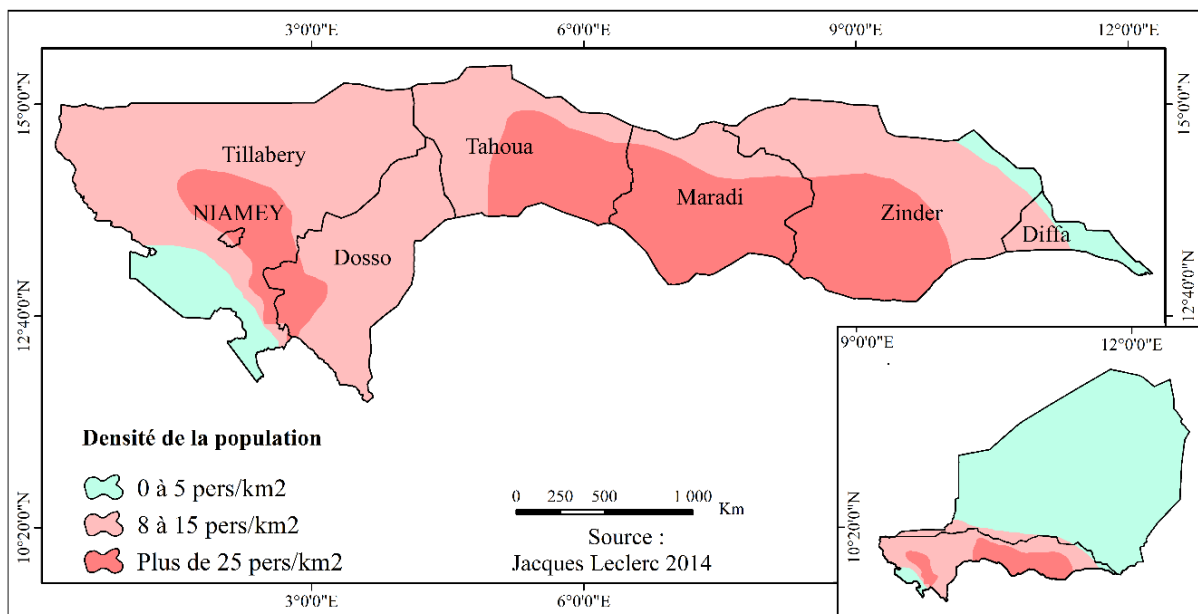


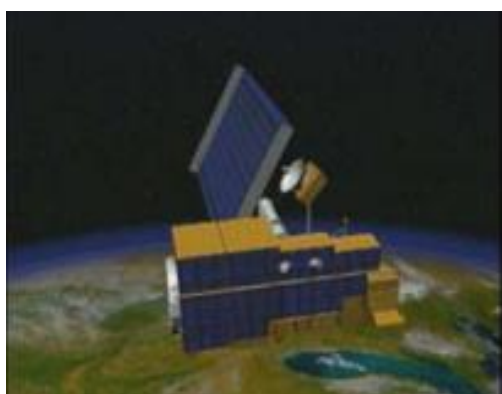
Figure 6 : Carte de densité de la population du Niger 2014. Reproduite dans le cadre de cette étude.
Source : Jacques Leclerc 2014.

CHAPITRE 3 :
DONNEES UTILISEES ET PREPARATIONS DES DONNEES

3.1. Données utilisées

Certains capteurs lancés ces dernières décennies possèdent des caractéristiques avantageuses pour le suivi des sécheresses. Parmi ces capteurs, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) semble particulièrement intéressant (Layelman, 2015). L'instrument MODIS est embarqué sur les plates-formes Terra (connu à l'origine sous le nom d'EOS AM-1) et Aqua (connu à l'origine sous le nom de EOS PM-1) de la NASA (Zhang, et al., 2004). Terra a été lancé avec succès le 18 décembre 1999 et acquière des données terrestres tandis que Aqua a été lancé avec succès le 4 mai 2002 et acquière des données océaniques (MODIS Design). L'orbite de Terra autour de la Terre est planifiée de sorte qu'elle passe du nord au sud à travers l'équateur le matin, tandis qu'Aqua passe du sud au nord au-dessus de l'équateur l'après-midi. Terra MODIS et Aqua MODIS visualisent la totalité de la surface de la Terre tous les 1 à 2 jours et acquièrent des données dans 36 bandes spectrales de résolutions spatiales différentes (2 bandes de 250 m, 5 bandes de 500 m et les 29 restants de 1 km) (McVicar & Jupp, 1998), dont sept bandes spectrales sont explicitement conçues pour la surveillance de la surface terrestre (Justice et al., 1998). En effet, le capteur MODIS a une fauchée de plus de 2 200 km et des champs de vue de l'ordre de 110° (angle zénithal de visée θ_r compris entre -55° et $+55^\circ$). Un pixel d'une scène est ainsi observé selon plusieurs configurations géométriques, ces configurations étant rythmées par le cycle orbital du satellite (16 jours pour TERRA) et le cycle annuel associé à l'évolution de la position du soleil (Iskander, 2008).

Tableau 2 : Caractéristiques du capteur MODIS TERRA



Lancement	1999
Altitude	705 km
Orbite	Héliosynchrone descendante
Heure de passage à l'équateur	10 : 30 AM
Champ de vue	2 330 km
Résolution spatiale au nadir	<ul style="list-style-type: none">• 250 m (bande #1-2)• 500 m (bande #3-7)• 1 km (bande #8-36)
Période de revisite	(+/-2jours)

Source : <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

Dans la plupart des études réalisées sur le suivi de la sécheresse par télédétection, le satellite NOAA-AVHRR est le plus utilisé. Suite à la recommandation de certains auteurs (Isabelle, 2006 ; Layelmam, 2015) disant : vue que MODIS ainsi que les autres nouveaux capteurs satellitaires (SPOT/VGT, et MSG/SEVIRI) ont été récemment lancés, il sera intéressant d'utiliser ces nouvelles sources d'informations afin d'évaluer les possibilités de la télédétection pour le suivi des conditions de sécheresse. Raison pour laquelle nous avons choisi le capteur satellitaire MODIS pour le suivi de la sécheresse, car il offre un regard sur la phénoménologie terrestre, atmosphérique et océanique à une communauté d'utilisateurs large et diverse à travers le monde (Layelmam, 2015). Ainsi, dans le cadre de notre étude deux catégories de données Terra MODIS ont été utilisées pour atteindre divers objectifs, l'Indice de Végétation par Différence Normalisé MODIS (NDVI-MODIS) et la température de surface du sol jour MODIS (Land Surface Temperature, LST-MODIS).

3.1.1. Indice de Végétation par Différence Normalisé de MODIS

Le NDVI utilisé est la version 6 (MOD13A3) de MODIS qui est fournis mensuellement à une résolution spatiale de 1 km. L'algorithme intègre tous les produits de 1 kilomètre sur 16 jours qui se chevauchent et utilise une moyenne temporelle pondérée pour obtenir le NDVI mensuel (Didan, 2015). Le NDVI a été téléchargé à partir du Centre d'archivage actif distribué des processus terrestres (Land Processes Distributed Active Archive Center – LPDAAC) (<http://lpdaac.usgs.gov/>) sur les 5 mois de la campagne agricole du Niger et sur une période d'étude de 15 ans (2003 à 2017) (tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques des données NDVI MODIS téléchargés

Couverture spatiale	Carrelages utilisés pour notre zone d'étude	Résolution Spatiale	Intervalle de temps	Echelle mensuelle (campagne agricole)	Format des données
Global	h18v07, h19v07	1 km	2003 à 2017	Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre	HDF

Pour chacun des 5 mois, deux tuiles du système de carrelage sinusoïdal MODIS (h18v07 et h19v07) (figure 7) ont été téléchargés, permettant de couvrir l'ensemble de la zone agricole (zone d'étude) puis après, les tuiles sont mosaïquées afin d'obtenir une seule image correspond au NDVI du mois en question.

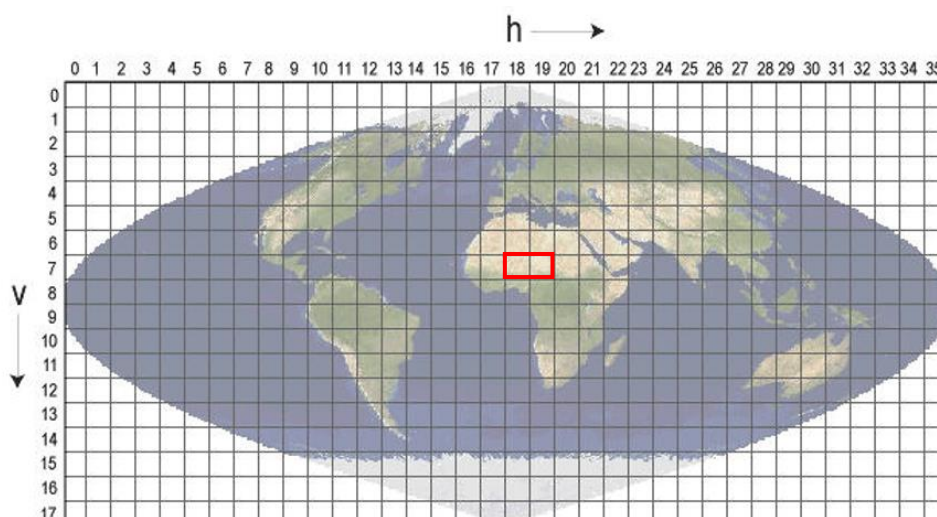


Figure 7 : Système de carrelage sinusoidal MODIS utilisé pour télécharger les tuiles (h18v07-h19v07) du NDVI

L'indice de végétation a été considéré par de nombreux scientifiques comme l'un des paramètres importants pour la cartographie des champs agricoles, l'estimation des impacts météorologiques, le calcul de la biomasse, le rendement des cultures et la production en pâturage, les conditions de sécheresse et la détermination de la vigueur de la végétation (Tucker et al., 1982 ; Justice et al., 1985 ; Hielkema et al., 1986 ; Kogan 1987 ; Dabrowska-zielinska et al. 2002). Raison pour laquelle, le NDVI a été utilisé dans le cadre de notre étude pour mettre en évidence les conditions de sécheresse végétation à travers le calcul de l'Indice de Condition de Végétation (VCI).

3.1.2. Température de surface du sol jour (Land Surface Temperature, LST-MODIS)

La température de surface du sol (LST en Kelvin) utilisée dans le cadre de notre étude est la version 6 (MOD11C3) de MODIS, fournit dans une Grille de Modélisation Climatique (CMG) de 0,05 (5600 m × 5600 m) degré latitude/longitude pour le globe entier (Wan et al., 2015). Le granule MOD11C3 est constitué de 17 couches. Ces couches comprennent les heures LST de jour et de nuit et autres couches d'indicateurs de qualité (QC) correspondantes, six couches d'émissivités et sept couches d'observation (Wan et al., 2015).

Les valeurs de LST dans le produit MOD11C3 sont calculées en composant et en faisant la moyenne des valeurs des fichiers quotidiens MOD11C1 correspondant au mois. Le produit MODIS LST fournit des estimations de la température de la surface du sol, et est calculée en utilisant des mesures satellite infrarouge thermique pour les pixels ne contenant pas de nuage (Zhang et al., 2004). la précision de ce produit est inférieure à 1°C (Wan et al., 2002). Ainsi, tout comme le NDVI, la température de surface du sol de jour a été téléchargé à partir du Centre d'archivage actif distribué des processus terrestres (Land Processes Distributed Active Archive

Center – LPDAAC) (<http://lpdaac.usgs.gov/>) sur les 5 mois de la campagne agricole du Niger et sur la période d'étude de 15 ans (2003 à 2017) (tableau 4). Contrairement au NDVI qui est téléchargé en fonction du système de carrelage sinusoïdal MODIS, la température de surface du sol jour téléchargée présente une couverture spatiale globale (sur tout le continent africain).

Tableau 4 : Caractéristiques des données de températures de surface du sol (LST) téléchargées

Couverture spatiale	Type de LST	Résolution Spatiale	Intervalle de temps	Echelle mensuelle (campagne agricole)	Unité	Format des données
A l'échelle continentale	Jour	5 km	2003 à 2017	Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre	Kelvin (K)	HDF

La température (humidité ou stress) est un paramètre clé pour le développement des plantes. L'étude de (Vogt et al., 1997) a montré qu'il existe un lien entre la température de l'air et la température de surface du sol. L'étude a démontré que dans 80 % des cas, la température de l'air peut être calculée à partir de la température de surface avec une précision de plus ou moins 2 K. Or on sait que, lorsque la demande en eau des plantes est plus grande que l'eau disponible pour les plantes, un stress hydrique se produit. Afin de conserver l'humidité, les stomates de feuilles se ferment pour minimiser les pertes par transpiration. Comme le bilan énergétique doit demeurer équilibré, une partie de l'énergie qui est normalement utilisée pour l'évapotranspiration est alors répartie entre le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère. Il y a alors une hausse de la température apparente du couvert végétal (Crago 1996 ; Mader 1987 ; Mcvicar and Jupp, 1998). Le flux de chaleur sensible qui est capté par les capteurs thermiques des satellites est donc plus élevé en situation de stress hydrique et peut être utilisé pour détecter l'état de stress hydrique des plantes et donc les conditions de sécheresse. Ainsi, la température de surface du sol jour a été utilisée pour calculer l'Indice de Condition de Température (TCI) afin de détecter les conditions de stress hydrique des cultures.

3.1.3. Données de précipitation CHIRPS

Les données CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station) sont un ensemble de données de précipitations de plus de 30 ans (de 1981 à aujourd'hui) quasi-global (50°S et 50°N). CHIRPS a été développé pour soutenir le réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine de l'Agence des États-Unis pour le développement international (FEWS NET-United States Agency for International Development (Famine Early Warning Systems Network) (Funk et al., 2015). Ces données satellitaires sont des séries de données quotidiennes, pentadale et mensuelles. La base de données CHIRPS, élaborée en 1981, intègre les images des

précipitations observées depuis l'espace dans une base de données sur les précipitations collectées dans des stations au sol à travers le monde (Abdoukarim et al., 2018).

Ainsi dans le cadre de notre étude, la version 2 CHIRPS de précipitations a été téléchargé à partir du Groupe des Aléas Climatiques (CHG-Climate Hazards Group) (<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>) sur les 5 mois de la campagne agricole du Niger et sur une période de 15 ans (2003 à 2017) (tableau 5).

Tableau 5 : Caractéristiques des données de précipitation CHIRPS téléchargés

Couverture spatiale	Résolution Spatiale	Intervalle de temps	Echelle mensuelle (campagne agricole)	Unité	Format des données
A l'échelle continentale	5 km	2003 à 2017	Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre	mm	GeoTiff

Le déficit pluviométrique des plantes est la principale cause qui conduit à la sécheresse. Grâce à l'Indice de condition de précipitation (PCI) (Zhang & Jia, 2013), les conditions de sécheresse météorologique peuvent être mises en évidence. De ce fait, les données de précipitations CHIRPS ont été utilisées pour calculer le PCI.

3.1.4. Données d'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration (ET) est la combinaison de la transpiration de la végétation et de l'évaporation du sol. C'est un élément important du bilan hydrique parce qu'il reflète l'échange de masse et d'énergie entre le système sol-eau-végétation et l'atmosphère (Senay et al., 2012). L'ET réel (ET_r) est produite à l'aide du modèle opérationnel de bilan énergétique de surface simplifié (*Simplified Surface Energy Balance*, SSEBop) (Senay et al., 2012) pour la période allant de 2003 à aujourd'hui. La configuration de SSEBop est basée sur l'approche SSEB (Simplified Surface Energy Balance) (Senay et al., 2011 ; Senay et al., 2013) avec un paramétrage unique pour les applications opérationnelles. Il combine les fractions ET générées à partir d'images thermiques MODIS à distance, acquises tous les 10 jours, avec l'ET de référence en utilisant une approche d'index thermique. La formulation initiale du SSEB est fondée sur les principes des pixels chauds et froids des modèles SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) et METRIC (Richard et al., 2007). La dépendance de l'ET_r à l'égard du couvert terrestre et de l'humidité du sol, ainsi que sa relation directe avec l'assimilation du dioxyde de carbone dans les plantes, en font une variable importante pour la surveillance de la sécheresse, du rendement des cultures et de la biomasse, une capacité essentielle pour les décideurs intéressés par la sécurité alimentaire, les marchés céréaliers, l'allocation de l'eau et la séquestration du carbone (Bastiaanssen et al., 2005). L'unité de données de l'ET_r est en millimètres (mm) avec une résolution spatiale de 1 km et varie de 0 à 1200 mm. Ainsi, les données mensuelles de l'ET_r

Chapitre 3 : Données utilisées et préparations des données

(juin à octobre) de 2003 à 2017 ont été téléchargées à partir du portail FEWS Early Warning Systems Network (FEWS NET) <https://earlywarning.usgs.gov/fews>.

Tableau 6 : Caractéristiques des données d'évapotranspirations réelles téléchargés

Couverture spatiale	Résolution Spatiale	Intervalle de temps	Echelle mensuelle (campagne agricole)	Unité	Format des données
A l'échelle continentale	1 km	2003 à 2017	Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre	mm	GeoTiff

Une diminution des précipitations entraîne un stress lié aux cultures et une réduction de l'évapotranspiration (ET), ce qui se traduit enfin par une dégradation des cultures. Cependant, l'indice de condition d'évapotranspiration (ETCI) peut être utilisé pour refléter les pertes en eau des cultures. De ce fait, les données d'évapotranspiration réelle (ETr) ont été utilisées pour calculer le ETCI.

3.1.5. Données vectorielles

Il s'agit des fichiers limites du Niger en format Shape file (.shp) issues du dernier découpage administratif du Niger réparti en régions, départements et en Communes. Cette donnée a été acquise gratuitement à partir du site Diva Gis (<http://www.diva-gis.org/>). Elles nous ont été très utiles pour la délimitation, l'extraction et la présentation de la zone d'étude.

3.1.6. Logiciels utilisés

Un certain nombre de logiciels ont été utilisés pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ce projet de recherche. Il s'agit notamment des logiciels : (1) ENVI Classic 5.3 qui a été utilisé pour le prétraitement des données MODIS et CHIRPS (décrit ci-dessus), (2) ArcGis 10.5 qui a servi pour la création du modèle de calcul de notre indice et la mise en page des cartes d'indices générées et enfin (3) XLSAT 2016 utilisé pour la détermination des paramètres statistiques entre l'indice ADCI et la culture du mil.

3.1.7. Données de rendement de la culture du mil

Au Niger, la culture la plus affectée par la sécheresse agricole et la plus consommée par la population nigérienne est le mil (Sivakumar, 1992). Raison pour laquelle cette culture a été prise en compte dans le cadre de notre étude. Les données collectées, portent sur les statistiques du rendement (en kg/ha) de la culture du mil acquis le 20 septembre 2018 auprès de la Direction de la Statistique Agricole (DSA) rattaché au Ministère de l'Agriculture du Niger (tableau 7). Ces données disponibles portent sur un intervalle de 15 ans (2003 à 2017). Le but de l'utilisation de cette donnée est de tester et valider l'indice ADCI que nous avons développé en réalisant

Chapitre 3 : Données utilisées et préparations des données

des tests de corrélations statistiques afin de déterminer la nature, l'intensité et la significativité de la relation qui existe entre le ADCI et la culture du mil.

Tableau 7: Rendement annuel en kg/ha de la culture du mil de 2003 à 2017

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Rendement du mil	476	364	450	483	451	511	411	529	391	544	413	451	530	537	542

Source : Direction des Statistiques Agricole (DSA) rattachée au Ministère de l'agriculture et de l'élevage du Niger.

3.2. Préparations des données

Avant de produire l'indice de sécheresse agricole ADCI, les données de bases ont subies un ensemble de prétraitements pour qu'elles puissent être bien exploitables. Ainsi, un ensemble de prétraitements ont été appliqués aux données d'input.

3.2.1. Extraction des données MODIS (NDVI et Température de surface jour)

Grâce au module Plugin MODIS conversion Toolkit (MCTK) du logiciel ENVI, nous avons prétraité tous les produits MODIS téléchargés (MOD13A3 pour le NDVI et MOD11C3 pour la température de surface-LST). Le prétraitement des données MODIS se compose de 3 phases : a) extraction des données (NDVI et LST-day) relatives à notre étude à partir du fichier source (HDF) acquis directement sur le net, b) ré-projection de ces données dans le système international WGS84, c) conversion en format (.Tiff) et extraction de notre zone d'étude (zone agricole du Niger) à partir de ces données.

- a) Les données brutes MODIS (MOD13A3 et MOD11C3) acquises sur le site (<http://lpdaac.usgs.gov/>) en format (.HDF), se compose plusieurs couches au sein d'un même fichier (.HDF) dont il faut sélectionner et extraire le produit par lequel l'utilisateur est intéressé. Concernant le produit MOD13A3, contient 11 couches dont l'indice NDVI (monthly NDVI) constitue la première couche. Ainsi, la couche du NDVI a été sélectionnée et extraite parmi ces 11 couches. Pour le produit MOD11C3, il contient 17 couches dont la température de surface jour (LST_Day_CMG) occupe la première couche. Cette dernière a été aussi extraite.
- b) En général, les données MODIS notamment (MOD13A3 et MOD11C3) acquises directement en format (.HDF) sont dans une grille standard avec une projection cartographique native (projection sinusoïdale & Datum inconnu) (White 2018). Par conséquent, une ré-projection s'impose afin de pouvoir exploiter et comparer ces données à d'autres données. Le Niger, ne dispose pas encore de sa propre projection cartographique, et vue que notre zone d'étude porte sur les 1/3 du pays, alors nous avons

Chapitre 3 : Données utilisées et préparations des données

ré-projetés nos données MODIS dans la projection Géographique (Lat/Long) avec le Datum du Système Géodésique Mondial 84, WGS-84 (World Geodesic System 84).

- c) Une fois les données du NDVI et de la température de surface jour extraites et ré-projetées, elles sont exportées en format (.Tiff) dans le but de pouvoir les exploitées dans d'autres logiciels. Par la suite, nous avons extrait notre zone d'étude.

Tous ces prétraitements des données MODIS précités ont été réalisés à travers le Plugin MODIS conversion Toolkit (MCTK) du logiciel ENVI.

Les valeurs des pixels de l'image NDVI MODIS sont comprises entre 0 et 1 donc aucun traitement radiométrique n'a été appliqué à cette donnée. Par contre, pour la température de surface jour (LST_day) MODIS les valeurs des pixels sont en degré kelvin (K), à cet effet une conversion en degré Celsius (°C) a été appliqué à travers l'équation (1) ci-dessous pour chaque mois de la campagne agricole du Niger (juin à octobre) et sur les 15 années prises en compte (2003-2017).

$$\text{Temp (}^{\circ}\text{c)} = \text{Temp (k)} - 273,15$$

Eq. 1

Avec Temp (°c) = Température en degré Celsius (°C)

Temp (K) = Température en degré Kelvin (K)

3.2.2. Extraction des données de précipitations CHIRPS et de l'évapotranspiration réelle

Les données de précipitations CHIRPS et celles de l'évapotranspiration réelle n'ont subies pratiquement aucun prétraitement, elles sont déjà dans la projection Géographique (Lat/Long) avec le Datum du Système Géodésique Mondial 84, WGS-84 (World Geodesic System 84). Les valeurs des pixels des deux images sont en millimètres. Donc, concernant ces données nous avons simplement extrait notre zone d'étude (zone agricole) pour chaque mois de la campagne agricole du Niger (juin à octobre) sur les 15 années prises en compte (2003-2017).

3.2.3. Rééchantillonnage

Les données spatiales utilisées dans le cadre ce travail ne possèdent pas la même résolution spatiale (tableau 8). Du coup, un rééchantillonnage s'impose pour ramener toutes ces données à la même résolution spatiale afin de pouvoir les superposées les unes sur les autres et mieux étudier le phénomène de la sécheresse agricole. Pour mieux exploiter et extraire les bonnes informations à partir de nos données nous avons effectué un rééchantillonnage, c'est-à-dire passer de la basse résolution à la haute résolution spatiale. Le tableau 8 ci-dessous, présente les rééchantillonnage appliqués.

Tableau 8 : Rééchantillonnages des données spatiales utilisées

Type de Données	Résolution spatiale avant rééchantillonnage	Résolution spatiale après rééchantillonnage
Précipitation CHIRPS	5 km	1 km
LST_Day_MODIS	5 km	1 km
NDVI_MODIS	1 km	1 km
Evapotranspiration réelle	1 km	1 km

3.2.4. Regroupement des images (Layers-stack)

Le layer stack des couches est un processus permettant de combiner plusieurs images en une seule image. Pour se faire, les images d'entrée doivent avoir la même résolution spatiale (nombre de lignes et de colonnes) pour pouvoir être layer stacker (Ahmad, 2016). Dans notre cas, les images du NDVI, LST, évapotranspiration réelle et précipitations CHIRPS ont été regroupées sur la base des différents mois d'étude (juin à octobre) et des années prises en compte 2003 à 2017. Ainsi, pour chacun des cas, le résultat obtenu est une image de n bandes dont chaque bande représente le mois et l'année considérés. Par exemple, faire le layer stack des données de précipitations CHIRPS du mois de juin de 2003 à 2017 revient à regrouper les images du mois de juin 2003, juin 2004, juin 2005,....., juin 2017. Et à la fin, l'image résultante est une image composée de tous les mois de juin de 2003 à 2017. Le même principe est appliqué pour les données du NDVI, la température de surface et l'évapotranspiration réelle en fonction de la formule de calcul de l'indice. Le Layer stack est indispensable pour le calcul des différents indicateurs pris en compte. La figure 8 ci-dessous résume l'ensemble des données utilisées ainsi que les prétraitements appliqués.

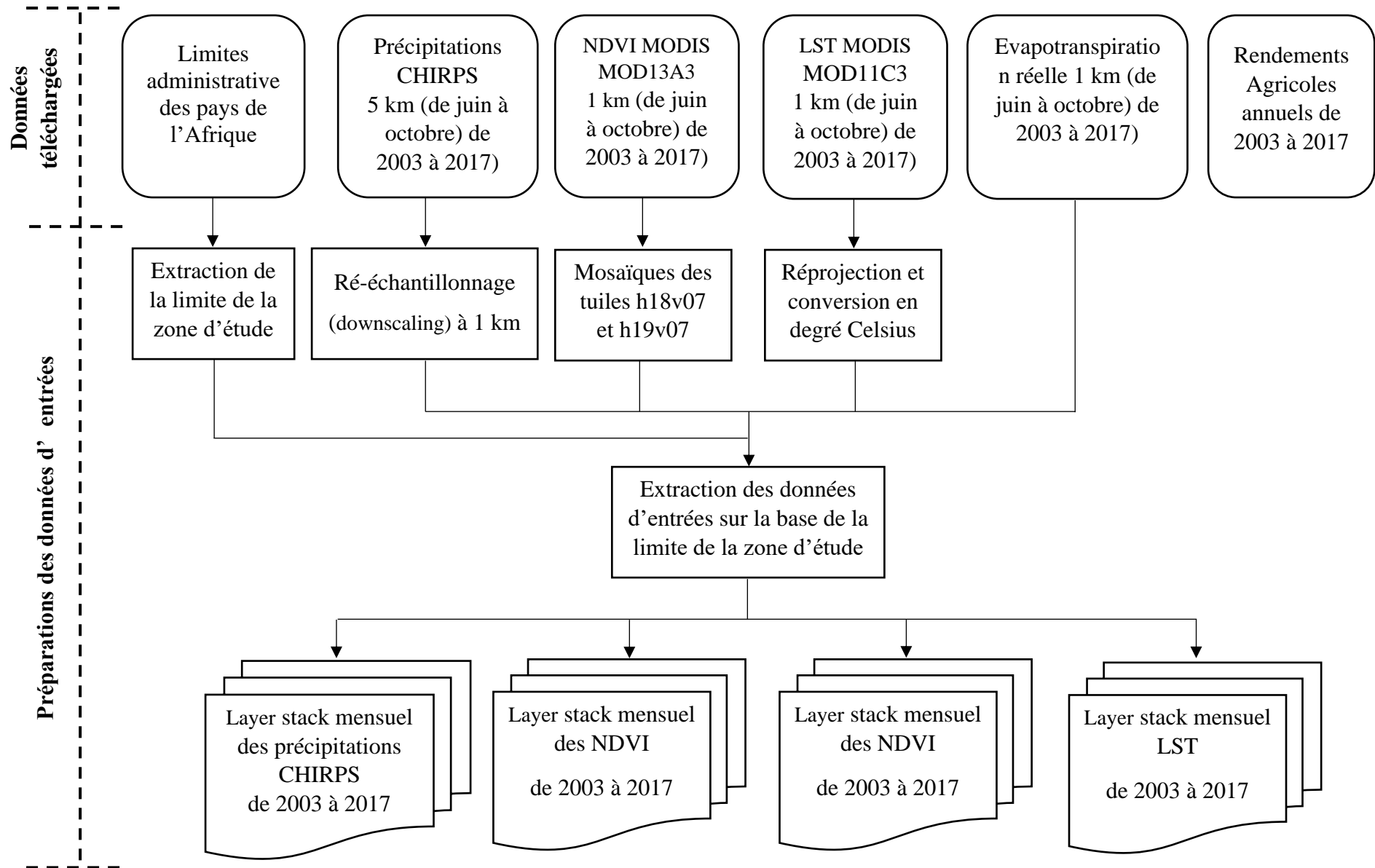


Figure 8 : Organigramme des données utilisées

CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE

L'approche méthodologique adoptée, consiste à intégrer des données de télédétection multi-sources pour proposer un nouvel indice ADCI, qui sera capable de mieux détecter et surveiller la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger, afin de mettre en place un Système d'Alerte Précoce à la Sécheresse Agricole (SAPSA) pour le suivi de ladite sécheresse. Pour calculer ce nouvel indice, nous avons combiné quatre indices de condition (PCI, VCI, TCI et ETCI) à l'aide de la méthode d'analyse en composantes principales (ACP). Le PCI est défini comme un indice qui peut nous fournir des renseignements sur le déficit pluviométrique (Du et al., 2013), le VCI est utilisé pour refléter les changements dans l'état de santé de la végétation (Kogan, 1995), le TCI est utilisé pour détecter le stress de la végétation causé par des températures élevées ou une humidité excessive (Kogan, 1995) et l'ETCI est utilisée pour refléter le déficit en eau des cultures (Senay et al., 2012). La combinaison de ces quatre paramètres clés nous permettra de mieux comprendre et de mieux détecter la sécheresse dans la zone agricole du Niger.

4.1. Principe de calcul de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI)

Dans le cadre de la surveillance de la sécheresse agricole, il est important de tenir en compte les principaux facteurs qui pourraient entraîner cette sécheresse. Par conséquent, cela conduit à la manipulation simultanée de nombreuses informations, avec des risques de redondance des informations. Il existe principalement deux méthodes de combiner plusieurs informations pour générer en output une seule information. La première méthode repose l'utilisation des facteurs de pondération. Celle-ci suppose que, pour chaque paramètre d'entrée pour le calcul de l'indice ADCI doit être multiplier par un facteur de pondération. Cependant, les facteurs de pondérations ne se déterminent pas de manière aléatoire. Une étude poussée sur terrain et au laboratoire est nécessaire afin de déterminer avec exactitude le vrai facteur de pondération qui convient pour chacune des données d'entrées. D'où, ce qui rend l'utilisation de cette méthode complexe et requière également beaucoup de fond pour les recherches mais également du temps. Vue que notre thèse n'était pas financée, cette méthode est aussitôt écartée.

La deuxième méthode quant à elle, porte sur l'analyse en composante principale (ACP). L'analyse en composantes principales (ACP) est un outil extrêmement puissant de compression et de synthèse de l'information, très utile lorsque l'on est en présence d'une somme importante de données quantitatives à traiter et interpréter (Marc, 2003).

C'est une méthode statistique qui traite des observations vectorielles (multivariées) afin d'en extraire des composantes linéaires. Cette idée simple s'est révélée très fructueuse pour le traitement des signaux et des images multi-capteurs dans de nombreux domaines tels que : les

Chapitre 4 : Méthodologie

interférences des ondes radio, les réseaux d'antennes pour les télécommunications, la prise de son, les signaux biomédicaux multi-électrodes, l'imagerie biomédicale, les images de télédétection (optiques et radar) (Zhang and Chen 2002). De manière plus générale, c'est utilisé dans tous les cas où un système de plusieurs capteurs, fournissant des signaux (ou images) cohérents, est à l'écoute d'un ensemble discret de sources que l'on cherche à extraire des observations et que l'on peut, pour des raisons physiques, supposer mutuellement indépendantes statistiquement.

L'objectif de base de l'analyse des principaux composants (APC) est de : réduire la dimension d'un ensemble de données (Richards 2013 ; Deng et al. 2008). Elle entreprend une transformation orthogonale d'un ensemble de variables potentiellement corrélées pour créer un nouvel ensemble de variables avec des composantes principales qui ne sont pas corrélées et qui sont ordonnées en fonction de la quantité de variance exposée dans les données originales (Eastman and Fulk 1993 ; Avena, Ricotta, and Volpe 1999). Comme outil mathématique utile, l'APC est surtout utilisé dans l'analyse exploratoire des données et pour la réalisation de modèles prédictifs. La procédure PCA calcule d'abord la matrice de covariance et les valeurs propres, les vecteurs propres de toutes les données d'entrée, ensuite il obtient le pourcentage de variation totale de l'ensembles de données expliquée par chaque composant, et enfin une série de nouvelles données (appelées canaux propres ou composants) sont calculées en multipliant le vecteur de données d'entrée originales (Lasaponara, 2006).

Dans les applications de télédétection, l'ACP est utilisé depuis longtemps comme outil de compression des données en éliminant les composants mineurs avec des valeurs explicatives éclairées. Bien que le VCI, le TCI, le PCI et le ETCI puissent être utilisées pour surveiller respectivement la sécheresse de la végétation, du sol, de l'aspect climatique et des déficits en eau des cultures, il existe des informations corrélées entre elles pour surveiller la sécheresse globale. En outre, la contribution de VCI, TCI, PCI et ETCI à la surveillance de la sécheresse n'a pas de relation linéaire en différentes saisons. Par exemple, si d'autres conditions sont près de la normale, la végétation peut être plus sensible à l'humidité durant la formation du couvert (apparence des feuilles) et à la température pendant la floraison. Par conséquent, la méthode d'ACP a été utilisé dans cette étude pour obtenir les informations principales de VCI, de TCI, de PCI et ETCI et pour rejeter le signal corrélé d'eux. La transformation des principaux composants a été achevée dans l'environnement du logiciel ArcGis.

Chapitre 4 : Méthodologie

Les VCI, TCI, PCI et ETCI représentent les données d'entrée pour chacun des 5 mois (Juin à octobre) de chaque année (2003 à 2017) en tant que bandes spectrales d'origine et ils ont calculé le même nombre de bandes de composants principaux.

Étant donné qu'en général que la première composante principal (PC1) contient toujours plus de 75 % à 80% d'informations provenant de VCI, TCI PCI et ETCI (Du et al., 2013)., d'où, cette première composante (PC1) est définie comme un nouvel indice de sécheresse agricole, à savoir l'indice de sécheresse synthétisé (SDI) dont nous avons nommé Indice de condition de sécheresse agricole (ADCI, Agricultural Drought Condition Index) (équation 2).

$$ADCI = PC1 (VCI, PCI, TCI, ETCI) \quad \text{Eq.2}$$

Ainsi, sur la base de la méthode ACP, un ensemble de données de ADCI de Juin à octobre de 2003 à 2017 a été produit. En se référant aux systèmes de classification de sécheresse des indices VCI, TCI et PCI (Bhuiyan, Singh, and Kogan 2006 ; Rhee, Im, and Carbone 2010), l'indice ADCI a doit également été classifié suivant le même système (tableau 9).

4.1.1. Indice de condition de végétation (VCI)

VCI est un indice de végétation résultant des valeurs maximales et minimales de NDVI. Le NDVI est calculé à partir de la réflectance spectrale de bande (rouge et proche infrarouge). Cet indice (VCI) a été développé pour contrôler les différences locales de productivité des écosystèmes (Du et al., 2013). Cet index varie entre 0 (très pauvre) et 100 (optimal), tableau 9. Dans le cas d'un mois extrêmement sec, l'état de la végétation est médiocre et l'indice VCI est proche ou égal à 0. Un VCI égal à 50 reflète des conditions de végétation équitables. Dans les conditions optimales de végétation, le VCI est proche de 100 (Jain et al., 2009). Par exemple, pour notre période d'étude (2003-2017), calculer le VCI du mois de juin 2003, équivaut à montrer le comportement de la végétation du mois de juin 2003 par rapport aux 14 autres mois de juin de la période. VCI est obtenu par équation 3. Ainsi, de 2003 à 2017, un ensemble de VCI mensuelle de juin à octobre a été calculé sur la zone agricole du Niger.

$$VCI = \frac{(NDVI)_{\text{current}} - (NDVI)_{\text{min}}}{(NDVI)_{\text{max}} - (NDVI)_{\text{min}}} \times 100 \quad \text{Eq.3}$$

Où, NDVI current est le NDVI du mois considéré, NDVI max est le NDVI maximal pendant la période 2003-2017 et NDVI min est le NDVI minimal pendant la période 2003-2017.

4.1.2. Indice de condition de précipitation (PCI)

PCI est un indice de condition qui fournit des informations sur la sécheresse météorologique (Du et al., 2013). Ainsi, en utilisant les données des précipitations CHIRPS, nous avons calculé l'indice PCI en utilisant le même algorithme que l'indice VCI ci-haut pour refléter le déficit pluviométrique (équation 4). Tout comme l'indice VCI et TCI, le PCI varie également de 0 (défavorable) à 100 (optimal), tableau 9.

$$PCI = \frac{(CHIRPS)_{current} - (CHIRPS)_{min}}{(CHIRPS)_{max} - (CHIRPS)_{min}} \times 100 \quad \text{Eq.4}$$

Où, CHIRPS current est la précipitation du mois considéré, CHIRPS min et CHIRPS max sont respectivement la précipitation minimale et la précipitation maximale pendant la période 2003-2017. Ainsi, tout comme le VCI, un ensemble de PCI mensuelle de juin à octobre pour la période 2003-2017 a été calculé sur la zone agricole du Niger.

4.1.3. Indice de condition de température (TCI)

TCI est développé par (Kogan, 1995). Il a la capacité de détecter les variations du comportement de la végétation dû à un changement relatif de la température (Kogan, 2002). Le TCI est couramment utilisé pour détecter le stress de la végétation causé par des températures élevées ou une humidité excessive.

Cet indice suppose qu'un événement de sécheresse diminuera l'humidité du sol et causera des contraintes thermiques à la surface du sol, et par conséquent une augmentation de la température de surface du sol (LST) au cours de l'année de sécheresse, que le même mois des années normales (Du et al., 2013). Tout comme le VCI, le TCI varie également entre 0 (très pauvre) et 100 (optimal), tableau 9. Les faibles valeurs du TCI représentent des conditions de stress hydrique relatif au sol, tandis que les valeurs élevées du TCI représentent des conditions où il n'y a pas de stress hydrique du sol (Kogan, 1995). Le TCI est obtenu par équation 5.

$$TCI = \frac{(TB)_{max} - (TB)_{current}}{(TB)_{max} - (TB)_{min}} \times 100 \quad \text{Eq.5}$$

Où, TB current est la température de brillance du sol du mois considéré, TB max et TB min représentent respectivement la température de brillance du sol (jour) maximale et la température de brillance du sol minimal pendant la période d'étude 2003-2017. Ainsi, un ensemble de données de l'indice TCI a été calculé sur une période des cinq (5) mois (juin à octobre) de 2003 à 2017.

Dans la formulation de cet indicateur, les valeurs de LST et LST_{max} sont inversés par rapport à NDVI et NDVI_{max} dans la formulation du VCI. La raison est fort simple. Les deux indicateurs

évaluent la situation (NDVI ou LST) par rapport à la situation qui représente les conditions sèches. Dans le cas du NDVI, c'est la valeur minimale qui est indicatrice d'un état de la végétation moins favorable alors que pour la température de surface, ce sont les températures maximales qui sont indicatrices de conditions de stress hydriques. En formulant ainsi les deux indicateurs, leur interprétation se fait de la même manière. Une valeur faible indique un stress et une valeur élevée indique des conditions favorables (Beaudin, 2007).






4.1.4. Indice de condition d'évapotranspiration (ETCI)

L'évapotranspiration réelle (ETr) présente un intérêt important pour l'agriculture, les ressources en eau, car l'évapotranspiration réelle est un indicateur du déficit en eau des cultures (Richard et al., 2007). Ainsi, l'ETCI a été utilisée pour refléter le déficit en eau des cultures dans la zone agricole du Niger. Il est obtenu par équation 6 en utilisant le même algorithme que le TCI. L'indice ETCI varie également entre 0 et 100, correspondant aux changements de l'ET de défavorable (0) à optimal (100), tableau 9.

$$ETCI = \frac{(ETr)_{maxi} - (ETr)_{current}}{(ETr)_{max} - (ETr)_{min}} \times 100 \quad \text{Eq.6}$$

Où, ETr max et ETr min représentent respectivement l'évapotranspiration réelle maximale et l'évapotranspiration réelle minimale au cours de la période 2003-2017. ETr current représente l'évapotranspiration réelle du mois considéré. Ainsi, à l'aide des données de ETr, un ensemble de données l'indice ETCI de juin à octobre a été calculé sur la période 2003-2017.

Tableau 9 : Classification des indices de sécheresses

Drought classes		PCI, VCI, TCI & ETCI	ADCI
Extreme drought		PCI < 10	ADCI < 10
Severe drought		10 ≤ PCI < 20	10 ≤ ADCI < 20
Moderate drought		20 ≤ PCI < 30	20 ≤ ADCI < 30
Light drought		30 ≤ PCI < 40	30 ≤ ADCI < 40
No drought		PCI > 40	ADCI > 40

Afin de pouvoir mieux interpréter les valeurs ainsi que les cartes de l'indice ADCI, les images de de ADCI ont été classifiés en cinq (5) classes comme présenté dans le tableau 9 ci-dessus. Les valeurs de ADCI supérieures à 40 représentent des conditions de non sécheresses, tandis que les valeurs de ADCI inférieure à 40 représentent des conditions de sécheresses qui varient de sécheresse légère à sécheresse extrême.

4.2. Validation de l'indice de condition de sécheresse (ADCI)

Afin d'évaluer la capacité du nouvel indice ADCI dans sa capacité à mieux détecter et surveiller la sécheresse agricole, une série de tests de validation a été mise en place.

Le premier test de validation de ADCI repose sur une comparaison statistique (par analyse de corrélation) et spatiale (par comparaison de carte de sécheresse) avec l'un des indices de sécheresse agricole le plus connu et le plus utilisé à travers le monde, indice de santé de végétation (VHI, Vegetation Condition Index).

Le deuxième test de validation du nouvel indice ADCI va de pair avec le premier test (comparaison statistique et spatiale), mais cette fois-ci avec l'un des indices de sécheresse météorologique le plus connu et le plus utilisé à travers le monde pour mettre en évidence les conditions de sécheresse météorologique.

Le troisième test de validation, quant à lui porte sur une analyse de corrélation annuelle entre le nouvel indice ADCI avec le rendement agricole de la principale culture pluviale du Niger qui est la culture de mil.

L'un des livrables le plus important qui peut être présenter aux décideurs afin de leur permettre de prendre les bonnes décisions au bon moment et les appliquées au bon moment, sont notamment les cartes de sécheresses présentant les zones les plus vulnérables à la sécheresse agricole. Pour cela, à travers des méthodes de superposition par intersection, nous avons déterminer les zones les plus vulnérables à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger pour ensuite nous rendre sur le terrain (sur des zones pilotes) et comprendre réellement pourquoi ces zones présentent une certaine vulnérabilité à ladite sécheresse.

4.2.1. Validation de l'indice ADCI par comparaison avec le VHI

L'un des indices les plus connus et les plus utilisés pour la détection et la surveillance de la sécheresse agricole est l'indice de santé de la végétation (VHI) développé par (F.N. Kogan, 2002). C'est un outil utile, pour surveiller les conditions de la végétation et l'impact du climat sur celle-ci en temps quasi réel (Layelmam, 2015). Cet indice est utilisé pour diverses applications telles que la détection de la sécheresse dans l'agriculture, la durée de la sécheresse, les rendements agricoles et la production agricole pendant la saison de croissance (Unganai & Kogan, 1998). Le VHI est obtenu par la combinaison du NDVI (à travers le VCI) et la température de surface du sol (à travers le TCI) pour offrir de l'information sur l'état de santé de la végétation. Il est obtenu par (équation 7), Kogan (2002). Ainsi, dans cette étude, le VHI a été calculé pendant la même période que le ADCI (juin à octobre et de 2003 à 2017) et par la suite, il a été comparé à l'indice ADCI, afin d'évaluer l'utilisation et la performance de ce nouvel

indice de sécheresse agricole. De ce fait, une analyse de corrélation a été appliquée comme premier test entre les deux indices de 2003 à 2017 en utilisant pour chaque année la moyenne des cinq mois (juin à octobre) de la période de croissance. Puis un deuxième test entre les deux indices par une comparaison spatiale (par carte de sécheresse). En ce qui concerne le deuxième test, il porte sur une comparaison visuelle des deux cartes de sécheresses de ADCI et VHI sur le début de l'apparition de la sécheresse, l'intensité de la sécheresse et enfin les zones affectées par la sécheresse. L'idée de cette validation du nouvel indice ADCI par le VHI est de déterminer comment se présente l'efficacité de l'indice ADCI à détecter et surveiller la sécheresse agricole vis-à-vis de l'indice existant VHI, qui faut-il le rappeler, reste toujours un outil puissant de détection de la sécheresse agricole au Etat Unis.

$$VHI = 0.5 \times VCI + 0.5 \times TCI \quad \text{Eq.7}$$

4.2.2. Validation de l'indice ADCI en utilisant les données du rendement des cultures

La variation du rendement des cultures peut être affectée par de nombreux facteurs, dont entre autres : les insectes, la sécheresse, les maladies et le manque de nutriments. D'après (Du et al., 2013), la sécheresse agricole est l'un des principaux facteurs à l'origine de la perte de rendement des cultures du fait que lorsqu'elle survienne, elle entraîne un assèchement du sol, qui à son tour prive les cultures de bénéficier de la quantité d'eau suffisante pour leur croissance et par conséquent nous assistons à une mauvaise récolte, une baisse de rendement agricole.

Ainsi, une analyse de corrélation entre l'indice de sécheresse par télédétection ADCI et le rendement des cultures est utilisée pour valider le nouvel indice ADCI. Au Niger, la culture du mil est la plus touchée par la sécheresse agricole, et est planté en juin et récolté en octobre (Sivakumar, 1992). Pour évaluer la relation existante entre l'indice de sécheresse agricole ADCI et le rendement du mil, nous avons choisi toute la saison de croissance (juin-octobre) du mil sur une période d'étude de 2003 à 2017.

L'objectif de cette validation en utilisant le rendement agricole est de déterminer la relation statistique qui peut exister entre le nouvel indice de sécheresse agricole et la culture du mil. Par conséquent, une analyse de corrélation a été effectuée entre les deux données.

4.2.3. Validation de l'indice ADCI en utilisant l'indice de précipitation standardisé calculé à l'échelle mensuelle (SPI-1)

Le SPI a été développé par (McKee et al., 1993). Il est utilisé opérationnellement depuis 1994 au Colorado pour le suivi des conditions de sécheresse (Beaudin, 2007). Basé sur un historique

des précipitations à long terme, le SPI a la capacité de quantifier la différence de précipitations d'une période, un déficit ou un excédent, par rapport à la moyenne historique des précipitations de la période (Layelmam, 2015). Il est calculé en ajustant les données historiques de précipitation à une fonction de distribution de probabilité gamma pour une période et un emplacement spécifiques, et en transformant la distribution gamma en une distribution normale avec une moyenne de zéro et un écart type de 1 (Gebrehiwot et al., 2011). Son utilisation à des échelles de temps variables (1, 2, 3, 6 mois, etc.) permet de caractériser la sécheresse de différents types (Beaudin, 2007). Le SPI-1 représente des conditions à court terme ; ses applications sont étroitement liées aux sécheresses liées au climat, à l'humidité à court terme du sol et au stress hydrique des cultures, en particulier pendant la période végétative. Raison pour laquelle, le SPI d'un mois (SPI-1) a été choisi au détriment des autres échelles de temps. Ainsi, le SPI-1 a été calculé à l'aide des données de précipitations CHIRPS pendant la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017 (équation 8), puis une analyse de corrélation avec l'indice ADCI a été effectuée afin de déterminer si le ADCI contient des informations sur la sécheresse météorologique.

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma p} \quad \text{Eq.8}$$

Avec p = Précipitations du mois considéré (mm), P_m = moyenne historique des précipitations de la période (mm) et σp = écart-type historique des précipitations de la période (mm).

Le choix du SPI-1 pour valider l'indice ADCI, nous permettra de mettre en évidence comment le ADCI définit ses zones de sécheresses agricoles par aux conditions météorologiques.

4.3. Processus de détection des zones vulnérables à la sécheresse agricole

Vue l'étendue de la zone d'étude (figure 1), certainement la sécheresse agricole ne se manifeste pas de la même manière ou de la même intensité d'un endroit à l'autre. D'où, l'intérêt de détecter les zones qui sont les plus vulnérables à cette sécheresse afin de les soumettre aux décideurs. Cette information leur permettra d'avoir une organisation plus efficace en matière d'intervention sur le terrain afin de conjuguer leur effort sur les zones les plus critiques. Pour cela, nous avons cherché à identifier les zones qui présentent un état de sécheresse agricole à chaque fois que le Niger vit un épisode de sécheresse. Ainsi, pour déterminer ces zones, nous avons appliqué une superposition de type intersection « **fuzzy overlay** » entre les séries mensuelles des mêmes mois de l'indice ADCI. C'est-à-dire que, pour chacun des 5 mois, on détermine l'intersection par superposition entre les mêmes classes de sécheresse selon la classification de l'indice ADCI donnée dans le tableau 9 ci-haut de 2003 à 2017. Par exemple

Chapitre 4 : Méthodologie

détecter les zones vulnérables à la sécheresse agricole pendant le mois de juin, revient à faire la superposition par intersection du mois de juin 2003, juin 2004 jusqu'au mois de juin 2017 et la même chose pour le mois de juillet, août, septembre et octobre (figure 9). Une fois ces zones vulnérables identifiées, nous avons pris de zones pilotes pour ensuite nous rendre le terrain afin de réaliser des enquêtes terrain non seulement pour valider les résultats générés par le ADCI, mais aussi pour comprendre pourquoi, ces zones souffrent de sécheresse agricole chronique.

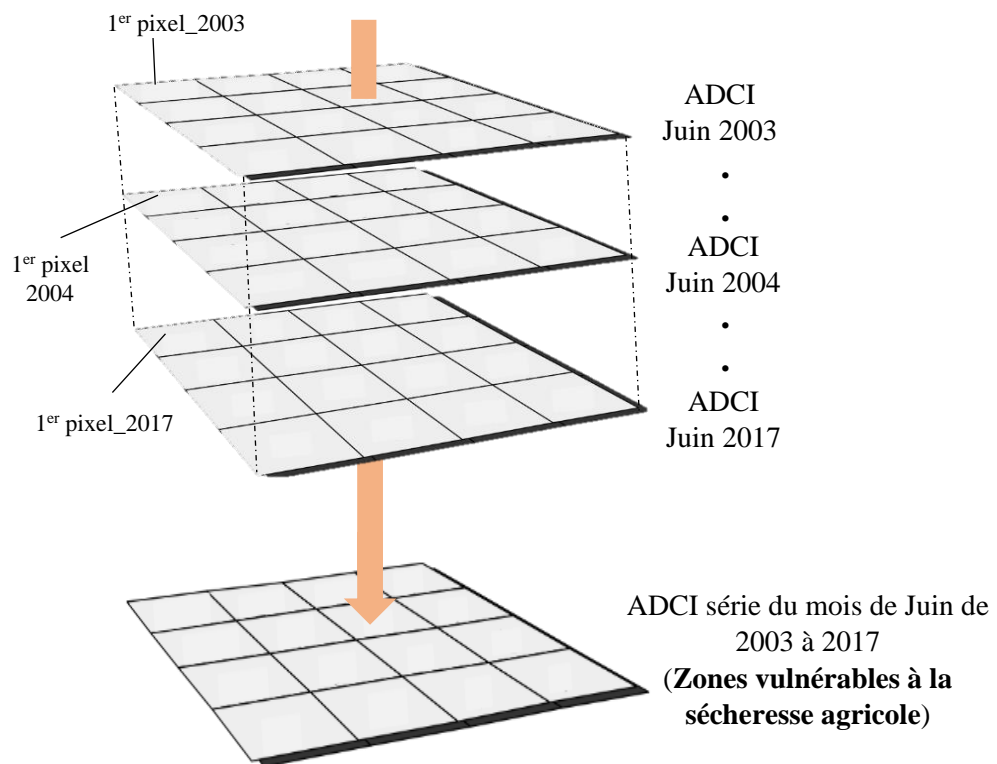


Figure 9 : Processus d'identification des zones vulnérables à la sécheresse agricole à travers la fonction de superposition par intersection

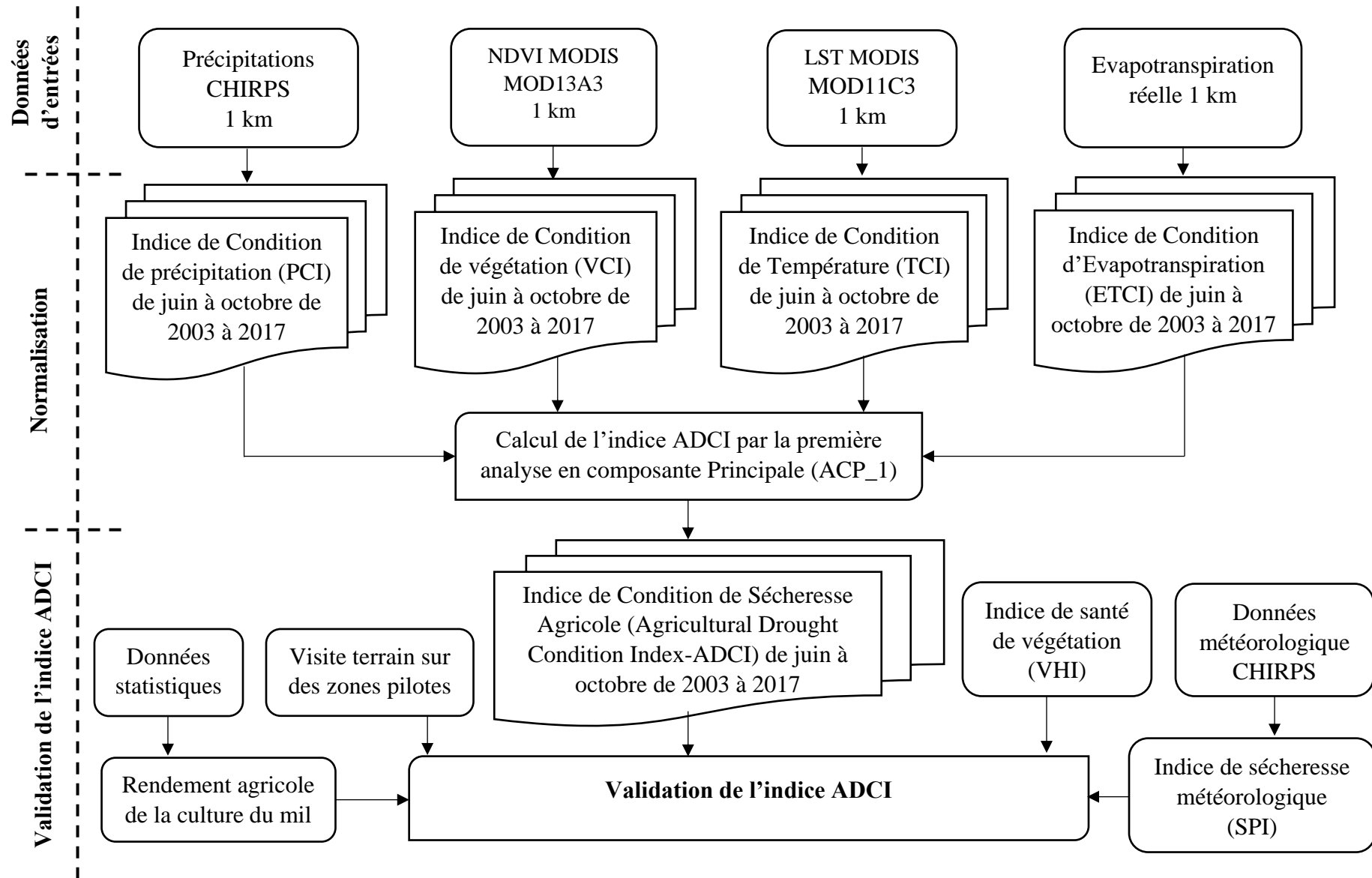


Figure 10 : Chaîne de calcul et de validation de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI)

CHAPITRE 5 :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour mieux organiser et présenter les résultats auxquels nous sommes parvenus dans ce travail de recherche, les résultats sont présentés et directement comparés à des indices existants et/ou à d'autres types de données (comme le rendement agricole).

5.1. Surveillance de la sécheresse agricole de 2003 à 2017 par l'indice ADCI

Dans cette recherche, les conditions de sécheresse agricole de 2003 à 2017 ont été mises en évidence via les résultats de l'indice ADCI. L'idée est d'évaluer l'indice ADCI afin de déterminer s'il est capable de détecter les années de sécheresse dont le Niger a connu pendant notre période d'étude. S'il arrive à mettre en évidence ses années de sécheresse, nous supposons qu'il sera aussi capable de détecter les sécheresses futures.

La figure 11 présente l'évolution des valeurs mensuelles (moyennes des pixels correspondant à chaque mois) et valeurs annuelles (moyennes des valeurs des six mois) de l'indice ADCI pendant la période de la campagne agricole du Niger. Les valeurs mensuelles de ADCI supérieures à 40 représentent des conditions de non sécheresses, tandis que les valeurs mensuelles de ADCI inférieures à 40 représentent des conditions de sécheresses agricoles qui varient de sécheresse légère ($30 \leq \text{ADCI} < 40$) à sécheresse extrême ($\text{ADCI} < 10$). Partant des résultats de la figure 11, nous constatons que l'indice ADCI peut refléter le début, la durée et la gravité de la sécheresse agricole et conformément à l'observation historique de la sécheresse dans la zone agricole du Niger (figure 11).

D'après l'étude de (Michiels et al., 2012) et le rapport de la banque mondial (World Bank, 2011), les grandes années de sécheresse agricole dont le Niger a connu entre 2003 et 2017 sont les années 2004, 2009 et 2011. Ces sécheresses ont engendré, respectivement, un important déficit céréalier de -21%, -12% et -18% sur la production agricole nationale. D'après les résultats de la figure 11, nous pouvons constater que l'indice ADCI a détecté les mêmes années de sécheresses agricoles sévères (2004, 2009 et 2011) ayant conduit à la diminution de la production céréalière nationale ($\text{ADCI} < 40$). Au-delà de ces trois années de sécheresses, le ADCI a identifié également deux autres années de sécheresses agricoles sévères (2013 et 2014) présentant presque les mêmes conditions de sécheresse que les précédentes.

Partant des résultats de la figure 11, pour la majorité des années de 2003 à 2017, le mois de juin présente des fortes conditions de sécheresse. Ce constat permet d'affirmer que presque chaque année le Niger vit un épisode de sécheresse qui, par la suite peut soit s'aggraver (comme en 2004, 2009, 2011, 2013 et 2014) soit redevenir à la normal.

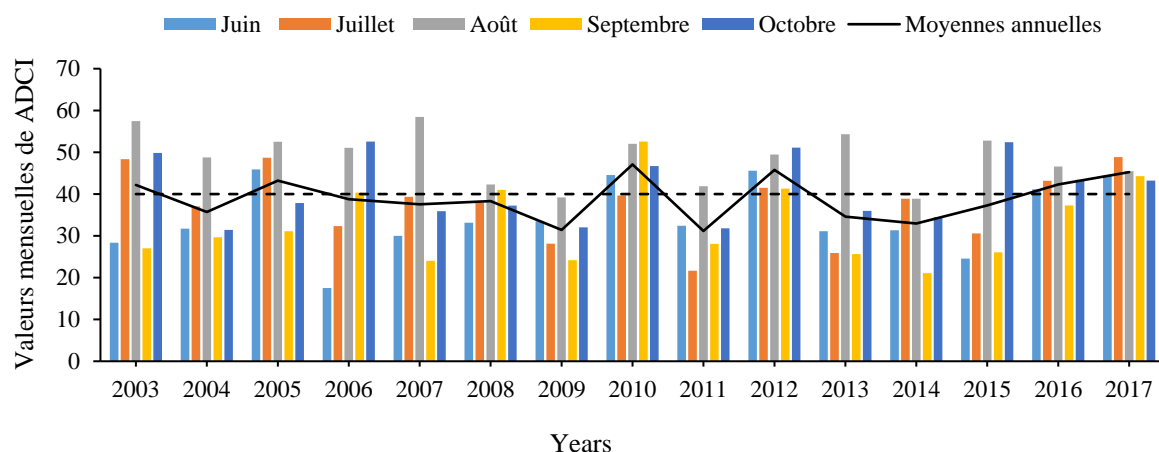


Figure 11 : Évolution des valeurs mensuelles (moyennes des pixels correspondant à chaque mois) et valeurs annuelles (moyennes des valeurs des six mois) de l'ADCI dans la zone agricole du Niger de 2003 à 2017.

5.2. Validation de ADCI à travers une comparaison annuelle avec le VHI de 2003 - 2017

Pour évaluer l'efficacité de l'indice ADCI, un test de validation a été effectué à l'aide d'une comparaison annuelle avec l'indice VHI de 2003 à 2017.

Cette validation se fera sous trois (3) aspects. Premièrement, déterminer la nature de la relation (par test statistique) qui existe entre les deux indices de sécheresse agricole. Deuxièmement, de déterminer la capacité des deux indices à détecter les années de sécheresse agricole, autrement dit, est ce que les deux détectent les mêmes années de sécheresse ou pas. Et troisièmement, de déterminer comment les deux indices définissent l'intensité de la sécheresse agricole.

Le résultat montre que le ADCI et le VHI sont fortement corrélés ($R^2 = 0,62$) au cours de la période de croissance du mil de 2003 à 2017 (figure 12). P-value < 0,0004 entre ADCI et VHI est inférieure à alpha (0,05), donc l'hypothèse H_0 qui stipule que la relation entre le ADCI et le VHI n'est qu'une coïncidence est rejeté. Par conséquent, l'hypothèse H_1 est adopté. Donc la relation entre le ADCI et le VHI n'est pas une coïncidence, les deux variables présentent belle et bien une relation statistiquement significative.

Partant des résultats de la figure 12 ci-dessous, il est à constater que, l'indice ADCI a pu détecter les différentes années de sécheresse (2004, 2009 et 2011) ayant caractérisées le Niger, plus deux autres années de sécheresse en 2013 et 2014 ($ADCI < 40$) tandis que l'indice VHI n'a détecté réellement que la sécheresse de 2009 ($VHI < 40$) puisque que pour l'année 2004 le VHI est supérieure ou égale à 40.

Pour les deux indices, les années les plus sèches ($ADCI \& VHI < 40$) entre 2003 et 2017 était l'année 2009. Les années les plus humides ($ADCI \& VHI > 40$) étaient 2005, 2010, 2012, 2016

et 2017 pour les deux indices (figure 12). En ce qui concerne les années 2004, 2011, 2013 et 2014, l'indice ADCI indique des fortes intensités de sécheresse (valeurs annuelles de ADCI nettement inférieur à 40), tandis que l'indice VHI indique des conditions de non sécheresse ($VHI > 40$). En plus, pour 2004 et 2009, l'indice ADCI met en évidence plus de conditions de sécheresse ($ADCI = 35,75$ pour 2004, $ADCI = 31,40$ pour 2009) par rapport à l'indice VHI ($VHI = 40,11$ pour 2004, $VHI = 33,46$ pour 2009). De 2007 à 2008, la courbe de l'indice ADCI et la courbe du rendement du mil évoluent dans le même sens, tandis que la courbe de l'indice VHI décroît. L'indice ADCI et le rendement du mil changent de façon cohérente, tandis que le VHI se comporte parfois différemment. Certes les deux indices présentent une bonne relation entre eux ($R^2 = 0,62$), néanmoins, en termes de surveillance de la sécheresse agricole, il est à constater que le ADCI permet de mieux détecter les périodes de sécheresse ainsi que l'intensité de sécheresse par rapport à l'indice VHI. Cette différence de résultats entre les deux indices s'explique par le fait que, pour qu'une sécheresse se mette en place, il y'a tout un ensemble de paramètres qui entre en jeu. Notamment deux des paramètres les plus importants sont les précipitations et l'évapotranspiration. Le déficit pluviométrique est le déclencheur numéro 1 de toutes les catégories de sécheresse en générale et de la sécheresse agricole en particulier, ce qui lui donne un rôle primordial dans le processus de mise en place de la sécheresse agricole. Ce déficit entraîne facilement un assèchement progressif du sol forçant les cultures à être prise au piège en carence d'eau. L'évapotranspiration quant à elle, accélère non seulement ce processus d'assèchement du sol conduisant ce dernier à perdre son humidité, mais aussi entraîne la déshydratation rapide des cultures et parfois même leur assèchement qui conduit les cultures dans un état de mauvaise santé donc mauvaise récolte et donc baisse de rendement. En effet, en plus des indicateurs de l'état de santé de végétation (VCI) et de l'humidité du sol (TCI), l'indice ADCI prend en compte ces deux paramètres (précipitation et évapotranspiration) pour détecter les conditions de sécheresse ainsi que l'intensité de celle-ci, contrairement à l'indice VHI qui ne prend pas en compte les informations sur les précipitations (PCI) et l'évapotranspiration (ETCI) et se résume juste au VCI et TCI pour détecter les conditions de sécheresse. Raison pour laquelle le ADCI arrive à mieux surveiller la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger que le VHI.

D'après l'étude de Michiels et al. (2012), les années 2005, 2010 et 2012 étaient des années de grandes crises alimentaires que le Niger a connues. Toutefois, selon nos résultats de la figure 12, nous constatons que ces années ont été favorables aux activités agricoles (valeurs de ADCI et $VHI > 40$). Cela s'explique par le fait que, de 2003 à 2017, les grandes années de sécheresse

que le Niger a connu ont été principalement 2004, 2009 et 2011. Les répercussions de ces années de sécheresse se sont donc manifestées au cours des années suivantes, ce qui explique les crises alimentaires de 2005, 2010 et 2012. L'indice ADCI tout comme le VHI ne mettent pas en évidence les conditions de crises alimentaires, parce qu'ils sont configurés uniquement pour détecter, mesurer l'ampleur et l'intensité de la sécheresse agricole.

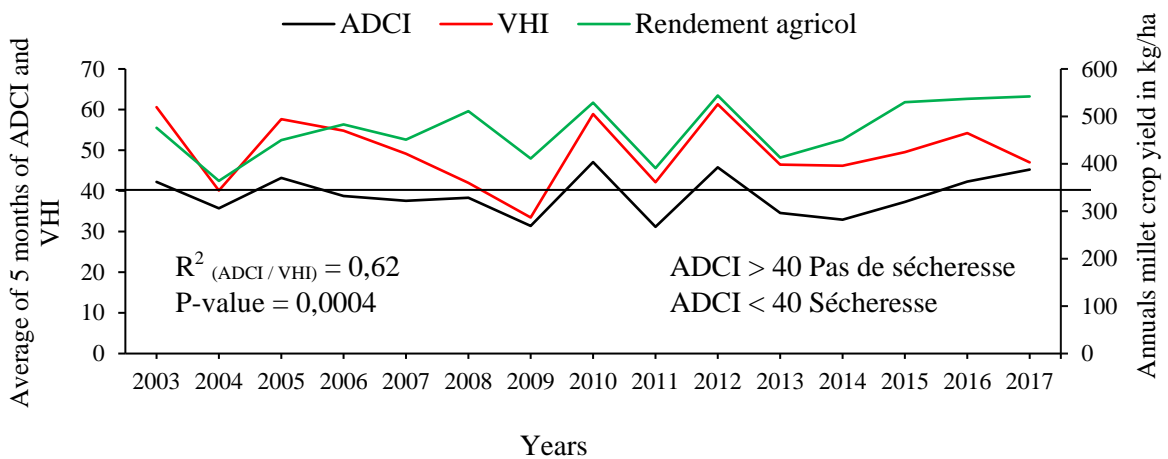


Figure 12 : Evolution annuelle des indices ADCI, VHI et rendement des cultures de millet de 2003 à 2017

4.3. Validation de ADCI par comparaison des cartes de sécheresses avec le VHI

Pour les années de forte sécheresse identifiées par l'indice ADCI (2004, 2009, 2011, 2013 et 2014), une comparaison du début, de l'intensité et des zones affectées par la sécheresse agricole a été effectuée à partir des cartes de ADCI et de VHI. Les cartes des indices des autres années sont placées dans la partie annexe, en raison de leur grande quantité 75 cartes par indice (15 années sur 5 mois), soit au total 450 cartes d'indices.

Les cartes résultantes de l'indice ADCI montrent qu'en 2004, pendant le mois de juin, la sécheresse agricole est apparue principalement dans la partie ouest du Niger caractérisée par des états de sécheresse modérée à sécheresse extrême. Concernant la carte du VHI, en juin 2004, le processus de sécheresse agricole est apparu de la même manière indiquée par la carte de ADCI, mais d'après la carte du VHI, la partie centrale de la zone agricole du Niger n'est pas affectée par la sécheresse alors que l'indice ADCI montre un état de sécheresse modérée figure 13. En juillet 2004, les deux indices indiquent des intensités de sécheresse différentes ainsi que les zones affectées par la sécheresse sont aussi différentes. La carte de l'indice VHI juillet 2004 indique une sécheresse extrême d'une part dans le centre de la zone agricole du Niger et d'autre part, pour le même indice, les parties sud-Ouest et sud-Est ne sont pas touchées par la sécheresse de juillet 2004. Par contre, pour l'indice ADCI, toute la zone d'étude présente

un état de sécheresse légère à sécheresse sévère. Pour les deux indices, la sévérité de la sécheresse a diminué surtout pendant le mois août, probablement à cause de l'arrivée des pluies. De septembre à octobre 2004, l'intensité de la sécheresse s'est aggravée, passant de la sécheresse modérée à la sécheresse extrême pour les deux indices. La carte de l'indice VHI, indique qu'il n'y a pas de sécheresse dans la partie sud en septembre, et la carte de l'ADCI, indique qu'il n'y a pas de sécheresse dans la partie nord en octobre (figure 13).

La sécheresse de 2009 a été plus sévère que celle de 2004. Elle est dominée par une intensité de sécheresse modérée à sécheresse extrême tout au long de la période de croissance du mil (juin à octobre) pour l'indice ADCI et l'indice VHI (figure 13). En effet, selon Michiels et al (2012), l'année 2009 a été caractérisée par des pluies tardives et des sécheresses prolongées qui ont gravement compromis la production agricole et conduit à une grave dégradation des zones agricoles du Niger. Pour l'indice ADCI, la sécheresse agricole a affecté toute la zone d'étude de juin à octobre, tandis que l'indice VHI indique que la zone centrale n'est pas affectée par la sécheresse pendant le mois de juillet et que la zone sud-Ouest et sud-Est ne sont pas également affectées par la sécheresse en août et septembre.

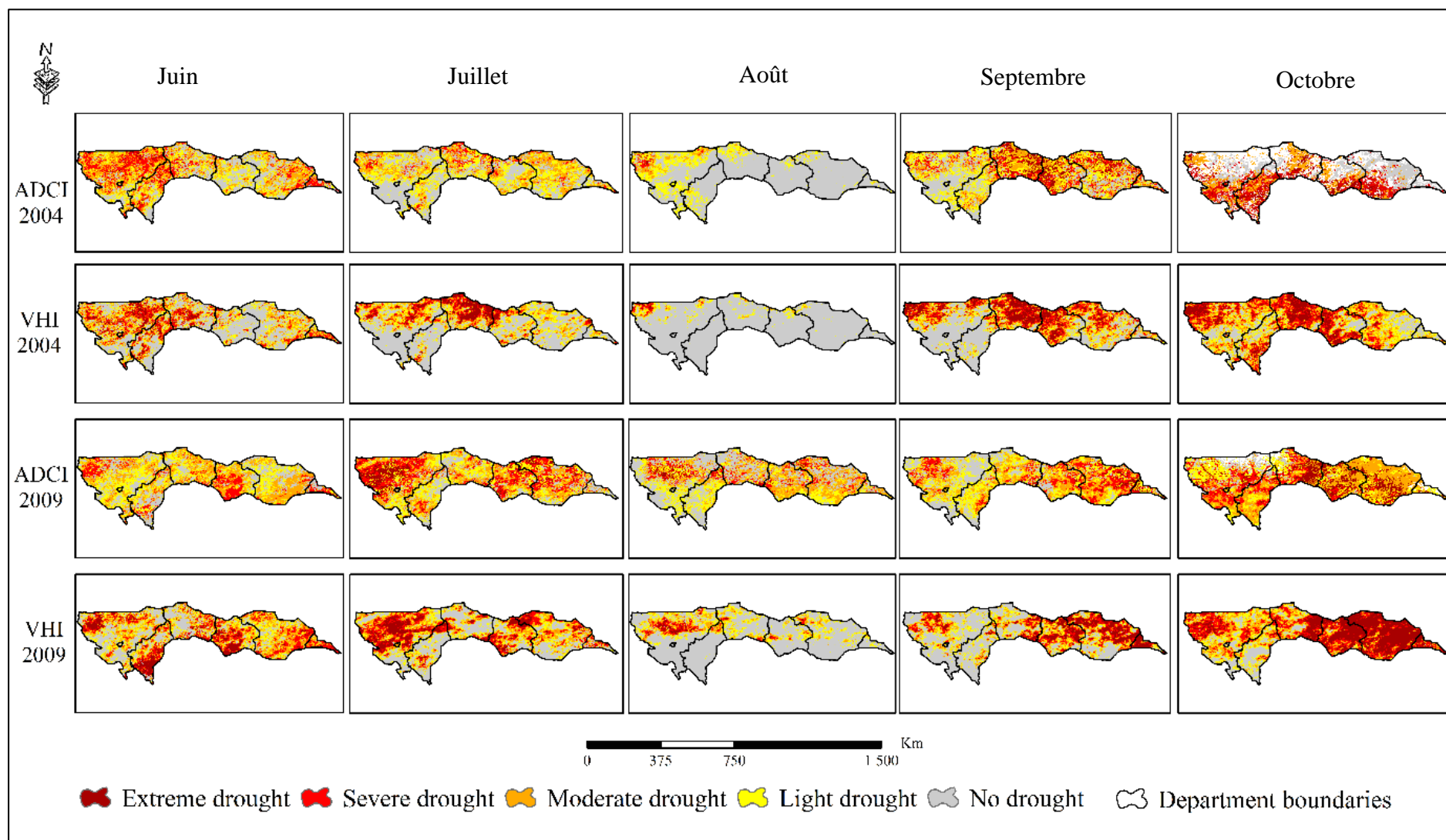


Figure 13 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2004 et 2009

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Pour l'année 2011, les deux indices indiquent que la sécheresse agricole a commencé à partir de la partie Ouest du mois de juin puis s'est rependue vers la partie Est jusqu'au mois d'octobre (figure 14). De juin à octobre 2011, l'intensité de la sécheresse varie selon la région et l'indice. Par exemple, en juin 2011, la partie Est de la zone agricole est dominée par une sécheresse sévère pour l'indice VHI tandis que pour l'indice ADCI, on note une sécheresse modérée. Par contre, en octobre 2011, l'indice ADCI indique une sévère sécheresse dans la partie Est de la zone agricole du Niger, tandis que l'indice VHI indique qu'il n'y a pas de sécheresse (figure 14). Les zones touchées par la sécheresse agricole diffèrent considérablement entre la carte de l'indice ADCI et celle du VHI de juin à octobre 2011. Pour le ADCI, en août 2011, la quasi-totalité de la zone Ouest est touchée par la sécheresse agricole, tandis que pour le VHI, seule une partie de la zone est affectée par la sécheresse. De septembre à octobre 2011, pour le VHI la partie Est n'est pas touchée par la sécheresse, tandis que le ADCI indique plutôt une sécheresse modérée à sécheresse sévère (figure 14).

Pour l'année 2013, la sécheresse agricole a également commencé de la partie Ouest à la partie Est de juin à octobre (figure 14). A partir du mois d'août à octobre 2013, l'intensité de la sécheresse détectée par l'indice ADCI est plus élevée que celle détectée par l'indice VHI. Par exemple, en août 2013, dans la partie nord-ouest de la zone d'étude, l'indice ADCI indique une légère sécheresse, tandis que l'indice VHI indique qu'il n'y a pas de sécheresse. De même, pour septembre 2013 dans la partie ouest, le ADCI montre une sécheresse extrême, tandis que le VHI indique une sécheresse sévère (figure 14). Pour le mois d'août et septembre 2013, les deux indices indiquent différentes zones affectées par la sécheresse agricole, en particulier en août, le VHI n'indique aucune zone touchée par la sécheresse tandis que l'indice ADCI indique une légère sécheresse dans le nord-ouest (figure 14).

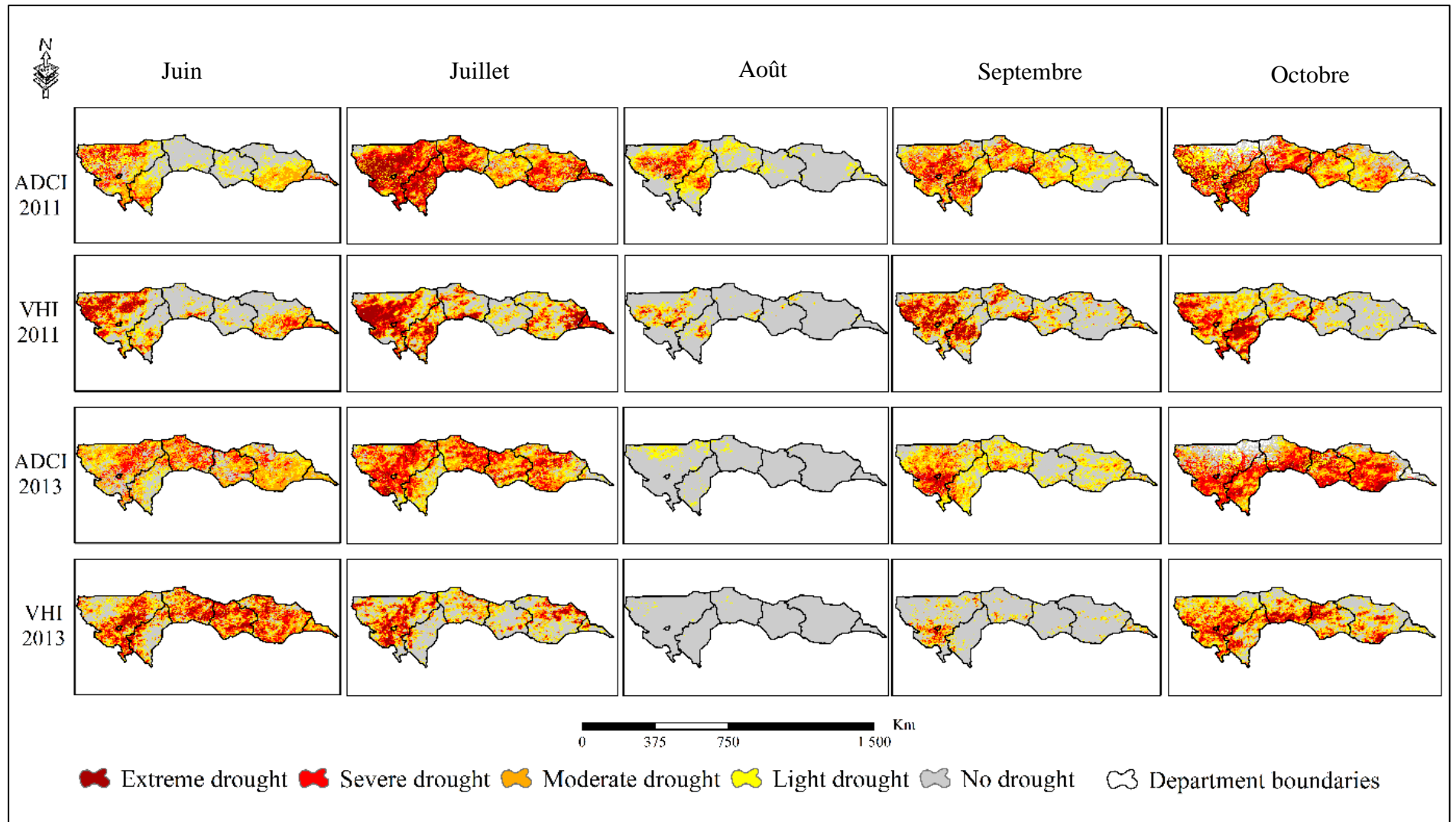


Figure 14 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2011 et 2013

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Pour l'année 2014, contrairement à d'autres années, la sécheresse agricole a commencé d'Est en Ouest. L'intensité de la sécheresse diffère également entre les deux indices. Par exemple, le mois d'octobre 2014 est dominé par une sécheresse sévère à une sécheresse extrême pour le ADCI, contrairement à l'indice VHI (figure 15). Comme dans les cas précédents, les deux indices ne présentent toujours pas les mêmes zones affectées par la sécheresse agricole. Pour l'indice ADCI, les zones affectées par la sécheresse agricole sont plus nombreuses comparativement à l'indice VHI de juin à octobre 2014 (figure 15).

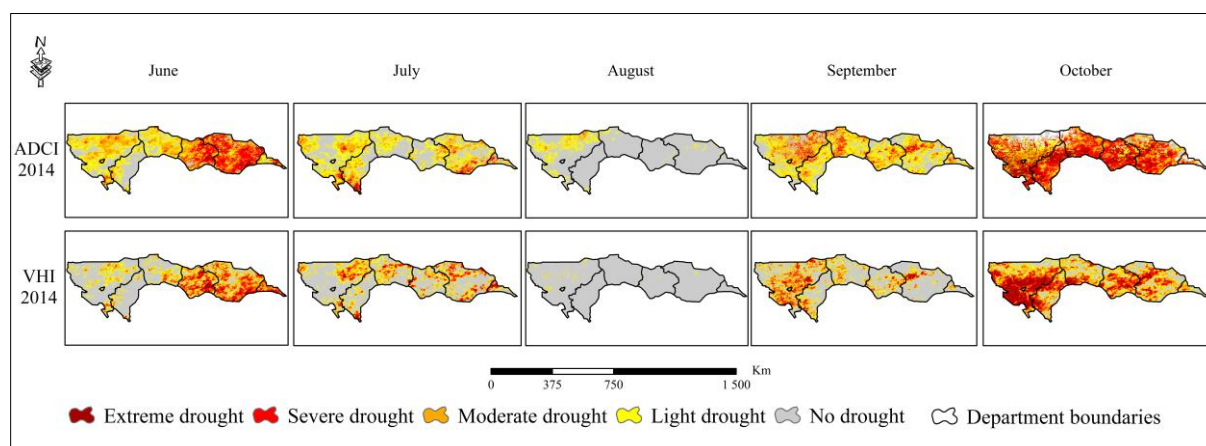


Figure 15 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et VHI pendant la période de croissance du mil en 2014

Dans le cadre de la détection et de la surveillance de la sécheresse agricole, il est très important de disposer des informations relatives aux débuts, à l'intensité et surtout aux zones affectées par ladite sécheresse. A la fin de cette comparaison entre le ADCI et le VHI, nous faisons les constats suivants :

- En général pour les deux indices, la sécheresse agricole commence de la partie Ouest puis se répand progressivement vers la partie centrale jusqu'à la partie Est de la zone agricole du Niger ;
- L'événement de sécheresse peut durer tout au long de la période de croissance de la culture du mil c'est-à-dire de juin à octobre ;
- La partie centrale et la partie Ouest de la zone agricole du Niger sont très sensibles à la sécheresse agricole ;
- Dans la plupart des cas, l'intensité de la sécheresse agricole présentée par les cartes de l'indice ADCI sont plus élevée que celles rapportées par les cartes de l'indice VHI ;

- Les régions affectées par la sécheresse agricole au cours de la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017 sont mises en évidence par les cartes de l'indice ADCI que par les cartes de l'indice VHI.

Cette différence de résultats entre les deux indices peut s'expliquer de la manière suivante. Comme nous l'avons vu précédemment, les deux indices ADCI et VHI ne disposent pas les mêmes données d'entrées pour leur calcul à savoir : VCI, TCI, PCI et ETCI pour l'indice ADCI et uniquement le VCI et le TCI pour l'indice VHI. Il est donc évident que, pendant la période de cycle de croissance de la culture du mil (juin à octobre), les quatre paramètres utilisés pour le calcul de ADCI ne présentent pas le même apport. Par exemple, en début de la saison pluvieuse, les précipitations sont irrégulières, voir même absentes ou en retard (PCI), les fortes températures entraînent sans nul doute des fortes évapotranspirations (ETCI), dans ces conditions l'humidité du sol est trop faible (TCI), l'état de santé de végétation n'est pas vraiment au point (VCI). Cette situation varie également lorsque nous sommes en milieu de la saison pluvieuse ou à la fin de celle-ci. Par conséquent, les indicateurs n'ont pas le même apport en termes d'information pour le calcul de ADCI dépendamment du mois considéré (juin à octobre). Certainement, en fonction du mois et du cycle de croissance de la culture du mil, un indicateur prédomine sur les autres et donc fixe ses règles en ce qui concerne le résultat final de l'indice ADCI ou de l'indice VHI. Par exemple prenons le cas du PCI, il est clair qu'en début de saison pluvieuse, les précipitations sont généralement faibles. Donc le ADCI prend en compte les informations issues de VCI, TCI, ETCI et du faible apport de PCI pour définir les conditions de sécheresse. Il est clair qu'aussi, en milieu de saison pluvieuse où les précipitations atteignent leur pic, l'apport du PCI pour le calcul de ADCI sera supérieur à l'apport de VCI, TCI ou ETCI. Et à la fin de cette saison pluvieuse l'apport du PCI redevient faible également. En conséquence, le ADCI bénéficie de quatre sources d'apports d'informations pour détecter et surveiller la sécheresse agricole. Contrairement à l'indice VHI qui ne bénéficie que de deux apports (VCI et TCI). Ce constat permet d'expliquer pourquoi le ADCI arrive à mieux mettre en évidence les zones affectées par la sécheresse agricole ainsi que l'intensité de celle-ci par rapport au VHI qui minimise les conditions de sécheresses.

4.4. Validation de ADCI en utilisant le rendement agricole de 2003 à 2017

Une troisième évaluation de l'indice ADCI a été effectuée en utilisant le rendement de la culture du mil. Dans cette section, une analyse de corrélation (à travers les diagrammes de dispersion) a été effectuée entre les indices ADCI, VHI et les données annuelles du rendement du mil pendant la période de son cycle phénologique (juin à octobre) sur les 15 années d'étude (2003-

2017). L'objectif de ce test de corrélation est de déterminer lequel de ces deux indices présentera une meilleure corrélation avec le rendement de la culture du mil d'une part, et d'autre part mettre en évidence l'intensité de relation qui existe entre le ADCI et le rendement de la culture du mil. Pendant les mois de juin et juillet, les deux indices présentent un nuage de points éparpillés, couvrant une grande surface et qui ne se situent pas sur la même diagonale, ce qui explique les faibles coefficients de détermination obtenus entre le rendement du mil et l'indice ADCI ($R^2 = 0,11$ pour le mois de juin et $R^2 = 0,2$ pour le mois de juillet) d'une part, et d'autre part, entre le rendement du mil et l'indice VHI ($R^2 = 0,09$ pour le mois de juin et $R^2 = 0,01$ pour le mois de juillet), figure 16a et figure 16b. Ces faibles résultats de corrélations obtenus entre ces deux mois semblent logiques et s'expliquent par le fait que les mois de juin et juillet coïncident généralement avec le début de la croissance de la culture du mil.

Pendant les mois d'août, septembre et octobre, le ADCI et le VHI présentent des corrélations positives avec le rendement du mil. Cependant, il est à noter que la corrélation entre le ADCI et le rendement du mil ($R^2 = 0,25$ en août, $R^2 = 0,42$ en septembre et $R^2 = 0,58$ en octobre) est nettement supérieure à la corrélation entre le VHI et le rendement du mil ($R^2 = 0,16$ en août, $R^2 = 0,26$ en septembre et $R^2 = 0,39$ en octobre) figure 16. En ce qui concerne les mois de juin, juillet et août, c'est tout à fait logique que les relations entre le ADCI et le rendement du mil soient faibles du moment que pour obtenir un rendement il faut attendre la récolte qui correspondent aux mois de septembre et octobre en fonction des localités de la zone agricole du Niger. Raison pour laquelle, pendant nous constatons une croissance du coefficient de détermination entre les deux variables à partir du mois de septembre à octobre.

A la fin de cette évaluation et comparaison, l'ADCI montre une meilleure corrélation avec le rendement du mil pendant la période du cycle phénologique de la culture du mil par rapport à l'indice VHI. Cette évaluation a montré que le nouvel indice ADCI peut refléter également l'influence de la sécheresse sur l'agriculture. Il s'agit d'un indice de sécheresse optimal basé sur la télédétection qui peut être utilisé pour surveiller l'état de sécheresse dans l'agriculture.

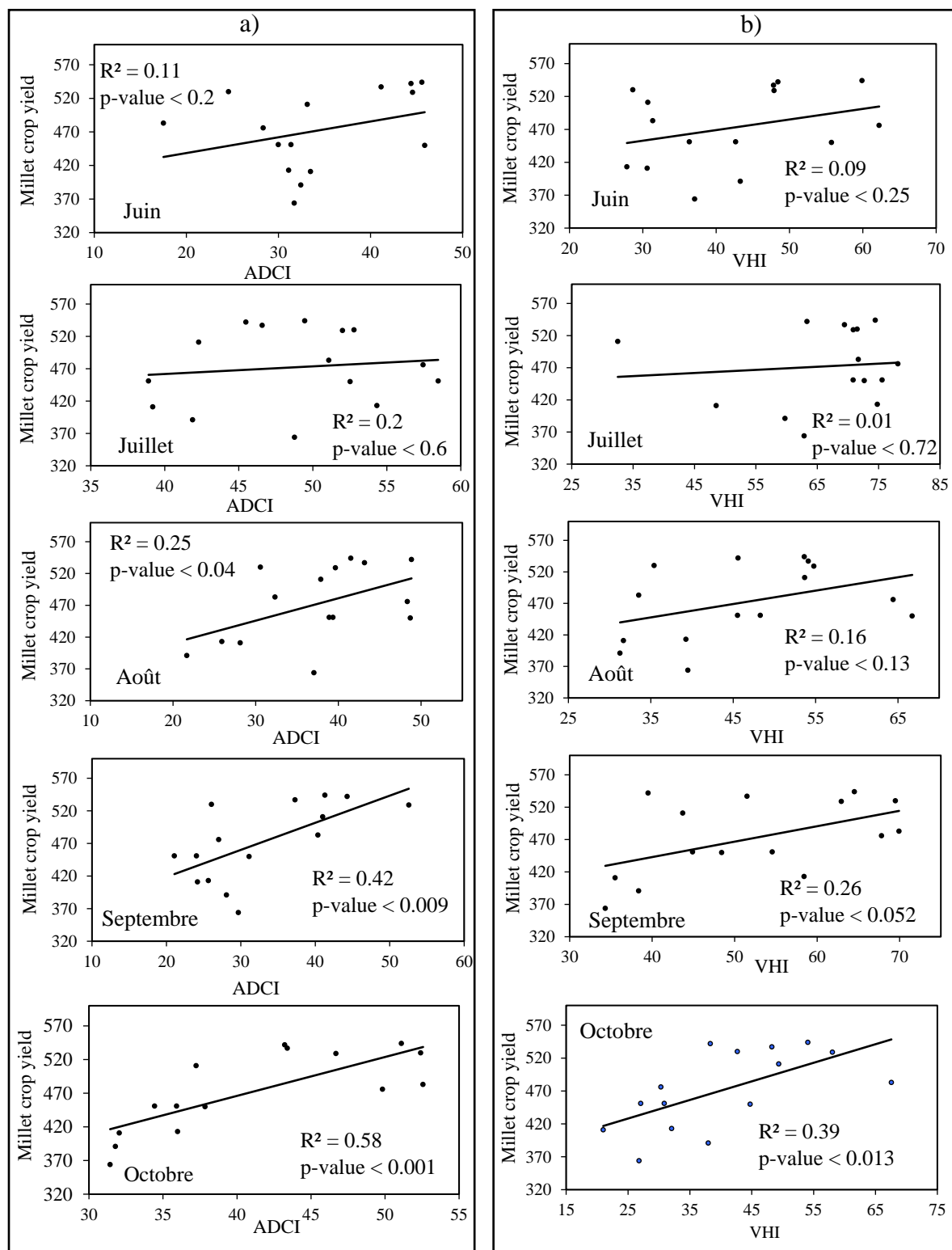


Figure 16 : (a) Diagramme de dispersion entre le ADCI & le rendement du mil et (b) diagramme de dispersion entre le VHI & le rendement du mil pendant la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017.

4.5. Validation de ADCI par comparaison des cartes de sécheresses avec le SPI-1

L'objectif de cette comparaison entre l'indice ADCI et l'indice de précipitation standardisé (SPI) calculé à l'échelle mensuelle (SPI-1) est de déterminer si les zones de sécheresses météorologiques identifiées par le SPI-1 correspondent en partie ou en totalité aux zones de sécheresses agricoles identifiées par le ADCI. Ce qui permet d'évaluer la capacité du nouvel indice ADCI à contenir des informations sur les précipitations, donc la sécheresse météorologique. Néanmoins comme dans les cas précédents, cette comparaison ne porte que sur les années de grande sécheresse dont le Niger a connu.

D'après la figure 17 durant la période de juin à octobre de l'année 2004, les deux indices ont montré que les sécheresses météorologique et agricole ont touchés la partie Ouest puis se propagent progressivement vers la partie Est de la zone agricole du Niger. De même, nous constatons que pour les mois de juin, juillet, août et septembre 2004, les zones de sécheresses agricoles (S.A) identifiées par l'indice ADCI correspondent en partie aux mêmes zones de sécheresse météorologique (S.M) identifiées par l'indice SPI-1 mais à des intensités de sécheresse différentes. Par exemple, pour les mois de juin et août, dans la partie nord-ouest de la zone agricole du Niger le SPI-1 présente une sécheresse modérée (juin) et sévère (août) tandis que le ADCI présente une sécheresse sévère. Pour le mois de septembre, le SPI-1 et le ADCI présentent des sécheresses sévères dans la partie centrale et la partie Est de la zone d'étude.

En ce qui concerne le mois d'octobre 2004, les deux indices sont en déphasage. Pour le SPI, toute la zone d'étude est dominée par une sécheresse légère tandis que pour le ADCI a montré des cas de sécheresse modérée à sécheresse extrême.

Pour l'année 2009, les deux indices indiquent des fortes intensités de sécheresses principalement dominées par une sécheresses agricoles sévères pour le ADCI de juin à octobre et une sécheresses météorologique légère pour le SPI de juin à octobre, sauf pour le mois d'août qui présente des cas de S.M extrême (figure 17). Également pour l'année 2009, en majorité les zones de S.A identifiées par le ADCI correspondent aussi aux zones de S.M mises en évidence par le SPI-1. Il s'agit particulièrement de la partie Nord-Ouest et la partie Est de la zone d'étude mais toujours avec des intensités de sécheresse différentes.

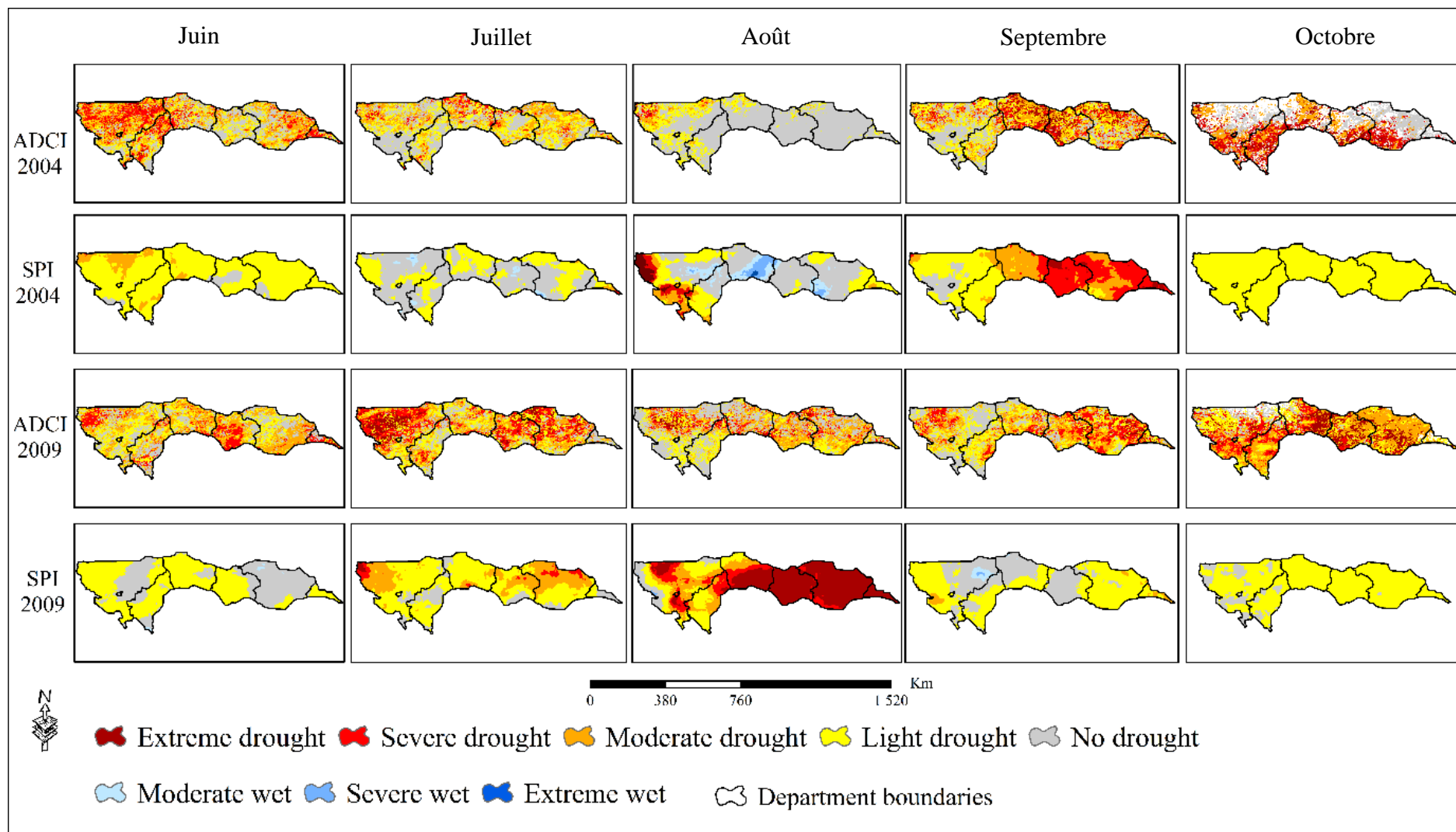


Figure 17 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2004 et 2009

Chapitre 5 : Résultats et discussions

D'après la figure 18, pour l'année 2011, les deux indices indiquent également que les sécheresses ont commencé de la partie Ouest puis s'étaient répandue vers la partie Est de la zone d'étude. En juin et août 2011 dans la partie ouest de la zone agricole du Niger, les deux indices (ADCI et SPI-1) ont identifié un état de sécheresse météorologique (légère à modérée) et sécheresse agricole (légère à sévère). Pour le mois de juillet 2011, la sécheresse agricole exprimé par le ADCI dans la bande ouest de la zone d'étude s'explique par la forte S.M identifié par le SPI-1. En ce qui concerne les mois de septembre et octobre 2011, la zone d'étude est dominée par une S.A sévère et une S.M légère (figure 18).

Pour l'année 2013, la majorité des zones affectées par la S.A mises en évidence par le ADCI correspondent en partie aux zones de S.M identifiées par le SPI-1 particulièrement pendant les mois de juin à septembre 2013 (figure 18). En août 2013, on constate que le ADCI montre un état de non S.A sur la quasi-totalité de la zone agricole du Niger. Ce constat se comprend mieux en lisant la carte de l'indice SPI-1 du mois d'août 2013 qui montre des conditions favorables avec des cas d'humidité sévère à extrême (figure 18). En octobre 2013, la carte du SPI-1 indique un état de non S.M dans la partie ouest de la zone agricole du Niger tandis que l'indice ADCI indique des cas de S.A sévère dans la même partie. Cela s'explique par le fait que l'indice ADCI ne se base pas uniquement sur les précipitations pour expliquer la S.A mais plutôt sur d'autres indices comme le VCI, le TCI et le ETCl.

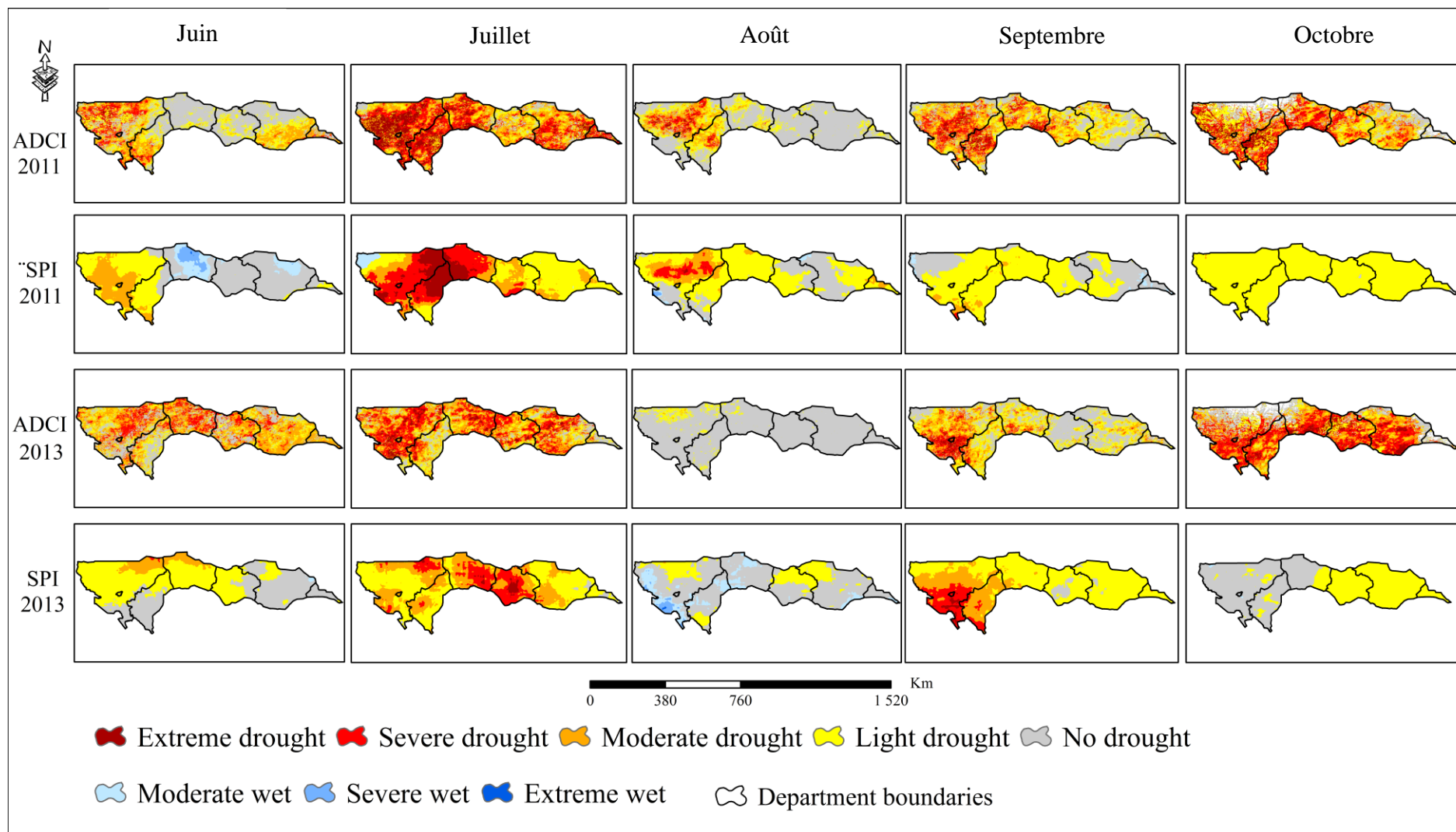


Figure 18 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2011 et 2013

Pour l'année 2014, le constat reste le même entre les deux indices tout comme pour les autres années. D'après la figure 19, en juin 2014, le ADCI a identifié des cas de S.A sévère dans toute la partie Est de la zone d'étude, ce qui est probablement dû à un déficit de précipitation enregistré durant le même mois (S.M modérée). Pendant les mois de juillet et août 2014, nous constatons que dans la partie centrale de la zone d'étude, les deux indices (ADCI et SPI-1) montrent des états de non sécheresse. Par contre en octobre 2014, on note l'effet inverse de sécheresse. SPI-1 indique un état de S.M légère dans toute la zone d'étude alors que pour le ADCI on note plutôt une dominance des cas de S.A sévère à S.A extrême.

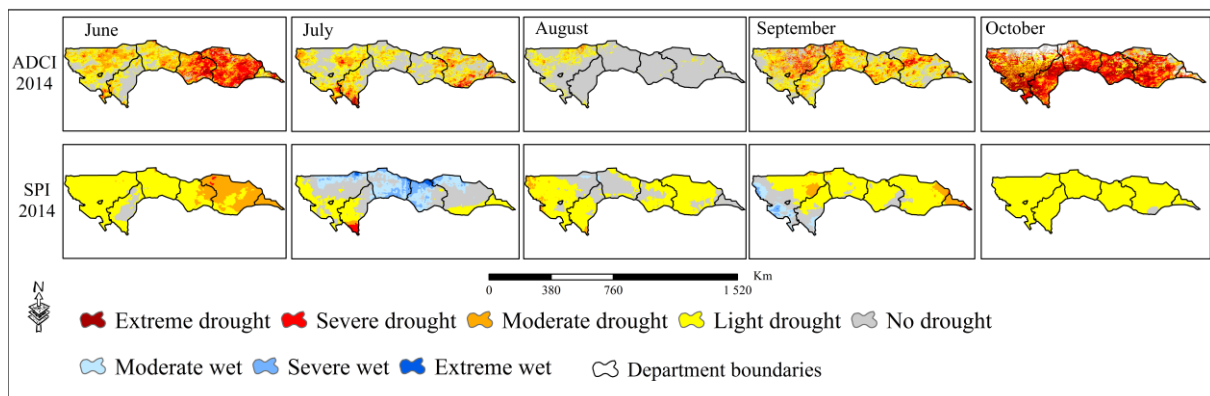


Figure 19 : Cartes de sécheresse des indices ADCI et SPI pendant la période de croissance du mil en 2014

En résumé de cette comparaison des cartes de sécheresses entre le ADCI (sécheresse agricole) et le SPI-1 (sécheresse météorologique), dans la majorité des cas, les zones de sécheresses agricoles identifiées par l'indice ADCI correspondent tantôt en partie et tantôt en totalité aux zones de sécheresses météorologiques identifiées par l'indice SPI-1. Ce qui permet donc, d'affirmer que l'indice ADCI prend en compte l'effet de la sécheresse météorologique pour identifier les zones de sécheresse agricole, contrairement à l'indice existant VHI qui ne prend pas en considération des informations directes sur les précipitations et/ou de l'évapotranspiration des cultures.

Les différences de corrélation de zones affectées par les sécheresses obtenues entre les deux indices (ADCI et SPI-1) pour les quelques localités s'expliquent par le fait que, le nouvel indice ADCI ne se base pas uniquement sur les précipitations (à travers l'indice de condition de précipitation, PCI) pour identifier la sécheresse agricole mais également prend en compte des informations issues des indices VCI, TCI et ETCI. Ce qui est donc logique de constater cette différence.

Le SPI-1 et le PCI sont des indicateurs de sécheresse météorologique mais dont leurs calculs respectifs sont totalement différents (voir section méthodologie). Néanmoins, le SPI est beaucoup plus spécialisé pour identifier cette catégorie de sécheresse. Le but de cette validation de l'indice ADCI par comparaison avec les cartes de SPI-1 est de montrer que le nouvel ADCI contient des informations liées aux précipitations qui jouent un rôle primordial pour ne pas dire la cause principale du déclenchement du processus de la sécheresse agricole. Les résultats issus de cette comparaison confirment une fois de plus l'efficacité du nouvel indice ADCI.

4.6 Validation de l'indice ADCI en utilisant une analyse de corrélation avec le SPI-1

Après avoir comparé spatialement les cartes de sécheresse agricole de ADCI aux cartes de sécheresse météorologique du SPI-1, il sera aussi important de déterminer statistiquement les types de relation existante entre les deux indices. Ce qui nous conduit à établir une série de tests de corrélation le ADCI et le SPI-1 pour chacun des cinq mois (juin-Octobre) de 2003 à 2017. Les résultats montrent que l'indice ADCI et le SPI-1 sont fortement corrélés au cours de la période de croissance du mil (figure 20) avec un p-value $< 0,004$. De juin à juillet le coefficient de détermination entre les deux indices est passé de $R^2 = 0,57$ à $R^2 = 0,73$ puis chute à $R^2 = 0,47$ en août et $R^2 = 0,33$ en septembre pour ensuite rehausser à $R^2 = 0,55$ pour le mois d'octobre. Ces résultats de corrélation peuvent s'expliquer par le fait que, étant donné qu'au Niger, la saison pluvieuse commence généralement du mois de juin pour prendre fin au mois de septembre-octobre, nous pouvons affirmer que d'une manière globale de 2003 à 2017, les précipitations ont commencé très tôt puis ont connues des irrégularités vers le milieu de la saison mais qui redeviennent à la normale à la fin de ladite saison. Ce constat se dégage également sur les cartes de SPI-1 qui montrent qu'en général, les mois de juin et octobre qui correspondent respectivement au début et à la fin de la saison pluvieuse ne présentent pas des cas de forte sécheresse météorologique. Les résultats de cette analyse de corrélation permettent de confirmer que le nouvel ADCI prend en compte des informations directes sur les précipitations pour mettre en évidence les zones de sécheresse agricole. Cela prouve que le nouvel indice de sécheresse, ADCI peut donc surveiller favorablement la sécheresse météorologique et aussi l'influence de celle-ci sur l'agriculture.

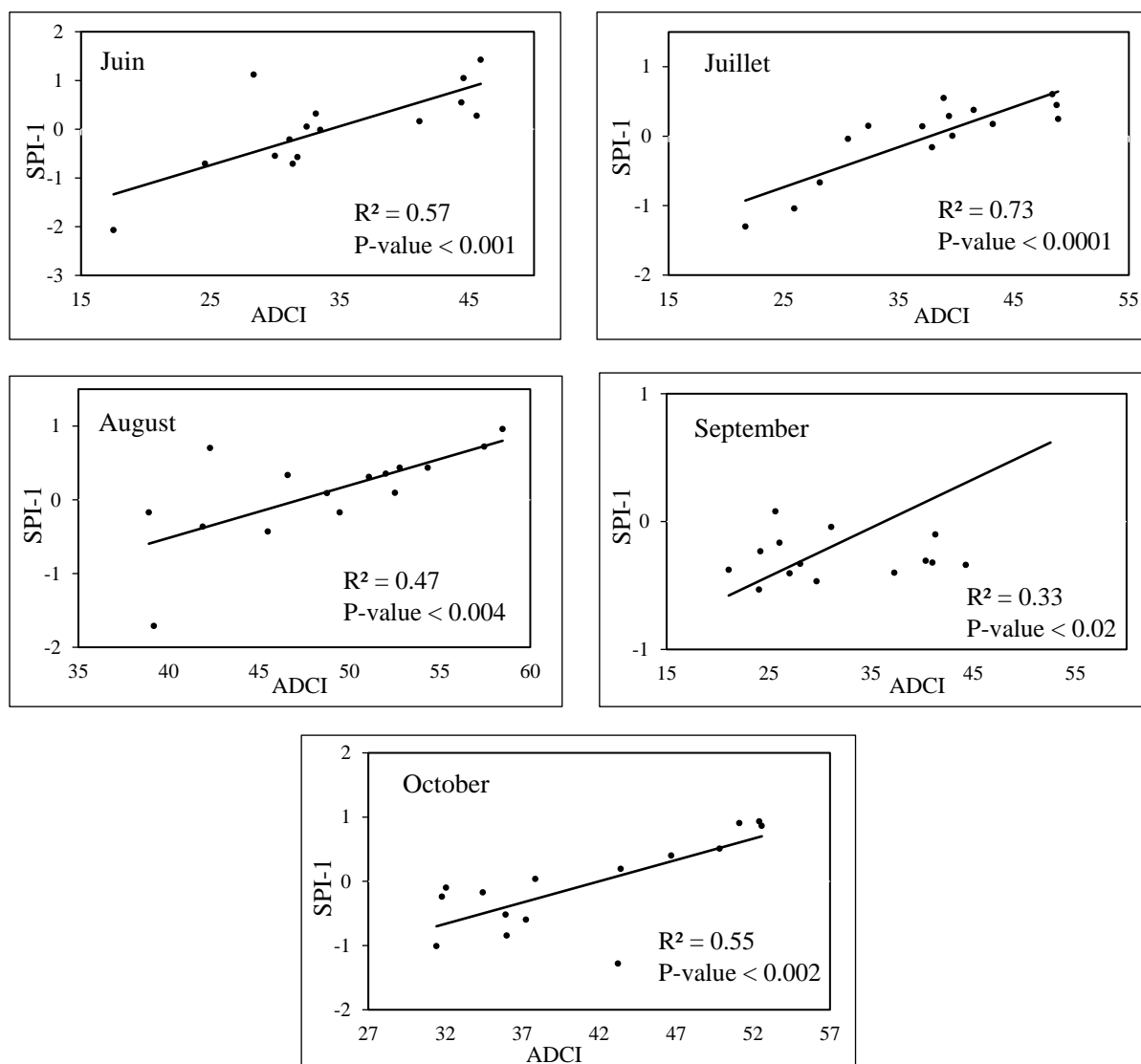


Figure 20 : Diagramme de dispersion et valeurs du coefficient de corrélation R entre l'indice ADCI et le SPI-1 pendant la période de croissance du mil (juin-octobre) de 2003 à 2017

4.7. Détections des zones vulnérables à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger à travers l'indice ADCI

Vue l'étendue de la zone d'étude (figure 1), certainement la sécheresse agricole ne se manifeste pas de la même manière ou de la même intensité d'un endroit à l'autre. D'où l'intérêt de détecter les zones qui sont les plus vulnérables à cette sécheresse afin de les soumettre aux décideurs. Cette information leur permettra d'avoir une organisation plus efficace en matière d'intervention sur le terrain en cas de sécheresse agricole afin de conjuguer leur effort sur les zones les plus critiques.

Pour cela, nous avons jugé utile de déterminer les différentes zones qui présentent toujours des cas de sécheresse agricole à chaque fois que le Niger vit un épisode de sécheresse. Après l'obtention des résultats de la superposition par intersection « **fuzzy overlay** » des différentes

Chapitre 5 : Résultats et discussions

séries mensuelles de 2003 à 2017, l'analyse de la figure 21 permet de constater que, sur les 5 mois (juin à octobre) de la campagne agricole du Niger, il existe : au moins 4 mois (juin, juillet, août, sept) pendant lesquels la sécheresse agricole modérée s'est manifestée dans la région de Tillabéry (situé au nord-ouest de la zone d'étude), et au moins 3 mois (juillet, août, septembre) pendant lesquelles la sécheresse agricole sévère s'est manifestée dans la région de Maradi (situé au centre) et la région de Zinder (situé à l'est). Ce qui nous permet d'affirmer que les zones les plus vulnérable à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger sont : la région de Maradi, la région de Tillabéry et la région de Zinder. Ces localités ont été affectés par la sécheresse agricole au moins dans chacun des trois (3) mois de chaque année de 2003 à 2017. Ce qui fait d'elles donc, des zones très vulnérables à la sécheresse agricole. Ces zones détectées seront d'une importance capitale non seulement pour cette étude mais aussi pour les autorités du Niger en charge de la question environnementale. Des études poussées doivent être menées dans ces localités afin de comprendre la cause principale des graves sécheresses chroniques que connaissent ces zones. Cela permettra de prendre des mesures avant, pendant et après les sécheresses futures pour minimiser les impacts de cette dernière.

Ainsi, grâce à ce nouvel indice, les autorités du Niger peuvent être tenue au courant de l'évolution des conditions de sécheresse agricole tant dans le temps et dans l'espace, ce qui reste une information capitale et indispensable pour l'atténuation des conséquences de la sécheresse agricole.

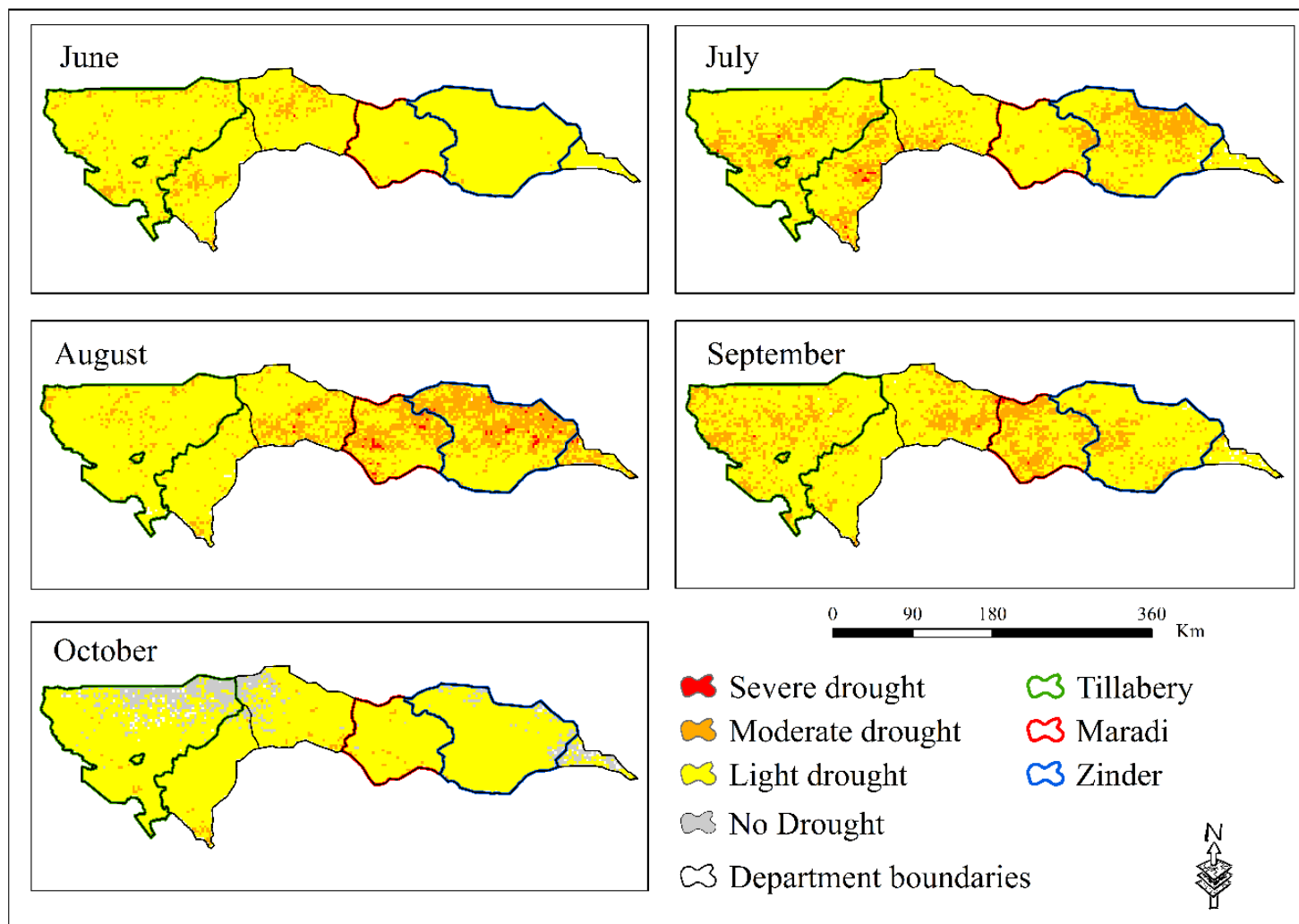


Figure 21 : Zones vulnérables à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger à partir de l'indice ADCI

4.8. Visite sur le terrain pour confirmation des résultats de l'indice ADCI

Toujours dans le cadre de la validation de l'indice ADCI et dans le souci de mieux comprendre pourquoi ces zones identifiées (zones vulnérables) présentent tout le temps des sécheresses agricoles chroniques, pour chacune des trois régions citées ci-haut, nous avons repéré les zones à pixels rouges qui apparaissent dans ces régions après l'obtention du résultat de la fonction «fuzzy overlay» pour ensuite nous rendre sur le terrain et voir de nous-même l'état de ces zones à pixels rouges (figure 22). Ces zones présentant des conditions de sécheresses agricole depuis 2003 jusqu'à 2017 ont été nommés zones très vulnérables à la sécheresse agricole. Ainsi, partant des résultats de la figure 22, pour la région de Maradi, nous avons identifié trois (3) zones très vulnérables qui présentent des pixels rouges sur toute la période 2003 à 2017. Il s'agit de la commune rurale de Chadakori, commune rurale de Kanembakache et commune rurale de Sofo. Pour la région de Zinder, trois localités sont aussi retenues : commune rurale de Alberkaram, commune rurale de Damagaram Takaya et commune rurale de Gouré. Et enfin pour la région de Tillabéry, une localité (département de Ouallam) a été retenue. Contrairement aux autres localités, cette dernière ne présente pas de pixel rouge (zone simplement vulnérable).

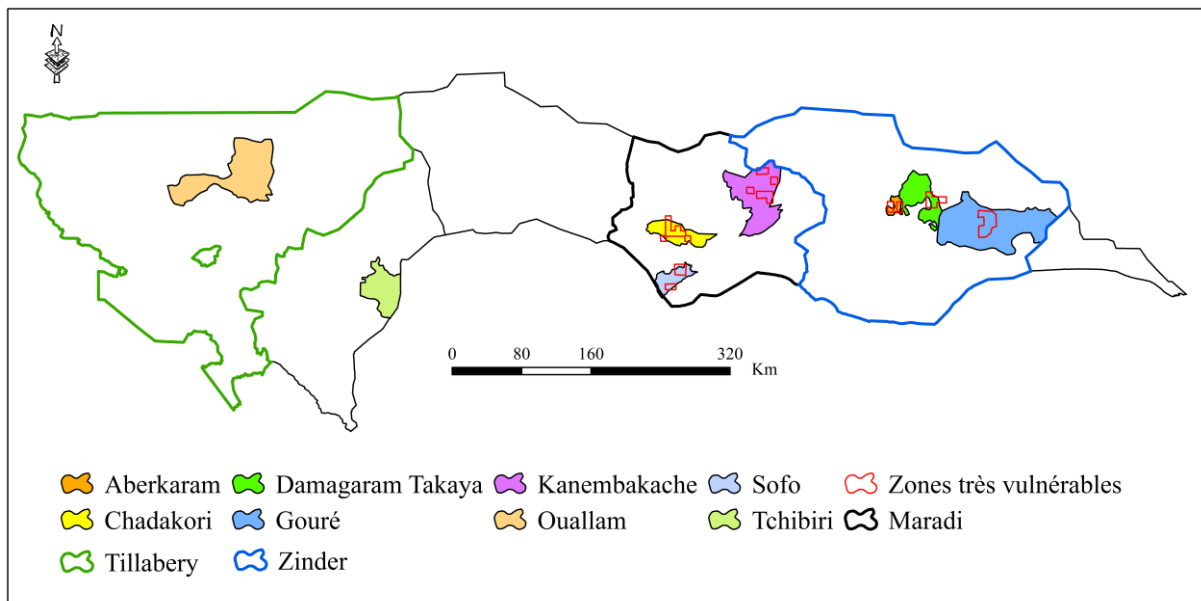


Figure 22 : Zones à haut risque de vulnérabilité à la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger
Pour quelques-unes de ces zones vulnérables une visite sur terrain notamment dans les champs de culture du mil a été effectuée suivie d'un ensemble de questions qui ont été adressée aux paysans trouvés sur place.

4.8.1. Région de Zinder

4.8.1.1. Commune rurale de Alberkaram



Planche 1 : Visite et enquête sur le site de la commune rurale de Alberkaram le 30 septembre 2018

Lors de notre visite dans la commune rurale de Alberkaram qui est apparue comme zone très vulnérable à la sécheresse agricole à travers les résultats de l'indice ADCI, nous avons pris pour cible quelques champs de culture de mil (un ensemble de sites) suivi d'un ensemble de questions que nous avons adressé aux cultivateurs. La planche 2 et le tableau 10 donnent un aperçu des caractéristiques de la commune rurale de l'Alberkaram.



Planche 2 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Alberkaram

Tableau 10 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Alberkaram

1	Type de sol	Sableux et sec
2	Types de cultures exercées	Culture de mil
3	Type d'engrais utilisé pour les cultures	Fumier d'animaux mais en très faible quantité
4	Répartition des eaux pluviales	Très irrégulière
5	Présence d'eau de surface	Pas de présence d'eau de surface
6	Type de relief	Relief plat
7	Végétation	Moyennement dense

Le premier constat que nous avons remarqué sur le terrain est que la plupart des champs présentant des cultures de mil sont asséchées et cultivées sur un sol sec et sableux (planche 2). Cette nature du sol (type sableux), entraîne une infiltration rapide des eaux de pluie aux détriments des cultures. Lors de notre passage le 30 septembre 2018, nous avons trouvé le paysan en train de faire la récolte du mil alors que le mil n'est pas tout à fait mûr (planche 1 et planche 2). Après une série de questions, ce dernier nous confirme que la localité fait face à

Chapitre 5 : Résultats et discussions

d'énorme problème d'eau pluviale, les précipitations sont irrégulières, pas toujours en quantité suffisante et parfois les précipitations accusent du retard ce qui les oblige occasionnellement à semer tardivement. Pour lui le rendement de son champ de mil décroît d'année en année.

4.8.1.2. Commune rurale de Damagaram Takaya



Planche 3 : Etat de quelques champs de culture de mil lors de notre passage dans la commune rurale de Damagaram Takaya

Tableau 11 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Damagaram Takaya

1	Type de sol	Sableux sec et compact
2	Types de cultures exercées	Culture de mil
3	Type d'engrais utilisé pour les cultures	Fumier d'animaux
4	Répartition des eaux pluviales	Très irrégulière
5	Présence d'eau de surface	Pas de présence d'eau de surface
6	Type de relief	Relief plat
7	Végétation	Moyennement dense

Dans cette commune, nous avons aussi remarqué que le sol est sableux mais de nature compacté (tableau 11), ce qui crée des ruissellements et parfois même des érosions du sol (planche 3). Comme dans la commune précédente, ici aussi la majorité des cultures sont asséchées alors que la récolte n'est pas encore faite. Les principaux facteurs qui peuvent conduire à un tel assèchement de la majorité des cultures ne peut être lié qu'au manque de précipitation nécessaire pour maintenir les cultures dans un état de bonne santé et/ou une forte évapotranspiration qui aspire l'eau du sol et des cultures pour entraîner l'assèchement de ses cultures. Notre indice ADCI prend en compte ces deux paramètres pour définir les zones

vulnérables à la sécheresse. D'où, nous comprenons mieux pourquoi le ADCI a marqué ces zones avec des pixels rouges (zones très vulnérables à la sécheresse agricole).

4.8.2. Région de Maradi

4.8.2.1. Commune rurale de Chadakori

Après la région de Zinder, le 4 octobre 2018 nous nous sommes rendus sur le troisième site qui est aussi une zone très vulnérable à la sécheresse agricole (planche 4). Ce troisième site est un village qui se trouve dans la région de Maradi dont l'activité principale est dominée par l'agriculture. Le tableau 12 présente les caractéristiques du site en question. Le sol est de nature sableux mais un peu humide néanmoins les cultures se présentent à moitié séchée et à moitié non séchée comme nous le constatons sur la planche 4 ci-dessous. Lorsque nous avons posé des questions au cultivateur trouvé dans son champ, d'après ce dernier, il a aussi semé tardivement en raison du retard accusé dans l'avènement des précipitations. Notre visite dans cette localité a été faite pendant le mois d'octobre, qui en temps normal, ce mois correspond non seulement à la fin de la saison de pluie, mais aussi à la période de récolte de la culture du mil. Cependant, lors de notre passage, les cultures sont à la moitié de leur cycle de croissance. Pour le cultivateur, cela est dû au fait que leur localité présente un sérieux problème d'irrégularité de précipitation accouplées à des fortes températures qui avoisine les 35°C en moyenne par jour.



Planche 4 : Etat de quelques champs de culture de mil lors de notre passage dans la commune rurale de Chadakori

Tableau 12 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Chadakori

1	Type de sol	Sableux et moyennement humide
2	Types de cultures exercée	Culture de mil
3	Type d'engrais utilisé pour les cultures	Fumier d'animaux
4	Répartition des eaux pluviales	Très irrégulière
5	Présence d'eau de surface	Présence d'eau de surface
6	Type de relief	Relief plat
7	Type de végétation	Faible

4.8.2.2. Commune rurale de Sofo

Dans cette commune rurale de Sofo, notre visite coïncide avec la récolte du mil comme nous pouvons le constater sur la planche 5. La zone est caractérisée par une forte évapotranspiration qui entraîne un assèchement rapide du sol mais des cultures elles-mêmes, néanmoins cela n'a pas empêché le développement des cultures. Dans ce champ, une partie des cultures ont atteint leur maturité et d'autre non. Malheureusement, lors de notre passage nous n'avons pas trouvé le cultivateur du champ en question afin qu'il nous explique mieux cet état des cultures.

D'après le résultat de la figure 21 sur les zones vulnérables à la sécheresse agricole, la troisième région présentant des zones vulnérables à la sécheresse agricole dont nous sommes censés visiter est la région de Tillabéry. Mais compte tenu des contraintes liées au temps, nous n'avons pas pu nous rendre dans cette localité.

Tableau 13 : Caractéristiques des sites de la commune rurale de Sofo

1	Type de sol	Sableux et sec
2	Types de cultures exercée	Culture de mil
3	Type d'engrais utilisé pour les cultures	Fumier d'animaux
4	Répartition des eaux pluviales	Moyennement irrégulière
5	Présence d'eau de surface	Pas de présence d'eau de surface
6	Type de relief	Relief plat
7	Type de végétation	Faible



Planche 5 : Etat de quelques champs de culture de mil capturés lors de notre passage dans la commune rurale de Sofo

En termes de conclusion, cette visite sur le terrain des zones vulnérables à la sécheresse agricole se trouvant dans les deux grandes régions de la partie centrale de la zone agricole du Niger (figure 22) a permis une fois de plus de faire ressortir l'efficacité du nouvel indice ADCI à donner des résultats fiables en termes de détection et surveillance de la sécheresse agricole.

CONCLUSIONS GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse était de proposer un nouvel indice de sécheresse agricole, appelé index de condition de sécheresse agricole, en anglais « Agricultural Drought Condition Index, (ADCI) » afin de mieux détecter et surveiller la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger. Ce nouvel indice est obtenu par la combinaison de quatre indices de condition à travers la méthode de l'analyse en composante principale (ACP). Il s'agit de l'indice de condition de précipitation (*Precipitation Condition Index, PCI*), l'indice de condition de végétation (*Vegetation Condition Index, VCI*), l'indice de condition de température (*Temperature Condition Index, TCI*) et enfin l'indice de condition d'évapotranspiration, (*Evapotranspiration Condition Index, ETCI*).

Les données satellitaires utilisées pour atteindre cet objectif portent sur : les produits MODIS-TERRA dont l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI_ MOD13A3), la température de surface du sol jour (Land Surface Temperature, LST- MOD11C3), les données de précipitations CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station), les données de l'évapotranspiration réelle du groupe FEWS-NET (Famine Early Warning Systems Network). En plus des données satellitaires, des données statistiques notamment le rendement agricole de la culture du mil et des données vectorielles ont aussi été utilisées dans le cadre de ce présent travail de recherche. Les données de précipitations CHIRPS ont permis de calculer l'indice de condition de précipitation (PCI) pour mettre en évidence le déficit pluviométrique, le NDVI MOD13A3 a permis de calculer l'indice de condition de végétation (VCI) pour déterminer l'état de santé de la végétation, la température de surface sol jour (LST- MOD11C3) a permis de calculer l'indice de condition de température (TCI) pour estimer l'humidité du sol et l'évapotranspiration réelle a permis de calculer l'indice de condition d'évapotranspiration (ETCI) pour déterminer le déficit en eau des cultures.

Pour évaluer la fiabilité de l'indice ADCI, une série de test de validation a été effectuée entre les indices ADCI/VHI et ADCI/SPI-1 à travers une analyse comparative par corrélation mais aussi de manière visuelle en observant leur évolution spatio-temporelle pendant le cycle phénologique de la culture du mil (juin-octobre) et sur la période d'étude 2003-2017. Toujours dans le souci de valider efficacement ce nouvel indice ADCI, des tests statistiques ont été réalisés entre le ADCI et le rendement agricole (culture de mil) sur la même période d'étude et enfin une visite sur le terrain dans les zones identifiées comme zones très vulnérables à la sécheresse agricole par le ADCI.

Les résultats de la présente étude montrent que le nouvel indice ADCI présente une forte corrélation positive (statistiquement et visuellement) avec les indices existants (l'indice de

Conclusion générale et recommandations

sécheresse agricole VHI et l'indice de sécheresse météorologique SPI-1) d'une part, et d'autre part, une corrélation statistiquement significative avec le rendement agricole de la culture du mil partant de juin à octobre de 2003 à 2017. L'évolution annuelle de la courbe des indices ADCI et VHI présente une forte intensité de corrélation entre les deux indices avec $R^2 = 0,62$ néanmoins, en termes de détection des zones affectées par la sécheresse agricole, l'indice ADCI permet de mieux ressortir l'intensité de la sécheresse agricole par rapport à l'indice VHI. De juin à octobre sur les 15 années d'étude (2003 à 2017), la variation de l'étendue spatiale de la sécheresse agricole détectée par l'indice ADCI est synchronisée à la variation de l'étendue spatiale de la sécheresse météorologique détectée par l'indice SPI-1. Autrement dit, ce constat permet d'exprimer que l'indice ADCI prend en compte les informations issues de la sécheresse météorologique pour définir les zones éventuelles de la sécheresse agricole.

Grâce à l'indice ADCI, l'historique de la sécheresse agricole de 2003 à 2017 ainsi que les grandes années de sécheresses dont le Niger a vécu (2004, 2009, 2011, 2013 et 2014), ont été mises en évidence. Cette analyse a permis de comprendre comment se manifeste le début, la durée et l'intensité de la sécheresse agricole d'une part, et d'autre part de pouvoir déterminer les régions les plus vulnérables à la sécheresse agricole. Principalement, deux régions de la partie centrale dont la région de Maradi (commune rurale de Chadakori, commune rurale de Kanembakache et commune rurale de Sofu) et la région de Zinder (commune rurale de Alberkaram, commune rurale de Damagaram Takaya et commune rurale de Gouré), plus une région de la partie Ouest, région de Tillabéry (département de Ouallam) de la zone agricole du Niger ont été identifiés comme zones vulnérables à la sécheresse agricole du fait qu'elles présentent des cas de sécheresse chronique pendant toute période d'étude 2003-2017.

Les visites ainsi que les enquêtes terrains en date d'octobre et novembre 2018 réalisées dans ces mêmes zones vulnérables nous ont permis de comprendre pourquoi l'indice ADCI a marqué ces régions comme étant vulnérable à la sécheresse agricole. En effet, ces régions sont confrontées à une irrégularité des pluies dans le temps et dans l'espace, mais aussi à des fortes températures élevées (35°C en moyenne) qui entraînent par conséquent des fortes évapotranspirations. Etant donné que le ADCI utilise des informations issues des précipitations et de l'évapotranspiration pour mieux ressortir les conditions de la sécheresse agricole, ces régions ont donc été détectées par le nouvel indice ADCI.

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons donc dire que l'objectif principal ainsi que les objectifs spécifiques de la présente étude ont été atteints. Par conséquent, la combinaison de plusieurs ensembles de données d'indicateur sur la sécheresse météorologique, l'humidité du

Conclusion générale et recommandations

sol, l'évapotranspiration réelle et les conditions de culture semble être le moyen idéal pour capturer et surveiller l'étendue spatio-temporelle et la sévérité de la sécheresse agricole.

Limitations et recommandations

Cette étude, comme toute autre, comporte toutefois certaines limitations qui pourraient faire l'objet d'amélioration lors de futurs travaux.

Avantages et limitations de l'indice ADCI

D'après nos recherches bibliographiques, la plupart des indices utilisés pour la détection des sécheresses agricoles à partir de la télédétection présentent des faiblesses. Parce qu'ils ne prennent pas en compte tous les facteurs qui peuvent conduire à ladite sécheresse. C'est pourquoi, dans cette étude, nous proposons un nouvel indice de sécheresse agricole complet, basé sur la télédétection, pour suivre le développement de la sécheresse agricole dans la zone agricole du Niger. Son principal avantage est qu'il intègre plusieurs informations relatives à la sécheresse agricole et qui proviennent de différentes sources dont entre autres les précipitations, la santé de la végétation, l'humidité du sol et les besoins en eau des cultures. La combinaison de ces paramètres clés permet à l'indice ADCI de mieux tenir compte des aspects de la sécheresse pour déterminer le début, l'intensité, les zones touchées et la fin de la sécheresse dite agricole. C'est pourquoi, pour les sécheresses de 2004, 2009, 2011, 2013 et 2014, l'indice ADCI a mieux détecté l'intensité de la sécheresse agricole que l'indice VHI (figure 7). Parce que la faiblesse de l'indice VHI est qu'il ne prend pas compte les données sur les précipitations et le déficit en eau des cultures. Ce nouvel indice sera d'une grande utilité non seulement pour le Niger mais aussi pour le reste du monde puisse qu'il offre une nouvelle approche pour mieux détecter et surveiller la sécheresse agricole. Son utilisation peut aider à déterminer l'intensité, les zones touchées par la sécheresse afin d'aider les décideurs à prendre les décisions les plus adéquates possibles. Les données d'entrées utilisées pour le calcul de l'indice ADCI sont toutes normalisées entre 0 et 100. Ainsi, après le calcul de l'indice ADCI par la méthode de la première analyse en composante principale (PC1), tous les résultats obtenus sont également normalisés entre 0 et 100. Cela montre une fois de plus l'avantage d'utiliser ce nouvel indice, car les valeurs ADCI sont faciles à interpréter et sont classées de la même manière que les indices PCI, VCI, TCI et ETCI (tableau 2). Cette classification est universelle et peut être appliquée pas seulement au Niger, mais partout dans le monde où l'indice ADCI sera calculée.

Dans cette première phase, le ADCI a été spécifiquement définie pour détecter et surveiller la sécheresse agricole. Toutefois, des améliorations peuvent être apportées à des futures travaux de recherches. ADCI ne tient pas compte des paramètres directs de l'humidité du sol. Dans cette

Conclusion générale et recommandations

étude, la température de la surface du sol (LST) MODIS est utilisée pour détecter la caractéristique du sol parce que cette température change en conséquence avec l'humidité du sol. Mais la LST est un paramètre indirect qui a des limites pour surveiller avec précision les changements dans l'humidité du sol. Par conséquent, les recherches futures pourront intégrer les données micro-ondes sur l'humidité du sol dans la surveillance de la sécheresse. C'est pourquoi l'évapotranspiration réelle a été utilisée pour renforcer l'information relative à l'humidité du sol d'une part et pour mettre en évidence les besoins en eau des cultures d'autre part. Pour améliorer l'indice ADCI, d'autres indicateurs tels que la densité de population peut être inclus afin de donner plus de puissance à ce nouvel indice. Dans cette étude, compte tenu de l'étendue de notre zone d'étude, le ADCI a été calculé sur une résolution spatiale de 1 km. Ainsi, pour un nouvel utilisateur de cet index, il peut envisager d'améliorer la résolution pour passer à 250 mètres par exemple.

Avantages et limitations de la méthode ACP

Dans cette étude, plusieurs informations provenant des données de télédétection (à travers les indices calculés) ont été combinées pour élaborer le nouvel indice ADCI. Cela conduit à la manipulation de beaucoup d'informations en même temps avec des risques de redondance d'informations. Ainsi, l'Analyse en Composante Principale (ACP) est la méthode idéale pour résoudre ce type de problème, parce que cette méthode est une technique fréquemment utilisée pour supprimer ou réduire les informations redondantes ou dupliquer pour ensuite compresser toutes ses informations dans un ensemble d'images multi-spectrales d'origine n en moins d'un canal ou, plus précisément, à leurs composants principaux (Avena et al. 1999).

Le plus souvent, l'APC a été utilisé dans des applications de télédétection. Elle est utilisée pour analyser les interrelations entre un grand nombre de variables. Dans le cas contraire, à défaut d'utiliser la méthode ACP, pour combiner les quatre indices (PCI, VCI, TCI et ETCI) ayant servi pour le calcul de ADCI, une méthode de pondération doit être utiliser. Cette méthode est difficile et demande beaucoup de financement et de temps afin de trouver les bons facteurs de pondération qui correspondent à chacun des quatre indices. C'est là le potentiel d'utiliser la méthode de l'APC dans notre recherche pour calculer l'indice ADCI car cette dernière est simple et pratique à utiliser.

Toutefois, l'utilisation de la méthode PCA exige une certaine vigilance dans certains cas, car l'ACP entreprend une transformation linéaire d'un ensemble de bandes d'images pour créer un nouvel ensemble de bandes d'images avec des composants principaux non corrélés et ordonnés en fonction de la variance expliquée dans les données d'origine (Eastman and Fulk, 1993). Dans

Conclusion générale et recommandations

notre recherche, la zone d'étude concernée est la zone agricole du Niger principalement dominée par les activités agricoles. Ainsi, le risque d'avoir des scénarios complexes (par exemple une agriculture hétérogène) est très faible. Cependant, lorsque l'indice ADCI sera appliqué dans une autre partie du monde avec une probabilité d'avoir une agriculture hétérogène (activité agricole plus activité pastorale par exemple), nous invitons les futurs utilisateurs à bien analyser et interpréter les résultats de la première composante principale (PC1) qu'ils auront comme résultat. Il est important de noter que quelle que soit la région où l'indice ADCI sera mis en application, il est censé produire de bons résultats, car c'est là le but même de sa création.

Bibliographies

Bibliographies

- Abdessadek, E., & Omaima, D. . (2015). *La classification et l'identification des cultures par la télédétection*.
- Abdoul Habou, Z., Boubacar, M. K., & Adam, T. (2016). Les systèmes de productions agricoles du Niger face au changement climatique : défis et perspectives. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3), 1262. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i3.28>
- Abdoulkarim, I. S., Karimou, A. J. M., Abdou, A., Alkhalil, A., & Ibrahima, K. (2018). *VARIABILITE SPATIALE ET TENDANCE DE PRECIPITATIONS SUR LA PERIODE 1981-2016 DANS LE BASSIN ACTIF DU NIGER* (Issue January).
- ABN. (2007). *Autorité du Bassin du Niger, Atlas du Bassin du fleuve Niger*.
- Ahmad, H. (2016). *Stack Exchange*. Geographic Information Systems Stack Exchange Is a Question and Answer Site for Cartographers, Geographers and GIS Professionals. <https://gis.stackexchange.com/questions/190948/layer-stacking-sentinel-2-imagery>
- Allen, R. ., Pereira, L. ., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements*. *Irrigation and Drainage*. FAO, Rome, Italy.
- Alley, W. M. (1984). The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100–1109. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- Alley, W. M. (1985). The Palmer drought severity index as a measure of hydrologic drought. *Water Resources Bulletin*, 21, 105–114. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1985.tb05357.x>
- Avena, G. C., Ricotta, C., & Volpe, F. (1999). The influence of principal component analysis on the spatial structure of a multispectral dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 20(17), 3367–3376. <https://doi.org/10.1080/014311699211381>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 85–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85))
- Beaudin, I. (2007). *Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de*

Bibliographies

sécheresse en milieu méditerranéen. UNIVERSITÉ LAVAL.

- Bezançon, G., Renno, J. ., De Rouw, A., & Winkel, T. (1995). *ORSTOM Actualités. Le mil au Niger*.
https://www.researchgate.net/profile/Thierry_Winkel/publication/308262115_Le_mil_au_Niger/inks/5863864b08ae329d62039b89/Le-mil-au-Niger.pdf
- Bhuiyan, C., Singh, R. P., & Kogan, F. N. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 289–302.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>
- Bijaber, N., El Hadani, D., Saidi, M., Svoboda, M. D., Wardlow, B. D., Hain, C. R., Poulsen, C. C., Yessef, M., & Rachid, A. (2018). Developing a Remote Sensed Drought Monitoring Indicator for Morocco. *Geosciences*, 8(55), 1–35.
- Bootsma, A., Boisvert, J. B., De jong, R., & Baier, W. (1996). La sécheresse et l’agriculture canadienne : une revue des moyens d’action. *Sécheresse (Montrouge)*, 7(4), 277–285.
- Boyd, D. S., Phipps, P. C., Foody, G. M., & Walsh, R. P. D. (2002). Exploring the utility of NOAA AVHRR middle infrared reflectance to monitor the impacts of ENSO-induced drought stress on Sabah rainforests. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5141–5147.
<https://doi.org/10.1080/01431160210163128>
- Capot-Rey, R. (1973). La végétation du Sahara, du Tchad à la Mauritanie de P. Quézel. *Annales de Géographie*, 76(415), 357–359. <http://www.jstor.org/stable/23446535>
- CILSS. (1973). *Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel*.
<http://www.cilss.int/index.php/640-2/>
- Crago, R. D. (1996). Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*, 180(1–4), 173–194. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02903-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02903-6)
- Dabrowska-zielinska, K., Kogan, F. N., Ciolkosz, A., & Gruszczynska, M. (2002). Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1109–1123. <https://doi.org/10.1080/01431160110070744>
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., & Tucker, C. J. (2014). Re-greening Sahel: 30years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140, 350–364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>
- Deng, J. S., Wang, K., Deng, Y. H., & Qi, G. J. (2008). PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *International Journal Of Remote Sensing*, 29(16), 4823–4838. <https://doi.org/10.1080/01431160801950162>

Bibliographies

- Denis, M., Johny, E., & Roger, B. (2012). Repetition of food and nutrition crises in Niger: urgent renovation food security policies. *Cah Agric*, 21, 302–310. <https://doi.org/10.1684/agr.2012.0588>
- Deshayes, M. (1991). La télédétection en agriculture. In *Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens* (Vol. 4). Montpellier : CIHEAM.
<http://om.ciheam.org/om/pdf/a04/a04.pdf>
- Didan, K. (2015). *MOD13A3 Indices de végétation MODIS / Terra Mensuel L3 Réseau global 1 km SIN V006 [ensemble de données]*. NASA EOSDIS LP DAAC.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006>
- Domenikiotis, C., Spiliotopoulos, M., Tsiros, E., & Dalezios, N. R. (2004). Early cotton production assessment in Greece based on a combination of the drought Vegetation Condition Index (VCI) and the Bhalme and Mooley Drought Index (BMDI). *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5373–5388. <https://doi.org/10.1080/01431160410001705033>
- Douglas, M. J., & Sally, H. (2014). *Improving Access to Water for Agriculture and Livestock in Niger : A Preliminary Analysis of Investment Options for ... Improving Access to Water for Agriculture and Livestock in Niger : A Preliminary Analysis of Investment Options for the Millennium Chal* (Issue January).
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Vardy, P., & Yan, H. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>
- Durand, J.-H. (1977). A propos de la sécheresse et ses conséquences au Sahel. *Cahiers d'outre-Mer*, 30(120), 383–403. <https://doi.org/10.3406/caoum.1977.2836>
- Eastman, J. ., & Fulk, M. (1993). Long sequence time-series evaluation using standardized principal components. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(6), 991–996.
- ECOAGRIS. (2015). *Système Régional Intégré d'Information Agricole de la CEDEAO*.
<http://ecoagris.cilss.int/index.php/640-2/>
- FAO. (1989). *Annuaire des statistiques de l'agriculture, republique du Niger, Ministere de l'Agriculture et de l'Elevage. FAO Center, Rome (Italy), R 18*.
- FAO, & SFW. (2010). *Review of Niger's livestock sector*.
- FEWS NET. (2011). *Livelihoods zoning 'plus' activity in Niger*. <http://www.fews.net/west-africa/niger/livelihood-description/>
- Fintrac/BEST. (2011). *Bellmon estimation. Submitted to USAID Office Food for Peace, Niger. October, 2011*.

Bibliographies

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Garba, M. A. (2002). *Les grands types de sols du Niger*. FAO. <http://www.fao.org/docrep/005/Y3948F/y3948f11.htm>
- Gebrehiwot, T., van der Veen, A., & Maathuis, B. (2011). Spatial and temporal assessment of drought in the Northern highlands of Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.12.002>
- Gobron, N., Pinty, B., Mélin, F., Taberner, M., Verstraete, M. M., Belward, A., Lavergne, T., & Widlowski, J. L. (2005). The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 2013–2020. <https://doi.org/10.1080/01431160412331330293>
- Hao, C., Zhang, J., & Yao, F. (2015). Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011>
- Hayashi, K. (2005). At the peasant level in the West African Sahel Band practice possible engineering development - proposition of the soil fertility management technique in the deterioration sandy soil by the application of common information. *Expert Bulletin*, 26(6), 12–26.
- Hielkema, J. U., Prince, S. D., & Astle, W. L. (1986). Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna zone of Democratic Republic Sudan using NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1499–1514. <https://doi.org/10.1080/01431168608948950>
- Hiernaux, P., Noël, H., & Houérou, L. (2006). Les parcours du Sahel. *Sécheresse*, 17(1–2), 1–21.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *International Journal Of Remote Sensing*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Idrissa, S. (2001). *Bilan-diagnostic sur la production du mil et du sorgho*. <http://hubrural.org/IMG/pdf/mil-sorgho-niger.pdf>
- INS-Niger. (2018). *Fiche sur l'évolution des principaux indicateurs sociodemographiques et agregats macroeconomiques du niger*. http://www.stat-niger.org/statistique/file/DSEDS/FSPI_Niger_Mai_2018.pdf
- Iskander, B. (2008). *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion*

Bibliographies

- durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech*. l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- JAICAF. (2009). *Association pour la Collaboration Internationale en matière d'Agriculture et des Forêts du Japon. Les céréales au Niger : Accent sur le mil et le sorgho*.
http://www.jaicaf.or.jp/publications/niger_f.pdf
- Jain, S. K., Keshri, R., Goswami, A., Sarkar, A., & Chaudhry, A. (2009). Identification of drought-vulnerable areas using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2653–2668. <https://doi.org/10.1080/01431160802555788>
- Jang, J. D. (2004). *Evaluation of thermal-water stress of forest in southern Québec from satellite images*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Qc., Canada.
- Jasmien, C. J. W., Garba, M., Sabiou, M., Fatondji, D., & Cornelis, W. M. (2015). Agricultural drought trends and mitigation in Tillabery , Niger. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (3), 37–41. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.999642>
- Justice, C. O., & Hiernaux, P. H. Y. (1983). Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1475–1497.
<https://doi.org/10.1080/01431168608948949>
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., & Tucker, C. J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1271–1318. <https://doi.org/10.1080/01431168508948281>
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., & et al. (1998). The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228–1249. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- Kogan, F.N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of American Meteorological Society*, 76(5), 655–668.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)
- Kogan, F.N. (2002). World Droughts in the New Millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices. *EOS , TRANSACTIONS , AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 8(4), 3–7.
- Kogan, F.N. (1987). Vegetation index for areal analysis of crop conditions. *Proceedings of 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, AMS, W. Lafayette, Indiana*, 103–106.
- Kogan, F.N., & Sullivan, J. (1993). Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 13(5), 219–222.

Bibliographies

[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90548-P](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90548-P)

- Kogan, F.N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal Of Remote Sensing*, 11(61). <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
- Kogan, F.N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F.N, Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., & Tsooj, S. (2004). Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2889–2896. <https://doi.org/10.1080/01431160410001697619>
- Kogan, Felix N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621–636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Lasaponara, R. (2006). On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling*, 194(4), 429–434. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.035>
- Layelmam, M. (2015). *Calculation of drought indicators from NOAA / AVHRR images To cite this version. Edited by: Mohammed Layelmam.*
- Leroux, L., Baron, C., Zoungrana, B., Traore, S. B., Lo Seen, D., & Begue, A. (2016). Crop Monitoring Using Vegetation and Thermal Indices for Yield Estimates: Case Study of a Rainfed Cereal in Semi-Arid West Africa. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 347–362. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2501343>
- Mader, S. (1987). *Biologie. Évolution, diversité et environnement. Éditions du Trécarré, Les Éditions Reynald Goulet inc., Saint-Laurent, Qc., Canada.*
- Marc, G. (2003). L'intérêt de l'analyse en composantes principales (ACP) pour la recherche en sciences sociales. *Cahiers Des Amériques Latines*, 43, 181–192. <https://doi.org/10.4000/cal.7364>
- Marega, O. (2016). *Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger).*
- Marshall, M. T., Husak, G. J., Michaelsen, J., & Funk, C. (2011). Testing a high-resolution satellite interpretation technique for crop area. *International Journal Of Remote Sensing*, 32(23), 7997–8012. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.532168>
- Maselli, F., Conese, C., Petkov, L., & Gilabert, M. A. (1993). Environmental monitoring and crop forecasting in the sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986-89.

Bibliographies

- International Journal of Remote Sensing*, 14(18), 3471–3487.
<https://doi.org/10.1080/01431169308904458>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- McVicar, T. R., & Bierwirth, P. N. (2001). Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *International Journal Of Remote Sensing*, 22(11), 2109–2128. <https://doi.org/10.1080/01431160120728>
- McVicar, T. R., & Jupp, L. B. (1998). The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural Systems*, 57(3), 399–468. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00026-2)
- Met Office. (2010). *Climat sahélien : rétrospective et projections*.
- MODIS Design. (n.d.). *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. NASA.
<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>
- Niasse, M., Abel, A., Abou, A., & Regional Office for Western Africa UICN. (2004). *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: éléments de stratégie régionale de préparation at d'adaptation*.
- NRC. (2006). *Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)*.
- Obassi, G. . (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of Americam Meteorological Society*, 75(9), 655–1661.
- Okpara, J. N., & Tarhule, A. (2015). Evaluation of Drought Indices in the Niger Basin , West Africa 1. *Journal of Geography and Earth Sciences*, 3(2), 1–32. <https://doi.org/10.15640/jges.v3n2a1>
- Ollivier, J. Y. (1989). Conséquences des sécheresses 1985 et 1986 dans le Sud-Ouest de la France : Elaboration d'un Programme de lutte. *La Houille Blanche*, 7(8), 530–533.
<https://doi.org/10.1051/lhb/1989052>
- Ooohemd, J., & Branquin, P. (1967). *Rapport technique d'agroclimatologie de l'Afrique seche au sud du Sahara en Afrique*.
- Padhee, S. K., Nikam, B. R., Dutta, S., & Aggarwal, S. P. (2017). Using satellite-based soil moisture to detect and monitor spatiotemporal traces of agricultural drought over Bundelkhand region of India. *GIScience and Remote Sensing*, 54(2), 144–166.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1286725>
- PANACC. (2006). *Programme d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques*.

Bibliographies

- Park, S., Feddema, J. J., & Egbert, S. L. (2004). Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. *Remote Sensing of Environment*, 88(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.003>
- Pierre, M. (1973). Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, une étude géomorphologique. In *Mémoire ORSTOM N°63* (p. 752).
- Pinty, B., & Verstraete, M. M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101(1), 15–20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>
- Poncet, Y. (1974). *La secheresse en Afrique sahelienne, une etude microregionale en Republique du Niger. La region de Dallols*.
- Qi, J., Chehboumi, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Rasmussen, M. S. (2007). Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*, 13(18), 3431–3442. <https://doi.org/10.1080/01431169208904132>
- Raymond Hunt, E., Rock, B. N., & Nobel, P. S. (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22(3), 429–435. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90094-0)
- RCA. (1985). *Réseau de Prévention des Crises Alimentaires au Sahel et en Afrique de l'Ouest*. Comité Permanent Inter-Etats de Lutte Contre La Sécheresse Dans Le Sahel. <http://www.cilss.int/index.php/le-rpca-le-reseau-de-prevention-des-crisis-alimentaires-au-sahel-et-en-afrique-de-louest/>
- RECA. (2004). *National Network of Chambers of Agriculture: Agroecological Zoning of NIGER*.
- République du Niger. (1991). *Les réformes du marché céréalier : Mesures de libéralisation et évolution des filières céréalières*.
- République du Niger. (2000). *Projet d'Appui au Développement Rural du Département de Dosso : Etude agro-économique et aménagements des terroirs dans le département de Dosso*.
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2875–2887. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- Richard, G. A., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and*

Bibliographies

- Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Roche, M. (1973). Les incidences climatiques et hydrologiques de la sécheresse. *Techniques et Developpements*, 4(10), 4-15.
- Rockström, J., Barron, J., & Fox, P. (2002). Rainwater management for increased productivity among small-holder farmers in drought prone environments. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(11–22), 949–959. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00098-0)
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS Tech. Report No. Accession Number: 74N30727*.
- Scott, M. S. (1988). Drought survival tactics of subsistence farmers in Niger. *Human Ecology*, 16(2), 123–144. <https://doi.org/10.1007/BF00888089>
- Seignobos, C., & Iyébi-Mandjek, O. (2000). *Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun*. République de Cameroun, Ministère de la recherche scientifique et technique, Institut national de cartographie.
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 577–591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Senay, G. B., Bohms, S., & Verdin, J. P. (2012). Remote Sensing of Evapotranspiration for Operational Drought Monitoring Using Principles of Water and Energy Balance. In *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*.
- Senay, G. B., Budde, M. E., & Verdin, J. P. (2011). Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. *Agricultural Water Management*, 98(4), 606–618. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.014>
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H., & Vogt, J. (2012). Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(11), 3519–3531. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>
- Singh, R. P., Roy, S., & Kogan, F. N. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 37–41. <https://doi.org/10.1080/0143116031000084323>

Bibliographies

- Sivakumar, M. V. K. (1992). Climate change and implications for agriculture in Niger. *Climatic Change*, 20(4), 297–312. <https://doi.org/10.1007/BF00142424>
- Sivakumar, M. V. K., Maidoukia, A., & Stern, R. D. (1993). *Agroclimatology of West Africa: Niger*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=QX9400001>
- Svoboda, M., & Fuchs, B. (2017). *Mixing Up a Drought Indicator Cocktail , Blended , not Stirred : A Combined Drought Indicator Approach*.
- Swinton, S. M. (1985). *Les Ressources Agricoles des Exploitations dans Trois Villages Représentatifs de l'Arrondissement de Madarounfa en 1984. Programme de Recherche sur les Systèmes de Production Document No7. Institut National de Recherches Agronomiques du Niger (INRAN)*.
- Terpend, N., & Saley, M. (2005). *Study on the development of animal sector development programs*.
- Tucker, C. J. (1985). *Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel : 1980-1984*. 249, 233–249.
- Tucker, C. J., Gatlin, J., Schnieder, S. R., & kuchinos, M. A. (1982). Monitoring large scale vegetation dynamics in the Nile delta and river valley from NOAA AVHRR data. *Proceedings of the Conference on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands, Cairo, Egypt (Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan)*, 973–977.
- Unganai, L. S., & Kogan, F. N. (1998). Drought Monitoring and Corn Yield Estimation in Southern Africa from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, 63(3), 219–232. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00132-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00132-6)
- Viau, A. A., Vogt, J. V., & Beaudin, I. (2000). Comparison of a Satellite-Based and a Precipitation-Based Drought Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(6), 580–583. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874799>
- Vischel, T., Lebel, T., Panthou, G., Quantin, G., Rossi, A., & Martinet, M. (2015). Chapitre 2. Le retour d'une période humide au Sahel ? In *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (pp. 43–60). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.8937>
- Vogt, J. V., Viau, A. A., & Paquet, F. (1997). Mapping regional air temperature fields using satellite-derived surface skin temperatures. *International Journal of Climatology*, 17, 559±1579. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971130\)17:14<1559::AID-JOC211>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971130)17:14<1559::AID-JOC211>3.0.CO;2-5)
- Vogt, J. V., & Somma, F. (Eds. . (2000). *Drought and drought mitigation in Europe*. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1>
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2015). *MOD11C3 MODIS/Terra Land Surface*

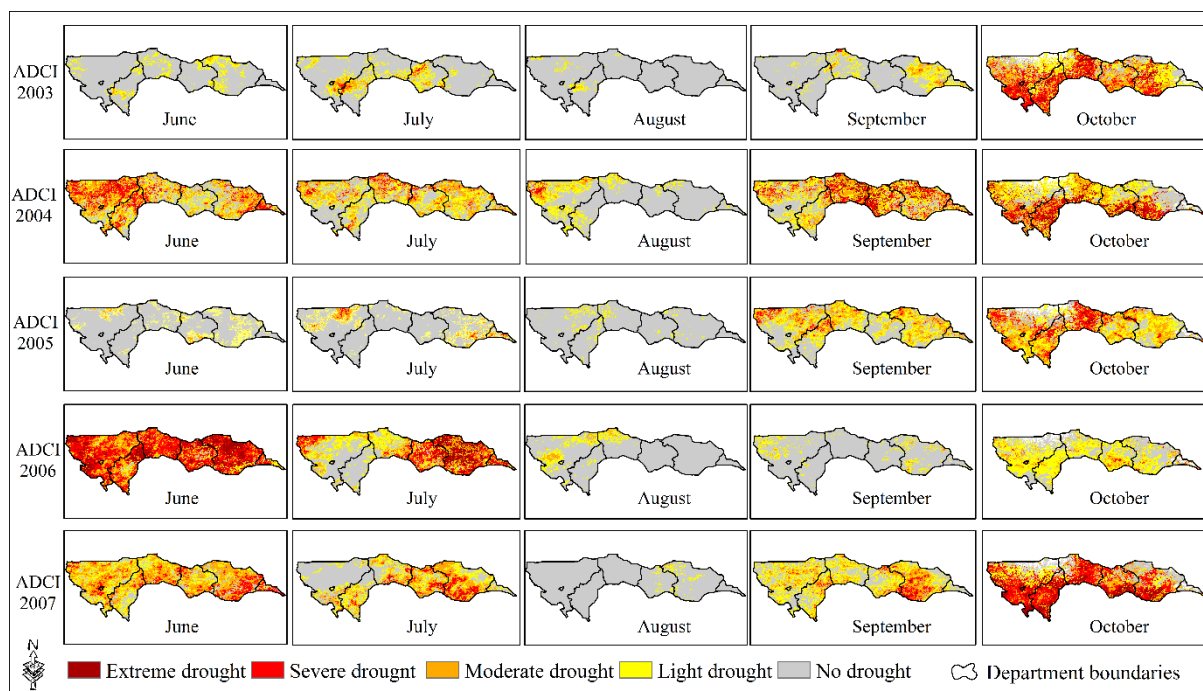
Bibliographies

- Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006*. NASA EOSDIS LP DAAC.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11C3.006>
- Wan, Z. M., Zhang, Y. L., & Zhang, Q. C. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 163–180.
- White, D. A. (2018). *The MODIS Conversion Toolkit (MCTK) User's Guide*.
<https://github.com/dawhite/MCTK/releases>
- White, D. H. (1990). *A Study of the Feasibility of Using Simulation Models and Mathematical Programs as Aids to Drought Monitoring and Management*. Information Paper No. IP/2/90, Bureau of Rural Resources, Canberra.
- Wilhite, D. A. (1993). *Understanding the Phenomenon of Drought*. University of Nebraska-Lincoln.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. University of Nebraska-Lincoln. *Water International*, 10, 111–120.
- WMO. (1975). World Meteorological Organization. WMO Technical Note 138. *Droughts and Agriculture*.
- World Bank. (2011). *Risk assessment of the agricultural sector in Niger: from crisis response to long-term risk management*.
- Yann, H. (2003). 178 - Sahel : une sécheresse persistante. Institut de Recherche Pour Le Développement (IRD). <https://www.ird.fr/la-mediatheque/fiches-d-actualite-scientifique/178-sahel-une-secheresse-persistante>
- Zhang, A., & Jia, G. (2013). Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134, 12–23.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., & Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190(March), 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.010>
- Zhang, X., & Chen, C. H. (2002). New independent component analysis method using higher order statistics with application to remote sensing images. *Optical Engineering*, 41, 1717–1728.
<https://doi.org/10.1117/1.1482722>
- Zhang, Xiaoyang, Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2004). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(7), 1133–1145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00784.x>

ANNEXES

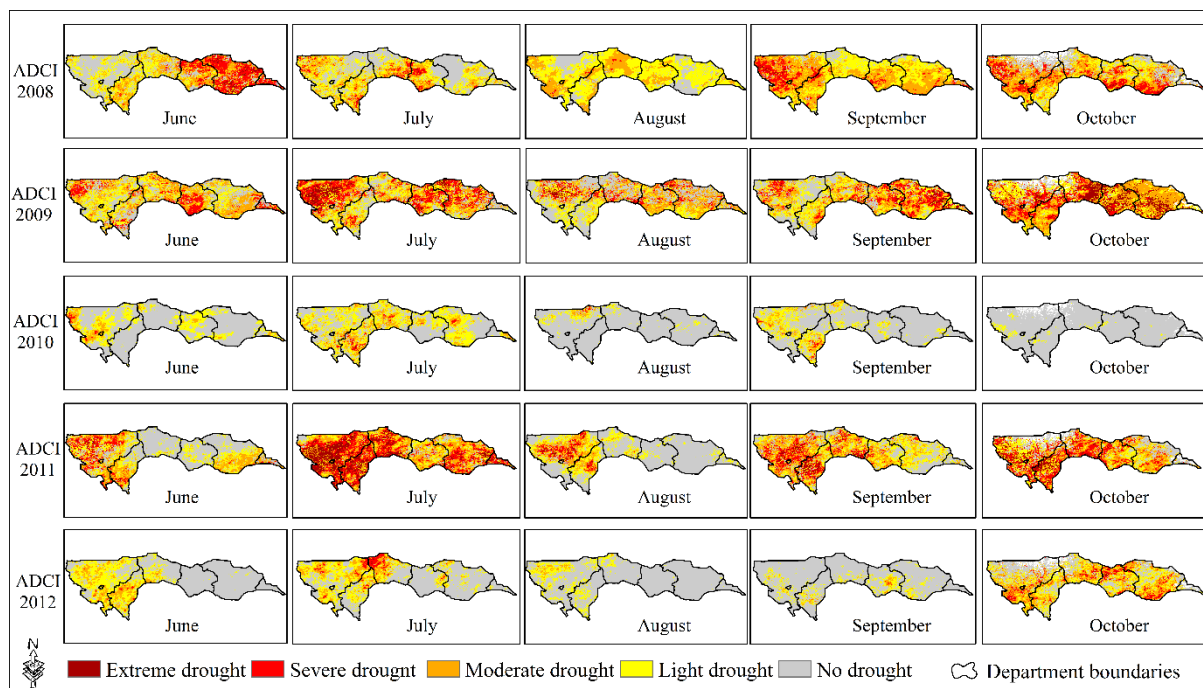
Annexes

Cartes des différents indices ADCI, PCI, VCI, TCI et ETCI sur les cinq (5) mois de la campagne agricole de la zone agricole du Niger de 2003 à 2017.

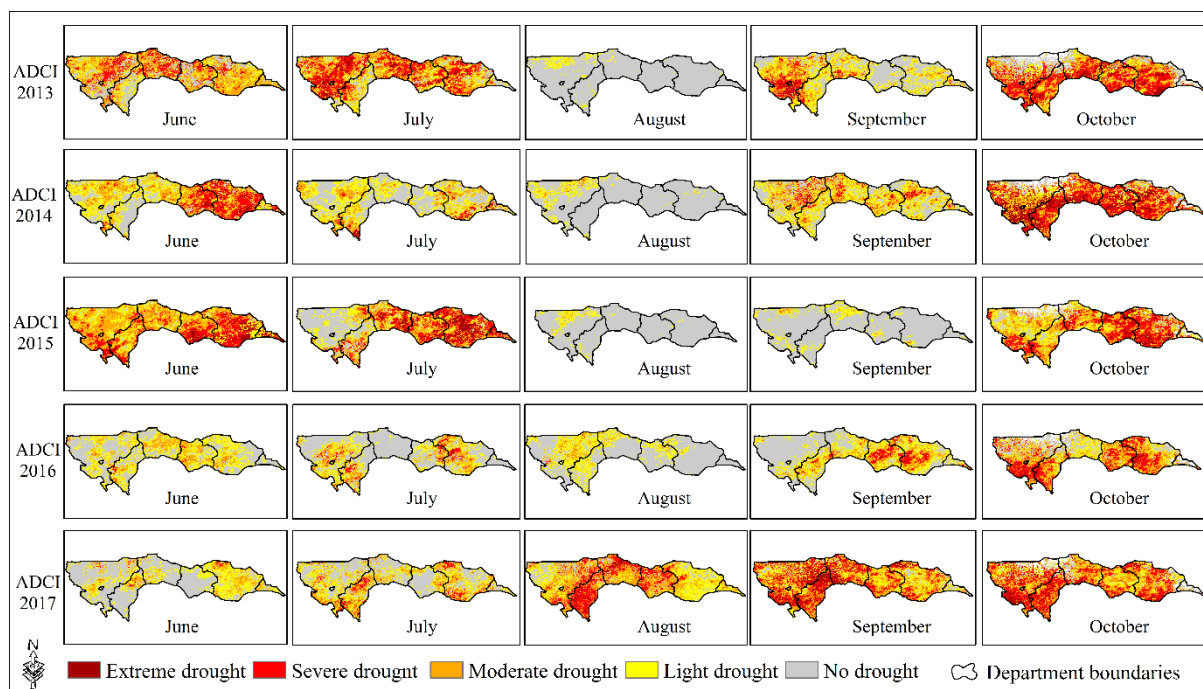


Annexe 1 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007

Annexes

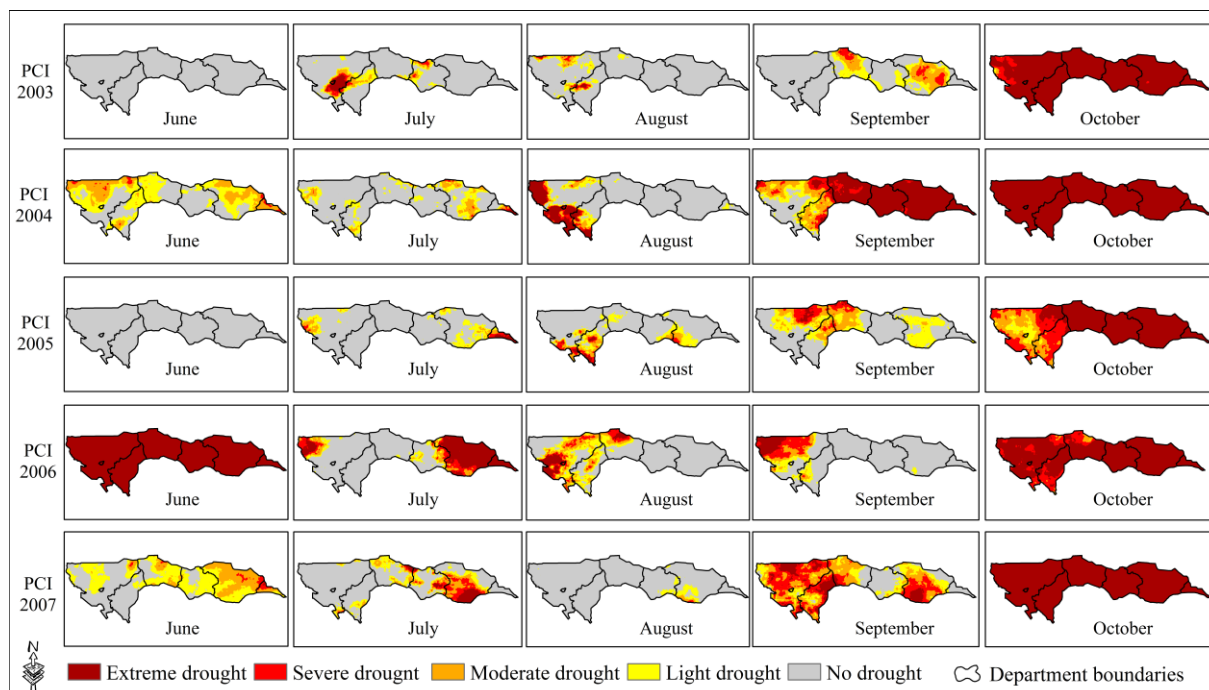


Annexe 2 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

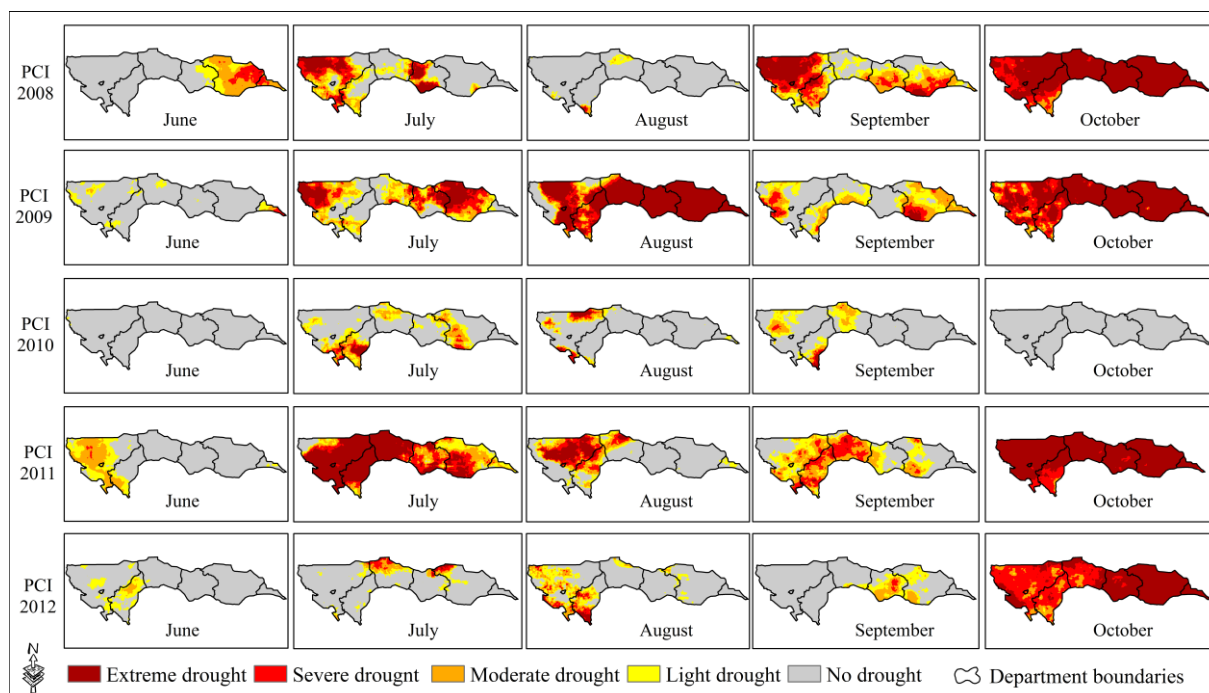


Annexe 3 : Cartes de l'indice de condition de sécheresse agricole (ADCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017

Annexes

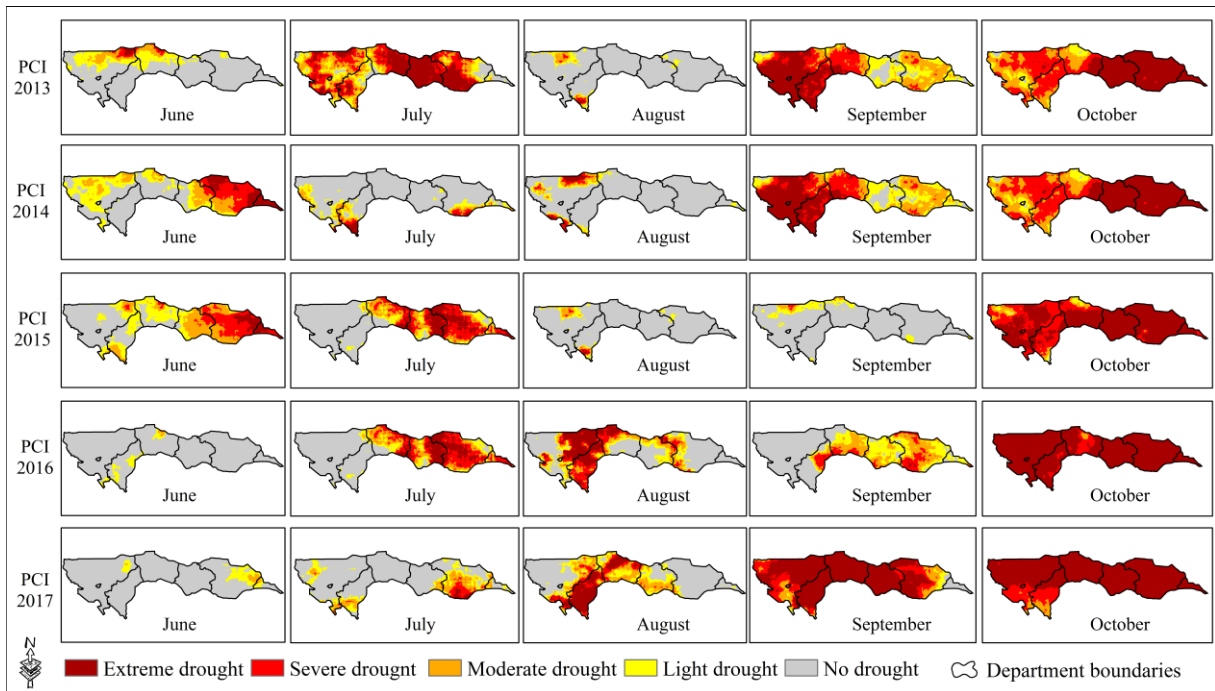


Annexe 4 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007

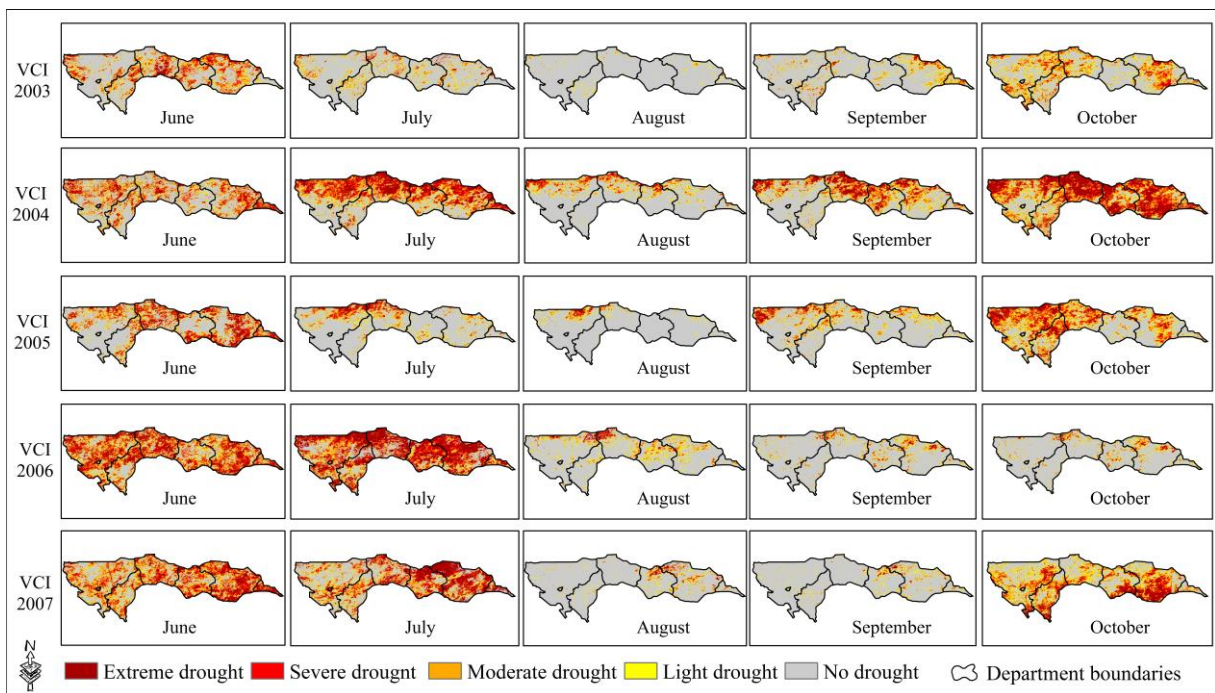


Annexe 5 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

Annexes

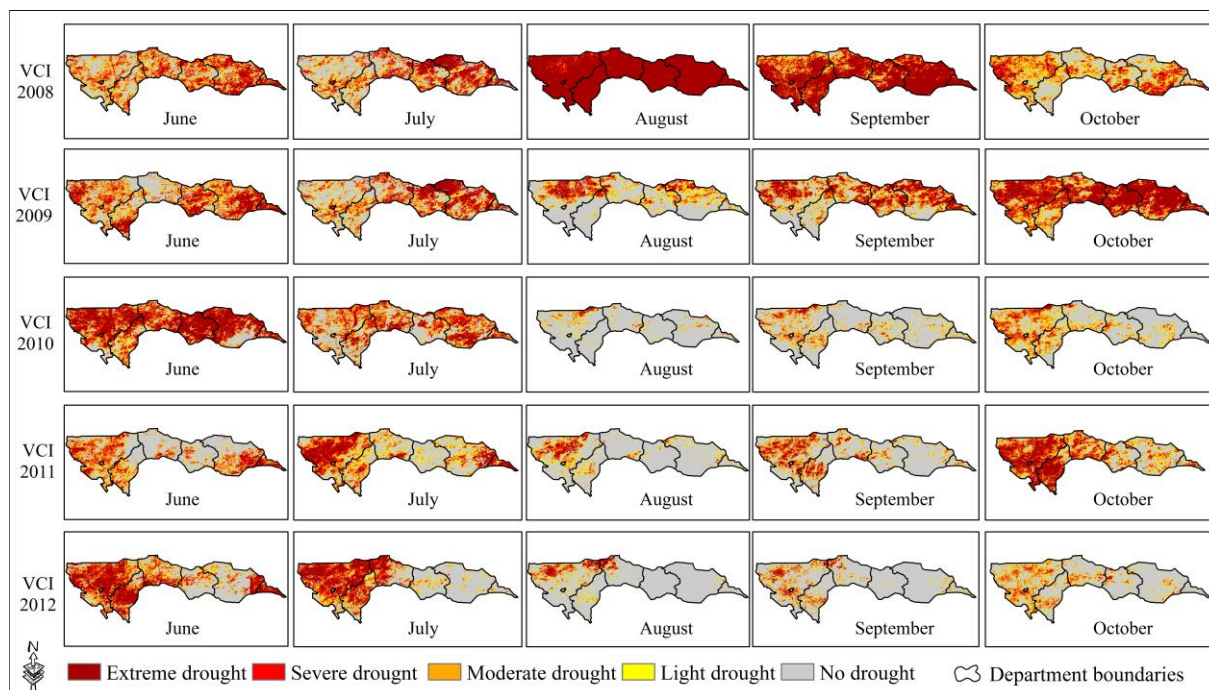


Annexe 6 : Cartes de l'indice de condition de précipitation (PCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017

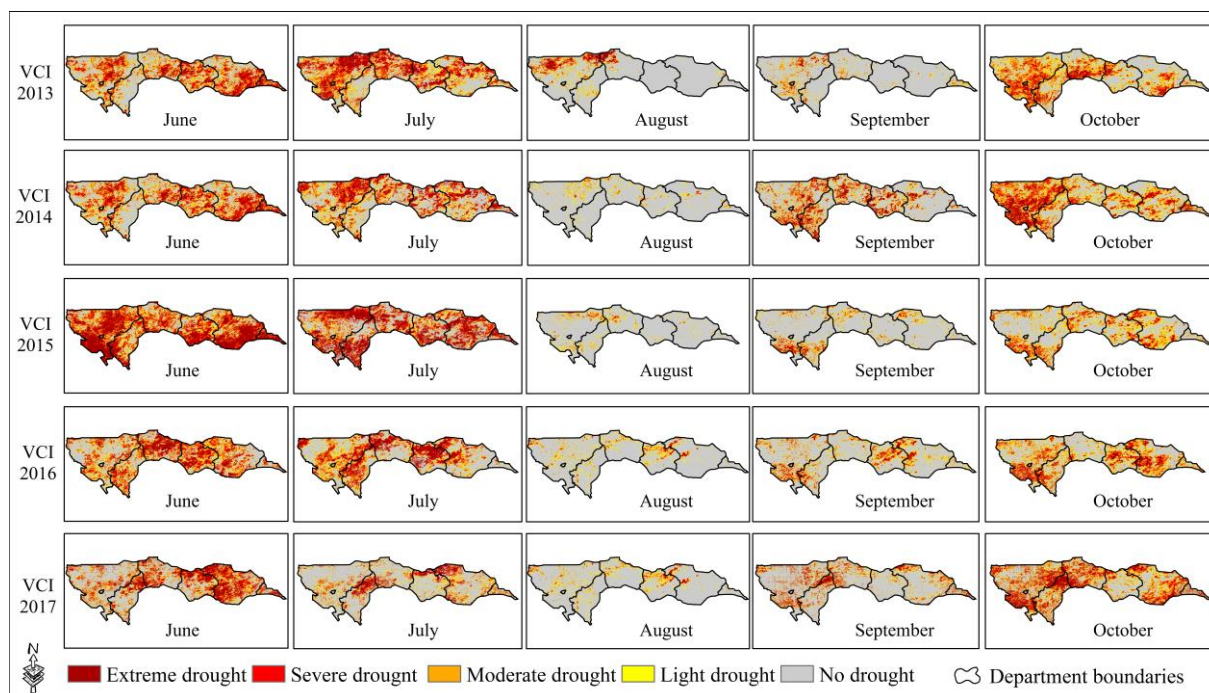


Annexe 7 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007

Annexes

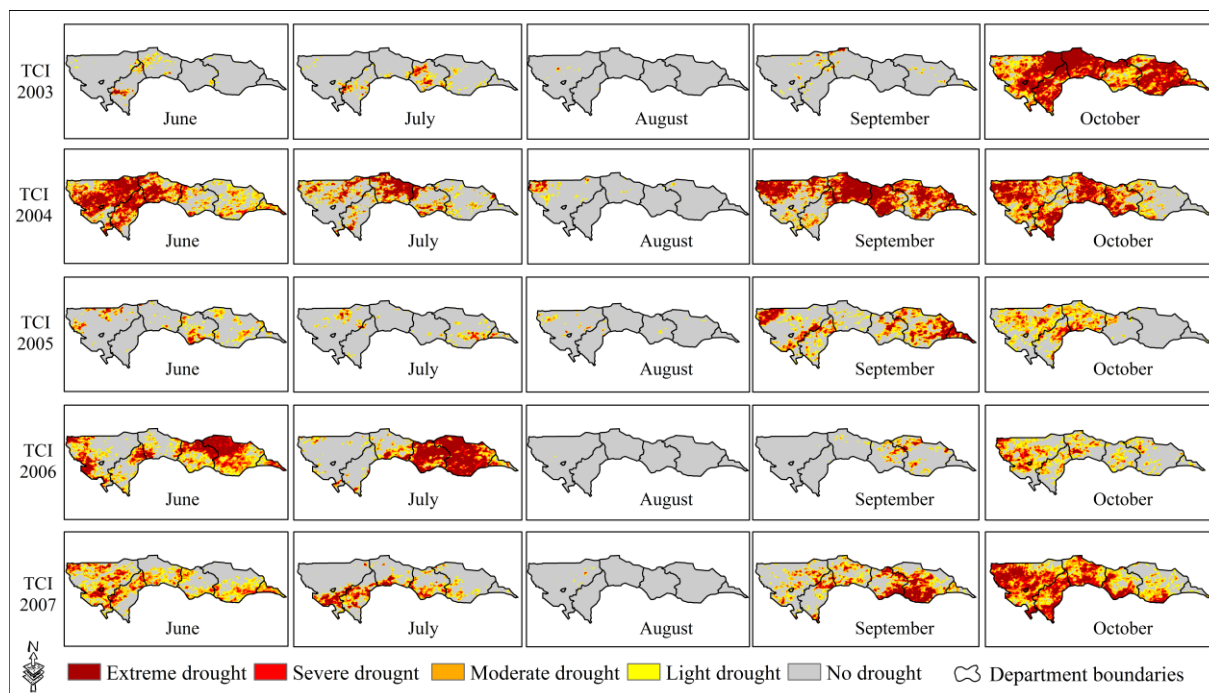


Annexe 8 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

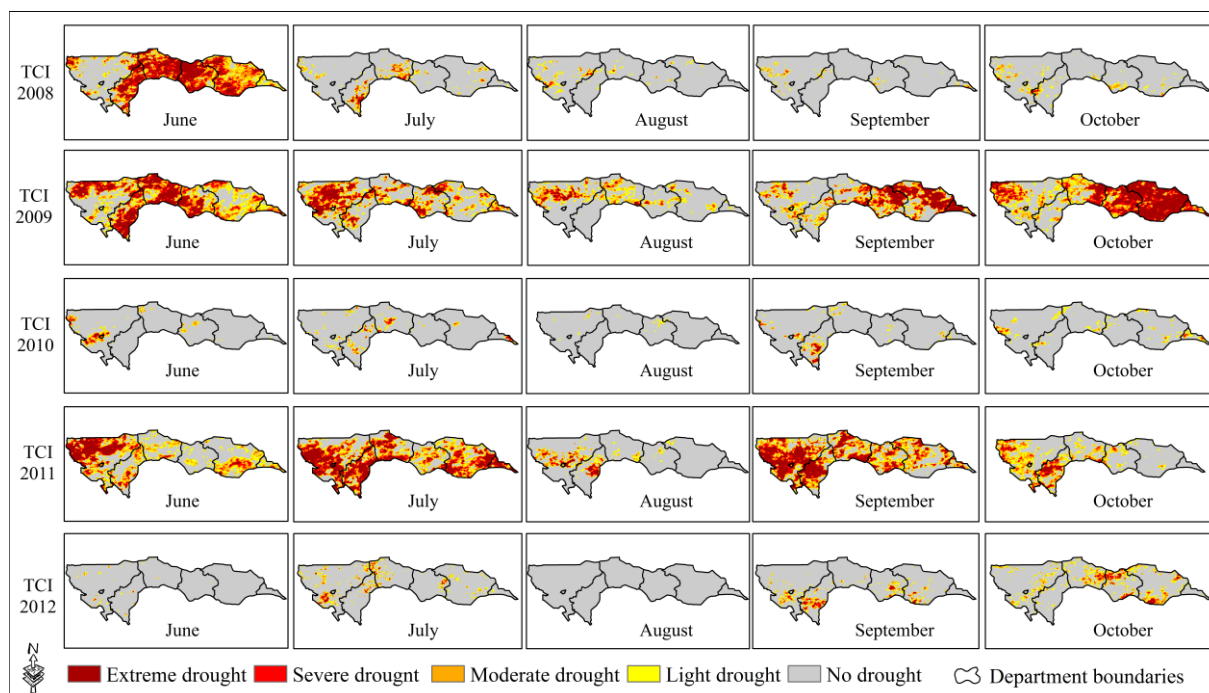


Annexe 9 : Cartes de l'indice de condition de végétation (VCI) de juin à octobre à partir de 2013 à 2017

Annexes

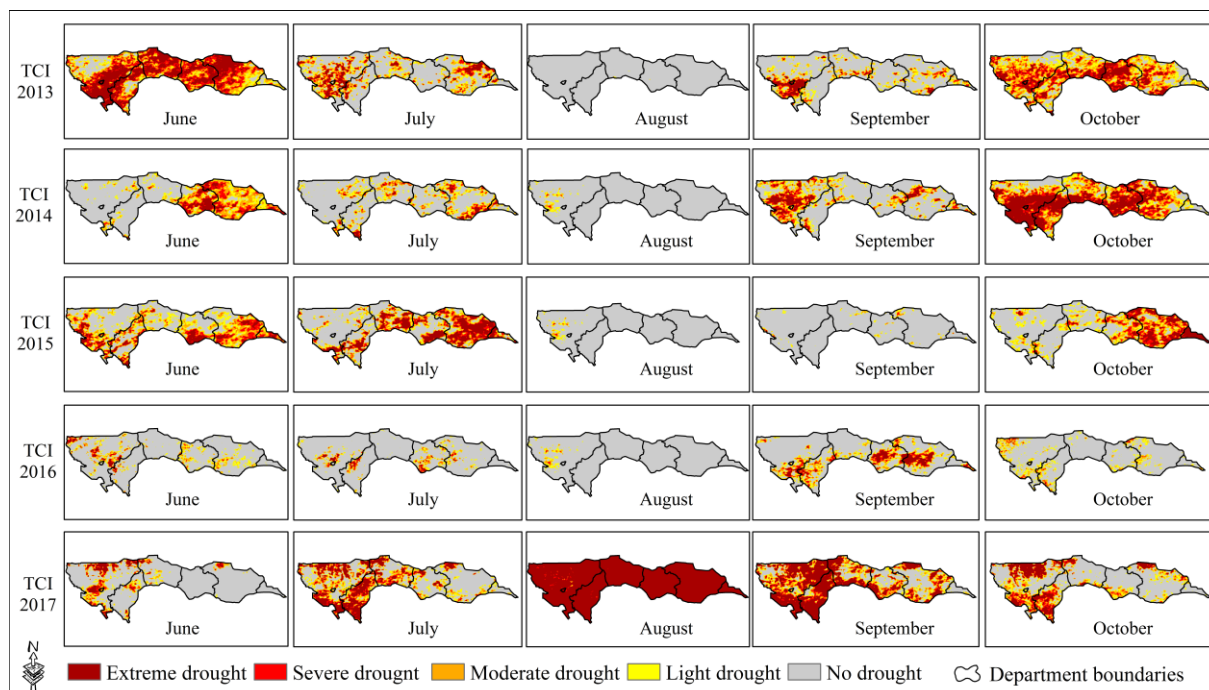


Annexe 10 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007

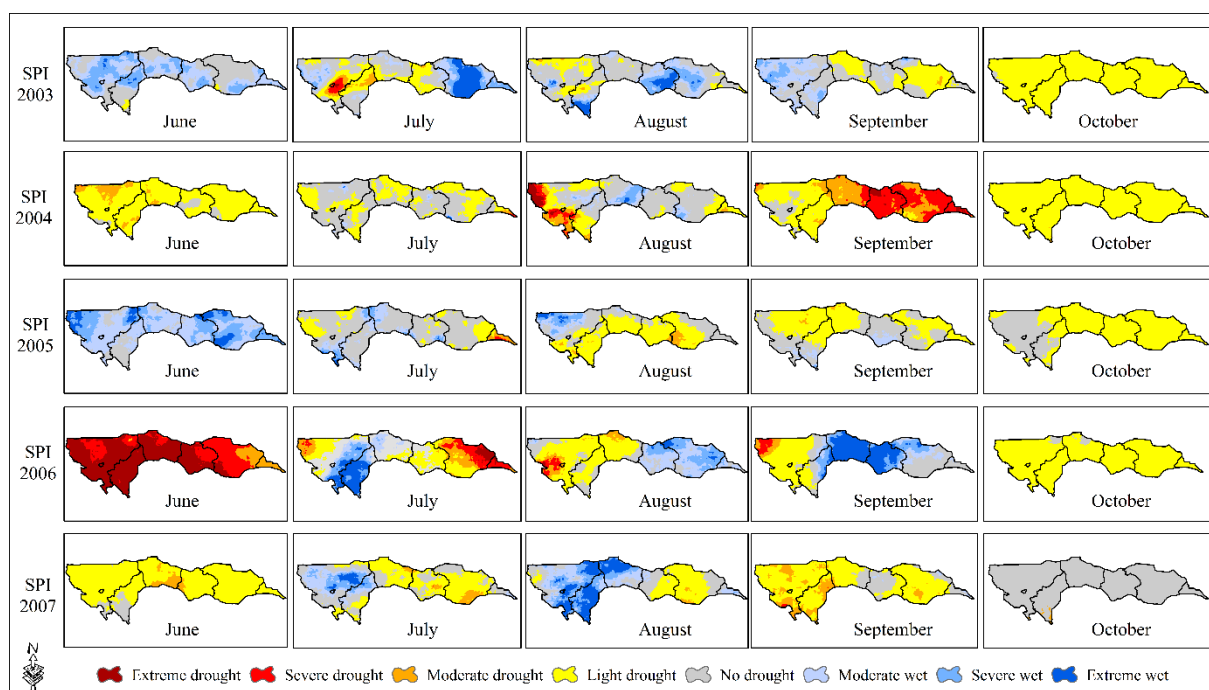


Annexe 11 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

Annexes

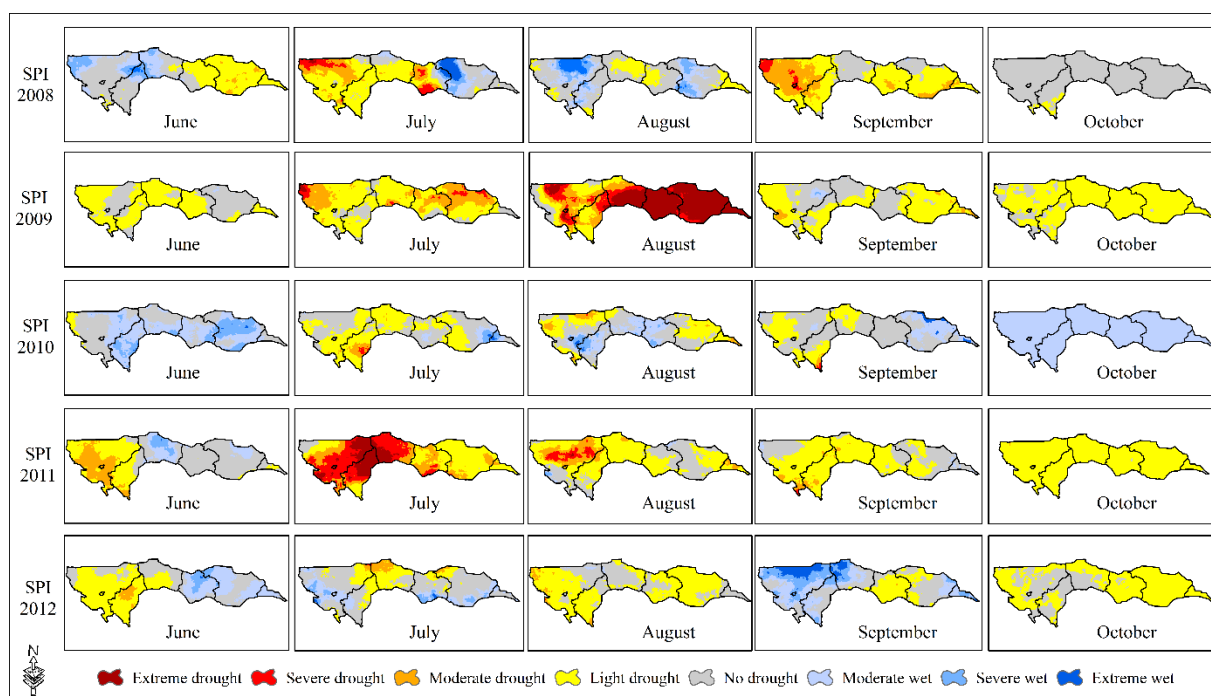


Annexe 12 : Cartes de l'indice de condition de température (TCI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

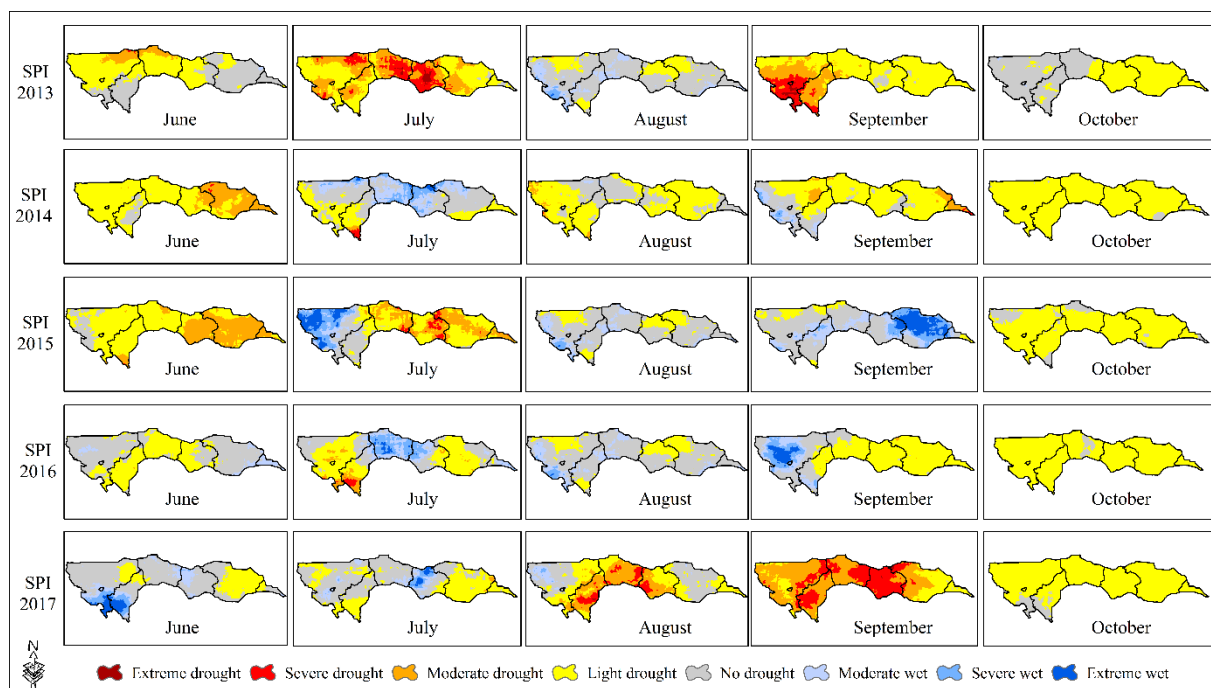


Annexe 13 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007

Annexes

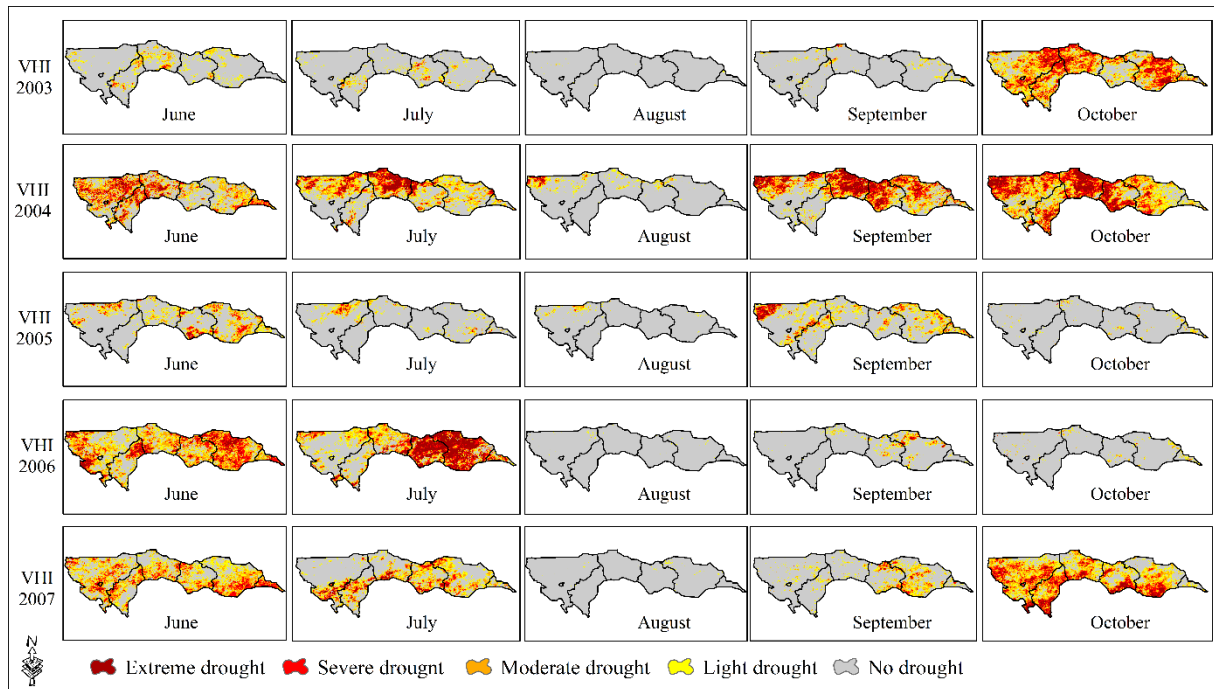


Annexe 14 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

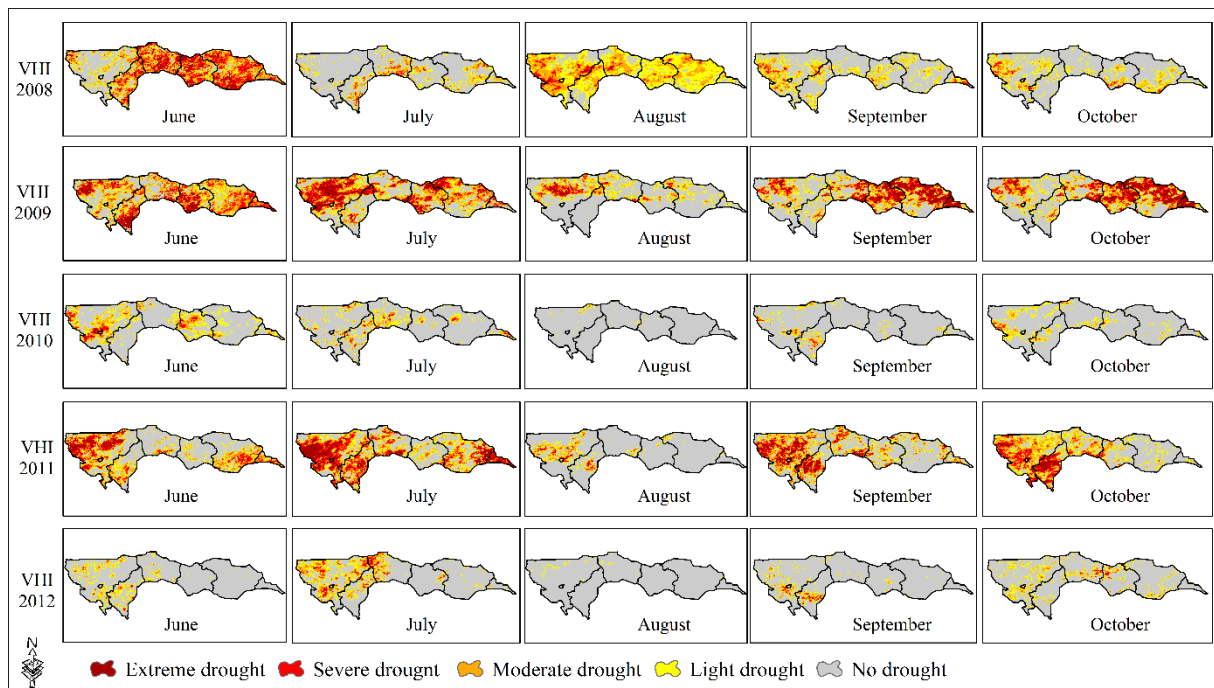


Annexe 15 : Cartes de l'indice de précipitation standardisé (SPI) de juin à octobre à partir de 2012 à 2017

Annexes

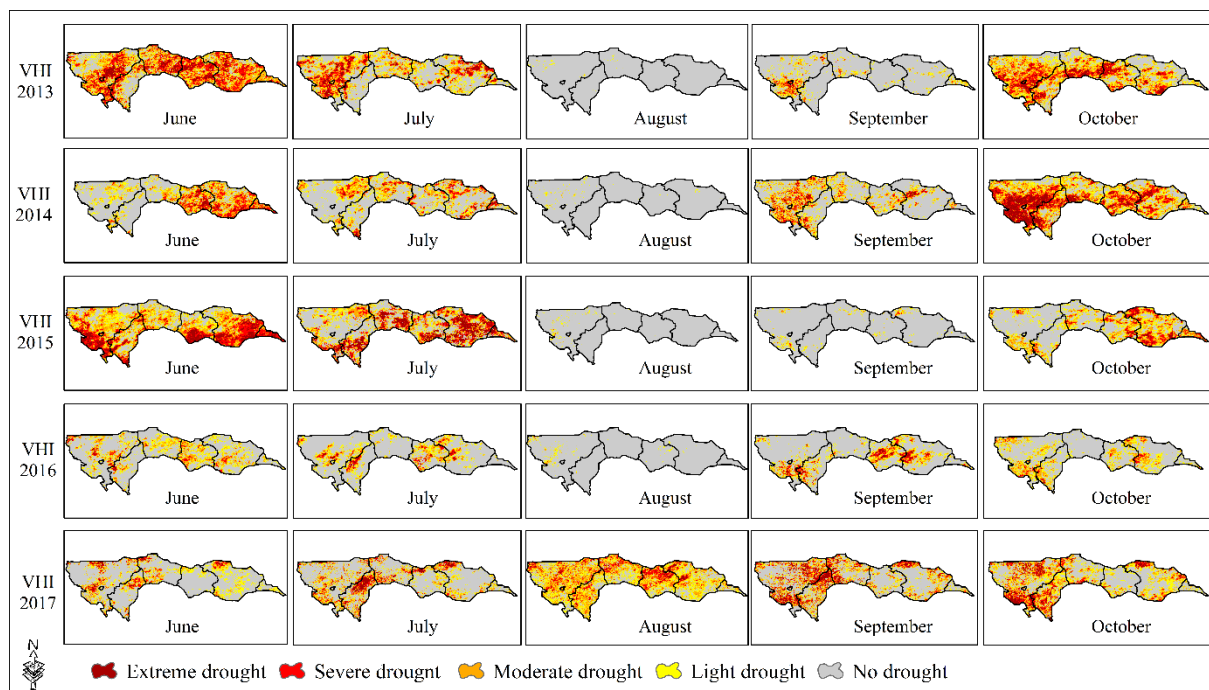


Annexe 16 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2003 à 2007



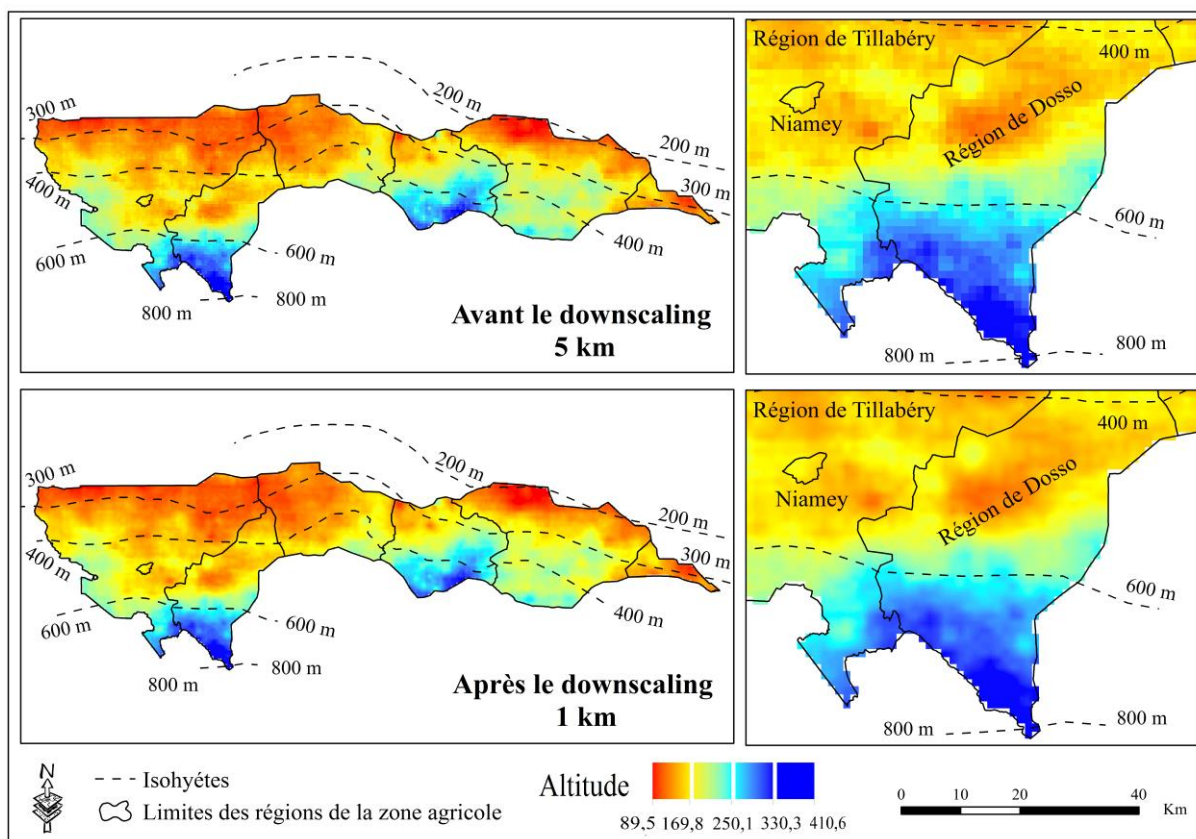
Annexe 17 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2008 à 2012

Annexes

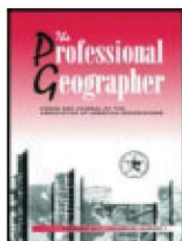


Annexe 18 : Cartes de l'indice de santé de végétation (VHI) de juin à octobre à partir de 2012 à 2017

Annexes



Annexe 19 : Résultat du rééchantillonnage des données de précipitation CHIRPS de 5 km à 1 km, cas du mois d'août 2003



The Professional Geographer



ISSN: 0033-0124 (Print) 1467-9272 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/rtpg20>

A New Index to Better Detect and Monitor Agricultural Drought in Niger Using Multisensor Remote Sensing Data

Mamane Barkawi Mansour Badamassi, Ahmed El-Aboudi & Paul Gérard Gbetkom

To cite this article: Mamane Barkawi Mansour Badamassi, Ahmed El-Aboudi & Paul Gérard Gbetkom (2020): A New Index to Better Detect and Monitor Agricultural Drought in Niger Using Multisensor Remote Sensing Data, *The Professional Geographer*, DOI: [10.1080/00330124.2020.1730197](https://doi.org/10.1080/00330124.2020.1730197)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00330124.2020.1730197>



Published online: 23 Mar 2020.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 34



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rtpg20>

Annexe 20 : Article N°1 scopus publié dans la revue *The Professional Geographer* en tant qu'auteur principale

A New Agricultural Drought Index to Better Detect and Monitor Millet Crop by Remote Sensing in West Africa: Case of Niger

Mansour Badamassi Mamane Barkawi*, Ph.D. Student in the Third Year Department of Biology Faculty of Science, Mohammed University, Ibn Batouta Avenue, Rabat, Morocco. E-mail: barkawimansour@gmail.com

El-Aboudi Ahmed, Professor of Higher Education (PES) Department of Biology Faculty of Science, Mohammed University, Rabat, Morocco.

Gbetkom Paul Gerard, Ph.D Student, Department of Geographic, Faculty of Arts, Letters, Languages, and Human Sciences, Aix Marseille University, Marseille, France.

Abstract--- In this paper, we propose to establish a remote sensing-based agricultural drought indicator named Agricultural Drought Condition Index (ADCI) that will detect agricultural drought linked mainly to millet crops in the agricultural area of Niger. It is obtained by combining four key parameters: Precipitation Condition index (PCI), Evapotranspiration Condition Index (ETCI), Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI). PCI is used to reflect precipitation deficit (Du et al., 2013), VCI is used to reflect variations in the health status of vegetation, TCI is used to identify vegetation stress produced by high temperatures or excessive humidity and ETCI is used to reflect crop shortage. ADCI is calculated over the crop growth period (June to October) from 2003 to 2017 in the agricultural area of Niger. Then, a comparison analysis between the ADCI results and the millet crop yield was carried out. Based on these results, ADCI shows a very statistically significant correlation with the millet crop yield throughout the millet growth period (June-October) and it is strongly correlated with the VHI index but provided better drought conditions than VHI. This new index is quite powerful and capable to identify and monitor the agricultural drought related to the cultivation of millet.

Keywords--- Agricultural Drought, Agricultural Drought Condition Index (ADCI), Chirps, Modis, Principal Component Analysis, Niger.

I. Introduction

Drought is one of the most dangerous natural phenomena that exists today. Many researchers like (Kogan 1997; Park et al 2004; Jang 2004) have been working on this topic. Its consequences can be disastrous even in highly developed countries. In Niger, the agricultural sector is very often threatened by chronic agricultural droughts followed by extensive damage (environmental degradation, financial crisis, loss of human life and animal). Agricultural drought is classified as a calamity that can affect the economy and society at regional to national extents (Wilhite, 2000). For example in Niger, the 2004 drought created a cereal deficit of -21% on the national agricultural production. The 2009 drought created a cereal deficit of -12% and that of 2011 a deficit of -18% (Michiels et al., 2012). The 2009 drought led to the loss of 2.7 million head of livestock by starvation, and an additional 357,000 animals were affected. The total value of the capital lost in the crisis attributable to the drought is approximately \$ 805 million (Douglas and Sally, 2014).

Therefore, it is important to have a reliable and accurate tool that can correctly estimate the start, severity, and ending of a drought event to assist decision-making. Therefore, to better study the phenomenon of drought, it will be important to combine all aspects that can lead to drought. It has mainly two ways to calculate drought indices: from meteorological observation or from remote sensing data (Wilhite and Glantz 1985; Park et al 2004; Jang 2004). According to Rockström et al (2002), indicators resulting from meteorological observations are useful in rain farming. These indices are resulting from point data that are preferable for temporal monitoring at a point location but are not reliable in a spatial dimension. The disadvantage of meteorological data is that their use in a large area, as in our case, requires a high density of points which is difficult to obtain (Padhee et al., 2017). In addition, in order to know the spatial situations of drought from this data, an interpolation method is required (Du et al., 2013). However, according to Rhee et al (2010), the interpolation result is not always reliable because it can be affected by many factors. Therefore, indicators resulting from remote sensing is the ideal way for drought monitoring (Rhee et al., 2010). It offers a synoptic vision covering large areas instantly, high repetitiveness adapted to the monitoring of dynamic phenomena over time (Mishra and Singh, 2010).

DOI: 10.5373/JARDCS/V11SP11/20193132

ISSN 1943-023X

Received: 23 Sep 2019/Accepted: 18 Oct 2019

1023

ÉTUDE PAR TÉLÉDÉTECTION DE LA DYNAMIQUE URBAINE DE LA VILLE DE NIAMEY (NIGER) DE 1985 À 2016 ET VARIATIONS CONCOMITANTES DE LA PLUVIOMÉTRIE

Mamane Barkawi MANSOUR BADAMASSI¹, Ahmed EL ABOUDI¹, Driss TAHIRI², Abdelali TAOUSS³,
Paul Gérard GBETKOM⁴

RÉSUMÉ

Depuis quelques décennies, la ville de Niamey connaît une croissance démographique exponentielle, 242 973 habitants en 1977 et 1 164 680 habitants en 2016. Ce phénomène a entraîné une forte dynamique urbaine caractérisée par l'augmentation et la densification des espaces urbanisés, ayant pour conséquence une extension de la ville au détriment des espaces naturels périurbains. Cette étude a pour but de mettre en évidence l'évolution de la ville de Niamey par télédétection de 1985 à 2016 et d'analyser parallèlement les variations de la pluviométrie durant la même période au moyen de l'Indice de Précipitation Standardisé (SPI). L'approche méthodologique adoptée consiste à cartographier l'évolution de la ville de Niamey par traitement d'images Landsat à quatre dates (1985, 1994, 2003, 2016) à travers une classification dirigée par l'algorithme du maximum de vraisemblance. À l'issue de ces résultats il ressort une extension de l'espace bâti principalement dans la direction Nord-Ouest et d'Ouest en Est de la ville de Niamey qui se fait aux dépens des zones de cultures, de sol nu et de la végétation. Pour l'évaluation du SPI, les données de précipitations CHIRPS sur une période de 34 ans (1981-2014) ont été retenues pour le calcul de cet indicateur de sécheresse météorologique, mettant ainsi en évidence les périodes sèches et les périodes humides enregistrées depuis 1981 dans la ville de Niamey. La confrontation de l'évolution de l'occupation du sol et des variations pluviométriques permet d'analyser leurs interactions.

MOTS-CLÉS

Images Landsat, urbanisation, Niamey, sécheresse, télédétection, analyse diachronique.

1. INTRODUCTION

Niamey est la ville la plus peuplée du Niger à cause d'un fort exode rural dû à l'attractivité économique et administrative de la ville. Le taux de fécondité est de 7,5 enfants par femme en 2015 (Banque Mondiale), ce qui explique une forte croissance démographique ayant pour conséquence une consommation d'espace à des fins de construction de base (bâti plus infrastructures). En quelques décennies, Niamey est devenue une grande agglomération grâce à ses fonctions politiques, administratives et commerciales. Sa croissance démographique s'est traduite par une extension rapide de la ville : le nombre de quartiers a été en moins d'un siècle multiplié par 16 : 5 quartiers lors de l'installation de la ville sur le plateau en 1937, et 89 aujourd'hui (Motcho *et al.*, 2005). L'extension de ces infrastructures de base se fait aux dépens de la végétation et des espaces cultivés environnants. Dans ce contexte d'explosion démographique et d'intensification des activités économiques, les espaces naturels jouent un rôle essentiel dans la ville, afin d'assurer un équilibre écologique. Cependant, ces espaces naturels connaissent d'importantes transformations dont la principale est leur conversion en zone d'habitation (Aminata, 2006). Au-delà de ce phénomène d'extension urbaine, la ville de Niamey (ville continentale) est confrontée à une baisse de pluviosité et la hausse des températures, ce qui conduit généralement à des sécheresses de type météorologique. Ces sécheresses impactent le couvert végétal et les ressources en eau de surface conduisant à des famines, des dégradations des sols et même à des pertes en vie (humaines et animales). Cela permet de s'interroger sur l'influence que peut avoir la sécheresse dans les mutations spatiales urbaines. Ainsi, pour un développement durable d'une ville ou d'un pays, la connaissance précise

1. Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc. Laboratoire de Botanique, Mycologie et Environnement. Courriel : barkawimansour@yahoo.fr

2. Institut Agronomique et Vétérinaire (IAV) Hassan II, Rabat.

3. Bureau d'étude Topographique GEOSPHERE, Témara, Maroc.

4. Faculté des arts, des lettres, langues et sciences humaines, Université Aix-Marseille, France.

Research Article

Mapping Change Detection of LULC on the Cameroonian Shores of Lake Chad and its Hinterland through an Inter-Seasonal and Multisensor Approach

Paul Gérard Gbetkom^{1, 2}, Sébastien Gadal¹, Ahmed El Aboudi², Alfred Homère Ngandam Mfondoum³, Mamane Barkawi Mansour Badamassi²

¹Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, 13545 Aix-en-Provence, France

²Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 1014, 4 avenue ibn battouta Rabat, Morocco

³Stats N' Maps, Private Consulting Firm, 13015 Audelia road, suite 9128, Dallas, Texas, USA

Publication Date: 12 September 2018

Correspondence should be addressed to *Paul Gérard Gbetkom*, paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr

DOI: <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.381>

Copyright © 2018 Paul Gérard Gbetkom, Sébastien Gadal, Ahmed El Aboudi, Alfred Homère Ngandam Mfondoum, Mamane Barkawi Mansour Badamassi. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Annexe 23 : Article N°4 non scopus publié dans la revue International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS en tant que co-auteur

Mapping of Built up Areas in the Cameroonians Shores of Lake Chad and its Hinterland through based Object Classification of Sentinel 2 Data

Paul Gérard Gbetkom, Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ,
Aix-en-Provence, France.*

*Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4 Avenue IBN Battouta Rabat Morocco.
E-mail: paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr*

*Sébastien Gadal, Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, Aix-en-Provence,
France. E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr*

*Ahmed El Aboudi, Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4 Avenue IBN Battouta
Rabat Morocco. E-mail: elaboudi@gmail.com*

*Alfred Homère Ngandam Mfondoum, Stats N'Maps, Private Consulting Firm, Audelia Road, Suite, Dallas.
E-mail: ngandamh@yahoo.com*

*Mamane Barkawi Mansour Badamassi, Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4
Avenue IBN Battouta Rabat Morocco.*

Abstract--- The objective of the paper is to carry out the spatial distribution of the built-up areas in the Cameroonians shores of the Lake Chad and its hinterland through orientated-object classification. The methods used combines spectral and statistical processing's. For the Principal Component Analysis (PCA) performed, the first component contains 87% of information. The built up areas indices have also computed, like Urban Index (UI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) based on sentinel 2 satellite images of April 2017. The components 3 and 6 of PCA and the built up indices are stacked with originals spectral bands to generate a new composite image. This new image is then segmented and classified by Support Vector Machines (SVMs) algorithm, submitted to a threshold analysis. The result is a classified image on which the identification of built-up areas from the others spatial objects is possible and the spatial distribution of built-up areas is countable.

Keywords--- Built-up Areas, Support Vector Machines, Cameroon, Lake Chad.

Annexe 24 : Article N°5 scopus publié dans la revue Journal of Adv Research in Dynamical & Control Systems en tant que co-auteur

