

Alerte précoce et sécurité alimentaire: test de la modélisation de prévision de rendements agricoles via les logiciels GeoWRSI, Spirits et CgmsStat Tools

Auteur : Peeters, Amaury

Promoteur(s) : Tychon, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée pays en développement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5554>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



ULg

Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**ALERTE PRECOCE ET SECURITE ALIMENTAIRE : TEST DE LA
MODELISATION DE PREVISION DES RENDEMENTS AGRICOLES
DU MIL ET DU SORGHO AU NIGER AVEC LES LOGICIELS
GEOWRSI, SPIRITS ET CGMS STAT TOOL**

AMAURY PEETERS

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT A FINALITE PAYS EN
DEVELOPPEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2017 – 2018

PROMOTEUR : Pr. BERNARD TYCHON

« *Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.* * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg »

"Le présent document n'engage que son auteur"

« Auteur du présent document :
PEETERS Amaury, amaury.peeters556@gmail.com »



ULg

Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**ALERTE PRECOCE ET SECURITE ALIMENTAIRE : TEST DE LA
MODELISATION DE PREVISION DES RENDEMENTS AGRICOLES
DU MIL ET DU SORGHO AU NIGER AVEC LES LOGICIELS
GEOWRSI, SPIRITS ET CGMS STAT TOOL**

AMAURY PEETERS

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT A FINALITE PAYS EN
DEVELOPPEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2017 – 2018

PROMOTEUR : Pr. BERNARD TYCHON

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à mon promoteur, le Pr. Bernard Tychon, sans qui je n'aurais pas pu faire ce stage au Centre Régional AGRHYMET, stage qui fut ma première expérience en Afrique. Je le remercie également pour tous les enseignements qu'il m'a dispensés.

Ensuite, je voudrais remercier le Dr. Bakary Djaby, qui m'a chaleureusement accueilli au sein du CRA et qui, malgré ses nombreuses missions, a toujours su trouver le temps pour m'épauler et m'aiguiller lorsque j'avais des difficultés.

Je tiens également à remercier Mr Ibrahim Makadaoure de FEWS NET, qui a pris son temps pour m'apprendre les rudiments du logiciel GeoWRSI, toujours avec le souci du détail.

Je veux aussi remercier toutes les personnes ressources qui ont contribué à ce stage, je pense à Mr Yahaya Mounkaila du service des statistiques agricoles du ministère de l'agriculture du Niger, Mme Aissa Sitta du centre météorologique du Niger, et enfin un tout grand merci au Dr. Hervé Kerdiles, du JRC, qui, grâce à sa patience indéfectible, m'a permis de maîtriser les logiciels SPIRITS et CGMS Stat Tool.

Mes derniers remerciements vont à mes proches, ma famille et aux personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce projet.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Besoin de consommation humaine.....	12
Tableau 2 : Questionnaires de l'EPER pour la collecte de statistiques agricoles	18
Tableau 3 : Données utilisées.....	28
Tableau 4 : Tendances liées aux rendements historiques sur plusieurs périodes.....	35
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des résultats	43

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Rendements officiels du mil pour Madarounfa et Tessaoua (1985 - 2017).....	13
Graphique 2 : Rendements officiels du sorgho pour Madarounfa et Tessaoua (1985 – 2017)	13
Graphique 3 : Evolution du NDVI pour Madarounfa (2002 – 2017).....	27
Graphique 4 : Les différentes tendances existantes à Tessaoua pour la culture sorgho.....	34
Graphique 5 : Tessaoua : R ² du rendement du mil pour les variables CRain et TSW	39
Graphique 6 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Tessaoua (2002 - 2017) - Mil – Crain + TSW - décade 24	39
Graphique 7 : Tessaoua : R ² du rendement du sorgho – CRad + TSW	40
Graphique 8 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Tessaoua (2002 - 2017) - Sorgho – CRad + TSW.....	40
Graphique 9 : Madarounfa : R ² du rendement du mil - WRSI.....	41
Graphique 10 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Madarounfa (2002 - 2017) - Mil - WRSI - décade 21	41
Graphique 11 : Madarounfa : R ² du rendement du sorgho - CETO.....	42
Graphique 12 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Madarounfa (1989 - 2017) - Sorgho - CETO - décade 24	42

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Situation géographique du Niger en Afrique de l'Ouest	5
Carte 2 : Situation géographique de la région Maradi au Niger.....	6
Carte 3 : Situation géographique des départements Tessaoua et Madarounfa dans la région Maradi	7
Carte 4 : Zonage agro-écologique du Niger - Les zones climatiques. Source : AGRHYMET..	7
Carte 5 : Moyenne de la pluviométrie (pluies estimées) pour le Niger sur la période 2002 - 2017	9

SIGLES ET ABREVIATIONS

AGRHYMET	: Centre Régional de Formation et d'Application en Agro météorologie et Hydrologie Opérationnelle
AMS	: AgroMetShell
AMSU	: Advanced Microwave Sounding Unit
BIOMASAH	: Modèle d'évaluation de la BIOMASSE herbacée des parcours du SAHEL
CCD	: Cold Cloud Duration
CHG	: Climate Hazard Group
CGMS	: Crop Growth Monitoring System
CHIRPS	: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CILSS	: Comité Permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CST	: CGMS Statistical Tool
CRA	: Centre Régional Agrhymet
DHC	: Diagnostic Hydrique des Cultures
DHC - CP	: Diagnostic Hydrique des Cultures – Champs Pluviométriques
DMSP	: Programme de satellites météorologiques pour la Défense
ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EOS	: End of Season
ERA	: ECMWF Re-Analysis
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEWS NET	: Famine Early Warning System Network
GeoWRSI	: Geo-spatial Water Requirement Satisfaction Index
INS	: Institut National des Statistiques
JRC	: Joint Research Centre
LGP	: Longueur de la période de croissance
MARS	: Monitoring Agricultural ResourceS

NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
OPE	: Operational
PET	: Evapotranspiration potentielle
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
RGP/H	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RFE	: Rainfall estimated
RMSE	: Root Mean Square Error (ou erreur quadratique moyenne)
RUM	: Regional and Unmixed Means
SARRA_H	: Système d'Analyse Régional de Risques Agro climatique Habillé
SIG	: Système d'Information Géographique
SOS	: Début de la saison (date de semis)
SPIRITS	: Software for the Processing and Interpretation of Remotely Sensed Image Time Series
SPOT VGT	: Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre VEGETATION
SSM / I	: Special Sensor Microwave / Imager
SWI	: Indice d'eau dans le sol
TSW	: Surplus total en eau
USGS	: Institut d'études géologiques des Etats-Unis
WHC	: Capacité de rétention en eau
WRSI	: Indice de satisfaction des besoins en eau

AVANT PROPOS

Lors de ma deuxième année de master en sciences et gestion de l'environnement (finalité Pays en Développement), le Pr. Bernard Tychon m'a proposé de partir au Niger au Centre Régional AGRHYMET pour réaliser mon stage à la suite de son cours d'alerte précoce et sécurité alimentaire. J'ai voulu saisir l'opportunité d'approfondir mes connaissances dans le domaine de la modélisation de prévision de rendement agricole.

Le Centre Régional AGRHYMET est un centre de recherche spécialisé dans le domaine de l'agrométéorologie. Il s'intéresse à de nombreux problèmes liés à la sécheresse, la désertification et la sécurité alimentaire. C'est une institution du Comité Permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS), organisation intergouvernementale d'Afrique de l'Ouest qui fut créée en 1973 pour lutter contre l'insécurité alimentaire, la sécheresse et la désertification (Unité communication AGRHYMET, 2016).

L'objectif de ce stage d'un mois a été de créer une base de données sur plusieurs unités administratives du Niger pour les utiliser dans une modélisation de prévision de rendement agricole. L'originalité de mon travail fut d'extraire des données via des logiciels qui n'ont pas encore été utilisés professionnellement, c'est pourquoi il est important de préciser que les résultats finaux ne seront peut-être pas concluants, l'un des logiciels utilisés étant encore en phase de développement. Pour créer une base de données avec une profondeur suffisante pour être utilisée dans ma modélisation, il a fallu que je rencontre de nombreuses personnes ressources, notamment du service des statistiques agricoles du ministère de l'agriculture du Niger, le centre de météorologie et les personnes ressources de l'AGRHYMET.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
LISTE DES TABLEAUX	II
LISTE DES GRAPHIQUES	II
LISTE DES CARTES	II
SIGLES ET ABREVIATIONS	III
RESUME	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE	2
1.1. PROBLEMATIQUE	2
1.1.1. Questions de recherche	3
1.1.2. Hypothèses de départ.....	3
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	4
1.2.1. Objectif général	4
1.2.2. Objectifs spécifiques.....	4
1.3. PRESENTATION DU NIGER ET ZONE D'ETUDE (MADAROUNFA ET TESSAOUA)	5
1.3.1. Caractéristiques du milieu naturel du Niger	7
1.3.1.1. Relief.....	8
1.3.1.2. Ressource en eau et pluviométrie.....	8
.....	9
1.3.1.3. Sol et végétation.....	9
1.4. AGRONOMIE DES CULTURES SECHES (MIL ET SORGHO)	10
1.4.1. Le mil.....	10
1.4.2. Le sorgho	11
1.5. PLACE DU MIL ET DU SORGHO DANS LA CONSOMMATION HUMAINE NIGERIENNE ET EVOLUTION DES RENDEMENTS POUR TESSAOUA ET MADAROUNFA	12
1.5.1. Rendements officiels du mil pour Madarounfa et Tessaoua	13
1.5.2. Rendements officiels du sorgho pour Madarounfa et Tessaoua.....	13
CHAPITRE 2 : LITTERATURE.....	15
2.1. CONCEPTS CLES	15
2.1.1. Rendement agricole	15
2.1.2. Modèle de prévision de rendement.....	15

2.2.	PREVISION DES RENDEMENTS : QUELQUES EXEMPLES DE MODELES EXISTANTS	15
2.2.1.	Modèle SARRA-H	15
2.2.2.	Modèles DHC et DHCCP	16
CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE		17
3.1.	MATERIELS	17
3.1.1.	Statistiques agricoles du Niger	17
3.1.2.	GeoWRSI.....	19
3.1.2.1.	Présentation.....	19
3.1.2.2.	Données d'entrées	20
3.1.2.3.	Données de sortie geoWRSI	22
3.1.2.4.	Points forts	24
3.1.2.5.	Limites	24
3.1.2.6.	Pistes d'amélioration.....	25
3.1.3.	Données ECMWF :	26
3.1.4.	Images NDVI.....	27
3.1.5.	Images de pluie estimées CHIRPS	27
3.1.6.	Données de station.....	28
3.1.7.	Tableau récapitulatif des données utilisées pour la modélisation.....	28
3.2.	METHODE	29
3.2.1.	Choix des unités administratives	29
3.2.2.	Configuration et utilisation de GeoWRSI	29
3.2.2.1.	Importation des données d'entrée	29
3.2.2.2.	Région	29
3.2.2.3.	Culture.....	30
3.2.2.4.	Calibrage des images de pluie estimées.....	30
3.2.2.5.	Extraction des données	30
3.2.3.	Utilisation de SPIRITS	30
3.2.4.	Utilisation de CGMS Stat Tool	31
3.2.4.1.	Création d'une base de données Access	32
3.2.4.2.	Analyse des tendances	33
3.2.4.3.	Analyse de régression	36
3.2.4.4.	Sélection des modèles	36
3.2.4.5.	Points forts de CST	37
3.2.4.6.	Limites de CST	37
3.2.5.	Méthodologie générale	37
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		39
4.1.	PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL A TESSAOUA.....	39
4.2.	PREVISION DES RENDEMENTS DU SORGHU A TESSAOUA.....	40
4.3.	PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL A MADAROUNFA	41

4.4. PREVISION DES RENDEMENTS DU SORGHO A MADAROUNFA	42
4.5. TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS.....	43
4.6. DISCUSSIONS.....	43
CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	47
WEBOGRAPHIE	48
ANNEXES	I

RESUME

Le Niger est un pays sahélien d'Afrique de l'Ouest qui fait partie des pays les plus vulnérables et les plus exposés aux variations climatiques. La pratique des cultures sèches (pluviales non irriguées) est l'activité principale. Le mil et le sorgho sont les céréales les plus consommées et constituent la base de l'alimentation des Nigériens. Le rendement de ces céréales dépend donc exclusivement des aléas climatiques et de la pluviométrie.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des techniques de prévision de rendement agricole au Niger dans le but de programmer des activités (précoces) pour faire face aux situations de crise alimentaire ou de surproduction. L'utilisation du logiciel GeoWRSI (modèle de bilan hydrique) a permis de sortir les données décennales du WRSI (Indice de satisfaction des besoins en eau) et de 4 autres indicateurs. L'hypothèse de départ est que ces indicateurs peuvent être performants et être corrélés à la variabilité interannuelle des rendements historiques des deux départements nigériens Madarounfa et Tessaoua. Le logiciel SPIRITS a été utilisé pour l'extraction des données statistiques. Enfin, la modélisation finale est effectuée aux moyens du logiciel CGMS Stat Tool, qui propose une méthode simplifiée et facile d'utilisation.

Les résultats obtenus restent faibles mais sont tout de même encourageants. La méthode doit encore être exploitée et testée sur d'autres régions avec d'autres données de rendements historiques. Il est important d'approfondir encore les potentialités de bilan hydrique du modèle GeoWRSI pour savoir s'il peut être un logiciel qui contribuerait à l'amélioration des alertes précoces au Niger.

Mots clés : mil, sorgho, rendement, modèle, geoWRSI, Spirits, CGMS Stat Tool, Niger

ABSTRACT

Niger is a Sahelian country situated in Western Africa. It is one of the most vulnerable and exposed places considering climatic variations. Dry cultures (pluvial not irrigated) are the country's main activity. Millet and sorghum provide the essential base of the population's food. These cereals' yield exclusively depends on climatic hazards and rainfall.

The main objective of this project is to contribute to the improvement of the agricultural yield forecast techniques in Niger with the aim of scheduling activities to face situations of food crisis or overproduction. The use of the GeoWRSI software (hydraulic balance model) allowed to take out the dekadal datas of the WRSI (Water Requirement Satisfaction Index) and of 4 other dekadal indicators (soil water index, length of the growing period, total surplus water and WRSI anomaly). The first hypothesis is that these indicators can be competitive and can be correlated to the interannual variability of the historical yields in the departments of Madarounfa and Tessaoua. The SPIRITS software was used to extract statistical datas. The final modelling is achieved with the CGMS Stat Tool software which offers an easy method of use.

The obtained results are poor but they are still encouraging. The method must be run again and tested in other areas with other historical yield datas. It is important to improve the potentialities of the GeoWRSI model in order to know if it would really contribute to the improvement of premature alerts in Niger.

Keywords : millet, sorghum, yield, model, geoWRSI, Spirits, CGMS Stat Tool, Niger

INTRODUCTION

Au Niger comme en Afrique de l'Ouest, l'agriculture est toujours le secteur d'activité employant la majorité de la population avec 76 % de la population en 2017, selon les données de la Banque Mondiale. Le maintien de la sécurité alimentaire constitue l'un des enjeux capitaux de ce pays sahélien. Cependant, cet objectif n'est pas toujours rempli car le rendement des cultures est très dépendant du climat, extrême dans cette région du monde. Avec des sécheresses prolongées et une pluviométrie irrégulière et en baisse depuis des décennies (malgré une récente remontée des isohyètes), le Niger doit également faire face à une croissance démographique en pleine expansion.

Ainsi, il est essentiel de développer des outils d'aide à la décision. De nombreux modèles tels que SARRA-H sont déjà utilisés actuellement dans les pays sahéliens, mais la recherche de modèles toujours plus fiables et robustes reste l'un des principaux objectifs de l'Afrique de l'Ouest. Une bonne gestion de crise alimentaire repose d'abord sur l'alerte précoce. Il faut pouvoir identifier à l'avance quelles seront les zones les plus déficitaires en cas de déficit de production céréalière.

Ce projet a pris sa source à l'Université de Liège, où il m'a été confié la mission de créer une base de données sur plusieurs départements nigériens en vue de tester un nouveau type de modélisation des rendements agricoles. Cette mission m'a d'abord menée au Niger, au Centre Régional AGHRYMET de Niamey où j'ai pu constituer ma base de données. Le projet m'a ensuite conduit au Centre commun de recherche (JRC) d'Ispra.

Ce travail de fin d'étude est divisé en 4 parties : le premier chapitre est le contexte de l'étude qui contient la problématique, la présentation du milieu, l'agronomie des cultures sèches (mil et sorgho) ainsi que la place de ces deux cultures dans l'économie nationale. Le deuxième chapitre concerne la revue de la littérature. Le troisième traite du matériel disponible et de la méthodologie utilisée. Enfin, le dernier chapitre expose les résultats de l'étude ainsi que les discussions.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. PROBLEMATIQUE

Depuis très longtemps, la production de mil en suffisance est capitale pour le maintien de la sécurité alimentaire au Niger. Ce pays d'Afrique de l'Ouest subit un climat aride et semi-aride et le mil est la céréale qui se développe le mieux dans ces conditions extrêmes où la saison des pluies (hivernage) peut être limitée à 3 mois. Avec le sorgho, ces deux céréales constituent les principales denrées alimentaires des populations sahéniennes puisque pas moins de 50 millions d'habitants du Sahel consomment le mil quotidiennement (Courcoux, 2009). Nous verrons au fil de ce travail que la production de mil et de sorgho peut varier très fortement d'une année à l'autre car elle est très dépendante des conditions climatiques et environnementales qui deviennent, d'année en année, de plus en plus difficiles (désertification, faible pluviométrie, etc.).

Etant l'un des pays les plus pauvres au monde, le revenu par habitant de 358 dollars (2010) le classe parmi les pays les plus sous-développés. Son indice de développement humain (Programme des Nations Unies pour le Développement) est l'un des plus faibles au niveau mondial (0,353 en 2016) (E. Grégoire, M. Gazibo, S. Gazibo, n. d.). Le Niger subit également une très forte croissance démographique, avec un taux annuel supérieur à 3,5 % (Département Agriculture et Services Environnementaux (AES) de la Banque Mondiale, 2013). La nécessité d'augmenter le rendement par hectare du mil est devenu en enjeu capital pour faire face à l'explosion démographique qui menace le Niger de nouvelles situations de famines.

Le service des statistiques du ministère de l'agriculture du Niger a la charge de réaliser annuellement le bilan céréalier, qui permet d'estimer le volume de céréales déficitaire ou excédentaire en fonction des besoins alimentaires de la population (Afrique Verte, 2005). Il ressort que la balance entre la production et les besoins alimentaires est très irrégulière d'année en année. Le bilan céréalier brut (calculé avant le solde import/export) est très souvent négatif, ce qui implique que le Niger est tributaire des importations commerciales. Ces importations ont pour objectif d'obtenir un bilan céréalier net positif. En ce qui concerne le bilan céréalier brut, on peut parler de déficit tendanciel ou structurel car on retrouve cette situation pratiquement tous les ans.

Enfin, même si le bilan céréalier est positif, il ne reflète que la situation nationale. Certaines zones du pays sont déficitaires tous les ans, ce qui peut impliquer de nombreux

changements socio-démographiques tels que l'exode vers des zones plus propices à l'agriculture, qui reste l'activité économique qui emploie la majorité des Nigériens. Une prévision des rendements précoce à l'échelle départementale constituerait un atout et permettrait au gouvernement de pouvoir anticiper quelles zones seront les plus déficitaires.

En Afrique de l'Ouest, la question de la prévision des rendements de culture au niveau régional et départemental est donc indispensable et doit être renforcée pour permettre d'informer et de situer les zones les plus déficitaires. Actuellement, le modèle BIOMASAH (développé par AGRHYMET) utilise les données statistiques des rendements officiels combinées avec des images satellitaires ainsi que d'autres paramètres agrométéorologiques obtenus via d'autres modèles pour établir des prévisions (GARBA, 2017). Le modèle SARRA-H est également utilisé en Afrique de l'Ouest dont la particularité est de pouvoir simuler la croissance d'une culture pour analyser les risques liés au climat (Alhassane A., Traore S. B., Bonnal V., 2013). Il permet de faire une analyse allant de la parcelle à la région et donc permet d'identifier les zones déficitaires.

1.1.1. Questions de recherche

- Les indicateurs utilisés pour la modélisation permettront-ils d'obtenir une prévision des rendements agricoles fiable et précoce pour le mil et le sorgho ?
- L'utilisation des trois logiciels (GeoWRSI, SPIRITS et CST) dans le cadre de ce mémoire pourrait-elle être utile à la prévision des rendements agricoles au niveau professionnel ?

1.1.2. Hypothèses de départ

- L'utilisation des indicateurs de sortie de GeoWRSI, les images NDVI et les données climatiques du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) permettrait d'obtenir des modèles fiables et précoces pour la sécurité alimentaire.
- L'utilisation des logiciels cités dans la question de recherche pourrait être utile à des professionnels dans le cadre d'une prévision des rendements agricoles.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

1.2.1. Objectif général

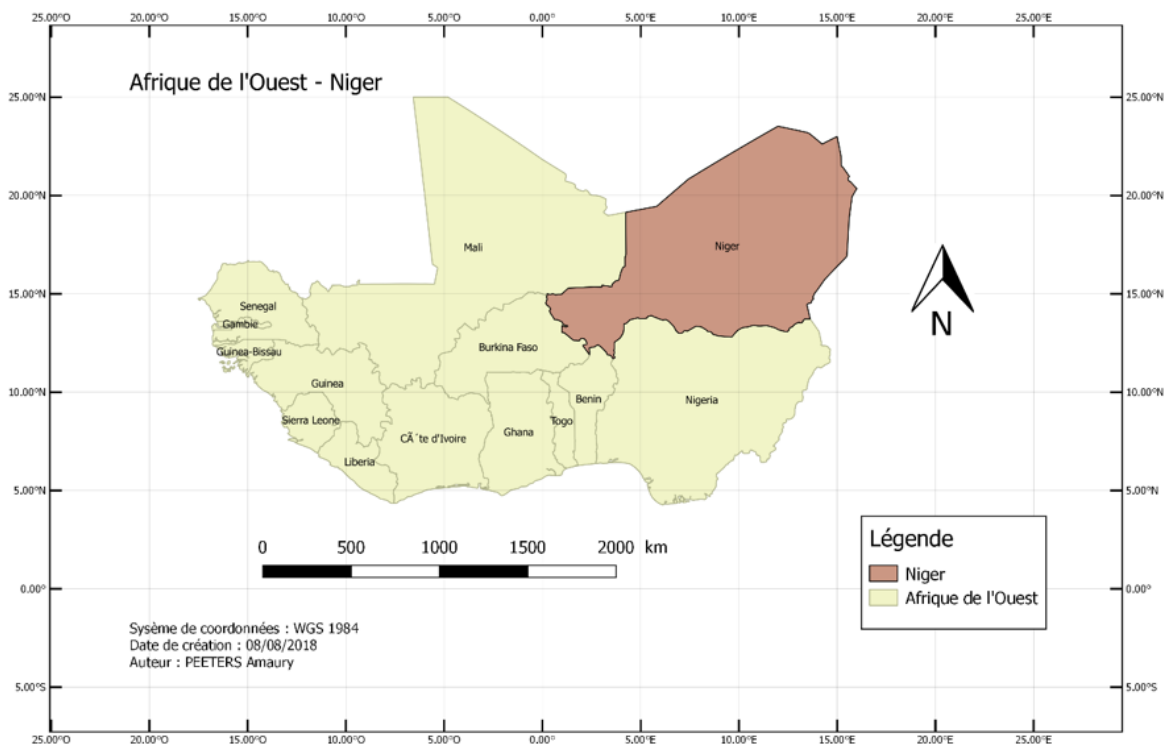
Contribuer à l'amélioration des techniques de prévision de rendement agricole au Niger dans le but de programmer des activités (précoces) pour faire face aux situations de crise alimentaire ou de surproduction.

1.2.2. Objectifs spécifiques

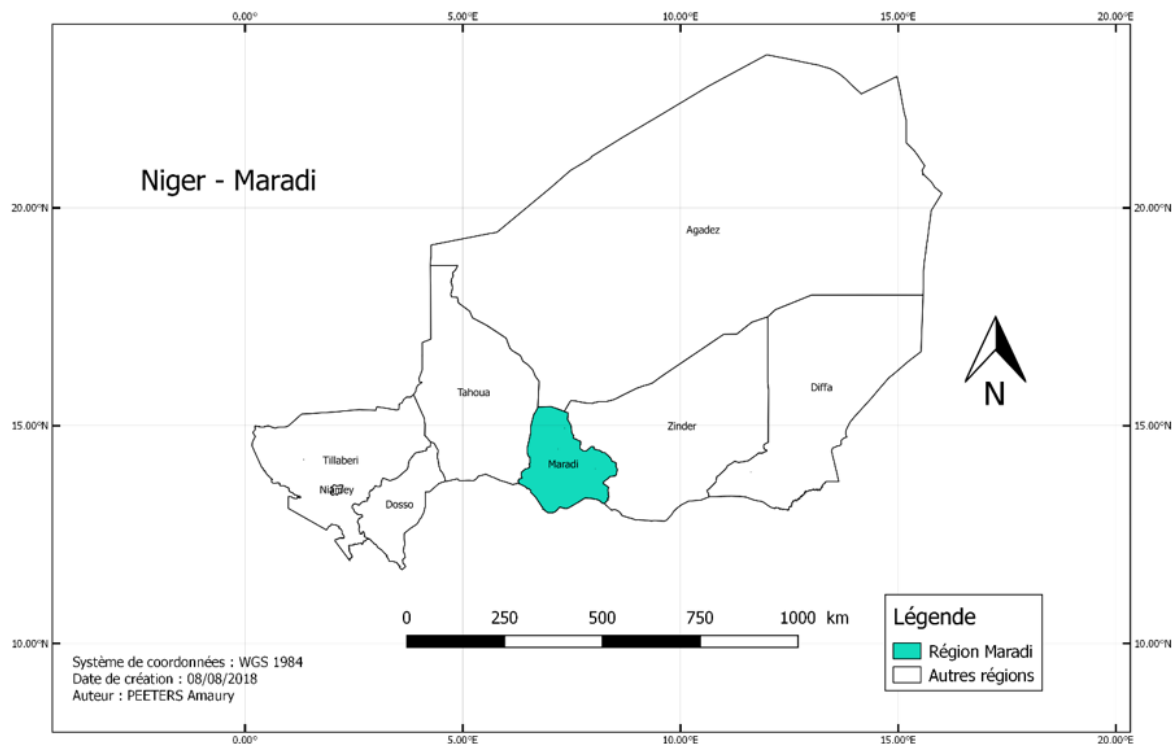
- Maîtriser les logiciels GeoWRSI, SPIRITS et CGMS Stat Tool dans le but de tester des nouveaux indicateurs lors de la modélisation de prévision de rendements agricoles.
- A partir des différents modèles obtenus, identifier les indicateurs qui influencent le rendement du mil et du sorgho dans les unités administratives de Madarounfa et Tessaoua.
- Dans une optique d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire, identifier et sélectionner les modèles les plus précoces pour permettre au gouvernement nigérien d'anticiper les situations de crise.

1.3. PRESENTATION DU NIGER ET ZONE D'ETUDE (MADAROUNFA ET TESSAOUA)

Le Niger est un pays d'Afrique de l'Ouest sans littoral enclavé entre l'Algérie au nord-est, la Libye au nord, le Mali à l'ouest, le Tchad à l'est, le Nigéria au sud ainsi que le Bénin et le Burkina Faso au sud-ouest. Il est situé entre les longitudes 0°10 Ouest et 16 ° Est et entre les latitudes 11°37 et 23°33 Nord. La capitale est Niamey, située au sud-ouest du pays. C'est également la plus grande ville du pays et la plus peuplée. D'une superficie de 1 267 000 km², la majorité du territoire nigérien (74 %) se trouve en zone saharienne (Comité Interministériel de Pilotage de la Stratégie de Développement Rural, 2004).



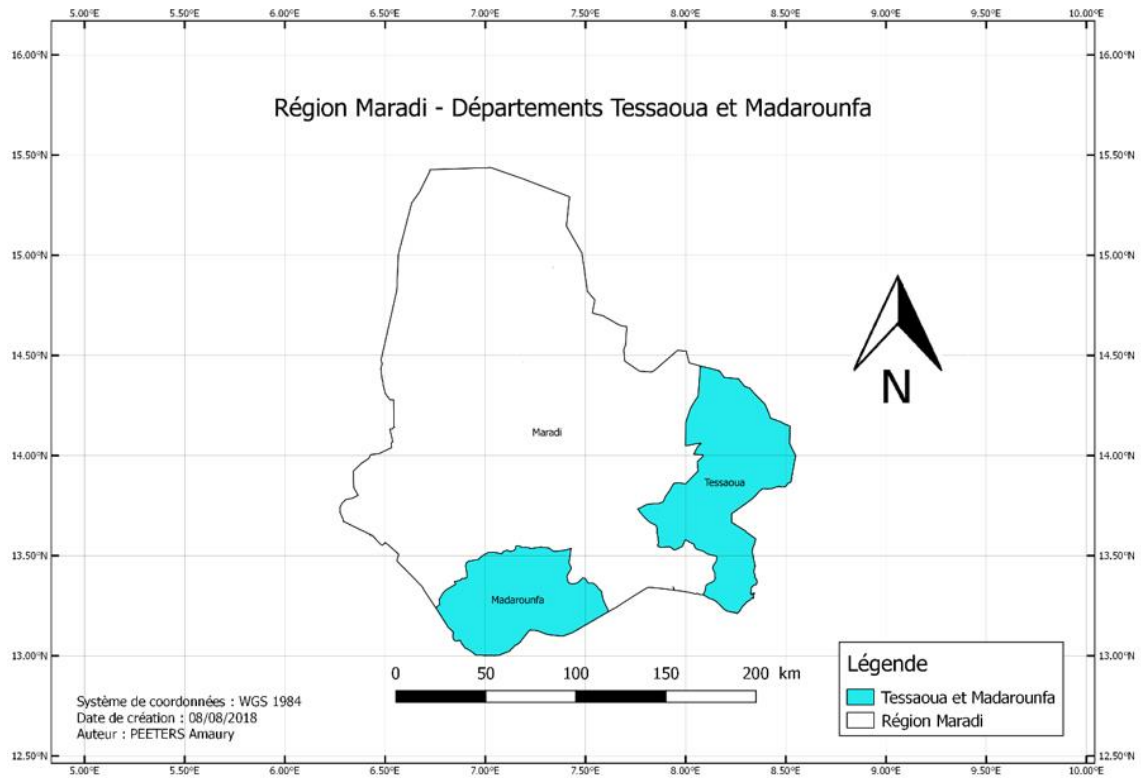
Carte 1 : Situation géographique du Niger en Afrique de l'Ouest



Carte 2 : Situation géographique de la région Maradi au Niger

Le Niger est divisé respectivement en 8 régions, elles-mêmes divisées en 63 départements. Depuis son indépendance en 1960, le pays a subi de nombreuses réformes administratives. La dernière date de 2012, le nombre de département étant passé de 36 à 63. Ce démembrement administratif fut l'un des critères de sélection de mes zones d'étude (voir partie 3.2.1. Choix des unités administratives), les deux se trouvant dans la région de Maradi.

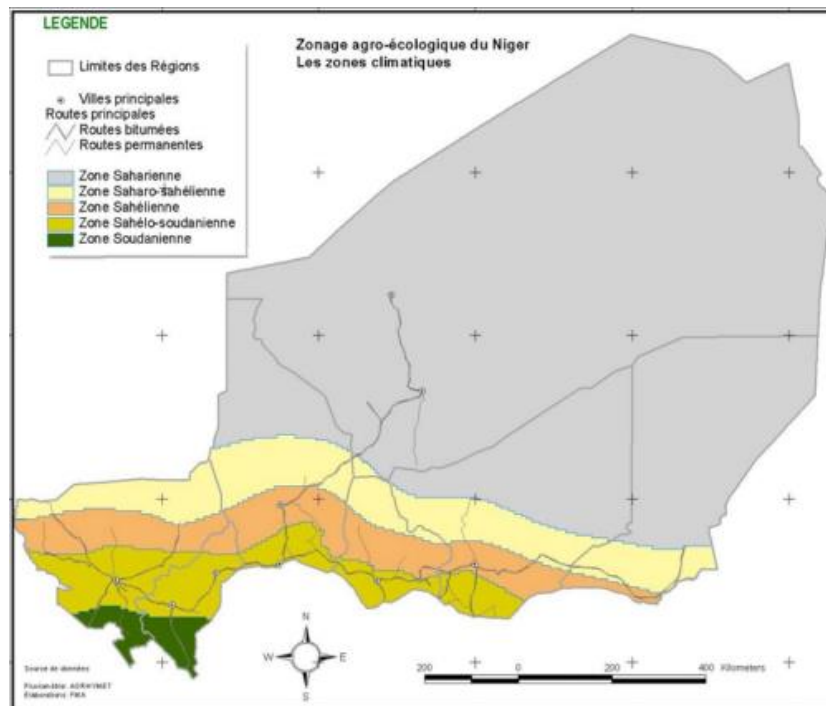
Cette région a une superficie de 38 500 km² et est située dans le centre-sud du pays. Selon la FAO, c'est la capitale économique du Niger. Cette région est la plus peuplée du Niger avec 4 160 231 habitants selon les projections démographiques de l'Institut National des Statistiques (INS). A titre de comparaison, lors du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGP/H) de 2014, la région comptait 3 402 094 habitants (Institut National de la Statistique, 2014). On en conclut que cette région nigérienne subit une forte pression démographique qui est en constante augmentation. Maradi représente 3,3 % du territoire national (Barké & Kjm, 2015). Cette région subit de nombreuses contraintes environnementales, notamment la dégradation des sols dunaires, propices au développement du mil.



Carte 3 : Situation géographique des départements Tessaoua et Madarounfa dans la région Maradi

L'un est situé en zone sahélo-soudanienne (Madarounfa) et l'autre est à cheval sur la zone sahélo-soudanienne et sahélienne (Tessoua).

1.3.1. Caractéristiques du milieu naturel du Niger



Carte 4 : Zonage agro-écologique du Niger - Les zones climatiques. Source : AGRHYMET

1.3.1.1. Relief

Le Niger a un relief très peu marqué avec une pénéplaine de 200 à 300 mètres d'altitude qui s'étend sur la majorité du pays (du désert du Sahara au bassin du Tchad) (JAICAF, 2009).

Le pays est subdivisé en différentes zones climatiques qui se différencient en fonction des précipitations annuelles moyennes. Sur la carte 4, on peut voir que la majorité du pays est occupé par le désert du Sahara où la pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse pas 200 millimètres. Ces conditions extrêmes ne permettent pas l'activité agricole.

En bordure de la zone saharienne se trouve la zone saharo-sahélienne qui représente environ 10 % du territoire. La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 200 et 300 millimètres et peut parfois permettre la culture du mil s'il pleut assez. On considère cette zone comme la zone pastorale (propice à l'élevage) du Niger.

La zone sahélienne est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle variant entre 300 et 400 millimètres. Dans cette zone, l'agriculture pluviale est très répandue avec pour principales cultures les céréales telles que le mil ou le sorgho. On peut également y trouver des associations avec des légumineuses telles que le niébé. Cette zone représente 8 % du territoire.

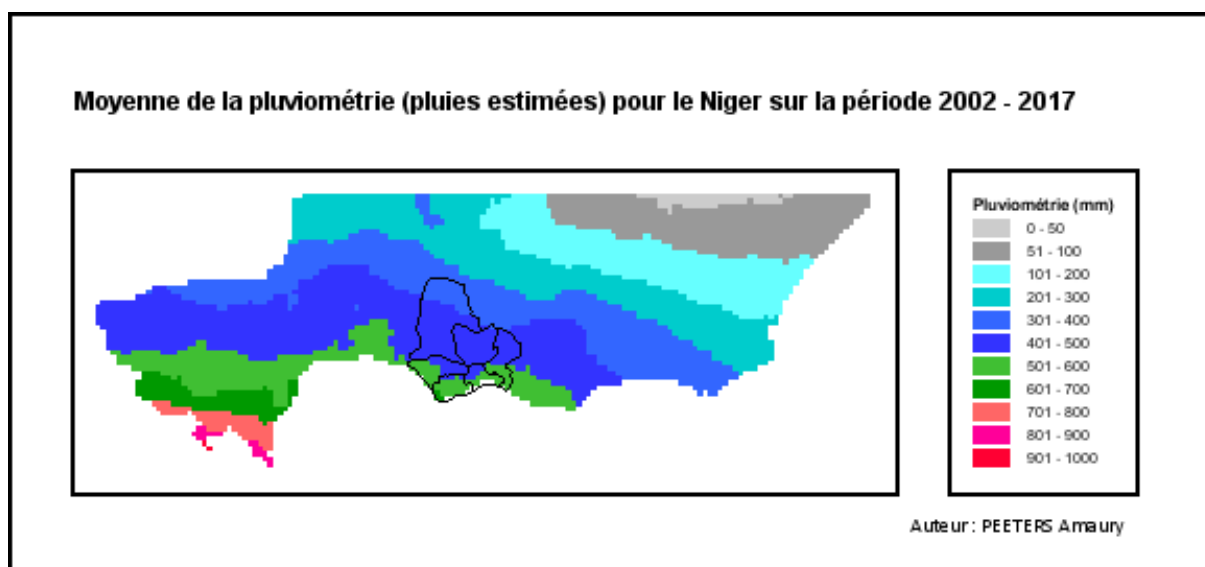
Avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 400 et 600 millimètres, la zone sahélo-soudanienne constitue une zone de forte potentialité agricole avec toujours les céréales comme culture majeure. Elle couvre 7 % du territoire.

Enfin, la dernière zone climatique est la zone soudanienne qui représente 1 % du territoire. Elle est caractérisée par une pluviométrie annuelle moyenne qui peut aller jusqu'à 800 millimètres.

1.3.1.2. Ressource en eau et pluviométrie

La principale ressource en eau du pays est le fleuve Niger. Prenant sa source en Guinée, il traverse une grande partie du Mali avant de traverser la partie sud-ouest du pays, en passant par sa capitale Niamey. D'une longueur de 4180 km, il est le troisième plus grand fleuve d'Afrique et est déterminant pour l'agriculture irriguée. Il constitue également un réservoir d'eau douce utilisée à des fins domestiques. Quelques affluents du fleuve arrivent jusqu'au lac Tchad, dont la superficie a considérablement diminué suites aux sécheresses et à la baisse de la pluviométrie annuelle qui alimente les cours d'eau qui se jettent dans le lac mais aussi

à la suite de l'utilisation massive de l'eau pour l'irrigation dans cette zone. Il est situé à l'extrême sud-est du pays.



Carte 5 : Moyenne de la pluviométrie (pluies estimées) pour le Niger sur la période 2002 - 2017

Cette carte pluviométrique de la zone agricole du Niger a été réalisée à l'aide de Spirits à partir des images de pluies estimées (voir chapitre 3.1.1.2.) obtenues avec GeoWRSI. Les images de pluies estimées par satellite ont été calibrées (merging) avec les données de station in situ pour obtenir cette carte finale. On peut voir très clairement le gradient pluviométrique nord-sud, avec une pluviométrie annuelle qui diminue plus on se déplace vers le nord. La partie vectorisée est la région de Maradi. On peut voir que Madarounfa, située entièrement dans la zone sahélo-soudanienne, profite d'une pluviométrie annuelle qui varie entre 501 et 600 millimètres, avec une pluviométrie moyenne annuelle allant jusque 700 mm pour sa partie méridionale. Pour Tessaoua, unité administrative située à la fois en zone sahélo-soudanienne au sud et sahélienne au nord, on constate une pluviométrie comprise entre 401 et 500 millimètres au nord, tandis qu'au sud, il pleut entre 501 et 600 millimètres.

1.3.1.3. Sol et végétation

Au Niger, et dans les pays sahéliens, le sol et la végétation constituent des facteurs environnementaux capitaux pour le maintien de la sécurité alimentaire. De nombreux habitants dépendent directement de ces facteurs et les surfaces cultivables sont très dépendantes de la pluviométrie. Ainsi, le Niger et l'ensemble des pays sahéliens, ont connu une fluctuation des isohyètes. Entre 1968 et 1995, c'est près de 6 millions de km² qui furent touchés par une baisse considérable de la pluviométrie avec 10 à 40 % par endroit (Descroix et al., 2015). La baisse des isohyète de 200 km vers le sud avait considérablement réduit les

surfaces cultivables et a directement aggravé la sécheresse des sols du Sahel, mettant en péril les moyens de subsistance des agriculteurs et de la population (CEDEAO-CSAO/OCDE, 2006). Depuis cet épisode sec qui a duré 27 ans, la reprise de la pluviométrie (certes faible), est indéniable (Descroix et al., 2015).

Les sols de Tessaoua et Madarounfa sont majoritairement de type ferrugineux tropicaux lessivés, très sensibles à l'érosion hydrique (Barké & Kjm, 2015). Par endroit, on retrouve également des sols ferrugineux non ou peu lessivés, des régosols (à Madarounfa) et des sols hydromorphes. Malgré leur caractère sablonneux (donc très vulnérable à l'érosion), les propriétés physiques de ces sols permettent d'y cultiver le mil et le sorgho (JAICAF, 2009), malgré une faible fertilité. De nombreuses techniques de conservation des sols tentent de contrer les effets de l'érosion éolienne et hydriques, qui réduisent le rendement des cultures (cours de conservation des sols, Tychon 2018).

1.4. AGRONOMIE DES CULTURES SECHES (MIL ET SORGHO)

Les cultures sèches sont celles qui sont réalisées uniquement en régime pluvial (pas d'irrigation) et qui sont donc totalement dépendantes des conditions climatiques. Cela engendre de très faibles productions. Au Niger, le rendement par hectare du mil varie entre 0,5 et 0,6 t/ha, tandis que le rendement du sorgho est d'environ 0,35 t/ha.

1.4.1. Le mil

C'est la céréale principale du Niger, l'un des pays producteurs principaux d'Afrique. En raison d'une pluviométrie faible et très variable d'année en année, d'une température très élevée, de sols peu fertiles et d'insectes ravageurs, sa production est très irrégulière, mais reste possible malgré toutes ces contraintes. Selon la FAO, la pression démographique a réduit la période de jachère, ce qui a engendré une dégradation des sols, ceux-ci étant surexploités.

Le mil se comporte mieux sur des sols légers qui sont riches en matière organique. Selon le catalogue national des espèces et variétés du Niger (Ministère de l'agriculture du Niger, 2012), il faut un apport de 3 à 5 tonnes de matière organique décomposée à l'hectare pour une préparation optimale du lit de semis.

La date du semis est généralement au début de la saison des pluies (juin - juillet). Il peut néanmoins être réalisé à sec, mais l'optimum du semis se situe après une pluie de 20 millimètres ou plus. La récolte se fait généralement en septembre - octobre mais peut varier d'une année à l'autre en fonction du début de la saison des pluies, très irrégulier. La longueur

de la période de croissance varie en fonction de la zone agro climatique. Généralement, elle est de 70 à 100 jours mais certaines variétés précoces peuvent avoir un cycle beaucoup plus court.

Le mil est adapté à une pluviométrie annuelle comprise entre 250 et 650 mm, c'est pourquoi on retrouve cette céréale dans de nombreux pays sahéliens.

Les techniques de conservation des sols comme le sarclage et le labour permettent un meilleur développement de la plante, augmentant ainsi le rendement. Le mil est cultivé sur des sols légers contenant plus de 65 % de sable, donc faciles à travailler.

1.4.2. Le sorgho

Toujours selon le catalogue national des espèces et variétés du Niger, le sorgho est une céréale qui peut se développer sur des sols lourds de vallées mais également des sols moyens riches en matière organique. Tout comme le mil, 3 à 5 tonnes de matière organique par hectare sont nécessaires pour une bonne préparation du lit de semis. Après la première pluie, pour les sols moyens, on pratique le scarifiage à la main pour enfuir la matière organique, tandis que pour les sols lourds, il faut labourer sur une profondeur de 30 à 40 centimètres et ensuite pratiquer le billonnage.

Il est moins cultivé que le mil car il nécessite une pluviométrie annuelle supérieure à 350 mm (JAICAF, 2009).

Globalement, une distance d'1 mètre sépare les plants de sorgho. On y pratique couramment la culture en association avec le niébé (légumineuse) ou encore le sésame.

Le sorgho en grains peut être consommé sous forme de grains entiers cuits, comme le riz. En Afrique, il est généralement consommé sous la forme bouillie de farine.

1.5. PLACE DU MIL ET DU SORGHO DANS LA CONSOMMATION HUMAINE NIGERIENNE ET EVOLUTION DES RENDEMENTS POUR TESSAOUA ET MADAROUNFA

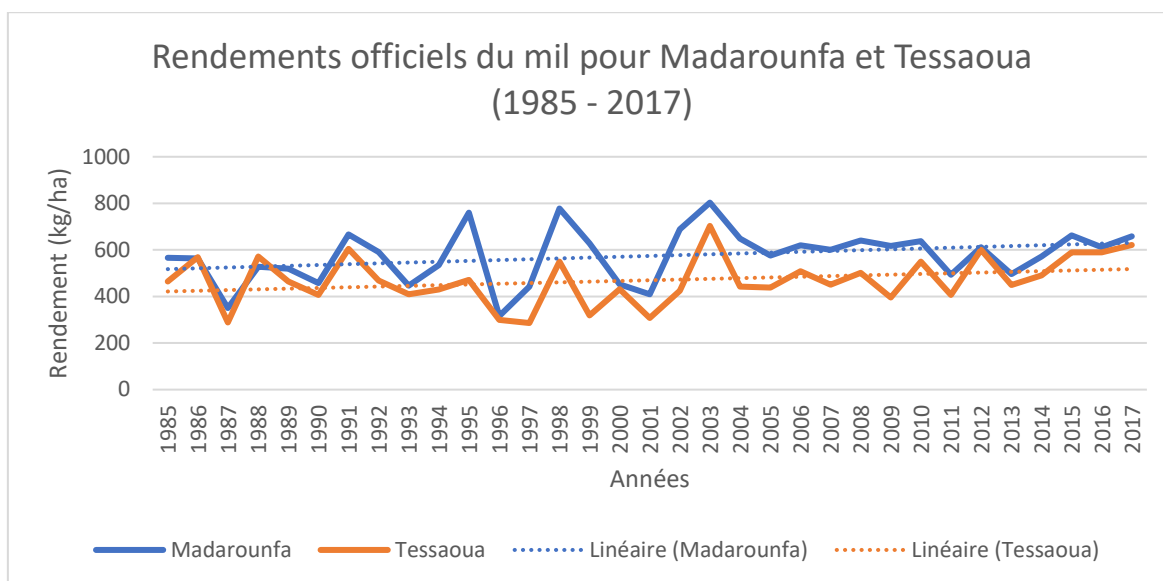
Actuellement, le Niger est le deuxième pays producteur de mil en Afrique de l'Ouest, loin derrière le Nigéria (JAICAF, 2009). En ce qui concerne le sorgho, la production nigérienne est beaucoup plus faible, notamment car il nécessite plus d'eau lors de son cycle de croissance. Selon les prévisions établies en projetant les données de population du RGP/H de 2012, la population du Niger est estimée au 30 avril 2017 à 20 520 070 habitants. Lors de l'année 2017, les besoins céréaliers (toutes céréales confondues) de la population nigérienne sont estimés à 4 740 136 tonnes, dont 4 247 654 tonnes pour les céréales sèches (mil, sorgho, maïs et fonio) soit 207 kg par habitant (voir tableau 1).

Postes	Riz	Blé	Mil+Sorgho+Maïs+Fonio	Total
Population au 30/04/2017				20 520 070
Besoins	369 361	123 121	4 247 654	4 740 136
- Norme de consommation	18	6	207	231
- Consommation humaine	369 361	123 121	4 247 654	4 740 136

Tableau 1 : Besoin de consommation humaine

Rien que pour le mil, le sorgho, le maïs et le fonio, les disponibilités cérésières excèdent aux besoins de consommation humaine selon le bilan céréalier net prévisionnel pour l'année 2017 (voir annexe 1). Pour cette année, on constate un excédent de 709 452 tonnes pour ces céréales, tandis qu'on se trouve en situation de déficit pour le riz et le blé, que le pays doit importer. Cependant, malgré cette situation nationale positive, de nombreux villages sont, chaque année, concernés par une situation de production déficitaire. Cela est notamment dû à des retards de semis, des invasions de sautereaux sur les premiers semis ou encore des épisodes de sécheresses prolongées. Pour l'année 2017, les villages concernés par des déficits de production concernent 4 869 402 habitants (plus de 23 % de la population totale) répartis dans 3837 villages soit 31 % des villages agricoles suivis. Ces statistiques prouvent que, pour l'année 2017, le pays a été auto-suffisant dans sa production cérésièrre nationale, mais que cette production reste très tributaire du climat. Une production stable d'année en année ne peut être garantie car un épisode de sécheresse prolongé ou une invasion de ravageurs peuvent totalement ruiner une campagne agricole.

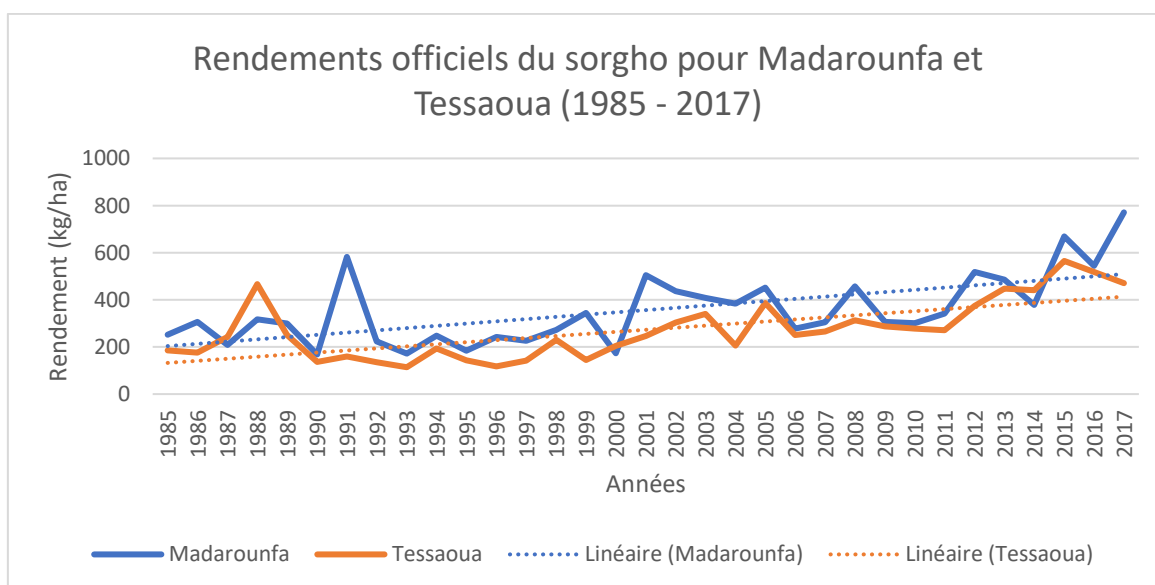
1.5.1. Rendements officiels du mil pour Madarounfa et Tessaoua



Graphique 1 : Rendements officiels du mil pour Madarounfa et Tessaoua (1985 - 2017)

Pour la période allant de 1985 à 2017, on constate sur le graphique 1 que les rendements du mil pour les deux unités administratives sont très irréguliers d'une année à l'autre. La tendance est très légèrement à la hausse mais les rendements restent très faibles. On constate également des similitudes dans l'évolution des courbes, avec des rendements qui augmentent à la fois pour Madarounfa et pour Tessaoua lors des « bonnes années », telles que 1998 et 2003. Enfin, comme Madarounfa bénéficie d'une pluviométrie plus importante, on constate des rendements supérieurs à ceux observés pour Tessaoua.

1.5.2. Rendements officiels du sorgho pour Madarounfa et Tessaoua



Graphique 2 : Rendements officiels du sorgho pour Madarounfa et Tessaoua (1985 - 2017)

Comme pour le mil, on constate sur le graphique 2 que les rendements officiels du sorgho sont très irréguliers mais sont en augmentation. Entre 1985 et 2000, on voit que les rendements varient entre 200 et 400 kg/ha, excepté pour l'année 1991 à Madarounfa où le rendement atteint 582 kg/ha. Le sorgho est une céréale qui nécessite plus d'eau que le mil pour se développer, c'est donc en toute logique que les rendements observés à Madarounfa sont supérieurs à ceux de Tessaoua.

La comparaison des deux graphiques démontre que les rendements du mil sont supérieurs à ceux du sorgho.

Pour consulter les statistiques agricoles utilisées pour ce travail, voir annexe 2.

CHAPITRE 2 : LITTERATURE

2.1. CONCEPTS CLES

2.1.1. Rendement agricole

En agriculture, le rendement représente le rapport entre la production (tonne) et la surface (hectare) cultivée. Il est exprimé en t/ha. Le rendement agricole des cultures sèches au Niger étant très faible, on exprime le rendement en kg/ha.

2.1.2. Modèle de prévision de rendement

Une composante importante pour tout système de prévision de rendement agricole régional, est le ciblage et l'analyse des données statistiques et régionales sur le rendement agricole, la superficie et la production. Afin de prévoir le rendement, il est nécessaire de connaître la variabilité interannuelle de la production agricole et de déterminer si cette variabilité peut être expliquée par un ou plusieurs facteurs / indicateurs. Ces indicateurs permettent de prédire le rendement agricole assez tôt dans la saison de croissance. Dans une optique de gestion ou d'anticipation de crise alimentaire, une prédiction précoce est indispensable, surtout dans les pays sahéliens. Une prévision des rendements précoce est importante tant sur le plan humain que sur le plan économique car cela permet de faciliter les échanges commerciaux. Les indicateurs utilisés sont souvent dérivés à partir des données météorologiques, des informations de satellite ou des modèles de simulation.

2.2. PREVISION DES RENDEMENTS : QUELQUES EXEMPLES DE MODELES EXISTANTS

2.2.1. Modèle SARRA-H

Le modèle agronomique SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agronomiques – Habillée) est un modèle de simulation des rendements des cultures annuelles (mil, sorgho, maïs, etc.) intégrant deux bilans de la plante et sa phénologie : le bilan hydrique et le bilan carboné (Alhassane A., Traore S. B., Bonnal V., 2013). A travers le bilan hydrique, SARRA-H prend en compte les apports d'eau (pluie et irrigation) sur la base de modèles dits de types réservoirs. Il simule le flux d'eau par un processus de remplissage, débordement de réservoirs qui symbolisent une unité homogène du sol, au regard de l'évaporation et la transpiration. Les processus de remplissage, drainage et ruissellement sont en liaison avec le sol, mais seuls les flux verticaux et descendants sont actuellement simulés par SARRA-H. Deux types de réservoirs sont retenus dans SARRA-H

pour estimer l'eau disponible selon les processus d'évaporation, transpiration et stockage d'eau accessible par les racines de la plante. Le modèle SARRA-H simule les dynamiques des biomasses aériennes (c'est à-dire les feuilles, les tiges et les épis) et les rendements potentiels sous la seule contrainte climatique (Alhassane A., Traore S. B., Bonnal V., 2013).

2.2.2. Modèles DHC et DHCCP

Le centre de météorologie du Niger fait des prévisions de rendement avec le logiciel DHC – Diagnostic Hydrique des Cultures (modèle du CRA). Jusqu'en 2010, ils utilisaient la version tabulaire (les données quantitatives) mais depuis 2010, il y a un problème (bug dans le logiciel, il ne tourne plus après 2010). Ils ont donc remplacé DHC (version station qui collecte les données réelles) par la version champs pluvieux DHCCP qui utilise les images d'estimation de pluie à la place des données réelles. Ces images de pluie estimées sont fournies par AGRHYMET. Ils utilisent également des images mises en ligne par FEWS-NET mais ils utilisent principalement celles provenant du CRA.

Les données des champs pluvieux sont corrigées avec le merging (méthode de calibration des images avec les données réelles avant de les utiliser). Une fois calibrées, ces images sont utilisées comme données d'entrées dans le modèle pour simuler les rendements. La simulation se fait vers la fin du mois d'aout jusqu'à fin septembre. Plus on s'approche de la campagne, plus les résultats s'améliorent et se rapprochent de la réalité. La dernière simulation se fait donc la 3^e décennie de septembre. Celle-ci est comparée avec les statistiques agricoles (qui font des estimations avant la fin de la campagne, avec le comptage des épis potentiels). Ils corrigent les informations quand il y a des aberrations et le produit fini est publié à la fin de la campagne.

Avec DHCCP, on peut voir les indices de satisfactions des besoins en eau pendant toute la campagne. Après 20 jours, on peut savoir si le semis a réussi. Le programme DHCCP considère qu'une fois le semis réussi, les différents stades phénologiques auront lieu à certaines dates en fonction de la culture. Les données de sortie de DHCCP sont : les conditions hydriques des cultures, la réserve en eau du sol, la date de semis et les rendements. Ces propos furent recueillis lors de ma rencontre avec Mme Aissa Sitta au centre de météorologie de Niamey.

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE

3.1. MATERIELS

3.1.1. Statistiques agricoles du Niger

La collecte de données est divisée en plusieurs étapes distinctes. L'évaluation de la production agricole est effectuée au moyen de l'enquête prévision et estimation des récoltes (EPER). C'est une enquête annuelle qui est destinée à fournir aux décideurs une estimation prévisionnelle de la production céréalière au Niger dès le mois d'octobre, dans le but de programmer des activités pour faire face à une situation de crise alimentaire ou de surproduction. Elle doit également permettre d'évaluer les productions de toutes les cultures pluviales au moment de la récolte.

Base de sondage

L'enquête est menée sous forme de sondage aléatoire à deux degrés :

- Les unités primaires : les zones de dénombrement (ZD). Une ZD comporte 1000 habitants.
- Les unités secondaires : les exploitations ou les ménages agricoles (15 par ZD).

Le domaine d'étude est le département (3^e niveau hiérarchique après le pays et les régions).

Echantillonnage

Le tirage des unités primaires (ZD) est à probabilités proportionnelles à la taille, dont la mesure est le nombre total de la ZD en 2004.

Après le recensement des ménages agricoles, il est systématiquement procédé à un tirage sans remise de 15 ménages qui constituent l'unité d'observation à l'intérieur de la ZD. Ainsi, pour la campagne de 2014, ce sont plus de 10 830 ménages qui ont été concernés répartis au niveau de 626 ZD et 144 villages.

Mise en œuvre de l'EPER

Elle se fait à trois niveaux : collecte, contrôle et supervision.

- Le niveau central assure l’élaboration des outils méthodologiques, la formation ou recyclage des agents d’exécution, la supervision finale, le traitement et l’analyse ;
 - Le niveau régional assure la supervision des opérations de contrôle et de collecte sur le terrain ;
 - Le niveau départemental assure le contrôle de la collecte qui se fait par les enquêteurs
- Cette collecte se fait au moyen d’un ensemble de six questionnaires administrés au cours des passages suivants :

Passage	Période	Activités
1	Mai – juin	– Dénombrement des ménages dans la ZD – Tirage des ménages échantillons
2	Juin	– Recensement des membres des ménages échantillons et de leurs champs
3	Juillet – août	– Mesures des champs et parcelles – Pose des carrés de rendement A l’aide de GPS, les agents enquêteurs mesurent la superficie des parcelles et des champs
4	Août – septembre	– Comptage des épis potentiels Ce comptage permet de se faire une idée du rendement potentiel, cela permet déjà de prévoir si les plants produiront suffisamment pour subvenir aux besoins de la population.
5	Septembre – octobre	– Stocks paysans
6	Octobre – décembre	– Récolte des carrés de rendement – Pesée des productions

Tableau 2 : Questionnaires de l’EPER pour la collecte de statistiques agricoles

Cette collecte d’information représente un travail très fastidieux, car 1 agent enquêteur peut s’occuper de plusieurs ZD. Il doit donc se rendre dans chaque ménage à exploitation agricole pour effectuer les différentes parties de la collecte. Le manque de moyen financier peut également constituer un problème. Les agents doivent parfois effectuer de nombreux kilomètres pour la collecte. Parfois, ceux-ci ne disposent pas de moyens de transport adéquats, manquent d’essence pour leur moto, etc. De plus, chaque agent ne dispose pas toujours d’un GPS personnel, ce qui pose des problèmes (les agents doivent parfois se prêter les GPS, ce qui retarde considérablement la collecte d’informations).

Selon Mr Yahaya Mounkaila, la centralisation de la collecte permet néanmoins d’obtenir des informations fiables.

Il existe également un questionnaire relatif au dénombrement des ménages. Les informations collectées varient peu d'une année à l'autre donc cette opération est donc effectuée tous les 3 ans.

L'estimation des principaux paramètres (superficies et rendements) se fait au moyen d'un coefficient d'extrapolation à l'échelle du département, 3^{ème} niveau administratif.

Le dispositif de collecte et de traitement des données comprend :

- 1 coordonnateur
- 4 superviseurs nationaux
- 16 superviseurs régionaux
- 60 contrôleurs
- 46 chefs d'équipes
- 260 agents enquêteurs

3.1.2. GeoWRSI

3.1.2.1. Présentation

Le Geo-spatial Water Requirement Satisfaction Index (GeoWRSI) est un logiciel géospatial, autonome. Il a été mis en œuvre par l'US Geological Survey (USGS) pour l'activité du réseau de systèmes d'alerte précoce de FEWS NET (Famine Early Warning System Network).

Le GeoWRSI exécute un modèle de bilan hydrique spécifique à une culture sélectionnée par l'utilisateur dans une zone géographique dans le monde (région délimitée par ses longitudes et latitudes minimales et maximales dont les dates probables de début de saison (SOS) et de fin de saison (EOS) sont connues) spécifiée par l'utilisateur, en utilisant comme données d'entrée les images de pluie estimée (RFE) et d'évapotranspiration potentielle (PET) décadaires, de la capacité de rétention en eau du sol (WHC) et de la Longueur de la Période de Croissance (LGP). Il fournit en sortie une gamme de produits (décadaires) de bilan hydrique (WRSI, SWI...) qui peut être utilisée de manière qualitative pour l'évaluation et le suivi de l'état des cultures pendant la saison de croissance végétale. Le WRSI peut être utilisé dans un processus de régression avec les rendements pour produire des modèles d'estimation de rendement.

3.1.2.2. Données d'entrées

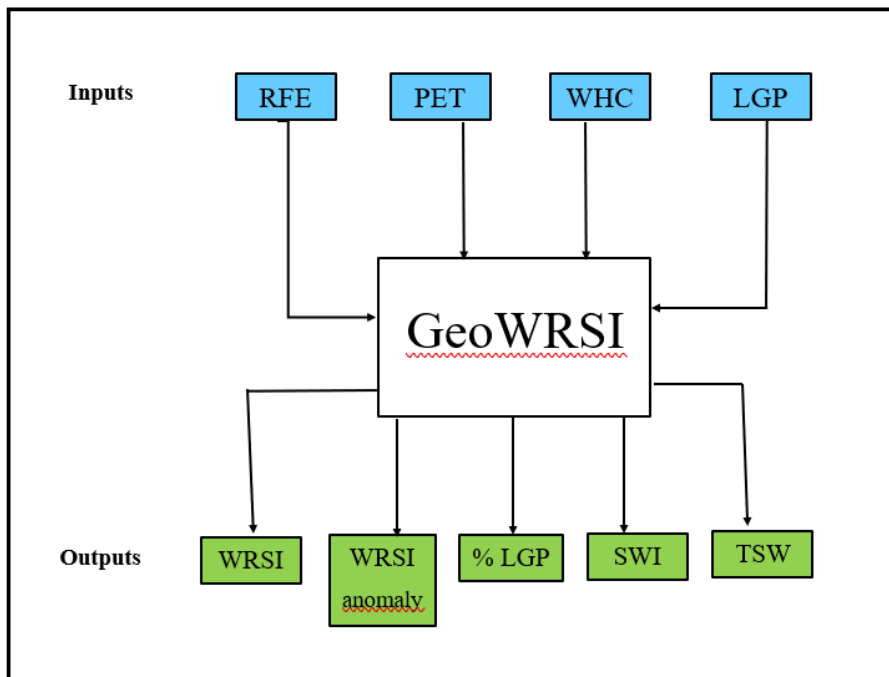


Figure 1 : Données d'entrée et de sorties du modèle GeoWRSI.
Auteur : A. Peeters

Les données d'entrée de GeoWRSI sont au nombre de 4. Les principales données d'entrées du modèle sont des images de **pluie estimée** et d'**évapotranspiration potentielle**. Pour tourner, le modèle a également besoin des informations de début et de fin de saison. Les cartes de ces deux variables sont nécessaires pour déterminer la **longueur de la période de croissance** (LGP) de la culture. Enfin, la **capacité de rétention en eau** est la 4^e donnée d'entrée du modèle.

Evapotranspiration potentielle :

Les images d'évapotranspiration potentielle sont calculées quotidiennement pour l'Afrique par FEWS NET (Famine Early Warning Systems Network) à l'Institut d'études géologiques des Etats-Unis (USGS – United State Geological Survey). Ces images ont une résolution de 1° et sont calculées à partir d'un modèle météorologique numérique qui sort les informations toutes les 6 heures. Le modèle utilise l'équation de Penman-Monteith (Shuttleworth, 1992 ; Verdin and Klaver, 2002).

Pluie estimée :

Les images de pluie estimées sont fournies par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) à une résolution spatiale de 0,1 degré, soit 10 km. Ces images sont le résultat d'une interpolation qui combine :

- La durée des nuages à sommets froids (CCD – Cold Cloud Duration) provenant de Météosat.
- Les données satellite micro-onde provenant du Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) des satellites du Programme de satellites météorologiques pour la Défense (DMSP). Ces données micro-onde sont, selon (Jobard, n.d.), « *des mesures directes de l'absorption et de l'émission ou de la diffusion du rayonnement par les gouttes d'eau et les cristaux de glace à l'intérieur des nuages* ».
- Des données provenant du radiomètre Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) à bord du satellite météorologique polaire NOAA-15. Ce radiomètre donne des informations sur la température et l'humidité de l'atmosphère.
- Des données pluviométriques provenant du Global Telecommunication System

Longueur de la période de croissance :

La longueur de la période de croissance (LGP – Length of the Growing Period) représente le nombre de décades de croissance de la plante, du semis jusqu'à la récolte. Le début de saison (SOS – Start of season) est déterminé en fonction de la pluviométrie. S'il pleut au moins 25 mm lors de la décade initiale et qu'il pleut au moins 20 mm lors des deux décades suivantes, le début de la saison sera fixé à cette décade initiale. On peut vérifier la pertinence de cette décade de début de saison en se référant au calendrier agricole fourni par la FAO, qui détermine la période de semis en fonction de la zone agroécologique et du type de culture. Le LGP doit être déterminé en fonction du type de culture et de la zone. On peut également le déterminer à partir du calendrier agricole.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, la longueur du cycle de croissance est de :

- **90 jours pour le mil**
- **110 jours pour le sorgho**

Capacité de rétention en eau :

Cet indicateur représente le volume d'eau qu'un sol peut retenir et qui ne s'écoule pas sous l'action de la gravité. Il dépend directement de la texture du sol et est mesuré en mm/m. La capacité de rétention en eau a été définie entre **100 et 125 mm** pour les deux zones d'étude.

3.1.2.3. Données de sortie geoWRSI

WRSI :

L'indice de satisfaction des besoins en eau (WRSI - Water Requirement Satisfaction Index) est un indicateur de la performance des cultures en fonction de la disponibilité de l'eau pour la culture pendant une saison de croissance.

Le WRSI pour une saison est basée sur l'approvisionnement en eau et la demande qu'une culture subit pendant une saison de croissance. Il est calculé comme le rapport de l'évapotranspiration réelle saisonnière (AET) au besoin en eau de la plante lors de la campagne (WR) :

$$\text{WRSI} = \frac{\text{AET}}{\text{WR}} * 100$$

WR est calculé à partir de l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith en utilisant le coefficient cultural (K_c) pour ajuster la demande au stade de croissance de la culture.

$$\text{WR} = \text{PET} * K_c$$

L'AET représente la quantité d'eau réelle retirée du réservoir d'eau du sol. Chaque fois que la teneur en eau du sol est supérieure au niveau d'appauvrissement maximal admissible (MAD) (selon le type de culture), l'AET restera le même que WR, c'est-à-dire pas de stress hydrique. Mais lorsque le niveau d'eau du sol est inférieur au niveau MAD, l'AET sera inférieur à WR en proportion de la teneur restante en eau du sol (Verdin, Funk, Senay, & Choularton, 2005).

La teneur en eau du sol est obtenue grâce à une équation de bilan de masse simple où le niveau d'eau du sol est surveillé dans un seau défini par la capacité de rétention en eau (WHC) du sol et la profondeur de la racine de la culture, c'est-à-dire :

$$\text{SW}_i = \text{SW}_{i-1} + \text{PPT}_i - \text{AET}_i$$

Avec SW, la teneur en eau du sol, et PPT les précipitations et i une décade donnée.

Cet indicateur peut varier de 0 à 100. Si le WRSI = 100, la plante dispose d'une quantité optimale d'eau et son rendement ne sera pas influencé par un déficit en eau. En revanche, si la valeur du WRSI est inférieure à 50, la plante se retrouve dans une situation critique de stress hydrique.

Anomalie relative du WRSI (WRSI anomaly)

L'image de l'anomalie du WRSI (en pourcentage) compare le WRSI d'une décade donnée par rapport à l'image du WRSI climatologique (médiane du WRSI de toutes les années étudiées) spécifié lors de la configuration de la région. C'est donc une anomalie relative (%). Une anomalie de 200 signifie que le WRSI de la décade est 2 fois supérieur au WRSI climatologique, tandis que qu'une anomalie de 50 signifie que le WRSI de la décade est 2 fois inférieur au WRSI climatologique.

Surplus total en eau (TSW – Total Surplus Water)

Cet indicateur mesure le surplus total en eau (mm) pour la plante à chaque décade. Si le sol reçoit plus d'eau qu'il ne peut en contenir (Water Hold Capacity), il y a surplus en eau et celle-ci s'écoule et peut créer une mare, en fonction du relief et des caractéristiques locales du sol. Un TSW élevé peut être un indicateur d'inondation ou d'érosion hydrique. S'il est élevé en début de saison, cela peut être très néfaste pour la culture (couvert végétal très faible) car l'écoulement ou la formation d'une mare peut entraîner les graines de semis et entraîner la couche de sol la plus fertile (Cours de conservation des sols, Tychon, 2018).

Pourcentage de phénologie

Cet indicateur varie de 0 à 100 et montre la progression phénologique de la plante à partir du semis (0 %) jusqu'à la récolte (100 %). Pour une longueur de période de croissance de 9 décades (mil), la phénologie sera de 0 % lors de la décade initiale et atteindra 100 % lors de la décade de fin de saison.

Indice d'eau dans le sol (SWI – Soil Water Index)

Cet indice représente la quantité d'eau disponible dans la zone racinaire de la plante par rapport à la capacité de rétention en eau à une décade donnée

$$\text{SoilWaterIndex} = \frac{SW_i}{WHC} * 100$$

SW = quantité d'eau dans le sol

i = décade donnée

Cet index est donc un indicateur de l'humidité dans le sol à la fin d'une décade définie. Un index de 100 signifie que le sol est au moins à la capacité au champ (capacité de rétention

maximale en eau du sol), que les racines de la plante bénéficient de suffisamment d'eau et que la plante ne subira pas de stress jusqu'à la prochaine décade. Un SWI entre 0 et 10 % est le résultat d'une sécheresse prolongée. Un SWI de 0 % indique que la plante a atteint le point de flétrissement permanent.

3.1.2.4. Points forts

Les points forts de GeoWRSI sont :

- Sorties décadaires
- Facilité d'usage et de configuration
- Résultats visuels
- Possibilité d'extraire les données en batch
- Calibrage des images de pluies estimées pour une meilleure fiabilité (corriger les sous-estimations ou surestimations des satellites)

3.1.2.5. Limites

Les paramètres cultureux du mil et du sorgho ont été préconfiguré de manière identique. C'est-à-dire que toutes les variables liées à la plante telles que les coefficients cultureux, la profondeur racinaire, etc. sont les mêmes pour les deux cultures. Cela implique que les données de sorties seront similaires or que les deux cultures, malgré leurs similitudes, sont bien différentes. Avant de faire tourner le bilan hydrique, il est donc important de vérifier ces paramètres et de les configurer soi-même à l'aide du « FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56 » de 1998 ou en connaissant les caractéristiques culturelles locales.

Le logiciel tourne grâce à des images de pluies estimées et des données d'évapotranspiration potentielle. Selon Ibrahim Makadaoure, de FEWS-NET, l'algorithme de fonctionnement du logiciel a changé entre l'année 2001 et 2002. Il en résulte qu'il n'est pas possible d'obtenir des données de sorties antérieures à 2001, c'est pourquoi la base de données utilisée pour ce travail commence en 2002.

Le gros point fort de GeoWRSI (sorties décadaires) comporte néanmoins des limites. Le logiciel permet de sortir de nombreux indicateurs mais seulement cinq ont une périodicité décadaire (WRSI, WRSI anomaly, SWI, TSW et le pourcentage de phénologie). Les autres données de sortie sont saisonnières et sont disponibles pour chaque stade phénologique de la plante (déficit en eau, surplus en eau, besoin en eau). A titre d'exemple, le déficit en eau au stade végétatif est un cumul des décades de ce stade, mais ce cumul ne permet pas

d'obtenir une valeur du déficit en eau pour chaque décade. Le logiciel peut donc encore être amélioré.

Il existe plusieurs moyens d'extraire les données de sortie de GeoWRSI. La méthode la plus simple est de faire tourner le logiciel et d'enregistrer image par image (on clique, on sauvegarde et on recommence pour chaque décade et chaque années) les données de sortie, mais cette méthode se révèle assez fastidieuse si l'on veut travailler sur une grande base de données. GeoWRSI propose également un batch, mais celui-ci ne permet d'extraire que le WRSI, le pourcentage de phénologie et le SWI. L'anomalie WRSI et le TSW doivent eux être extraits image par image, ce qui n'est pas très pratique. On se rend compte qu'il manque deux cases pour ces deux indicateurs dans la boîte de dialogue de la configuration des données de sortie décadaires qui permettent d'extraire en batch dans GeoWRSI.

3.1.2.6. Pistes d'amélioration

Lors de l'utilisation de GeoWRSI, on constate que le logiciel peut encore être amélioré. La boîte de dialogues permettant de choisir les données que l'on veut extraire pourrait être améliorée en y ajoutant d'autres sorties décadaires, telles que le surplus total en eau et l'anomalie du WRSI.

En ce qui concerne la configuration des cultures existantes (établie à l'aide des données de la FAO), il faudrait changer la culture « sorgho » qui a la même configuration que le mil. Si l'on fait tourner le modèle sans faire de configuration, les résultats seront les mêmes pour le mil et pour le sorgho.

L'une des quatre données d'entrée est la longueur de la période de croissance. Si l'on fait tourner GeoWRSI avec sa configuration initiale, cette période est identique pour chaque culture, or les cultures ont des cycles de croissance différents (90 jours pour le mil et 110 jours pour le sorgho). Il est donc essentiel, avant de faire tourner le logiciel, de vérifier la longueur de la période de croissance de la culture sur laquelle on travaille, en fonction de la zone géographique. On peut le faire via le « crop calendar » disponible sur le site de la FAO.

3.1.3. Données ECMWF :

Le Centre européen pour les prévisions météorologique à moyen terme (ECMWF – European Center for Medium-Range Weather Forecasts) est une organisation intergouvernementale créée en 1975 dont les rôles sont, selon leur site internet officiel, de :

- Produire des prévisions météorologiques et surveiller le système Terre
- Mener des recherches scientifiques et techniques visant à améliorer la qualité des prévisions
- Conserver les archives de données météorologiques

ECMWF fonctionne avec un ensemble de modèles globaux et de systèmes d'assimilation de données (data assimilation systems), qui permettent de combiner les variables issues des observations météorologiques (température, rayonnement global, etc.) dans le but de créer de nouveaux modèles de prévisions numériques.

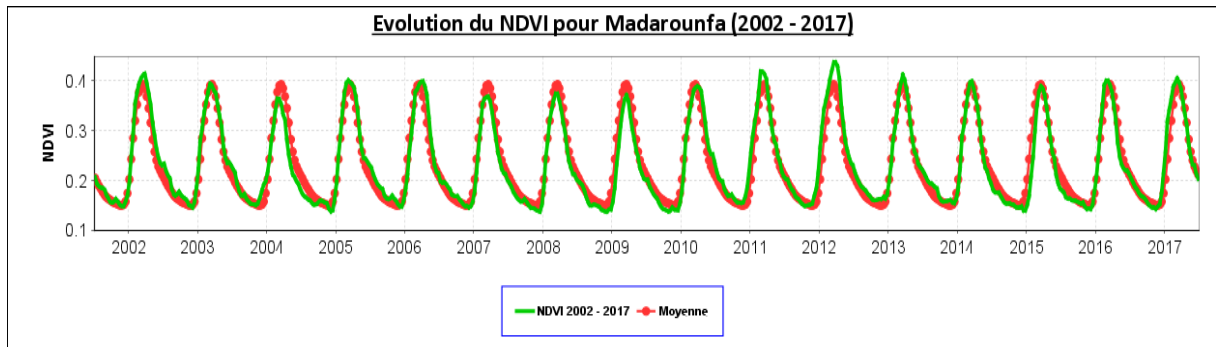
Dans le cadre de ce projet, où j'ai eu la possibilité de me rendre au Centre commun de recherche (JRC – Joint Research Centre), qui utilise les données de l'ECMWF, j'ai pu obtenir les données de température moyenne (°C), minimales (°C) et maximales (°C), les images de pluie (mm/j), de rayonnement global (kJ/m²/j) ainsi que les données d'évapotranspiration (mm/j).

Les données de sorties de modèle sont récupérées toutes les 3 ou 6 heures, elles sont agrégées à la journée puis à la décade et les nouveaux paramètres sont calculés. Pour les paramètres tels que la température minimale, la température maximale, la température moyenne, la radiation globale et l'évapotranspiration potentielle, les données de sorties de modèles sont interpolées pour obtenir une résolution commune (0.25 degré). Des corrections de biais sont faites entre la moyenne sur le long terme ERA (ECMWF Re-Analysis) et OPE (operational), qui sont les données récentes, pour obtenir les anomalies. En revanche, il n'y a pas d'interpolation entre ERA et OPE pour la pluie car les deux ne sont pas corrélées. C'est pourquoi la pluviométrie estimée à partir de plusieurs méthodes peut être très variable. En effet, il est possible d'obtenir des données de pluies estimées très différentes pour la même zone, il faut alors faire un choix ou tester les différentes pluies lors de la modélisation.

Les données ECMWF utilisées dans le logiciel de modélisation CST ont été cumulées sur la longueur de la période de croissance. Cette opération a été réalisée en supposant que, par exemple, la température à une décade donnée ne pouvait pas être un bon prédicteur (fiable) du rendement.

3.1.4. Images NDVI

Lors de la modélisation, les images NDVI utilisées proviennent du Satellite pour l'Observation de la Terre Vegetation (SPOT Vegetation) pour les années 1999 - 2012 et du satellite PROBA-V (Project for On-Board Autonomy – Vegetation) pour les années 2013 - 2017. Les images NDVI sont lissées selon la méthodologie de Swets. Le graphique 3 montre l'évolution du NDVI pour le département de Madarounfa. Ce graphique a été réalisé à l'aide de SPIRITS.



Graphique 3 : Evolution du NDVI pour Madarounfa (2002 – 2017)

3.1.5. Images de pluie estimées CHIRPS

Le Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est un jeu de données sur la pluviométrie. Les cartes de pluie estimées sont obtenues en combinant des images satellitaires d'une résolution de 0.05 degré avec les données des stations météorologiques in situ (Funk et al., 2015). Les estimations sont basées sur l'observation de la durée des nuages froids (CCD). L'objectif de la création de CHIRPS était de permettre à FEWS NET d'assurer un meilleur contrôle des sécheresses.

3.1.6. Données de station

Les données pluviométriques réelles issues des stations in situ ont également été utilisées comme données d'entrée pour la modélisation finale.

3.1.7. Tableau récapitulatif des données utilisées pour la modélisation

Source	Données
Statistiques agricoles	Rendements officiels
Centre météo	Pluie station
GeoWRSI	WRSI
	WRSI_anomaly
	TSW
	SWI
	% Pheno
SPOT-VGT/ProbaV	NDVI
ECMWF	Tmin
	Tmax
	Tavg
	Rg
	Rain
	ETO
CHIRPS	Pluie CHIRPS

Tableau 3 : Données utilisées

3.2. METHODE

3.2.1. Choix des unités administratives

Plusieurs critères ont défini le choix des unités administratives sur lesquelles j'ai travaillé :

- La fiabilité des limites administratives des départements
- Les zones climatiques (différenciées par la pluviométrie)
- La profondeur de la base de données

Mon objectif était de travailler sur une unité se situant dans la zone soudanienne, une dans la zone sahélo-soudanienne et une dans la zone sahélienne. Cependant, en raison du dernier démembrement administratif datant de 2012, mon choix s'est réduit à 2 unités administratives se situant principalement dans la zone sahélo-soudanienne et minoritairement dans la zone sahélienne. Ce choix a été réduit car j'ai dû sélectionner les départements les plus fiables, ceux qui n'ont pas subi le démembrement administratif en 2012, pour travailler sur une base de données allant de 2002 à 2016. Ce découpage administratif implique que la majorité des unités administratives du Niger n'ont plus la même superficie depuis 2012, certaines ayant gagné du terrain sur d'autres et inversement. Il serait donc impossible de travailler sur les unités ayant été découpées car il n'y a pas de similitude entre les anciennes et les nouvelles et les bases de données des statistiques agricoles n'ont pas été mises à jour.

3.2.2. Configuration et utilisation de GeoWRSI

3.2.2.1. Importation des données d'entrée

La première étape est l'importation des images de pluie estimées et d'évapotranspiration potentielle. GeoWRSI propose un onglet où on peut directement télécharger les images via le site de Climate Hazard Group (CHG). On peut également les importer d'un autre ordinateur puis compléter ces données en téléchargeant les données manquantes. Pour rester à jour, on peut télécharger les images tous les 10 jours. Ces images d'entrées sont stockées dans un dossier windows.

3.2.2.2. Région

Une étape essentielle est la configuration de la zone d'étude. Plusieurs régions sont déjà configurées dans le logiciel. Pour travailler sur sa propre zone de culture, il faut d'abord créer un masque d'extraction des images en vectorisant un shapefile (créé avec un GIS) de la zone voulue. On peut ensuite créer sa région en éditant une région existante. Pour ce projet,

j'ai édité la région « West Sahel Africa » pour n'obtenir que les images de la zone agricole du Niger. Il faut modifier les coordonnées spatiales (via le shapefile), le SOS climatologique, le WRSI climatologique, la longueur de la période de croissance, la carte de la capacité de rétention en eau, le masque d'extraction, le SOS par défaut et le répertoire contenant les données d'entrée.

3.2.2.3. Culture

Certaines cultures sont préconfigurées par les développeurs du logiciel. Cependant, celles-ci doivent être modifiées, notamment pour les coefficients cultureux (par exemple, les coefficients du mil et du sorgho sont identiques). Une fois les cultures configurées on peut faire tourner le modèle.

3.2.2.4. Calibrage des images de pluie estimées

Pour obtenir une meilleure précision des images de pluies estimées utilisées comme données d'entrée, GeoWRSI propose d'effectuer un merging de ces images. Si l'on est en possession des données réelles issues des stations in situ, geoWRSI peut calibrer les images de pluie estimées. Ainsi, on se rend compte que le satellite NOAA a parfois surestimé ou sous-estimé les quantités de pluie tombée.

3.2.2.5. Extraction des données

GeoWRSI propose un mode batch pour l'extraction des données. Il est ainsi possible d'extraire les images (format bil) pour les indicateurs WRSI, SWI et %pheno. Les deux autres indicateurs (WRSI anomaly et TSW) doivent être extraits image par image.

3.2.3. Utilisation de SPIRITS

Dans le cadre de ce travail, le logiciel SPIRITS a permis de faire les extractions des statistiques des images NDVI, CHIRPS, ECMWF et des données de sortie de GeoWRSI.

Les images NDVI, CHIRPS et ECMWF ont été collectées lors de ma visite au JRC. Ces différentes images ont une résolution différente (1 km pour NDVI, 25 km pour CHIRPS et 25 km pour ECMWF), c'est pourquoi il a fallu créer un masque de culture pour chaque image, ainsi qu'un masque administratif pour chaque image. Le masque de culture permet de faire une extraction des statistiques exactement où les cultures se trouvent. Cela permet donc de masquer les zones non agricoles, qui fausseraient les résultats. Par exemple, pour l'unité administrative Madarounfa, 30 % du territoire n'est pas agricole (bâti, roches) et donc il est important de pouvoir masquer ces 30 % de la superficie de la zone. Il faut

néanmoins relativiser la fiabilité de ce masque de culture car il ne permet pas de faire la distinction entre, d'une part, le type de culture (il n'existe pas de masque de culture mil ou sorgho) et d'autre part les zones de jachère (même si celles-ci diminuent d'année en année). Cela reste tout de même le moyen le plus fiable de faire l'extraction des données. Pour les images issues du logiciel GeoWRSI, il a fallu également créer un masque de cultures, la résolution étant de 8 km.

Une fois ces masques de culture créés, il est possible d'extraire les données numériques (en format RUM - Regional and Unmixed Means - dans SPIRITS) pour chaque indicateur et pour chaque culture. Certains indicateurs tels que la pluie, le NDVI et les indicateurs ECMWF sont génériques, c'est-à-dire qu'ils ne varient pas en fonction de la culture. En revanche, les variables GeoWRSI sont spécifiques à chaque culture.

Une fois les RUM extraits, SPIRITS propose de les visualiser sous forme graphique, ce qui permet de faire des comparaisons et déjà de se faire une idée sur la corrélation qui peut exister entre différents indicateurs.

3.2.4. Utilisation de CGMS Stat Tool

Ce logiciel a été créé dans le cadre du Système Européen MARS, dans l'optique de simplifier les méthodes traditionnelles de prévision de rendement en combinant les analyses de variation interannuelles de rendement avec des indicateurs issus de différentes sources (satellite, modèles, etc.)

CST permet de :

- Sélectionner une région et un type de culture
- Sélectionner une période au cours de l'année
- Effectuer une analyse de séries chronologiques sur les données statistiques disponibles
- Mener une analyse de régression ou d'un scénario en faisant la validation croisée
- Prévoir le rendement agricole pour l'année cible.

Cette partie du mémoire consiste à décrire la méthodologie utilisée dans le logiciel CST.

3.2.4.1. Création d'une base de données Access

La première étape est la création d'une base de données Access qui doit contenir les données de **rendements historiques**, les **zones d'étude** ainsi que les **types de culture**. La création de la table Access est relativement simple car il suffit de créer au préalable des tables de données dans Excel, qu'il faut ensuite copier et coller dans Access. Attention, il faut néanmoins bien respecter la structure demandée par Access, sinon l'importation ne sera pas possible. Il faut donc créer 3 tables de données dans Excel. Les différentes tables de données Access sont disponibles dans l'annexe 5.

La première, « **REGION** » permet d'hierarchiser la base de données CST. Elle est divisée en 5 colonnes :

- REG_MAP_ID : elle doit contenir l'ID utilisé lors de la création du masque administratif dans le GIS (utilisé pour extraire les données dans SPIRITS). Le département Madarounfa à 5 comme ID, tandis que Tessaoua a 6 comme ID. Il est impératif d'utiliser ces ID car CST fait des liens entre ceux-ci et les fichiers RUM extraits dans SPIRITS. Le Niger, niveau administratif supérieur aux 2 départements, a l'ID 100. Ce niveau hiérarchique n'a pas d'importance dans ce travail et l'ID a été choisi sans contrainte.
- REG_NAME : elle doit contenir le nom des régions. Ici, Madarounfa, Tessaoua et Niger.
- REG_LEVEL : elle doit contenir le niveau hiérarchique des zones. Madarounfa et Tessaoua sont de niveau 1. Tandis que le Niger est de niveau 0.
- REG_MAP_ID_BT : cette colonne a pour objectif de faire les liens entre les différents niveaux hiérarchiques et pour déterminer quelle région appartient (BT = Belongs to, soit appartenir en anglais) à une autre. Ainsi, Madarounfa et Tessaoua appartiennent à l'ID « 100 » (Niger).
- BELONGS_TO_NAME : cette colonne est la même que la précédente. Elle diffère du fait qu'à la place de l'ID, il faut écrire la région (Niger).

La deuxième, **STAT_CROP**, permet de configurer les différentes cultures utilisées. Elle est divisée en 4 colonnes :

- STAT_CROP_NO : cette colonne doit être remplie avec un numéro différent pour chaque culture. Ici, le mil a le numéro 2 et le sorgho a le numéro 3.
- STAT_CROP_NAME : cette colonne doit être remplie avec le nom des cultures.

- CROP_NO : idem que pour la colonne STAT_CROP_NO.
- CROP_NAME : idem que pour la colonne STAT_CROP_NAME.

La troisième, **STAT_REGION**, permet d'importer les statistiques agricoles des rendements historiques. Elle est divisée en 5 colonnes :

- REG_MAP_ID : cette colonne se réfère à la colonne créée dans la table « REGION ». On y retrouve les ID des départements
- STAT_CROP_NO : cette colonne se réfère à la colonne créée dans la table « STAT_CROP ».
- YEAR : cette colonne concerne les années des rendements historiques.
- AREA_CULTIVATED : cette colonne concerne les superficies.
- OFFICIAL_YIELD : cette colonne concerne les rendements officiels.

On distingue donc les liens créés entre les différentes tables. Une fois cette base Access créée, il faut la charger dans CST (file -> change database). L'étape suivante de la configuration est l'importation des données RUM (fichiers textes contenant les statistiques extraites grâce à SPIRITS). Pour charger les RUM, il faut cliquer sur l'onglet « tools » puis « data import and management » et « import RUM ». L'onglet « Accumulate data » permet d'accumuler les données. Dans le cadre de ce travail, les données ECMWF, NDVI, CHIRPS et la pluie de station ont été accumulées sur la période de la décade 16 à la 27 (intervalle entre les différentes périodes de croissance de 2002 à 2017).

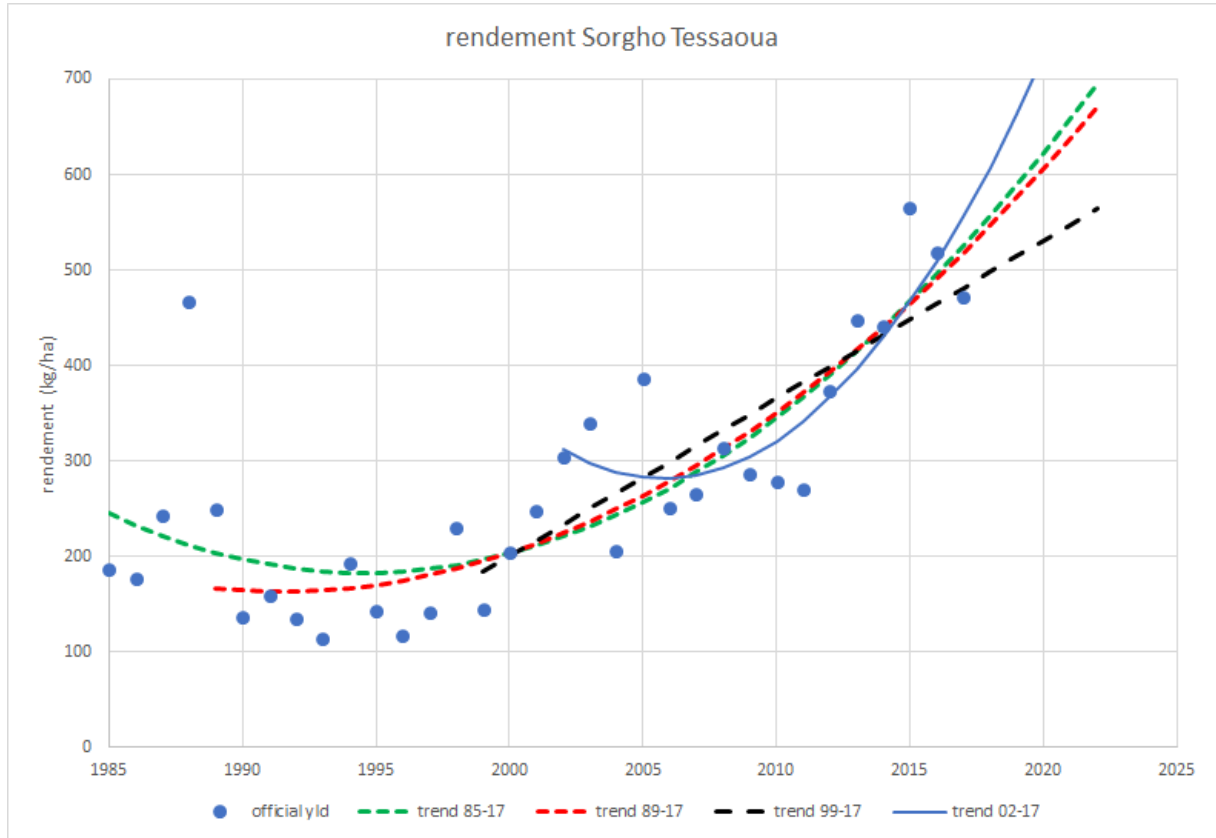
La configuration de CST est maintenant terminée, les données sont chargées et on peut commencer à exploiter le logiciel.

3.2.4.2. Analyse des tendances

La première partie est l'analyse de tendances temporelles. Cela permet d'analyser les rendements rapportés dans une région et d'évaluer :

- Les données disponibles. On peut facilement voir s'il manque des données (data gaps).
- La présence d'années anormales qui pourraient être exclues de l'analyse (ex : une erreur dans les données statistiques avec une année où le rendement est bien supérieur à la moyenne).
- La présence de tendances temporelles dans les séries chronologiques.

CST peut indiquer plusieurs types de tendances (quadratique, linéaire ou pas de tendance). Dans le cadre de ce travail, où je teste des indicateurs pour des périodes différentes, plusieurs tendances peuvent apparaître pour les mêmes statistiques agricoles, comme on peut le voir sur le graphique 4 :



Graphique 4 : Les différentes tendances existantes à Tessaoua pour la culture sorgho

On constate qu'il y a plusieurs tendances pour les rendements de la culture sorgho pour le département Tessaoua. On voit une tendance quadratique pour les périodes 1985 – 2017, 1989 – 2017 et 2002 – 2017. Pour la période 1999 – 2017, la tendance est linéaire. Cela implique que la fiabilité des prévisions de rendement liée aux tendances n'est pas très bonne car cet ajustement statistique est très sensible aux années utilisées. Dans ce cas-ci, les tendances ne sont pas plausibles et ne peuvent pas être utilisées comme modèles de prévision.

Les tendances à la hausse peuvent souvent survenir dans les séries chronologiques des rendements de récoltes régionales. Elles sont souvent dues aux améliorations de la technologie (de meilleures variétés de récoltes, de meilleurs engrais, une meilleure gestion des cultures...). Les tendances à la baisse sont plus rares mais surviennent également (ex : dégradation des sols). Cependant, lors d'une année où la météo est catastrophique, la tendance positive due à l'amélioration technologique peut passer inaperçue.

Lorsqu'elle est plausible, la tendance doit être prise en compte lors de la prévision du rendement des récoltes, car elle ne peut généralement pas être expliquée par les indicateurs de rendement des récoltes.

La méthodologie à appliquer est donc de d'abord regarder s'il y a des tendances pour les différentes cultures, régions et périodes étudiées.

Région	Culture	Période	Tendance
Madarounfa	Mil	1985 - 2017	Pas de tendance
		1989 - 2017	Pas de tendance
		1999 - 2017	Pas de tendance
		2002 - 2017	Pas de tendance
	Sorgho	1985 - 2017	Linéaire
		1989 - 2017	Linéaire
		1999 - 2017	Pas de tendance
		2002 - 2017	Quadratique
Tessaoua	Mil	1985 - 2017	Pas de tendance
		1989 - 2017	Pas de tendance
		1999 - 2017	Pas de tendance
		2002 - 2017	Pas de tendance
	Sorgho	1985 - 2017	Quadratique
		1989 - 2017	Quadratique
		1999 - 2017	Linéaire
		2002 - 2017	Quadratique

Tableau 4 : Tendances liées aux rendements historiques sur plusieurs périodes

Que ce soit pour Madarounfa ou Tessaoua, il n'y a pas de tendance dans l'évolution du rendement du mil pour toutes les périodes étudiées. En revanche, on constate que les tendances sont quadratiques ou linéaires quand on analyse le rendement du sorgho. On voit même que pour Madarounfa, on passe d'une tendance linéaire pour les périodes de 1985 – 2017 et 1989 – 2017 à une période sans tendance (1999 – 2017). Les changements de tendances indiquent qu'elles ne peuvent pas être utilisées.

3.2.4.3. Analyse de régression

L'analyse de régression est une approche pour trouver un rapport entre la variabilité interannuelle dans les statistiques des rendements de récoltes et les indicateurs (météo, simulation de bilan hydrique, satellite). Quand une telle relation est établie et paramétrée, elle permet de prévoir le rendement de la récolte pour l'année cible.

Les r^2 obtenus dans CST sont les R^2 obtenus après une validation croisée que CST fait automatiquement. Dans le cadre de ce projet, j'ai utilisé les données du modèle CST de Tessaoua pour la culture mil (voir les résultats en chapitre 4.1. Prédiction des rendements du mil à Tessaoua) et ai réalisé une validation croisée à l'aide du logiciel statistique JMP pour comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes. Les résultats issus de la validation croisée dans JMP (prédiction pour l'année cible et RMSE) sont similaires à ceux simulés dans CST. La conclusion de cette comparaison (voir annexe 4) est que le logiciel CST permet de largement simplifier les méthodes de régression et d'obtenir directement les meilleurs modèles.

3.2.4.4. Sélection des modèles

Dans une optique d'alerte précoce, je n'ai pas toujours choisi le R^2 de validation le plus haut. Cela permet parfois de sélectionner des modèles plus précoces. Il est possible de déterminer la statistique que l'on estime la plus pertinente pour sélectionner un modèle. Dans le cadre de ce travail, j'ai choisi la RMSE comme indicateur.

J'ai testé les modèles de façon systématique pour Madarounfa mil, Madarounfa sorgho, Tessaoua mil et Tessaoua sorgho avec 2017 comme année cible. J'ai donc testé les indicateurs disponibles pour chaque période pour voir s'il y avait une relation avec le rendement.

CST permet aussi de visualiser la matrice de corrélation entre les différents indicateurs. Un indicateur qui est fortement corrélé (important coefficient absolu de corrélation) avec un autre indicateur a peu de valeur dans l'analyse de régression. Il est donc essentiel de regarder la matrice de corrélation avant de tester les modèles. Les variables très corrélées entre elles feront monter le R^2 mais les résultats finaux ne seront pas bons.

Une fois les meilleurs modèles trouvés, CST propose un batch pour voir quels sont les meilleurs modèles en fonction d'une période déterminée. Pour le batch, j'ai choisi l'intervalle entre les périodes de croissance des années 2002 à 2017, soit de la décade 16 à 27. Ce batch permet donc d'obtenir les meilleurs modèles. Quand le meilleur modèle est

trouvé pour plusieurs décades consécutives, on peut en déduire que le modèle est stable et qu'il permettra d'obtenir des prévisions à ces différentes décades. On verra dans le prochain chapitre les résultats issus du batch (voir annexe 6). Dans le cadre de ce travail, j'ai utilisé l'évolution du R^2 comme indicateur de la stabilité des modèles sur plusieurs décades.

Les résultats sont disponibles dans le chapitre 4.

3.2.4.5. Points forts de CST

- Validation croisée automatique
- Mode batch permettant la sélection des meilleurs modèles en fonction d'une période déterminée
- Facilité d'utilisation
- Accumulation des indicateurs
- Matrice de corrélation

3.2.4.6. Limites de CST

- Peu de variables peuvent être testées en même temps (12)
- La corrélation des variables est uniquement jugée via la matrice de corrélation (absence de régression linéaire pas à pas)
- L'interface du logiciel est très réduite (mode fenêtre, pas de mode plein écran) et ne permet pas de visualiser l'ensemble des données sur une même page s'il y en a un grand nombre.

3.2.5. Méthodologie générale

La figure 2 de la page suivante montre l'ensemble de la modélisation de ce projet avec toutes les variables utilisées

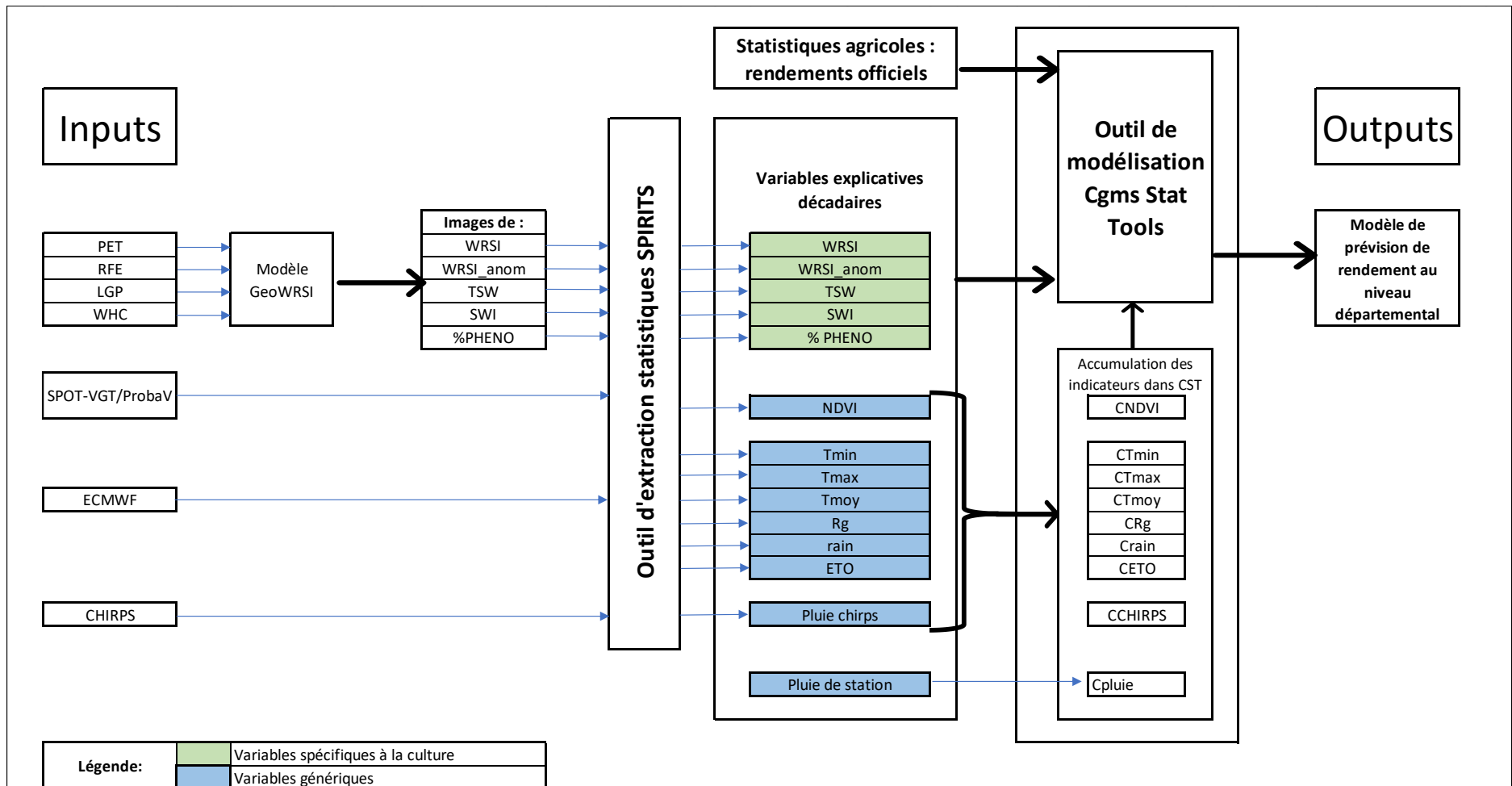
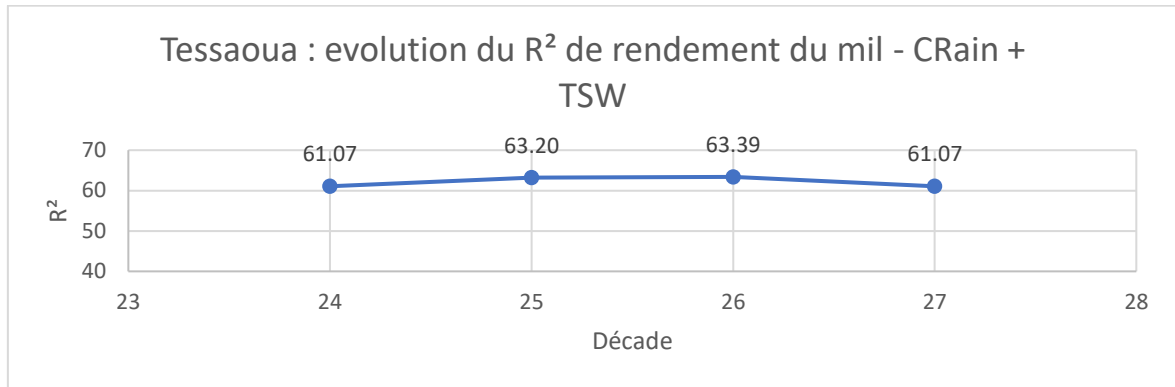


Figure 2 : Schéma de la méthodologie générale du modèle. Auteur : Amaury Peeters

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

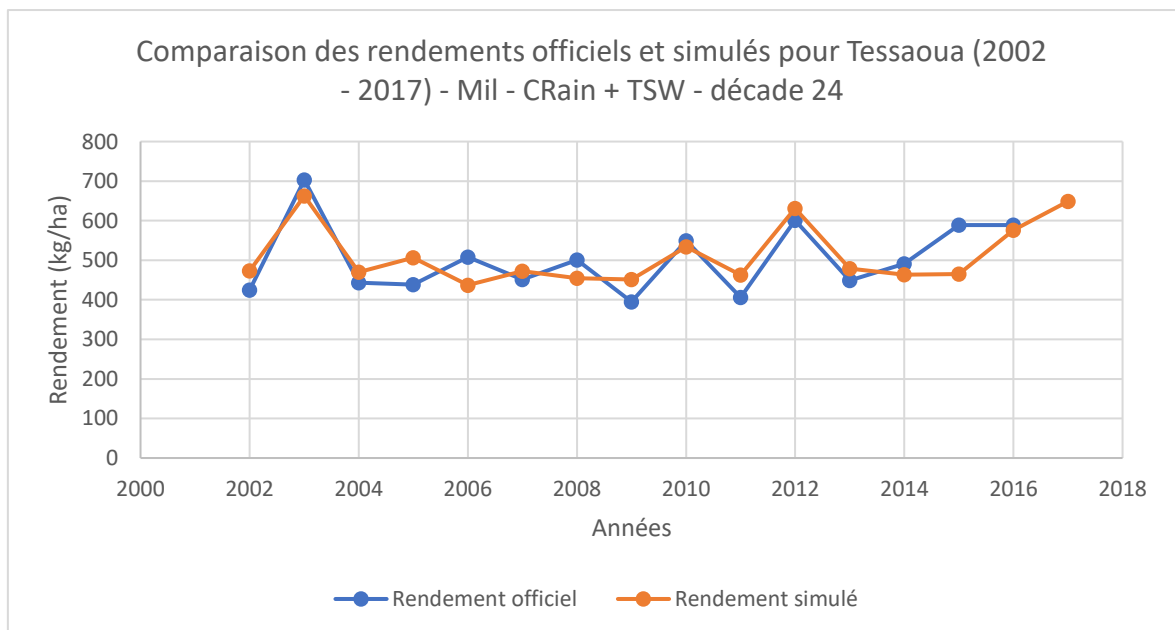
4.1. PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL A TESSAOUA



Graphique 5 : Tessaoua : R² du rendement du mil pour les variables CRain et TSW

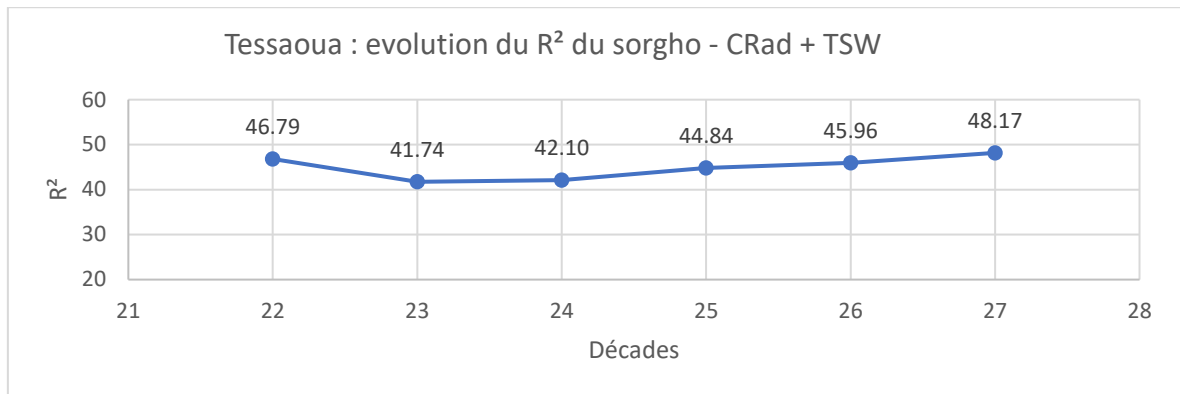
Pour Tessaoua, le meilleur modèle est un modèle à deux variables : le surplus total en eau et l'accumulation de la pluie ECMWF. La modélisation permet d'obtenir différentes prévisions avant la récolte. Le graphique 5 montre que ce modèle à deux variables peut être utilisé à partir de la décade 24 jusque-là décade 27. Le R² de validation est de 61,07 pour la décade 24 (décade à laquelle la RMSE est la plus faible).

La RMSE est de 64,23 kg/ha, soit 12,5 % d'erreur par rapport au rendement moyen simulé. La prévision de rendement pour 2017 est de 648 kg/ha.



Graphique 6 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Tessaoua (2002 - 2017) - Mil - CRain + TSW - décade 24

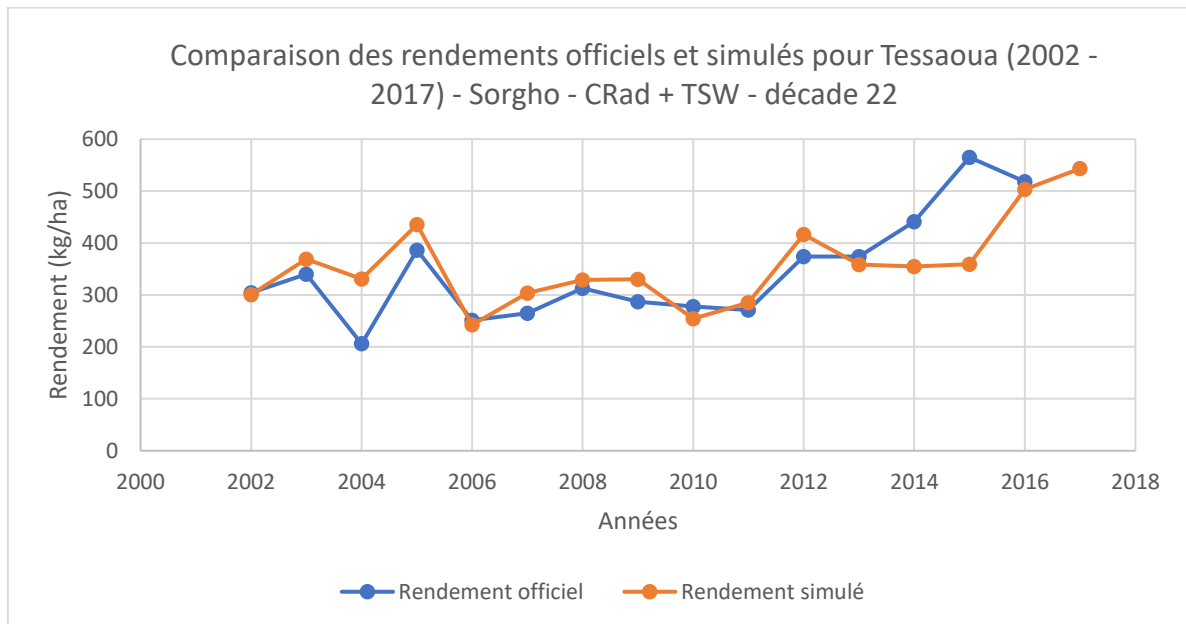
4.2. PREVISION DES RENDEMENTS DU SORGHO A TESSAOUA



Graphique 7 : Tessaoua : R² du rendement du sorgho – CRad + TSW

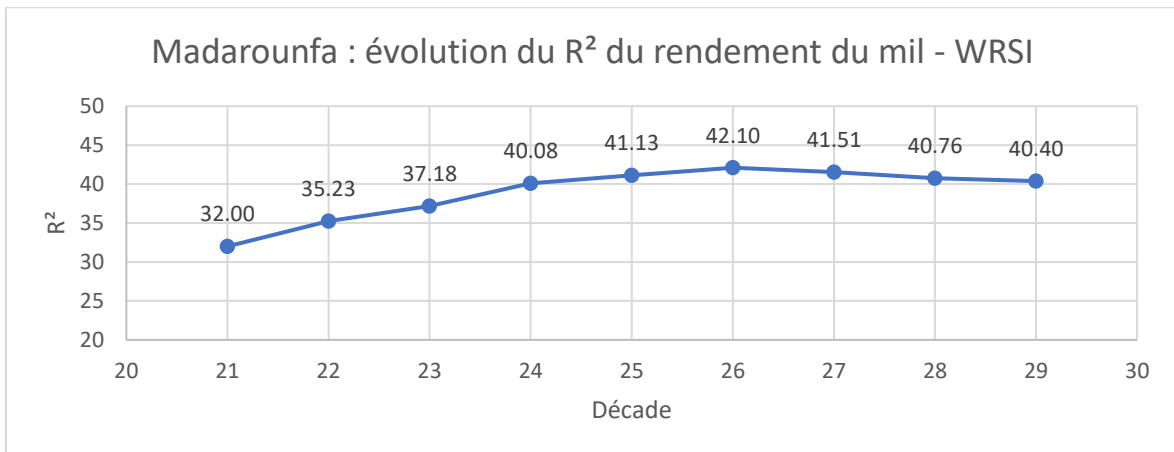
Pour la culture sorgho à Tessaoua, le meilleur modèle est un modèle à deux variables : le surplus total en eau et le rayonnement global cumulé. La modélisation permet d’obtenir différentes prévisions avant la récolte. Le graphique 7 montre que ce modèle peut être utilisé à partir de la décade 22 jusque-là décade 27. Le R² de validation est de 46,79 pour la décade 22 (décade à laquelle la RMSE est la plus faible).

La RMSE est de 81,7 kg/ha, soit 22,87 % d’erreur par rapport au rendement moyen simulé. La prévision de rendement pour 2017 est de 543 kg/ha.



Graphique 8 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Tessaoua (2002 - 2017) - Sorgho – CRad + TSW

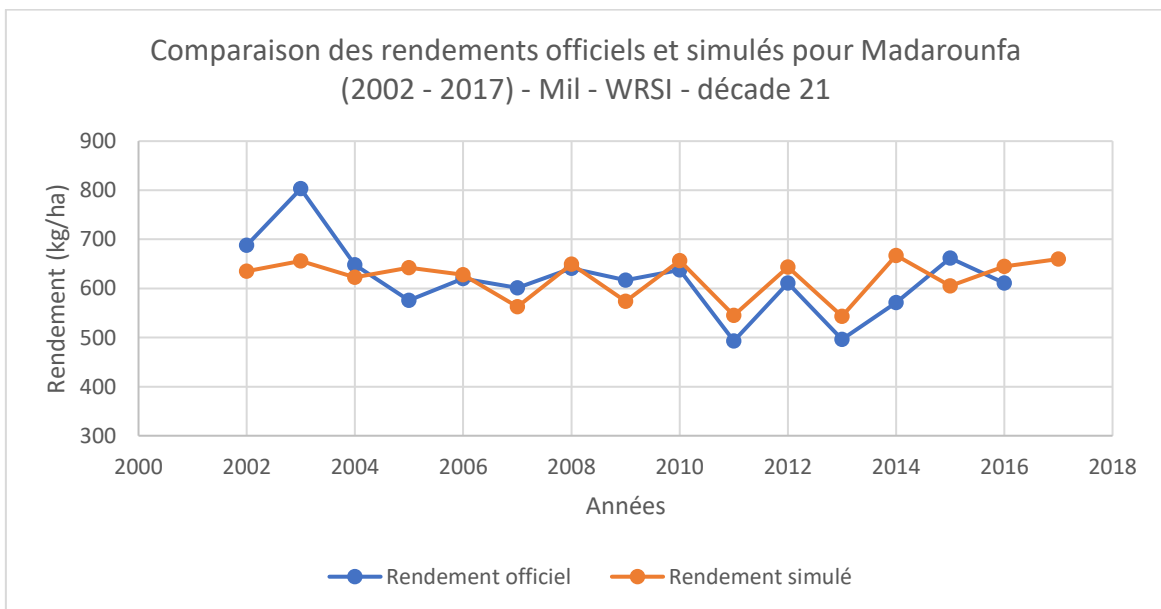
4.3. PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL A MADAROUNFA



Graphique 9 : Madarounfa : R² du rendement du mil - WRSI

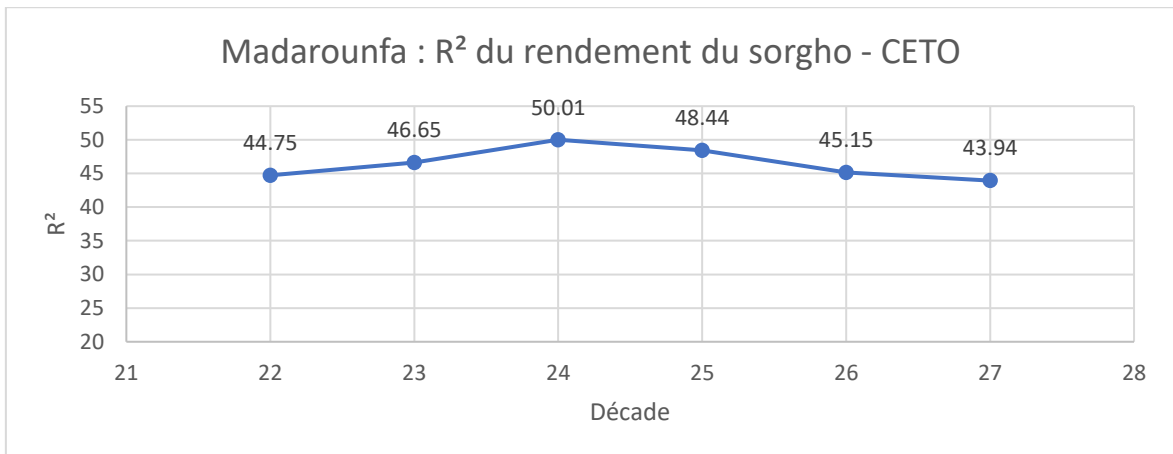
Pour le mil à Madarounfa, aucun modèle à plusieurs variables n'a pu être trouvé, les variables étant trop corrélées entre elles. Le WRSI est l'indicateur le plus corrélé aux rendements historiques de la période 2002 – 2016. Le R² de validation est assez stable (entre 30 et 40) de la décade 21 à 29 avec un pic lors de la décade 26 avec un R² de 42.

Le modèle choisi est celui de la décade 21 car c'est le meilleur en termes de précocité. La RMSE est de 69,4 kg/ha, soit 11,18 % d'erreur par rapport au rendement moyen simulé. La prévision de rendement pour l'année 2017 est de 660 kg/ha.



Graphique 10 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Madarounfa (2002 - 2017) - Mil - WRSI - décade 21

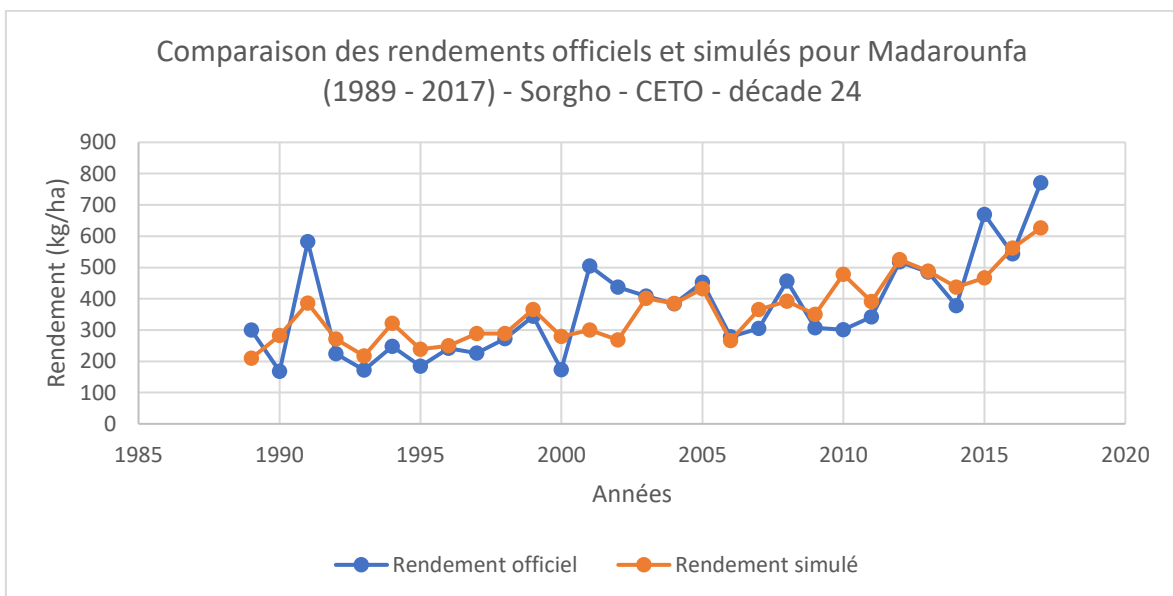
4.4. PREVISION DES RENDEMENTS DU SORGHO A MADAROUNFA



Graphique 11 : Madarounfa : R² du rendement du sorgho - CETO

Pour la culture sorgho à Madarounfa, aucun modèle à plusieurs variables n'a été trouvé, les variables étant trop corrélées entre elles. C'est l'indicateur d'évapotranspiration cumulée qui est le plus corrélé au rendement. Il est également assez stable et varie entre 45 et 50 sur la période allant de la décade 22 à 27. Le pic est atteint lors de la décade 24, avec un R² de validation de 50.

Le modèle choisi est celui dont la RMSE est la plus faible (décade 24). La RMSE est de 110,497 kg/ha, soit une erreur de 30 % par rapport au rendement moyen simulé. La prévision du rendement pour 2017 est de 626,6 kg/ha.



Graphique 12 : Comparaison des rendements officiels et simulés pour Madarounfa (1989 - 2017) - Sorgho - CETO - décade 24

4.5. TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS

Département	Culture	Modèles	Date de prédiction	R ²	RMSE
Tessaoua	Mil	CRain + TSW	Décade 24	61,07	64,2
Tessaoua	Sorgho	CRad + TSW	Décade 22	46,79	81,7
Madarounfa	Mil	WRSI	Décade 21	32	69,4
Madarounfa	Sorgho	CETO	Décade 24	50	110,5

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des résultats

4.6. DISCUSSIONS

Les résultats démontrent certaines disparités entre les deux départements. On constate que les résultats de la modélisation pour Tessaoua sont plus fiables que pour Madarounfa, que ce soit pour les deux cultures étudiées.

Pour le département de Tessaoua, on constate que le surplus total en eau et la pluie ECMWF sont les variables les plus corrélées au rendement du mil. Ce modèle à deux variables donne des réponses à partir de la décade 24 jusqu'à la décade 27, avec un r^2 de validation très stable (environ 60 pour les 4 décades). On peut donc en conclure que le modèle est fiable. C'est un modèle intéressant car il permet d'obtenir une RMSE de 64,23 kg/ha, soit 12,5 % d'erreur par rapport au rendement moyen simulé. C'est un résultat satisfaisant compte tenu du fait qu'il permet une prévision très précoce (environ 2 mois avant la récolte).

Pour le sorgho à Tessaoua, on constate que c'est le surplus total en eau et le rayonnement global cumulé qui sont les variables les plus corrélées au rendement. Le R^2 de validation est assez stable (environ 45) et est obtenu pour les décades 22 à 27. La RMSE de 81,7 kg/ha est assez élevée par rapport au rendement moyen simulé avec une erreur d'environ 22,8 %. Il permet néanmoins d'obtenir une prévision très précoce pour le sorgho (2 mois et demi avant la récolte).

En ce qui concerne le département de Madarounfa, ses résultats obtenus grâce à la modélisation sont très mitigés et démontrent certains points négatifs. On se rend compte que très peu d'indicateurs permettent d'obtenir une bonne prévision de rendements. Seuls les modèles à une variable ont été trouvés avec les données d'entrée.

Pour Madarounfa, c'est l'indice de satisfaction des besoins en eau qui est le meilleur indicateur du rendement du mil. C'est un très bon indicateur car la réponse du modèle indique que c'est le meilleur indicateur à partir de la décade 21 jusqu'à la décade 29. Le r^2

de validation de la décade 21 est de 32 et donne une RMSE de 69,4 kg/ha, soit 11,8 % d'erreur par rapport au rendement moyen simulé. Ce modèle permet donc d'obtenir une prévision très précoce à plus de 2 mois et demi de la récolte. Cependant, la variable explicative unique de ce modèle ne permet pas de faire confiance au modèle. Il faudrait pour cela trouver d'autres variables corrélées au WRSI pour cette zone.

Pour le rendement du sorgho à Madarounfa, c'est l'évapotranspiration cumulée qui est la variable la plus corrélée aux rendements historiques. En plus du fait que le modèle ne comporte qu'une seule variable explicative, on constate que la RMSE obtenue est très élevée par rapport au rendement moyen simulé (erreur de 30 %). On ne peut donc pas faire confiance à ce modèle à une variable, qui nécessiterait d'être modélisé avec d'autres variables d'entrée.

Les relations entre les rendements historiques et les indicateurs sont donc différentes en fonction de la zone, mais pas de la culture.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec des modèles à deux variables, ce qui indique une certaine fiabilité due au faible nombre de variables. Ces résultats, malgré de faibles R^2 , sont assez fiables car les indicateurs testés réagissent sur plusieurs décades de façon plus ou moins constante. On peut donc supposer qu'en utilisant d'autres paramètres (météorologiques ou issus d'autres modèles), on pourrait obtenir des modèles à plusieurs variables qui pourraient être de meilleurs prédicteurs du rendement.

CONCLUSION

Il n'est plus à démontrer que la nécessité de développer des modèles de prévision des rendements agricoles en Afrique de l'Ouest est capitale pour le maintien de la sécurité alimentaire. Il a été démontré que les cultures céréalières (avec le mil largement en première position en termes de production) sont les principales sources d'alimentation pour la population nigérienne. Le rendement de ces cultures est tributaire des aléas climatiques. Il est très sensible aux périodes de sécheresses, qui peuvent parfois sévir sur plusieurs décades, anéantissant les espoirs de récoltes dans les localités concernées. Au Niger, et plus largement en Afrique de l'Ouest, de nombreux modèles de prévisions sont développés, mais très peu d'exploitations agricoles utilisent ces modèles comme outils d'aide à la décision, par faute de maîtrise de ces outils ou encore du manque d'accès à ceux-ci.

L'objectif principal de ce travail fut d'évaluer les performances de la modélisation des rendements agricoles du mil et du sorgho dans les deux unités administratives Tessaoua et Madarounfa, situées dans la région Maradi au Niger. La mission de départ fut d'utiliser le modèle hydrique GeoWRSI afin d'utiliser ses sorties décadaires et de tester leur fiabilité et de voir si elles pouvaient être corrélées à la variabilité interannuelle des rendements historiques des cultures. N'ayant jamais été utilisé dans un but professionnel, la fiabilité de ces sorties étaient à démontrer dans ce projet.

Il ressort de l'étude que certains indicateurs de GeoWRSI (Indice de satisfaction des besoins en eau et surplus total en eau) sont corrélés aux rendements historiques. Les résultats de la modélisation indiquent que les résultats ne sont fiables que pour le département Tessaoua. Avec du recul, on comprend que la sélection initiale de seulement 2 départements constituait un risque, notamment pour la comparaison des résultats. Cependant, les résultats obtenus pour Tessaoua sont encourageants et démontrent que la méthode doit être approfondie et testée sur d'autres départements, voire d'autre pays.

L'une des limites de ce projet fut la méconnaissance de l'occupation exacte des sols. Il est, en effet, impossible de déterminer quelles sont les zones exactes où sont cultivés le mil et le sorgho. Les données ont donc été extraites pour l'ensemble des cultures des zones étudiées et la précision des résultats s'en ressent. Cependant, la conclusion de ce projet est qu'il est possible d'obtenir une prévision de rendement précoce avec des résultats disponibles 2 mois avant la récolte, avec une erreur de 12,5 % pour le mil à Tessaoua.

Le logiciel CST est un logiciel très puissant qui permet de réduire considérablement les analyses statistiques. Il est actuellement utilisé par le JRC mais devrait être utilisé à plus grande échelle, et notamment en Afrique.

BIBLIOGRAPHIE

- Afrique Verte. (2005). L'analyse de la campagne agricole, par l'analyse du bilan céréalier. Retrieved from www.afriqueverte.org
- Alhassane A., Traore S. B., Bonnal V., B. C. (2013). SARRA-H Modèle de simulation de la croissance des cultures, 49. Retrieved from http://sarrah.teledetection.fr/Doc/Manuel_SARRA-H_en_cours.pdf
- Barké, K. M., & Kjm, A. (2015). *Cartographie des potentialités agricoles et forestières de la région Maradi*. Retrieved from https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/200470/1/Karimou_Barke_maradi_kolliya_colloque.pdf
- CEDEAO-CSAO/OCDE. (2006). La zone écologique fragile des pays du Sahel. *Atlas de l'Intégration Régionale En Afrique de l'Ouest*, 1–11. Retrieved from www.cilssnet.org
- Comité Interministériel de Pilotage de la Stratégie de Développement Rural. (2004). Le Zonage Agro-écologique du NIGER, 1–12.
- Courcoux, G. (Institut de recherche pour le développement). (2009). Le mil, aliment du futur au Sahel. *Actualité Scientifique*.
- Département Agriculture et Services Environnementaux (AES) de la Banque Mondiale. (2013). *ÉVALUATION DES RISQUES DU SECTEUR AGRICOLE AU NIGER: De la Réaction Aux Crises à la Gestion des Risques à Long Terme*. Retrieved from www.worldbank.org
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., ... -Sénégal, D. (2015). *ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PLUVIOMÉTRIE EN AFRIQUE DE L'OUEST À TRAVERS DEUX RÉGIONS : LA SÉNÉGAMBIE ET LE BASSIN DU NIGER MOYEN* (Vol. 12). Retrieved from http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/docannexe/file/1105/descroix_et_al_climatologie_2015_pages_25_a_43.pdf
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GARBA, I. (2017). *Modélisation spatiale de la production fourragère en zone pastorale nigérienne*. Université de Liège.
- Institut National de la Statistique. (2014). Population. *Annuaire Statistique Du Niger 2010 - 2014*, 67–76. Retrieved from http://www.stat-niger.org/statistique/file/Annuaire_Statistiques/2013/AS_Chapitre/AS2010-2014_POPULATION.pdf
- JAICAF. (2009). *Les céréales au Niger. Accent sur le mil et le sorgho*. Tokyo, Japon. Retrieved from http://www.jaicaf.or.jp/publications/niger_f.pdf
- Jobard, I. (n.d.). Estimation des pluies par satellite : l'apport des données satellite micro-onde 1., 77–95. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/010008091.pdf
- Ministère de l'agriculture du Niger. (2012). Catalogue national des espèces et variétés végétales du Niger. Retrieved from

http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/spid/docs/Niger/CatalogueNationaldesEspece setVarietesVegetales-Niger.pdf

Unité communication AGRHYMET. (2016). *Centre Régional AGRHYMET Présentation Générale.*

Verdin, J., Funk, C., Senay, G., & Choularton, R. (2005). Climate science and famine early warning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 360(1463), 2155–68. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1754>

Cours de conservation des sols, Tychon 2018

WEBOGRAPHIE

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SL.AGR.EMPL.ZS?locations=NE>

Emmanuel GRÉGOIRE, Mamoudou GAZIBO, Sadou GAZIBO,(n. d.) « NIGER », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 02 août 2018. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/niger/>

ANNEXES

ANNEXE 1 : bilan céréalier net prévisionnel de la campagne 2017 (source : Ministère de l'agriculture)

Postes	Riz	Blé	Mil+Sorgho+Maïs+Fonio	Total
Population au 30/04/2017				20 520 070
1 - Disponibilité	166 547	117	4 957 106	5 123 770
- Production brute	148 895	180	5 707 635	5 856 710
- Production nette	96 782	117	4 851 490	4 948 389
- Stocks Initiaux	69 765	0	105 616	175 381
o Paysans			61 896	61 896
o Commerçant	66 842		15739	82 581
o PAM	2764		11 895	14 659
o Public	159		16 086	16 245
2 - Besoins	369 361	123 120	4 247 654	4 740 136
- Norme de consommation	18	6	207	231
Consommation Humaine	369 361	123 120	4 247 654	4 740 136
- Stocks finaux	0	0		
o Paysans				
o Autres				
3 - Excédents(+) ou Déficit(-)	-202 814	-123 003	709 452	383 634
4 - Solde Import/Export	210 623	16 996	17 234	244 853
Importations commerciales	210 623	16 996	17 234	244 853
- Aides prévues				0
5 - Excédents (+) ou Déficit (-)	7 809	-106 007	726 686	628 487
6 – Disponibilité Apparente/hbt/an=kg/hbt	18	1	242	262

ANNEXE 2 : statistiques agricoles obtenues par le service des statistiques agricoles (Ministère de l'Agriculture du Niger)

Région	Culture	Année	Superficie	Rendement officiel
Madarounfa	Mil	1985	97899	566
Madarounfa	Mil	1986	92597	563
Madarounfa	Mil	1987	91892	350
Madarounfa	Mil	1988	95607	528
Madarounfa	Mil	1989	90428	520
Madarounfa	Mil	1990	69748	458
Madarounfa	Mil	1991	70557	667
Madarounfa	Mil	1992	87553	591
Madarounfa	Mil	1993	90137	447
Madarounfa	Mil	1994	108335	534
Madarounfa	Mil	1995	119265	760
Madarounfa	Mil	1996	106938	316
Madarounfa	Mil	1997	134230	443
Madarounfa	Mil	1998	128463	778
Madarounfa	Mil	1999	146511	628
Madarounfa	Mil	2000	143966	452
Madarounfa	Mil	2001	105621	409
Madarounfa	Mil	2002	131352	688
Madarounfa	Mil	2003	127272	803
Madarounfa	Mil	2004	121662	648
Madarounfa	Mil	2005	136024	576
Madarounfa	Mil	2006	137554	620
Madarounfa	Mil	2007	149657	601
Madarounfa	Mil	2008	208563	641
Madarounfa	Mil	2009	214388	617
Madarounfa	Mil	2010	201254	638
Madarounfa	Mil	2011	199706	493
Madarounfa	Mil	2012	187104	611
Madarounfa	Mil	2013	191001	496
Madarounfa	Mil	2014	193904	571
Madarounfa	Mil	2015	158690	662
Madarounfa	Mil	2016	191965	611
Madarounfa	Mil	2017	181092	658
Madarounfa	Sorgho	1985	76370	252
Madarounfa	Sorgho	1986	62835	307
Madarounfa	Sorgho	1987	48276	208
Madarounfa	Sorgho	1988	53781	317
Madarounfa	Sorgho	1989	67712	300
Madarounfa	Sorgho	1990	39610	168
Madarounfa	Sorgho	1991	35533	582

Madarounfa	Sorgho	1992	35533	224
Madarounfa	Sorgho	1993	44410	172
Madarounfa	Sorgho	1994	51235	248
Madarounfa	Sorgho	1995	51290	184
Madarounfa	Sorgho	1996	52176	242
Madarounfa	Sorgho	1997	78363	226
Madarounfa	Sorgho	1998	86146	272
Madarounfa	Sorgho	1999	90529	344
Madarounfa	Sorgho	2000	93341	173
Madarounfa	Sorgho	2001	67686	505
Madarounfa	Sorgho	2002	106430	437
Madarounfa	Sorgho	2003	107430	408
Madarounfa	Sorgho	2004	105521	384
Madarounfa	Sorgho	2005	92608	452
Madarounfa	Sorgho	2006	95525	278
Madarounfa	Sorgho	2007	109830	305
Madarounfa	Sorgho	2008	133579	457
Madarounfa	Sorgho	2009	137260	307
Madarounfa	Sorgho	2010	135926	301
Madarounfa	Sorgho	2011	125711	342
Madarounfa	Sorgho	2012	124457	518
Madarounfa	Sorgho	2013	144572	485
Madarounfa	Sorgho	2014	143457	378
Madarounfa	Sorgho	2015	142018	669
Madarounfa	Sorgho	2016	142023	544
Madarounfa	Sorgho	2017	132238	771
Tessaoua	Mil	1985	113489	465
Tessaoua	Mil	1986	111178	569
Tessaoua	Mil	1987	103115	288
Tessaoua	Mil	1988	123738	572
Tessaoua	Mil	1989	138581	465
Tessaoua	Mil	1990	153647	406
Tessaoua	Mil	1991	162023	605
Tessaoua	Mil	1992	125980	468
Tessaoua	Mil	1993	139367	409
Tessaoua	Mil	1994	129437	430
Tessaoua	Mil	1995	127592	471
Tessaoua	Mil	1996	202455	300
Tessaoua	Mil	1997	213294	286
Tessaoua	Mil	1998	288336	549
Tessaoua	Mil	1999	258696	318
Tessaoua	Mil	2000	206996	432
Tessaoua	Mil	2001	192504	307
Tessaoua	Mil	2002	232212	425
Tessaoua	Mil	2003	156041	703
Tessaoua	Mil	2004	153369	443

Tessaoua	Mil	2005	195537	438
Tessaoua	Mil	2006	340902	508
Tessaoua	Mil	2007	309883	451
Tessaoua	Mil	2008	358328	501
Tessaoua	Mil	2009	348540	395
Tessaoua	Mil	2010	361911	549
Tessaoua	Mil	2011	361070	406
Tessaoua	Mil	2012	347946	601
Tessaoua	Mil	2013	364794	449
Tessaoua	Mil	2014	373046	491
Tessaoua	Mil	2015	308114	589
Tessaoua	Mil	2016	365586	589
Tessaoua	Mil	2017	341117	621
Tessaoua	Sorgho	1985	76848	186
Tessaoua	Sorgho	1986	71548	176
Tessaoua	Sorgho	1987	73697	242
Tessaoua	Sorgho	1988	110548	467
Tessaoua	Sorgho	1989	119270	250
Tessaoua	Sorgho	1990	134407	137
Tessaoua	Sorgho	1991	138466	159
Tessaoua	Sorgho	1992	138466	135
Tessaoua	Sorgho	1993	151508	114
Tessaoua	Sorgho	1994	89675	193
Tessaoua	Sorgho	1995	99688	143
Tessaoua	Sorgho	1996	123676	117
Tessaoua	Sorgho	1997	169110	142
Tessaoua	Sorgho	1998	206118	230
Tessaoua	Sorgho	1999	203541	145
Tessaoua	Sorgho	2000	168483	204
Tessaoua	Sorgho	2001	187761	247
Tessaoua	Sorgho	2002	177702	304
Tessaoua	Sorgho	2003	178698	340
Tessaoua	Sorgho	2004	176845	206
Tessaoua	Sorgho	2005	156537	386
Tessaoua	Sorgho	2006	280784	251
Tessaoua	Sorgho	2007	280430	265
Tessaoua	Sorgho	2008	269733	313
Tessaoua	Sorgho	2009	167108	287
Tessaoua	Sorgho	2010	269733	278
Tessaoua	Sorgho	2011	290719	271
Tessaoua	Sorgho	2012	255545	374
Tessaoua	Sorgho	2013	238546	447
Tessaoua	Sorgho	2014	243145	441
Tessaoua	Sorgho	2015	231446	565
Tessaoua	Sorgho	2016	238282	518
Tessaoua	Sorgho	2017	257914	471

ANNEXE 3 : tableau reprenant la disponibilité des différents indicateurs

Années/indicateurs	CHIRPS	ECMWF	NDVI	GeoWRSI
1985				
1986				
1987				
1988				
1989				
1990				
1991				
1992				
1993				
1994				
1995				
1996				
1997				
1998				
1999				
2000				
2001				
2002				
2003				
2004				
2005				
2006				
2007				
2008				
2009				
2010				
2011				
2012				
2013				
2014				
2015				
2016				
2017				
Total d'années	33	29	19	16

ANNEXE 4 : comparaison entre les résultats de CST et de JMP pour le département Tessaoua
(modèle à 2 variables CRain et TSW) lors de la décade 24

Résultats CST :

R-squared	61.071
Adjusted R-squared	54.583
Residual Standard deviation	58.994
Root mean squared error for prediction	64.228
Maximum of VIF	1.016
Prediction for target year	648.660
Standard Error of Prediction (Mean)	57.924
Standard Error of Prediction (New)	82.677
Residual Degrees of Freedom	12.000

<i>Year</i>	<i>Yield</i>	<i>Fitted</i>	<i>Residual</i>	<i>Leverage</i>	<i>Influence</i>
2002	425.000	473.350	-48.350	0.08	-0.57
2003	703.000	662.480	40.520	0.48	-24.38
2004	443.000	470.024	-27.024	0.08	0.66
2005	438.000	506.666	-68.666	0.12	19.09
2006	508.000	437.147	70.853	0.18	21.18
2007	451.000	472.128	-21.128	0.08	-0.38
2008	501.000	454.375	46.625	0.11	5.04
2009	395.000	451.480	-56.480	0.11	-7.44
2010	549.000	533.743	15.257	0.14	-5.58
2011	406.000	462.887	-56.887	0.13	-11.35
2012	601.000	630.700	-29.700	0.58	-2.49
2013	449.000	478.658	-29.658	0.09	2.85
2014	491.000	463.195	27.805	0.09	0.87
2015	589.000	465.159	123.841	0.09	3.39
2016	589.000	576.008	12.992	0.64	-27.87
2017	*	648.660	*	0.96	0.00E+000

Résultats JMP après la validation croisée :

	Rendement	Rendement simulé	Résidus	Résidus au carré
2002	425	477.5499461	-52.54994607	2761.496832
2003	703	625.3637919	77.63620814	6027.380815
2004	443	472.5079075	-29.50790746	870.7166027
2005	438	515.7831501	-77.78315007	6050.218435
2006	508	421.5858479	86.41415214	7467.40569
2007	451	473.9946424	-22.9946424	528.7535791
2008	501	448.7589462	52.24105378	2729.1277
2009	395	458.8098274	-63.80982743	4071.694077
2010	549	531.3103739	17.68962613	312.9228725
2011	406	471.4532242	-65.45322419	4284.124557
2012	601	671.793739	-70.79373898	5011.753479
2013	449	481.4163329	-32.41633293	1050.818641
2014	491	460.4325827	30.56741731	934.3670011
2015	589	453.1942182	135.8057818	18443.21037
2016	589	552.4565115	36.54348852	1335.426553
2017		648.6603174		

Moyenne des résidus	4125.29448
RMSE	64.22845538

ANNEXE 5 : Tables de la base de données Access « REGION », « STAT_CROP », « STAT_REGION »

REGION					
REG_MAP_IC	REG_NAME	REG_LEVEL	REG_MAP_ID_BT	BELONGS_TO_NAME	Cliquer pour ajouter
5	MADAROUNFA	1	100	Niger	
6	TESSAOUA	1	100	Niger	
100	Niger	0			
*					

STAT_CROP					
STAT_CROP_NO	STAT_CROP_NAME	CROP_NO	CROP_NAME	Cliquer pour ajouter	
2	Mil	2	Mil		
3	Sorgho	3	Sorgho		
4	Niebe	4	Niebe		
0		0			

STAT_REGION							
REG_MAP_IC	STAT_CROP_NO	YEAR	AREA_CULTIVATED	OFFICIAL_YIELD	BELONGS_TO	Cliquer pour ajouter	
5	2	1985	97899	566			
5	2	1986	92597	563			
5	2	1987	91892	350			
5	2	1988	95607	528			
5	2	1989	90428	520			
5	2	1990	69748	458			
5	2	1991	70557	667			
5	2	1992	87553	591			
5	2	1993	90137	447			
5	2	1994	108335	534			
5	2	1995	119265	760			

ANNEXE 6 : résultats de la modélisation CST

RUN_ID	AREA_NAME	CROP_NAME	ANALYSIS	TARGET_YEAR	INDICATORS	DEKAD	RSQ	RSQ_ADJ	RES_STD_DEV	RMSQ_ERR_PRED
416	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain	16	30.4940078	25.147393	75.7367015	86.68623857
417	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain	17	27.5399515	21.9661016	77.329388	84.72402734
418	TESSAOUA	Mil	R	2017		18	0	0	87.5392701	90.61175308
419	TESSAOUA	Mil	R	2017		19	0	0	87.5392701	90.61175308
420	TESSAOUA	Mil	R	2017	TWS	20	40.1341143	35.5290462	70.2886122	70.46860898
421	TESSAOUA	Mil	R	2017	TWS	21	40.1341143	35.5290462	70.2886122	70.46860898
422	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain	22	20.8998418	14.8152143	80.7948984	85.50042609
423	TESSAOUA	Mil	R	2017	TWS	23	35.1844394	30.198627	73.1366231	83.54479268
424	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain+TWS	24	61.0712811	54.5831613	58.9944793	64.22845538
425	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain+TWS	25	63.202785	57.0699158	57.3566518	61.27250464
426	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain+TWS	26	63.3919052	57.2905561	57.2090689	61.17642586
427	TESSAOUA	Mil	R	2017	CRain+TWS	27	61.0652537	54.5761293	58.9990462	63.03754388
RUN_ID	AREA_NAME	CROP_NAME	ANALYSIS	TARGET_YEAR	INDICATORS	DEKAD	RSQ	RSQ_ADJ	RES_STD_DEV	RMSQ_ERR_PRED
428	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		16	0	0	100.542718	104.0716002
429	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		17	0	0	100.542718	104.0716002
430	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		18	0	0	100.542718	104.0716002
431	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		19	0	0	100.542718	104.0716002
432	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		20	0	0	100.542718	104.0716002
433	TESSAOUA	Sorgho	R	2017		21	0	0	100.542718	104.0716002
434	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	22	46.7913859	37.9232835	79.2163794	81.70272898
435	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	23	41.7368756	32.0263549	82.8935808	86.28376159
436	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	24	42.1020324	32.4523712	82.6334099	86.55283929
437	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	25	44.8360432	35.6420504	80.6587933	85.54920233
438	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	26	45.955846	36.948487	79.8359278	85.75825605
439	TESSAOUA	Sorgho	R	2017	CRad+TWS	27	48.174245	39.5366191	78.1802103	83.5172244
RUN_ID	AREA_NAME	CROP_NAME	ANALYSIS	TARGET_YEAR	INDICATORS	DEKAD	RSQ	RSQ_ADJ	RES_STD_DEV	RMSQ_ERR_PRED
51	MADAROUNFA	Mil	R	2017		16	0	0	74.5278471	77.14365079
52	MADAROUNFA	Mil	R	2017		17	0	0	74.5278471	77.14365079
53	MADAROUNFA	Mil	R	2017		18	0	0	74.5278471	77.14365079
54	MADAROUNFA	Mil	R	2017		19	0	0	74.5278471	77.14365079
55	MADAROUNFA	Mil	R	2017		20	0	0	74.5278471	77.14365079
56	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	21	31.999844	26.7690628	63.7772622	69.43477032
57	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	22	35.2293156	30.2469553	62.2443822	67.07179306
58	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	23	37.1773239	32.3448103	61.3012223	66.10228229
59	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	24	40.0798123	35.4705671	59.8683792	64.44218082
60	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	25	41.1318352	36.6035148	59.3404952	63.7679383
61	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	26	42.0990464	37.6451268	58.8509904	63.31563659
62	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	27	41.5147152	37.0158472	59.1472044	63.71501065
63	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	28	40.7596505	36.2027005	59.5277851	64.05662749
64	MADAROUNFA	Mil	R	2017	WRSI	29	40.3967788	35.8119156	59.709823	64.16005029
RUN_ID	AREA_NAME	CROP_NAME	ANALYSIS	TARGET_YEAR	INDICATORS	DEKAD	RSQ	RSQ_ADJ	RES_STD_DEV	RMSQ_ERR_PRED
180	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		16	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
181	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		17	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
182	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		18	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
183	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		19	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
184	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		20	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
185	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017		21	32.0439667	29.4302731	113.765429	119.8611986
186	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	22	44.748637	40.328528	104.612713	114.4564055
187	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	23	46.6455773	42.3772235	102.801199	112.9931499
188	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	24	50.0144251	46.0155792	99.5028028	110.4971102
189	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	25	48.4422832	44.3176659	101.055465	112.1741365
190	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	26	45.1472876	40.7590707	104.234628	115.4586283
191	MADAROUNFA	Sorgho	R	2017	CETO	27	43.9418201	39.4571657	105.373757	116.3967444

RESUME

Le Niger est un pays sahélien d'Afrique de l'Ouest qui fait partie des pays les plus vulnérables et les plus exposés aux variations climatiques. La pratique des cultures sèches (pluviales non irriguées) est l'activité principale. Le mil et le sorgho sont les céréales les plus consommées et constituent la base de l'alimentation des nigériens. Le rendement de ces céréales dépend donc exclusivement des aléas climatiques et de la pluviométrie.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des techniques de prévision de rendement agricole au Niger dans le but de programmer des activités (précoces) pour faire face aux situations de crise alimentaire ou de surproduction. L'utilisation du logiciel GeoWRSI (modèle de bilan hydrique) a permis de sortir les données décennales du WRSI (Indice de satisfaction des besoins en eau) et de 4 autres indicateurs. L'hypothèse de départ est que ces indicateurs peuvent être performants et être corrélés à la variabilité interannuelle des rendements historiques des deux départements nigériens Madarounfa et Tessaoua. Le logiciel Spirits a été utilisé pour l'extraction des données statistiques. Enfin, la modélisation finale est effectuée aux moyens du logiciel CGMS Stat Tool, qui propose une méthode simplifiée et facile d'utilisation.

Les résultats obtenus restent faibles mais sont tout de même encourageants. La méthode doit encore être exploitée et testée sur d'autres régions avec d'autres données de rendements historiques. Il est important d'approfondir encore les potentialités de bilan hydrique du modèle GeoWRSI pour savoir s'il peut être un logiciel qui contribuerait à l'amélioration des alertes précoces au Niger.

Mots clés : mil, sorgho, rendement, modèle, geoWRSI, Spirits, CGMS Stat Tool, Niger