

A solid green square is positioned to the left of the title.

CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE AGRICOLE DANS LES BAS-FONDS RIZICOLES AU BURKINA FASO À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAUX AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 13 Octobre 2014 par :

Moctar DEMBELE

Travaux dirigés par :

Dr Malicki ZOROM
Enseignant-chercheur en
Mathématiques appliquées
LEAH-2iE

Dr Sander ZWART
Spécialiste en télédétection et SIG
AfricaRice Center

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr Rabah LAHMAR

Membres et correcteurs : M. Sewa Koffi Da SILVEIRA
M. Sina THIAM

Promotion [2013/2014]

We never know the worth of water till the well is dry
Thomas Fuller

*« A la mémoire de mon père et
aux innombrables sacrifices de ma mère »*

REMERCIEMENTS

Cinq années se sont écoulées entre le début et la fin de ce cycle de Master en ingénierie de l'eau. Au terme de cette formation, je tiens à remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'aboutissement de celle-ci, et en particulier à la réalisation du présent stage de fin de cycle. Ainsi j'adresse mes sincères remerciements à :

- ◆ L'ensemble du corps professoral de la fondation 2iE, pour la qualité et la rigueur des enseignements que j'ai reçu ;
- ◆ M. Sander ZWART, mon principal encadreur à AfricaRice, qui a bien voulu m'offrir l'opportunité d'intégrer son unité de recherche en SIG afin d'y effectuer mon stage de fin de cycle d'ingénierie de l'eau ;
- ◆ M. Abd Salam EL-VILALY, mon second encadreur à AfricaRice, qui n'a pas hésité à consacrer la majeure partie de son temps à m'initier aux SIG et à me guider dans mes recherches ;
- ◆ M. Malicki ZOROM, mon principal encadreur à 2iE, qui a accepté de m'encadrer afin que ce travail réponde aux exigences de mon université ;
- ◆ M. Corentin SOME, mon second encadreur à 2iE, qui a bien voulu m'accompagner dès le départ, et qui n'a pas hésité à continuer de le faire après la fin de son exercice à 2iE ;
- ◆ M. Moussa SIE, mon tuteur à Cotonou, qui m'a mis dans des conditions favorables au bon déroulement de mon stage ;
- ◆ M. Amadou KEÏTA, et M. Jean-Yves JAMIN respectivement enseignant chercheur à 2iE et chercheur au CIRAD, pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à la lecture de ce rapport afin d'y apporter des améliorations ;
- ◆ Tous mes proches qui n'ont cessé de me soutenir durant mon cursus.

RÉSUMÉ

La présente étude a permis de caractériser la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso avec des données acquises par télédétection. Les variables utilisées sont essentiellement la pluviométrie, la température de surface (*LST*) et l'indice normalisé de végétation (*NDVI*). Elles sont issues de la mission de mesure des pluies tropicales (TRMM) et du radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne (MODIS).

La période d'étude couvre la saison des pluies qui correspond aussi à la principale saison des cultures (Mai à Octobre) des années 2001 à 2013. Les indices de sécheresse utilisés sont : l'indice de la condition végétale (*VCI*), l'indice de la condition thermique (*TCT*) et l'indice de la santé végétale (*VHI*). L'indice de précipitation standardisé (*SPI*) qui est un indice de sécheresse météorologique a également été calculé pour une comparaison avec le *VHI*.

Les résultats ont montré une bonne aptitude de ces indices à détecter la sécheresse agricole au Burkina Faso. Le *VHI* a montré une bonne corrélation avec la pluviométrie ($r= 0.78$), tandis que la corrélation du *SPI* avec le *NDVI* reste faible ($r= -0.03$). Le *SPI* a également montré une faible corrélation avec le *VHI* ($r= 0.07$). Cependant en considérant le seuil de sécheresse du *VHI* à 0.50, le *SPI* et le *VHI* parviennent à détecter de façon commune la sécheresse au cours de la saison des cultures de 6 années sur 7. Cela signifie qu'il y a une probabilité de 86% pour qu'un déficit pluviométrique sur l'étendue d'un bas-fond engendre une sécheresse agricole. Toutefois, il serait préférable que le *VHI* soit utilisé pour détecter les poches de sécheresse dans les bas-fonds et, si sécheresse il y a, le *SPI* servirait à lier ou non les causes de cette sécheresse à un déficit pluviométrique.

Mots-clés :

- 1- Sécheresse agricole
- 2- Bas-fonds
- 3- Riz
- 4- Télédétection
- 5- Burkina Faso

ABSTRACT

This study allowed characterization of drought in rice growing inland valleys and lowlands in Burkina Faso with remotely sensed data. These data include rainfall, land surface temperature (*LST*) and the normalized difference vegetation index (*NDVI*). They are obtained from tropical rainfall measuring mission (TRMM) and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS).

The study period covers the rainy season, which also corresponds to the main growing season (May-October), from years 2001 to 2013. Drought indices used are: vegetation condition index (*VCI*), temperature condition index (*TCI*) and vegetation health index (*VHI*). The standardized precipitation index (*SPI*) is a meteorological drought index which has been also calculated for comparison with the *VHI*.

The results denoted a good ability of these indices to detect drought in Burkina Faso. The *VHI* showed a good correlation with rainfall ($r= 0.78$), while the correlation of *SPI* with *NDVI* remained low ($r= -0.03$). *SPI* also showed a low correlation with the *VHI* ($r= 0.07$). However, considering the threshold of drought for *VHI* equal to 0.50, *SPI* and *VHI* come to common way to detect drought during the growing season of 6 years by 7. This means that there is a probability of 86% for a rainfall deficit on the extent of a lowland to generate an agricultural drought. However, it is desirable that the *VHI* is used to detect drought in lowlands and, if there is drought, *SPI* serve to bind or not the causes of this drought to a rainfall deficit.

Keywords:

- 1- Agricultural drought
- 2- Lowlands
- 3- Rice
- 4- Remote sensing
- 5- Burkina Faso

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ADRAO	: Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest
AfricaRice	: Centre du riz pour l'Afrique (ex ADRAO)
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CCNUCC	: Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
DGPER	: Direction Générale de la Promotion de l'Économie Rurale
ETP	: Evapotranspiration
ID	: Identifiant
IRRI	: International Rice Research Institute
LAI	: Leaf Area Index
LEAH	: Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau
LST	: Land Surface Temperature
MAFAP	: Monitoring African Food and Agricultural Policies
MAHRH	: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques
MECV	: Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie
MODIS	: Moderate-Resolution Imaging Spectro-Radiometer
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
RICE-CI	: Rice Challenge Initiative
SIG	: Système d'Information Géographique
SPI	: Standardized Precipitation Index
TCI	: Temperature Condition Index
TRMM	: Tropical Rainfall Measuring Mission
VCI	: Vegetation Condition Index
VHI	: Vegetation Health Index

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vi
TABLE DES MATIÈRES	1
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	5
I. PREMIÈRE PARTIE: GÉNÉRALITÉS	7
I.1. Cadre et justification de l'étude	7
I.2. Présentation de la zone de l'étude.....	8
I.2.1. Situation géographique	8
I.2.2. Climat et végétation	9
I.2.3. Hydrographie	11
I.2.4. Relief et sols.....	12
I.2.5. Etat de la production du riz.....	14
I.2.6. Historique de la sécheresse au Burkina Faso.....	16
I.3. Revue de la littérature	17
I.3.1. Quelques définitions	17
I.3.2. Synthèse de travaux antérieurs.....	21
I.4. La plante de riz.....	21
II. DEUXIÈME PARTIE: HYPOTHÈSES DE RECHERCHE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	24
II.1. Objectifs de l'étude	24
II.2. Hypothèses de recherche.....	24
III. TROISIÈME PARTIE: MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	27
III.1. Données satellitaires.....	27
III.1.1. Indice normalisé de végétation (NDVI).....	27
III.1.2. La température de surface (LST)	28

III.1.3. La pluviométrie	28
III.2. Acquisition des données satellitaires	29
III.3. Traitement des images satellitaires	29
III.4. Indices de sécheresse.....	33
III.4.1. Indice de la condition végétale (<i>VCI</i>)	33
III.4.2. Indice de la condition thermique (<i>TCI</i>).....	34
III.4.3. Indice de la santé végétale (<i>VHI</i>)	35
III.4.4. Indice de précipitation standardisé (<i>SPI</i>)	36
IV. QUATRIÈME PARTIE: RÉSULTATS	38
IV.1. Synthèse des données utilisées.....	38
IV.1.1. La pluviométrie	38
IV.1.2. L'indice normalisé de végétation (<i>NDVI</i>).....	38
IV.1.3. La température de surface (<i>LST</i>).....	39
IV.2. Relation entre la <i>LST</i> , le <i>NDVI</i> et la pluviométrie dans les bas-fonds	40
IV.3. Résultat de la cartographie de la sécheresse agricole dans les bas-fonds	42
IV.3.1. L'indice de la condition végétale (<i>VCI</i>).....	42
IV.3.2. L'indice de la condition thermique (<i>TCI</i>)	43
IV.3.3. L'indice de la santé végétale (<i>VHI</i>).....	44
IV.3.4. Indice de précipitation standardisé (<i>SPI</i>)	49
IV.4. Résultats de la synthèse de la sécheresse dans les bas-fonds par province.....	52
IV.4.1. L'indice de la santé végétale (<i>VHI</i>).....	53
IV.4.2. Indice de précipitation standardisé (<i>SPI</i>)	54
IV.4.3. Fréquence de la sécheresse dans les bas-fonds regroupés par province	55
IV.5. Evolution saisonnière de la sécheresse dans les bas-fonds	56
V. DISCUSSION ET ANALYSES	62
V.1. Appréciation des données d'entrées acquises par télédétection.....	62
V.2. Appréciation des indices de sécheresse.....	63
V.3. Périodes de sécheresse et riziculture	67
CONCLUSION	69
BIBLIOGRAPHIE	71

ANNEXES 76

Annexe 1 : Evolution saisonnière et périodique du *VCI* dans les bas-fonds..... I
Annexe 2 : Evolution saisonnière et périodique du *TCI* dans les bas-fonds II
Annexe 3 : Moyenne périodique du *VHI* sur le long terme (2001-2013) III
Annexe 4 : Moyenne saisonnière (P10 à P19) du *VHI* sur le long terme..... IV
Annexe 5 : Moyenne saisonnière (P10 à P19) du *SPI* sur le long terme..... VI
Annexe 6 : Moyenne saisonnière du *NDVI*, de la *LST* et de la pluviométrie par province... VIII
Annexe 7 : Moyenne saisonnière du *VCI* et du *TCI* des bas-fonds regroupés par province IX
Annexe 8 : Evolution saisonnière de la pluviométrie, du *SPI* et du *VHI* entre 2001 et 2013 ... X
Annexe 9 : Fréquence périodique de la sécheresse avec le *VHI* XIII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pertes économiques (millions de F CFA) liées aux facteurs climatiques 16
Tableau 2 : Pourcentage des bas-fonds affectés par la sécheresse avec le *VHI* 45
Tableau 3 : Classification de la sévérité de la sécheresse avec le *VHI* 47
Tableau 4 : Sévérité de la sécheresse dans les bas-fonds avec le *VHI* 47
Tableau 5 : Fréquence de la sécheresse agricole estimée à partir du *VHI* dans les bas-fonds . 49
Tableau 6 : Pourcentage des bas-fonds affectés par la sécheresse avec le *SPI* 50
Tableau 7 : Classification de la sévérité de la sécheresse avec le *SPI* 50
Tableau 8 : Sévérité de la sécheresse dans les bas-fonds avec le *SPI* 51
Tableau 9 : Fréquence de la sécheresse météorologique dans les bas-fonds avec le *SPI* 52

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du Burkina Faso	8
Figure 2 : Régions administratives du Burkina Faso	9
Figure 3 : Régions climatiques du Burkina Faso	11
Figure 4 : Bassins versants et principaux cours d'eau au Burkina Faso	12
Figure 5 : Grands ensembles topographiques du Burkina Faso	13
Figure 6 : Classes des sols au Burkina Faso.....	14
Figure 7 : Relation entre les variantes de la sécheresse et leurs impacts	18
Figure 8 : Coupe schématique d'une vallée représentant une zone de bas-fond	20
Figure 9 : Phases de développement du riz	23
Figure 10 : Influence du stress hydrique sur les variables d'état de la plante	26
Figure 11 : Evolution du NDVI dans les bas-fonds rizicoles au cours d'une année.....	30
Figure 12 : Carte des 27 229 bas-fonds étudiés	32
Figure 13 : Provinces administratives du Burkina Faso.....	32
Figure 14 : Présentation par province de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles .	33
Figure 15 : Cadre méthodologique de l'étude de la sécheresse agricole dans les bas-fonds ...	37
Figure 16 : Moyenne saisonnière et variation de la pluviométrie (TRMM) entre 2001 et 2013	38
Figure 17 : Moyenne saisonnière et variation du <i>NDVI</i> sur le long terme (2001-2013).....	39
Figure 18 : Moyenne saisonnière et variation de la <i>LST</i> sur le long terme (2001-2013)	40
Figure 19 : Moyenne périodique de la <i>LST</i> , du <i>NDVI</i> et de la pluviométrie.....	41
Figure 20 : Moyenne saisonnière de la <i>LST</i> , du <i>NDVI</i> et de la pluviométrie par région	41
Figure 21 : Moyenne saisonnière du <i>VCI</i> sur le long terme (2001-2013).....	42
Figure 22 : Moyenne saisonnière du <i>TCI</i> sur le long terme (2001-2013)	44
Figure 23 : Moyenne saisonnière du <i>VHI</i> sur le long terme (2001-2013).....	46
Figure 24 : Evolution du <i>VHI</i> dans les bas-fonds entre 2001 et 2013.....	46
Figure 25 : Evolution du <i>VHI</i> dans les bas-fonds entre P10 et P19	48
Figure 26 : Evolution du <i>SPI</i> dans les bas-fonds entre 2001 et 2013.....	50
Figure 27 : Evolution du <i>SPI</i> dans les bas-fonds entre P10 et P19	52
Figure 28 : <i>VHI</i> des bas-fonds par province sur le long terme (2001-2013).....	53
Figure 29 : <i>SPI</i> des bas-fonds par province sur le long terme (2001-2013).....	54
Figure 30 : Fréquence de la sécheresse dans les bas-fonds par province.....	55
Figure 31 : Caractéristiques de la sécheresse dans les bas-fonds entre 2001 et 2013.....	57
Figure 32 : Caractéristiques de la sécheresse dans les bas-fonds par province.....	58
Figure 33 : Tendances du <i>SPI</i> et évolution du <i>VHI</i> dans les bas-fonds par province	61
Figure 34 : Relation entre la pluviométrie, le <i>NDVI</i> et la <i>LST</i> dans les bas-fonds par province	62
Figure 35 : Relation entre la <i>LST</i> et le <i>NDVI</i> dans les bas-fonds par province	63
Figure 36 : Relation entre la pluviométrie, le <i>VCI</i> , le <i>TCI</i> et le <i>VHI</i> dans les bas-fonds par province.....	64
Figure 37 : Superficie occupée et production par type de riziculture au Burkina Faso	65
Figure 38 : Rendement de la production rizicole entre 2001 et 2012 au Burkina Faso	66
Figure 39 : Relation entre le <i>NDVI</i> , le <i>SPI</i> et le <i>VHI</i> dans les bas-fonds par province	67

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Afrique de l'Ouest est de plus en plus affectée par les effets du changement climatique. Les catastrophes naturelles entraînent des pertes considérables tant sur le plan économique que social. La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles les plus complexes et les moins bien appréhendées, affectant plus de personnes que tous les autres aléas climatiques (Wilhite, 2000). Les pénuries d'eau sont de plus en plus récurrentes, en partie parce que la demande en eau augmente en raison de la croissance démographique et de l'expansion des activités hydriques connexes, et aussi à cause du changement climatique et de la contamination de l'approvisionnement en eau (Bates *et al.*, 2008). En effet, les déficits pluviométriques engendrent une diminution du débit des cours d'eau et une baisse du niveau des eaux souterraines. Ces variations impactent considérablement l'humidité du sol, source d'approvisionnement en eau des plantes. Ainsi on assiste à des poches de sécheresse qui menacent la sécurité alimentaire par le biais d'importantes pertes dans la production agricole. Lorsque la sécheresse se produit pendant le cycle de développement des cultures, il peut en résulter une réduction des rendements et voire une destruction totale de la production.

Le riz est l'une des céréales les plus cultivées et consommées au Burkina Faso, et il occupe la quatrième place après le sorgho, le mil et le maïs. Il est en majeure partie cultivé dans les bas-fonds qui présentent des potentialités d'intensification et de diversification agricoles intéressantes, liées à une meilleure disponibilité en eau que sur les plateaux et à une meilleure fertilité naturelle. En effet, les bas-fonds représentent 67% des terres rizicoles et fournissent 42% de la production nationale (Guissou et Ilboudo, 2012). Toutefois l'agriculture burkinabè est tributaire de la pluviométrie, caractérisée par sa distribution erratique. Cette pluviométrie capricieuse influence la production du riz au point où celle-ci subit les méfaits des poches de sécheresse répétées. La population est donc sujette à des risques de famine et l'insécurité alimentaire menace davantage.

Puisque la sécheresse est une caractéristique normale du climat et sa récurrence est inévitable (Mishra and Desai, 2005), il est utile de la caractériser afin de développer des méthodes d'adaptation en fonction de sa durée, sa fréquence et sa gravité. De telles informations aideront les gestionnaires des ressources en eau dans la recherche de solutions durables pour la gestion de l'eau et pour l'évaluation des risques d'occurrence de la sécheresse. Ces informations guideront les décideurs lorsqu'il sera nécessaire d'investir pour garantir la sécurité alimentaire. De plus, les services de vulgarisation agricole seront également guidés pour la propagation des variétés de riz tolérantes à la sécheresse.

Au cours d'une sécheresse, il se produit un stress hydrique qui affecte les paramètres physiologiques et biophysiques des plantes (Tardieu et Dreyer, 1997). Certains capteurs de satellites sont capables de détecter ces changements à la surface de la terre. Dans cette étude, les variables utilisées sont la pluviométrie, la température de surface (*LST*) et l'indice normalisé de végétation (*NDVI*) obtenus à partir d'images satellitaires. Ainsi des indices de sécheresse tels que l'indice de la condition thermique (*TCI*), l'indice de la condition végétale (*VCI*) et l'indice de la santé végétale (*VHI*) seront calculés pour évaluer la distribution spatio-temporelle de l'état de la végétation et, les éventuelles poches de sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso sur la période 2001-2013. L'indice de précipitation standardisée (*SPI*) sera calculé pour une comparaison avec le *VHI*. Cette étude aboutira à des cartes de sécheresse dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso. Une synthèse des résultats sera faite à l'échelle provinciale, afin d'effectuer une comparaison entre les différentes unités administratives.

Dans la suite du présent mémoire, une présentation de la zone d'étude est faite, avec une description des données, des matériels et des méthodes utilisés. Les résultats des indices de sécheresse sont ensuite exposés avec les différentes cartes de sécheresse. Ces résultats sont analysés et discutés avec des recommandations, puis une conclusion générale est faite pour clore le travail.

I. PREMIÈRE PARTIE: GÉNÉRALITÉS

I.1. Cadre et justification de l'étude

Comme en Asie, le riz est devenu la culture céréalière la plus importante dans les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest. Le riz est cultivé comme un aliment de base par les agriculteurs des petites vallées, ou comme une culture de rente dans de nombreux périmètres irrigués (Bado et al., 2010). L'Afrique de l'Ouest est la région la plus importante en Afrique subsaharienne en termes de production (63%) et de consommation de riz (67%). Elle est suivie par l'Afrique de l'Est (production: 32%, consommation: 21%), l'Afrique Centrale et l'Afrique du Sud (production: 5%, consommation: 12%) (ADRAO, 2008). Toutefois, le changement climatique a des impacts négatifs sur la production du riz dans les zones arides et semi-arides et celle-ci reste fortement affectée par diverses contraintes abiotiques et biotiques. La sécheresse est parmi les plus importantes contraintes abiotiques et de nombreuses études ont démontré son impact sur la performance des géotypes de riz, surtout lorsqu'elle survient pendant la phase de reproduction de la culture (AfricaRice, 2010). En effet, l'impact de la sécheresse causée par l'irrégularité des précipitations et la faible maîtrise de l'eau dans les écosystèmes des plaines pluviales affectent le rendement du riz à environ 48% au Nigéria, 67 % au Burkina Faso et 80% au Mali (AfricaRice, 2010). Compte tenu de ces considérations et dans le but d'améliorer la production du riz dans les bas-fonds, AfricaRice Center, le centre du riz pour l'Afrique, fait des efforts pour le développement des variétés de riz résistantes à la sécheresse ainsi que la caractérisation de la sécheresse dans les bas-fonds. C'est ainsi que le projet RICE-CI a été lancé dans le but d'améliorer la productivité du riz dans les écosystèmes des plaines pluviales du Burkina Faso, du Mali et du Nigeria pour la tolérance à la sécheresse et le potentiel de rendement.

La présente étude est menée dans le cadre du premier module de ce projet et porte sur la caractérisation de la sécheresse dans les bas-fonds, la création de sites et de modèles d'évaluation de la sécheresse, et la description de l'ajustement des idéotypes aux principales sous-classes des environnements ciblés. Cette étude se focalise sur le développement et l'application d'une méthodologie qui permet de quantifier la distribution spatio-temporelle de la sécheresse agricole et de sa gravité dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso. Pour atteindre cet objectif, les données météorologiques des stations terrestres peuvent être une bonne source d'information pour l'évaluation de la sécheresse agricole. Toutefois, la faible densité des stations météorologiques fait qu'il est difficile de faire une cartographie spatio-temporelle pour une estimation fiable de la sécheresse sur de vastes territoires. En outre, les

données recueillies par les stations météorologiques existantes sont souvent incomplètes et non disponibles en temps quasi-réel. Aussi, il est également difficile de surveiller de grandes surfaces en utilisant des procédés classiques. Afin de remédier à ces problèmes, l'utilisation d'images satellitaires issues de la télédétection reste une option intéressante (Jeyaseelan, 2003; Son et al., 2012; Thenkabail et al., 2004) actuellement utilisée dans le monde entier (Gocic and Trajkovic, 2013; Khalili et al., 2011; Mirabbasi et al., 2013). En général, les approches satellitaires permettent une meilleure caractérisation des conditions de sécheresse à grande échelle par rapport aux méthodes traditionnelles qui se basent sur l'interpolation spatiale des données issues de stations météorologiques. Par ailleurs, l'observation spatiale fournit des données permanentes et des informations visuelles supplémentaires (Kogan, 1997).

I.2. Présentation de la zone de l'étude

I.2.1. Situation géographique

Le Burkina Faso est un pays sahélien enclavé, situé dans la zone de la boucle du fleuve Niger au cœur de l'Afrique de l'Ouest, entre les latitudes 9°20' et 15°05' Nord et les longitudes 02°20' Est et 05°30' Ouest. Son point le plus proche de l'océan Atlantique est éloigné de 500 km. Il couvre une superficie de 274 220 km² et fait frontière avec 06 pays : le Mali au Nord et à l'Ouest, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin au Sud et le Niger à l'Est. La carte ci-après présente la localisation du Burkina Faso :

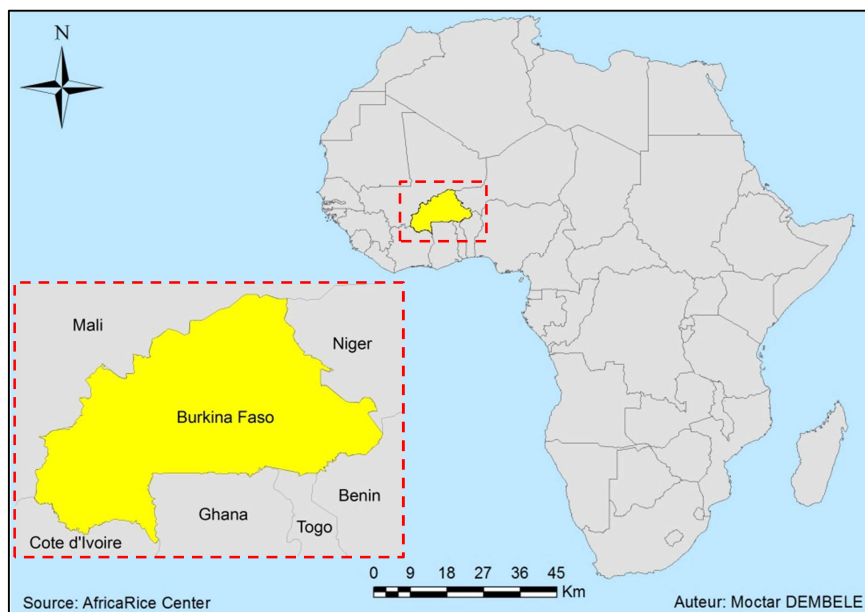


Figure 1 : Localisation du Burkina Faso

Sur le plan administratif, le Burkina Faso est divisé en 13 régions (figure 2), 45 provinces (figure 13), 350 départements et 8 337 villages.

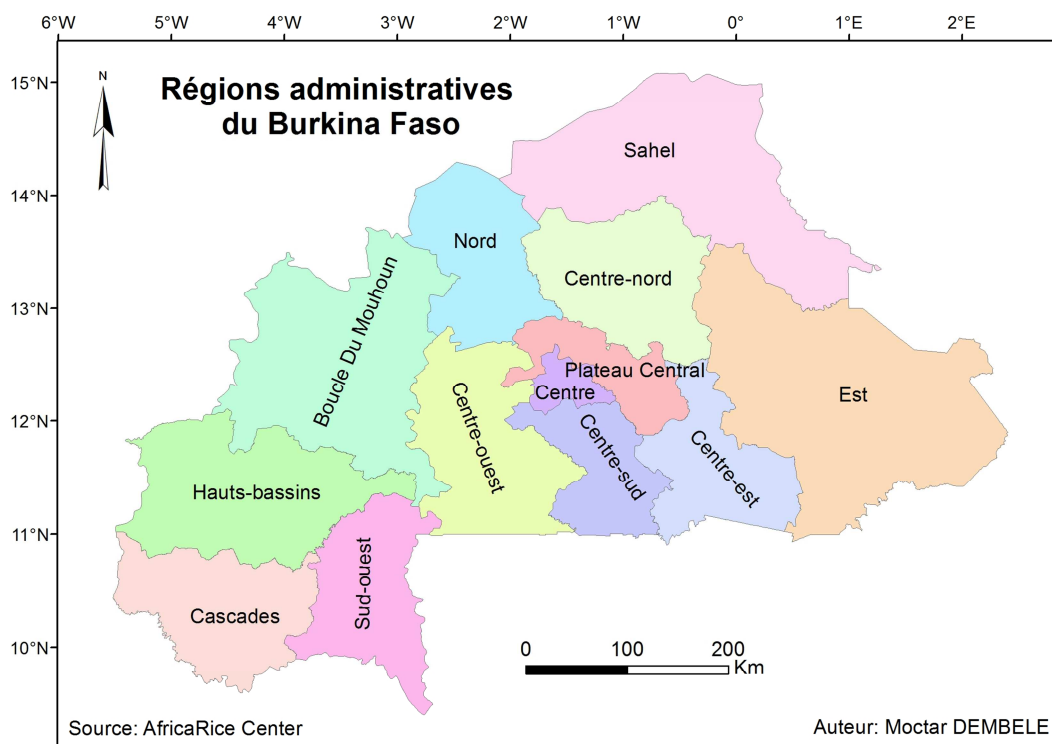


Figure 2 : Régions administratives du Burkina Faso

I.2.2. Climat et végétation

Le climat du Burkina Faso qui est de type tropical à dominance sahélienne, caractérisé par l'alternance de deux saisons contrastées :

- ◆ une saison humide, de mai à septembre, dominée par des vents humides (mousson) du secteur Sud-Ouest en provenance du Golfe de Guinée ;
- ◆ une saison sèche s'étendant d'octobre à avril avec une période froide de décembre à février et une période chaude de mars à mai. Elle est caractérisée par des vents chauds et secs chargés de poussières (harmattan) du secteur Nord-Est.

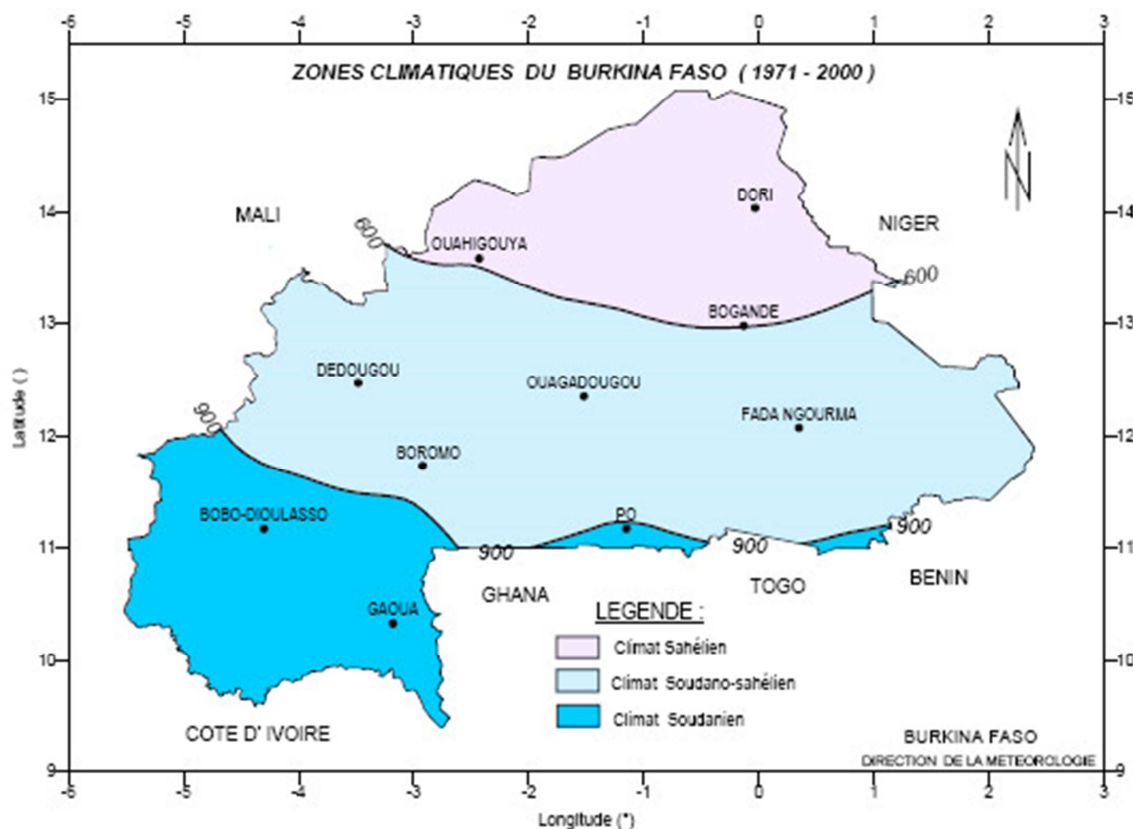
Les mois de mai et d'octobre sont des mois de transition. L'alternance des deux types de saison est déterminée par le déplacement du Front Inter Tropical (FIT). La répartition spatiale de la pluviométrie permet de distinguer, du Nord au Sud, trois principales zones climatiques qui recourent les unités phytogéographiques:

- la zone sahélienne qui se situe au nord du parallèle 14°N. Elle a une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 300 et 600 mm. La saison sèche y dure de 7 à 9

mois (de octobre à juin) et la longueur de la saison végétative y est inférieure à 100 jours par an. Elle est la zone la plus sèche et connaît une grande variabilité interannuelle et spatio-temporelle des pluies, de fortes amplitudes thermiques diurnes et annuelles et de très fortes évapotranspirations potentielles (ETP) pendant les périodes chaudes (mois de mars à juin). Cette zone représente environ 25% de la superficie du pays. La végétation naturelle est de type steppe arbustive épineuse avec un tapis herbeux en touffes et les arbres sont épars et localisés sur les cours d'eau ;

- la zone nord-soudanienne située entre les parallèles 11°30' et 14°N, avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 600 et 900 mm. La saison pluvieuse s'y étale sur 4 à 5 mois (de juin à octobre). Elle connaît des amplitudes thermiques diurnes et annuelles moins importantes que dans la partie nord du pays, et des ETP modérées. Elle occupe le milieu du pays et constitue la zone climatique la plus vaste. La végétation naturelle est caractérisée par une strate herbacée plus continue et des formations ligneuses plus denses du type savane arbustive à savane arborée ;
- la zone sud-soudanienne située au Sud du parallèle 11°30'N, avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 900 et 1 200 mm, marquée par une saison des pluies pouvant durer jusqu'à 6 mois (de mai à octobre). Elle représente la zone la plus humide du pays. Les amplitudes diurnes et annuelles de températures et les ETP y sont relativement faibles. C'est une zone à tapis herbacée plus dense et continu caractérisée par des savanes arborées à forêts claires avec des galeries forestières le long des cours d'eau. Avec des saisons végétatives de près de 160 jours par an, l'agriculture y est plus favorable grâce à des rendements plus importants liés à la pluviométrie mais aussi à la fertilité des sols.

La moyenne des températures varie selon les saisons entre 27°C et 30°C au Sud et 22°C et 33°C au Nord. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle décroît de plus de 2 260 mm/an au nord en zone sahélienne à moins de 1 800 mm au sud-ouest en zone sud-soudanienne. Les valeurs les plus fortes sont observées entre février et mars, alors que les plus faibles valeurs se situent en juillet, août et septembre, mois au cours desquelles l'ETP est compensée par la pluviométrie. Parallèlement, les valeurs de l'insolation sont élevées toute l'année tout en restant comprises entre 6 et 10 h/jour (MECV, 2011).



Source : Direction générale de la météorologie du Burkina Faso

Figure 3 : Régions climatiques du Burkina Faso

I.2.3. Hydrographie

Le réseau hydrographique du Burkina Faso est assez dense malgré que le pays soit peu arrosé et peu accidenté. Tous les cours d'eau sont temporaires à l'exception de deux fleuves : le Mouhoun et la Comoé dans le Sud-Ouest. Le pays est drainé par cinq bassins hydrographiques nationaux que sont la Comoé, le Mouhoun, le Nakambé, le Nazinon et le Niger. Trois grands bassins internationaux couvrent l'ensemble du territoire national :

- le bassin du Niger qui occupe 83 362 km² à l'Est et au Nord, soit 30% du territoire. Il regroupe tous les affluents du fleuve Niger que sont le Beli, le Goroual, la Sirba, le Gouroubi, la Diamangou, le Dargol, la Faga, la Tapoa-Mekrou, le Bonsoaga et le Banifing ;
- le bassin de la Volta qui s'étend sur 173 000 km² au Centre et à l'Ouest, soit 63% du pays, et charrie ses eaux en direction du Ghana. Ces cours d'eau pérennes sont: le

Mouhoun, le Kou, le Sourou, la Pendjari, la Kompienga, le Nakambé, le Nazinon et la Sissili;

- le bassin de la Comoé, couvrant 17 600 km² dans le Sud-Ouest, soit 7% du pays. Il draine ses eaux vers la Côte d'Ivoire avant de se jeter dans le Golfe de Guinée. Il regroupe la Comoé et ses affluents qui sont le Yanon et la Léraba.

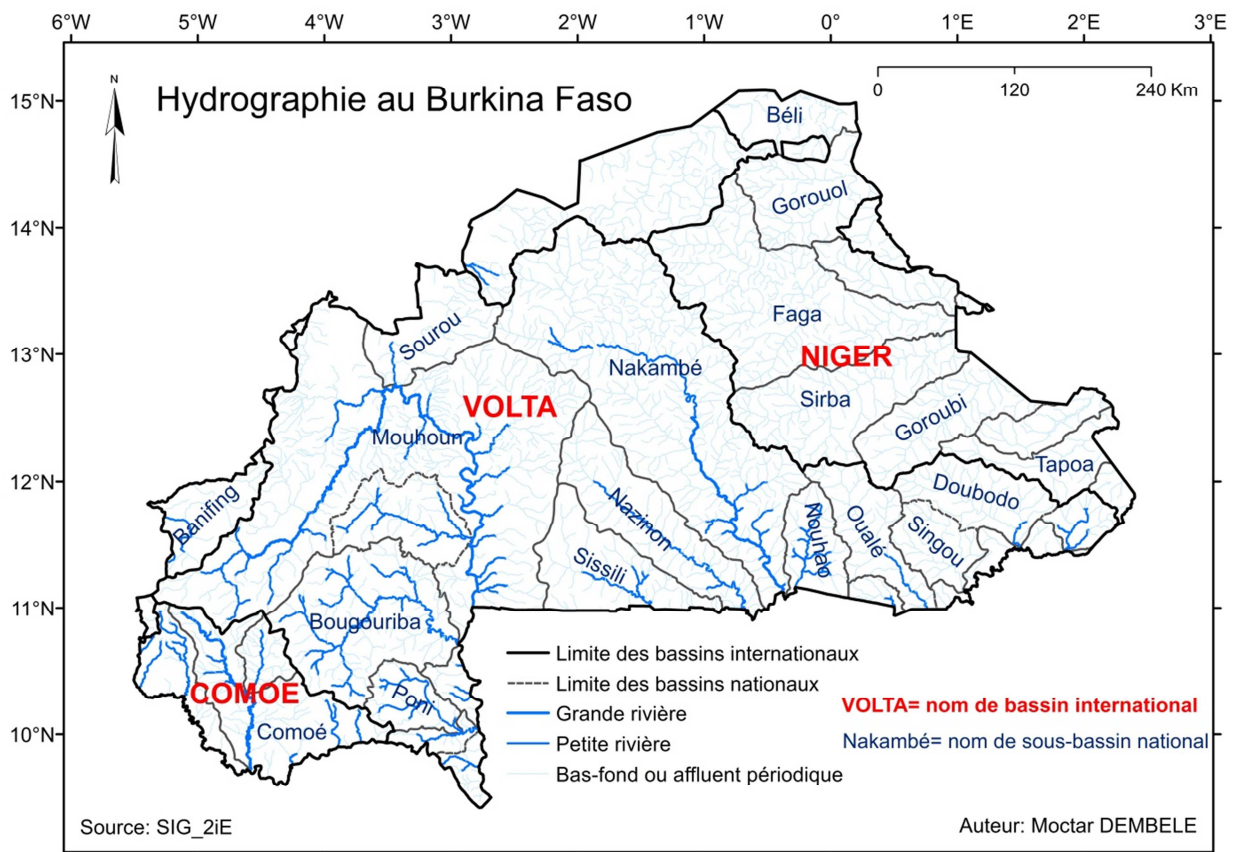


Figure 4 : Bassins versants et principaux cours d'eau au Burkina Faso

I.2.4. Relief et sols

Le Burkina Faso est un pays plat : près de 90 % du pays se situent entre 250 et 300 m d'altitude. Un plateau s'étend sur les trois quarts du pays. Certaines régions émergent de cette pénéplaine : les collines birrimiennes, les falaises à l'Ouest (Banfora) et au Sud-Est (Gobnangou), ainsi que les inselbergs granitiques (Pama, Wayen). La région la plus élevée du pays est située dans l'Ouest : le pic du Ténakourou à la frontière Malienne y culmine à 749 m. La région la plus basse, inférieure à 160 m, se trouve en bordure de la Pendjari dans le Sud-Est du pays et le point le plus bas est situé à 135 m.

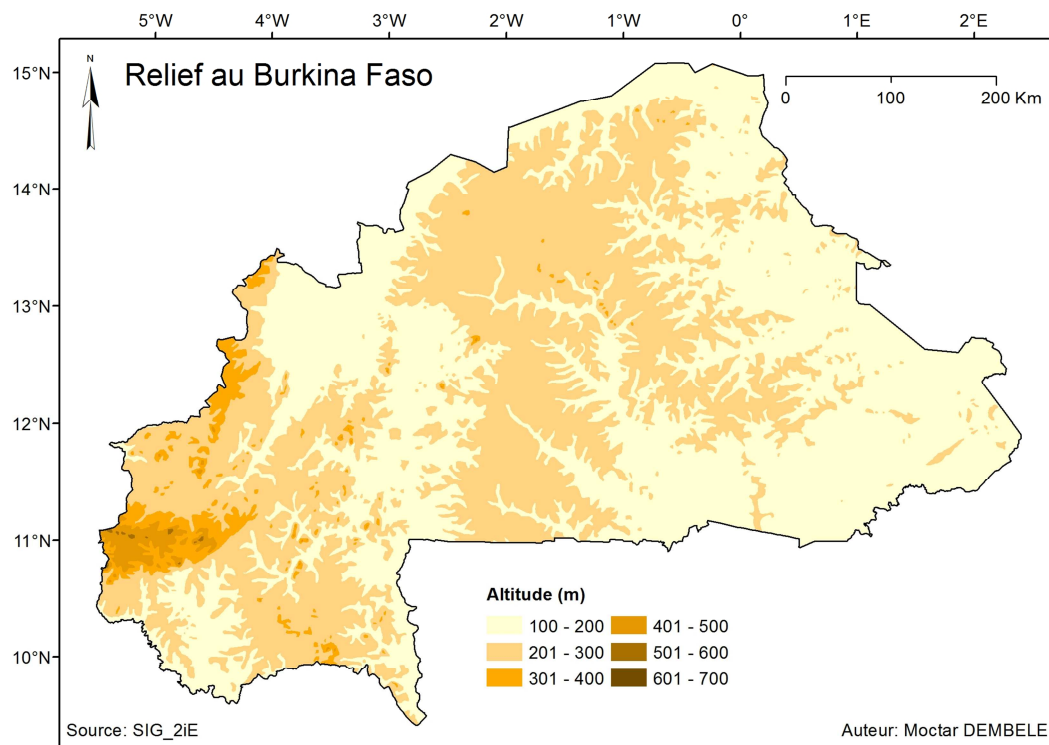


Figure 5 : Grands ensembles topographiques du Burkina Faso

La pédologie est hétérogène à cause de la longue évolution géomorphologique et de la diversité de la couverture géologique. Les sols sont en général peu profonds, vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne et de surcroît pauvres en éléments nutritifs. On y recense 9 classes de sol selon la commission de pédologie et de cartographie des sols du Burkina Faso (CCNUCC, 2001) qui sont :

- Les sols minéraux bruts situés sur les cuirasses ou les formations superficielles. Ils sont disséminés sur toute l'étendue du pays ;
- Les sols peu évolués caractérisés par une faible évolution du profil. On les rencontre partout dans le pays ;
- Les vertisols localisés sur des roches basiques ou sur des alluvions issues de substratum basique. On les rencontre particulièrement dans les provinces du Sourou, du Nahouri, de la Sissili, du Sanguié, du Boulgou et du Gourma ;
- Les sols isolumiques représentés par les sols bruns sub-arides, localisés dans les provinces du Soum et de l'Oudalan ;
- Les sols bruns eutrophes tropicaux situés sur des roches basiques. On les rencontre dans les parties Ouest, Sud-Ouest, Centre Ouest, Nord-Ouest et Est du pays ;

- Les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse représentés par les sols ferrugineux tropicaux suffisamment répandus dans le pays (39%). Ils se caractérisent par leur structure massive et par leur faible richesse chimique ;
- Les sols ferralitiques localisés sur des grès grossiers. On les retrouve dans les provinces du Houet, du Kéné Dougou, de la Léraba, de la Comoé et dans la partie sud de la province du Mouhoun ;
- Les sols hydromorphes que l'on retrouve aux alentours des fleuves Mouhoun, Nakambé, Nazinon et aussi aux environs des grandes rivières.
- Les sols sodiques caractérisés par la présence de sels solubles. Ils sont localisés dans les parties Centre Nord, Centre Sud et Est du pays.

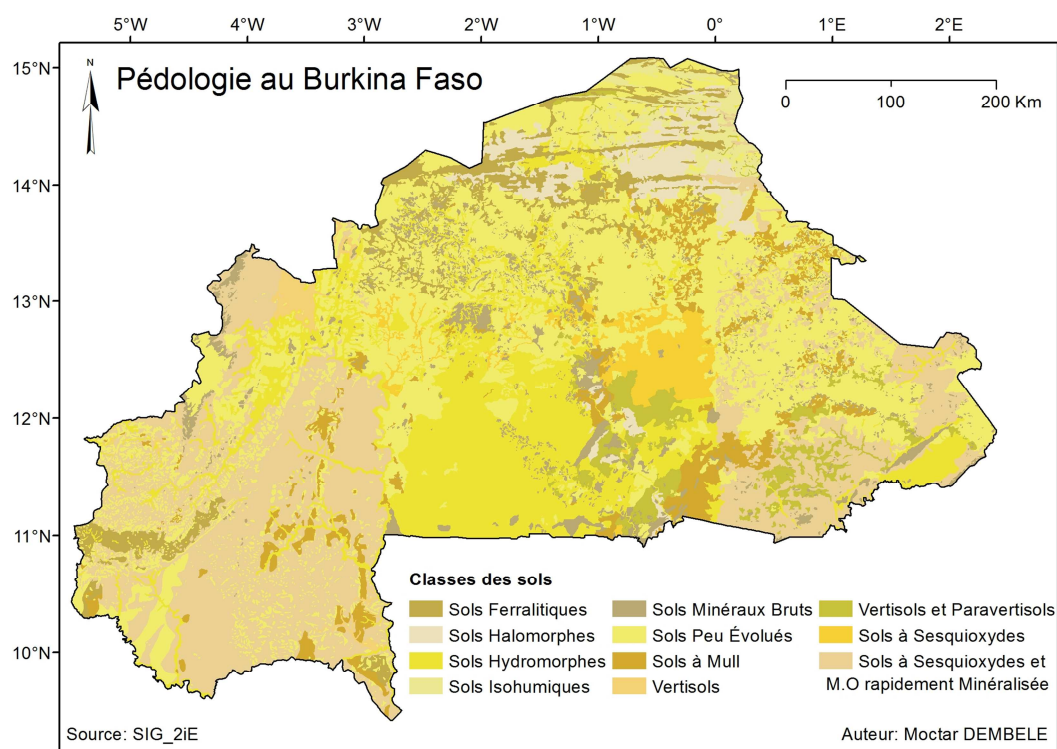


Figure 6 : Classes des sols au Burkina Faso

I.2.5. Etat de la production du riz

Au Burkina Faso comme dans beaucoup d'autres pays de l'Afrique de l'Ouest, le riz est un sujet de préoccupation grandissante à la fois pour les producteurs et les consommateurs et revêt de ce point de vue un caractère stratégique dans l'arène politique burkinabé. Insignifiante au début des années soixante, la consommation de riz a atteint aujourd'hui plus de 200 000 tonnes au Burkina Faso et s'accroît à un rythme de 5,6% par an, taux supérieur à celui de la croissance démographique (Guissou et Ilboudo, 2012).

Le riz au Burkina Faso occupe la quatrième place parmi les céréales cultivées, tant du point de vue des superficies, de la production que de la consommation annuelle par tête. Cependant, la production nationale en riz paddy est encore modeste et couvre moins de 50% des besoins en consommation. Cette situation d'inadéquation entre l'offre locale et la demande intérieure amène le pays à avoir recours à des importations massives chaque année pour satisfaire une demande sans cesse croissante.

L'importance de la riziculture au Burkina Faso n'est plus à démontrer. Cependant, du fait des aléas pluviométriques, les rendements et la production de riz connaissent une variabilité interannuelle importante. Les mesures de soutien à la production agricole ont permis une amélioration des performances de la riziculture au Burkina Faso au cours de ces dernières années qui s'est traduit surtout par une hausse des rendements de la riziculture irriguée (plaines et bas-fonds aménagés) passant de 2,7 tonnes à l'hectare en 2007 à 4 tonnes en 2010. Cependant, l'augmentation de la production n'a pas rempli, et de loin, l'objectif politique de satisfaire l'autosuffisance en riz, quand bien même le ratio d'autosuffisance a augmenté de 43% à 52% sur la période 2008 à 2010. Paradoxalement, le Burkina Faso dispose d'un potentiel important non encore exploité dans le domaine de la riziculture: environ 500 000 ha de bas-fonds aménageables dont moins de 10% sont aujourd'hui aménagés et plus de 233 500 ha irrigables dont moins de 5% sont actuellement mis en valeur. En termes d'impacts, l'aménagement de 2500 ha de bas-fonds rizicoles se traduit par un accroissement de la production de 5% contre 37% pour l'amélioration des rendements (MAHRH, 2009). Les principales zones de production de riz sont les régions des Hauts-Bassins et du Centre-Est, qui produisent près de 55% de la production nationale du fait de la présence des grands aménagements dans ces deux régions (Bagré au Centre-Est et Bama dans les Hauts Bassins). La production du riz se fait selon trois modes bien distincts, irrigué, bas-fond et pluvial strict:

- La riziculture irriguée qui concerne les plaines et les bas-fonds aménagés a occupé en moyenne 23% des superficies rizicoles sur la période 1984-2010 et fournit près de 53% de la production nationale en riz (DGPER, 2009). Introduite dans les années 60 au Burkina Faso, elle constitue le mode le plus performant de production de riz dans le pays avec des rendements de 4 à 7 tonnes/ha, en raison de la maîtrise totale de l'eau permettant la double campagne annuelle;
- La riziculture de bas-fond non aménagés est la forme traditionnelle de riziculture la plus pratiquée au Burkina Faso et dans toutes les régions du pays. Elle est pratiquée dans des sites sans maîtrise de l'eau (bas-fonds traditionnels non aménagés). Avec

67% des superficies totales exploitées en riz, les bas-fonds non aménagés fournissent 42% de la production nationale en riz, avec un rendement moyen de 1,3 tonnes/ha;

- La riziculture pluviale stricte occupe 10% des superficies dévolues au riz et fournit 5% de la production nationale en riz (DGPER, 2009) avec un rendement moyen de 1 tonne/ha. Cependant, elle pourrait revêtir une grande importance pour la production nationale pour peu qu'elle puisse s'insérer dans le système de rotation pratiqué en particulier dans les zones cotonnières. Tributaire de la quantité et de la répartition des pluies, ce type de riziculture n'est adapté qu'aux régions du Burkina Faso où la pluviométrie annuelle atteint ou dépasse 800 mm.

I.2.6. Historique de la sécheresse au Burkina Faso

Depuis les années soixante-dix jusqu'à nos jours, le Burkina Faso connaît des années de sécheresse, devenue presque chronique. Une analyse des données de pluies de 1896 à 2006 de l'Afrique de l'Ouest montre que la quantité moyenne annuelle des pluies au cours des quatre dernières décennies (1970-2009) est restée en dessous de la moyenne annuelle enregistrée durant la période 1900-1970 (Mahé and Paturel, 2009). En effet, deux évènements extrêmes ont démontré la fragilité des ressources naturelles du Sahel. Il s'agit de la sécheresse de 1972-1973 et celle de 1984-1985 (Herceg et al., 2007; Landsberg, 1975) qui ont causé des pertes en vie humaine et décimé des troupeaux de bétail dans la région semi-aride.

Au Burkina Faso, les inondations et la sècheresse affectent chaque année les superficies agricoles et provoquent des pertes économiques considérables estimées à plus de 175 milliards FCFA entre 2005 et 2010. En 2004 et 2007, de graves sécheresses ont causé une baisse significative de la production agricole (-16% en 2007) accentuant l'insécurité alimentaire des populations rurales et entraînant un ralentissement de la croissance de la valeur ajoutée du secteur agricole (MAFAP, 2013).

Tableau 1 : Pertes économiques (millions de F CFA) liées aux facteurs climatiques

	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	Total
Sécheresse	6 226	15 985	70 538	17 451	31 611	141 811
Inondations	535	3 362	14 006	8 502	6 958	33 363
Total	6 761	19 347	84 544	25 953	38 569	175 174
% PIB agricole	0.9	2.3	10.2	2.9	4.5	4.2

Source : MAFAP (2013)

I.3. Revue de la littérature

I.3.1. Quelques définitions

- **Aridité**

L'aridité traduit des conditions climatiques caractérisées par la faiblesse des précipitations moyennes annuelles et par le fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle. Concept climatique à référence spatiale (zone aride), l'aridité ne doit pas être confondue avec la sécheresse, concept météorologique à référence temporelle, phénomène conjoncturel (période, année sèche). L'aridité a de fortes implications hydrologiques et édaphiques dont elle est indissociable.

- **Sécheresse**

La sécheresse est une caractéristique récurrente normale du climat (Mishra and Desai, 2005). Elle se produit dans toutes les zones climatiques, mais ses caractéristiques varient considérablement d'une région à l'autre. Elle diffère de l'aridité qui est réservé aux régions à faible pluviométrie et est une caractéristique permanente du climat. Définir la sécheresse est donc difficile. Le Glossaire de la météorologie (1959) définit la sécheresse comme «une période de temps anormalement sèche et suffisamment prolongée pour que le manque d'eau puisse provoquer un grave déséquilibre hydrologique dans la zone touchée ». La sécheresse est un terme relatif. Par conséquent, toute discussion en termes de déficit de précipitations doit se référer à l'activité liée à cette précipitation. Cela signifie que quelle que soit la définition, la sécheresse ne peut pas être considérée uniquement comme un phénomène physique, mais elle doit être considérée par rapport à ses impacts sur la société (Bordi and Sutera, 2007). Wilhite et Glantz (1985) ont classé la sécheresse en quatre catégories (Hisdal et al., 2000) :

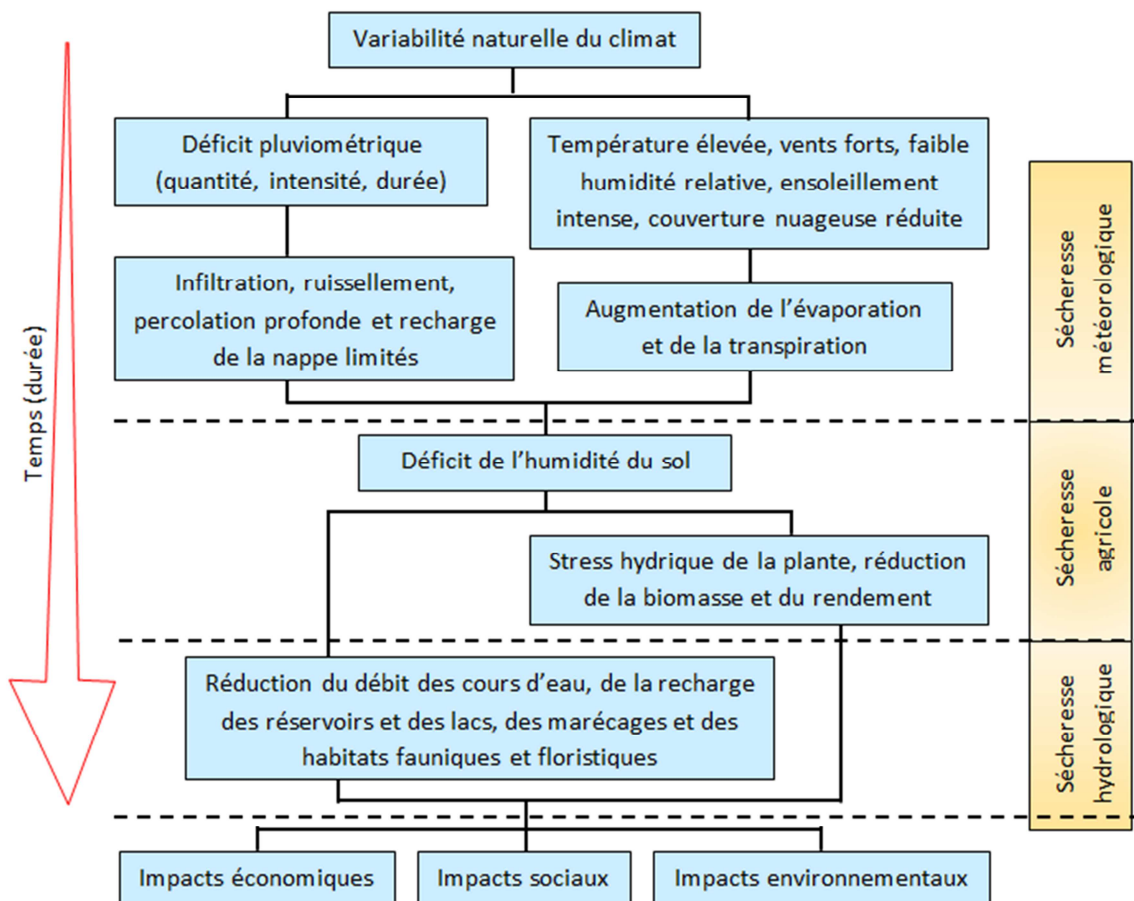
- **La sécheresse météorologique ou atmosphérique**, liée à une pénurie de précipitations avec des valeurs en dessous de la normale sur une certaine période ;
- **La sécheresse agricole**, qui est fonction du taux d'humidité du sol à un mètre de profondeur. Cette sécheresse dépend des précipitations, mais aussi de la nature du sol, des pratiques culturales et du type de plante. Ce type de sécheresse a des effets marquants sur la végétation;
- **La sécheresse hydrologique**, qui se produit quand les réserves en eau des sols (aquifères) et le niveau des cours d'eau chutent en dessous de la moyenne. Cela peut

être dû à une sécheresse météorologique particulièrement longue et intense, mais aussi à une surexploitation des ressources en eau ;

- **La sécheresse socio-économique**, liée à l'écart entre l'offre et la demande en eau des populations pour une activité économique.

Les trois premières catégories peuvent être considérer comme des indicateurs environnementaux et la dernière en tant qu'indicateur de la disponibilité de la ressource en eau. Toutefois, la sécheresse météorologique est la principale cause de la sécheresse. Habituellement, elle conduit d'abord à une sécheresse agricole en raison du manque d'eau dans le sol puis, si les insuffisances de précipitations continuent, une sécheresse hydrologique se développe. Les eaux souterraines sont généralement les dernières à être touchées, mais aussi les dernières à revenir à la normale (Hisdal et al., 2000).

La relation entre les différents types de sécheresse et leurs impacts peut être illustrée par la figure 7.



Source: adaptée de l'étude de Jeyaseelan (2003) et des informations issues du site web du National Drought Mitigation Centre, USA (<http://enso.unl.edu/ndmc/enigma/def2.htm>)

Figure 7 : Relation entre les variantes de la sécheresse et leurs impacts

▪ **Indicateur de sécheresse**

Un indicateur de sécheresse est une mesure d'une variable météorologique, hydrologique, agricole ou socio-économique qui fournit des signes d'une potentielle sécheresse (Fuchs, 2012).

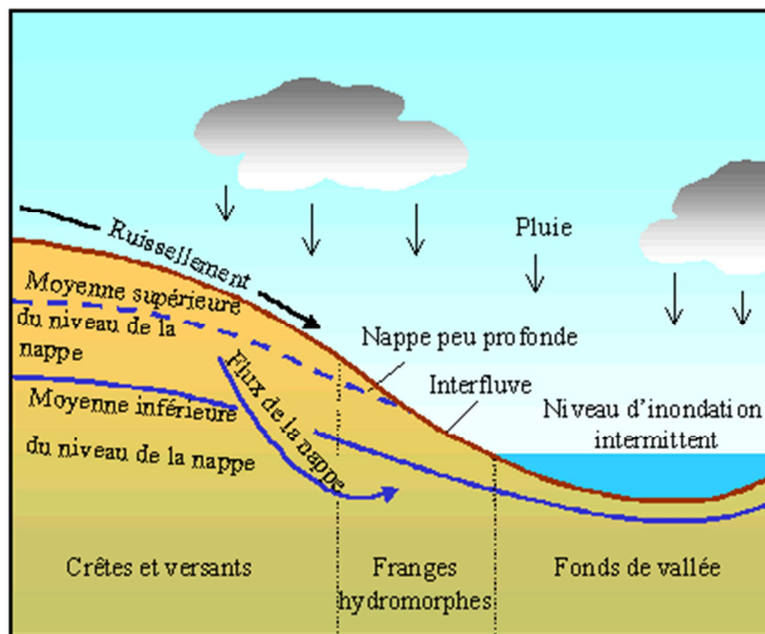
▪ **Indice de sécheresse**

Un indice de sécheresse est une méthode de dérivation des informations additionnelles relatives à la sécheresse en comparant la situation actuelle à l'information historique sur la base de calculs statistiques (Fuchs, 2012). Les indices de sécheresse sont des éléments importants et utiles pour la surveillance et l'évaluation de la sécheresse, car ils simplifient les interrelations complexes entre de nombreux paramètres climatiques. Il convient de mentionner que les indices de sécheresse peuvent être regroupés en deux catégories, les indices généraux et les indices spécifiques. Les indices généraux donnent un aperçu de l'apparition de la sécheresse et de sa gravité, alors que les indices spécifiques sont surtout utiles pour corrélérer des événements de sécheresse pour les dommages attendus de la sécheresse dans les différents secteurs de l'économie, de l'environnement et de la société. Les indices de sécheresse fournissent des représentations spatiales et temporelles des sécheresses historiques et donc placent les conditions actuelles dans une perspective historique. Ils sont précieux car ils permettent de fournir aux décideurs une mesure des récentes anomalies du climat pour une région. La gestion de la sécheresse dépend de la capacité des indices à détecter les conditions et les seuils d'occurrence de sécheresses afin de mesurer, de surveiller et de réduire leurs impacts (Tsakiris et al., 2007).

▪ **Bas-fond**

Le bas-fond constitue la partie inondable d'un bassin versant qui peut comprendre, du haut vers le bas : la crête, le plateau, le versant, la zone hydromorphe et le bas-fond proprement dit (Defoer et al., 2008). Selon Raunet (1985), les bas-fonds en régions intertropicales, sont les fonds plats ou concaves des vallons, petites vallées et gouttières d'écoulement inondables qui constituent des axes de drainage élémentaires emboîtés dans les épaisses altérations des socles cristallins pénéplanisés. Ce sont les axes de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques contenues dans l'épais manteau d'altération et alimentées par les pluies. Leurs sols sont engorgés ou submergés pendant une

période plus ou moins longue de l'année par une nappe d'eau correspondant à des affleurements de nappe et à des apports par ruissellement.



Source : ADRAO (http://www.warda.cgiar.org/ivc/isnar_fr/basfonds.htm)

Figure 8 : Coupe schématique d'une vallée représentant une zone de bas-fond

- **Télédétection**

La télédétection est un ensemble de techniques et d'outils pour la collecte d'informations sur un objet sans entrer en contact physique avec cet objet (Rossi, 2009). La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

- **Systèmes d'information géographique**

Selon l'institut de recherche des systèmes environnementaux (ESRI), un système d'information géographique (SIG) intègre le matériel, les logiciels et les données pour saisir, gérer, analyser et afficher toutes les formes d'informations géographiquement référencées. Les SIG permettent de voir, de comprendre, d'interpréter et visualiser les données de plusieurs manières qui révèlent les relations, les modèles et les tendances sous forme de cartes et de graphiques.

- **Pixel**

D'après le glossaire des termes de télédétection, le pixel est la plus petite unité d'une image numérique. Une image satellitaire est composée d'une matrice de plusieurs pixels, chacun ayant une valeur numérique particulière.

I.3.2. Synthèse de travaux antérieurs

Les données pluviométriques des stations météorologiques au sol sont généralement utilisées dans les méthodes traditionnelles d'évaluation et de suivi de la sécheresse. Toutefois, ils sont généralement limités, souvent inexacts et surtout, difficile à obtenir en temps quasi-réel. En revanche, les données satellitaires sont toujours disponibles et peuvent être utilisés pour détecter le début de la sécheresse, sa durée et son ampleur (Thiruvengadachari and Gopalkrishna, 1993). Dans l'étude de la sécheresse, de nombreux chercheurs ont utilisé la capacité des SIG à stocker et analyser de grands volumes de données de télédétection et intégrer des données provenant de différentes sources. Un certain nombre d'études a illustré l'utilisation de la télédétection et des SIG dans le suivi, les études d'impact, la cartographie de la sévérité, et la prévision des sécheresses (De Jager et al., 2000; Paulo et al., 2012; Tucker, 1979). Au cours des dernières décennies, les données satellitaires ont été utilisées seules ou en association avec d'autres données pour le suivi de la sécheresse de l'échelle régionale à l'échelle continentale (Vogt et al., 2000). Ces études étaient basées sur l'utilisation des indices de pluviométrie (Gocic and Trajkovic, 2013; Khalili et al., 2011; Mirabbasi et al., 2013), des indices de végétation (McVicar and Jupp, 1998; Vogt et al., 2000), les températures de surface (Seiler et al., 1998) , et une combinaison des différents indices (Du et al., 2013; Kogan, 1995; Kogan, 1998; Kogan, 1997).

I.4. La plante de riz

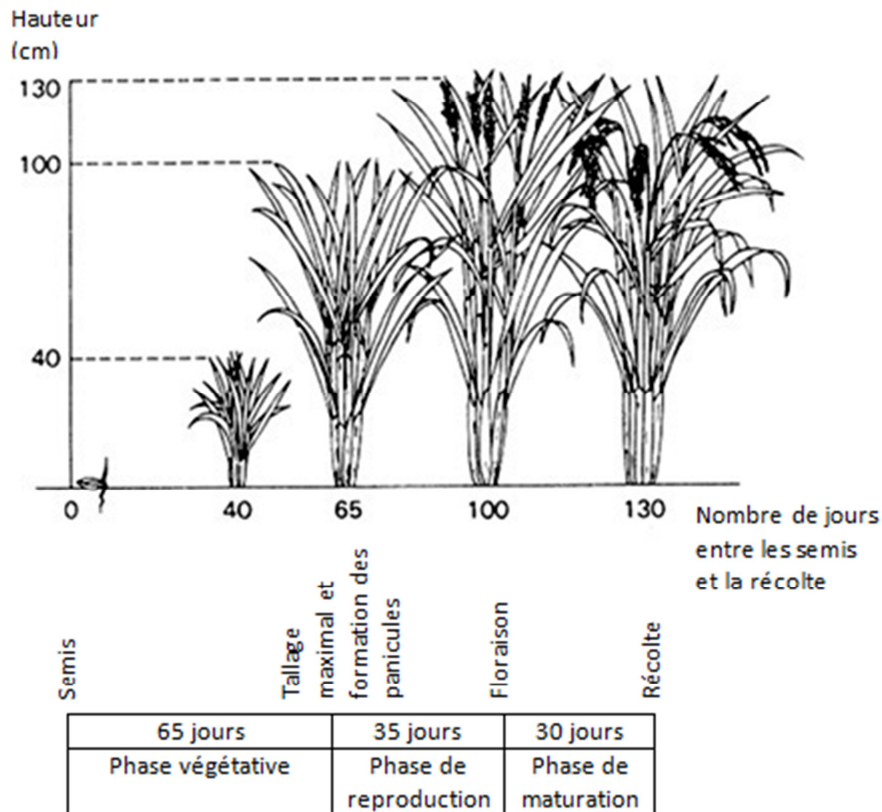
Le riz est une graminée annuelle d'origine tropicale appartenant à la famille des graminées et au genre *Oryzae*. Ce genre comprend une vingtaine d'espèces dont deux seulement sont cultivées (Wopereis et al., 2008) :

- *Oryza sativa* L. qui est originaire d'Asie, et dont les principaux types sont *indica* et *japonica*. Le type *indica* est originaire de l'Asie tropicale et le type *japonica* est originaire de la zone tempérée et subtropicale de l'Asie ;
- *Oryza glaberrima* Steud, ou encore riz africain, est originaire du delta central du Niger.

Le riz est une plante très souple qui pousse aussi bien en zone inondée qu'en zone non-inondée. La plante de riz est constituée par des tiges rondes et creuses, des feuilles plates et des panicules

terminales. Elle possède des organes végétatifs (racines, tiges et feuilles) et des organes reproducteurs à savoir la panicule constituée d'un ensemble d'épillets. Le développement du riz se fait en trois grandes phases :

- La **phase végétative** durant laquelle la plante traverse les stades de développement suivants : germination-émergence, plantule, tallage et élongation des entre-nœuds (selon la variété). La durée de la phase végétative est variable et est fonction des variétés. Cette phase est influencée par les températures basses et la photopériode (durée du jour), qui peuvent, lorsque la variété est sensible, allonger sa durée. La plupart des pratiques culturales s'opèrent durant la phase végétative, notamment la lutte contre les mauvaises herbes, la fertilisation, la lutte contre les insectes et les maladies ;
- La **phase reproductive** qui comporte les stades d'initiation paniculaire, de montaison et d'épiaison. Caractérisée par la naissance de la panicule et le développement des épillets et des organes reproducteurs, elle a une durée relativement fixe comprise entre 30 et 35 jours, et n'est pas fonction de la variété ni de la saison. Cette phase n'est pas affectée par la photopériode, cependant elle est très sensible aux températures basses, à la sécheresse (déficit hydrique) et à la salinité, qui peuvent occasionner la stérilité des organes reproducteurs des épillets, ce qui se traduit par des grains vides ;
- La **phase de maturité** qui comporte les stades de floraison, de grain laiteux, de grain pâteux et de maturité. Sa durée est relativement fixe, 30 jours environ, indépendamment de la variété et la saison. Elle est sensible aux aléas climatiques tels que les températures élevées, les vents violents et la sécheresse (déficit hydrique) durant les 15 premiers jours qui suivent la floraison (stade pâteux). L'arrêt de l'irrigation ou le drainage des parcelles au stade pâteux n'a pas d'influence négative sur la production. Cela est même bénéfique pour le riz puisqu'il homogénéise la maturation et facilite la récolte.



- La durée de la phase végétative varie selon les variétés.
- Les phases de reproduction et de maturation sont assez constantes pour la plupart des variétés.
- Le temps qui sépare les semis de la récolte varie de 80 à 180 jours ou plus.

Source : IRRI (<http://www.fao.org/docrep/003/t0751f/To751f05.htm>)

Figure 9 : Phases de développement du riz

La phénologie, succession des stades de développement, du riz n'est pas constante au cours d'une année car elle dépend entre autres de la température de l'air et de l'eau et de la photopériode. La phénologie est surtout fonction du choix variétal et de la date de semis. La température agit aussi de façon directe sur le rendement. En général, les basses températures autour de l'initiation paniculaire peuvent causer une stérilité des épillets. Une température minimale de l'air de 18 °C peut causer un début de stérilité. La stérilité atteint 100 % si la température minimale de l'air tombe en dessous de 16 °C. Un effet de stérilité peut aussi se produire pour des températures élevées à la floraison. Le pourcentage de stérilité augmente de 0 à 100 % si la température moyenne de l'air augmente de 35 °C à 45 °C (Wopereis et al., 2008).

II. DEUXIÈME PARTIE: HYPOTHÈSES DE RECHERCHE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

II.1. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de la présente étude est de développer, appliquer et évaluer une méthodologie qui permet de quantifier et caractériser la distribution spatio-temporelle de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso. Elle s'appuie sur l'analyse d'indices de sécheresse calculés à partir de données pluviométriques et des paramètres physiologiques et biophysiques des végétaux acquis par télédétection. La conduite de l'étude se base sur les objectifs spécifiques suivants :

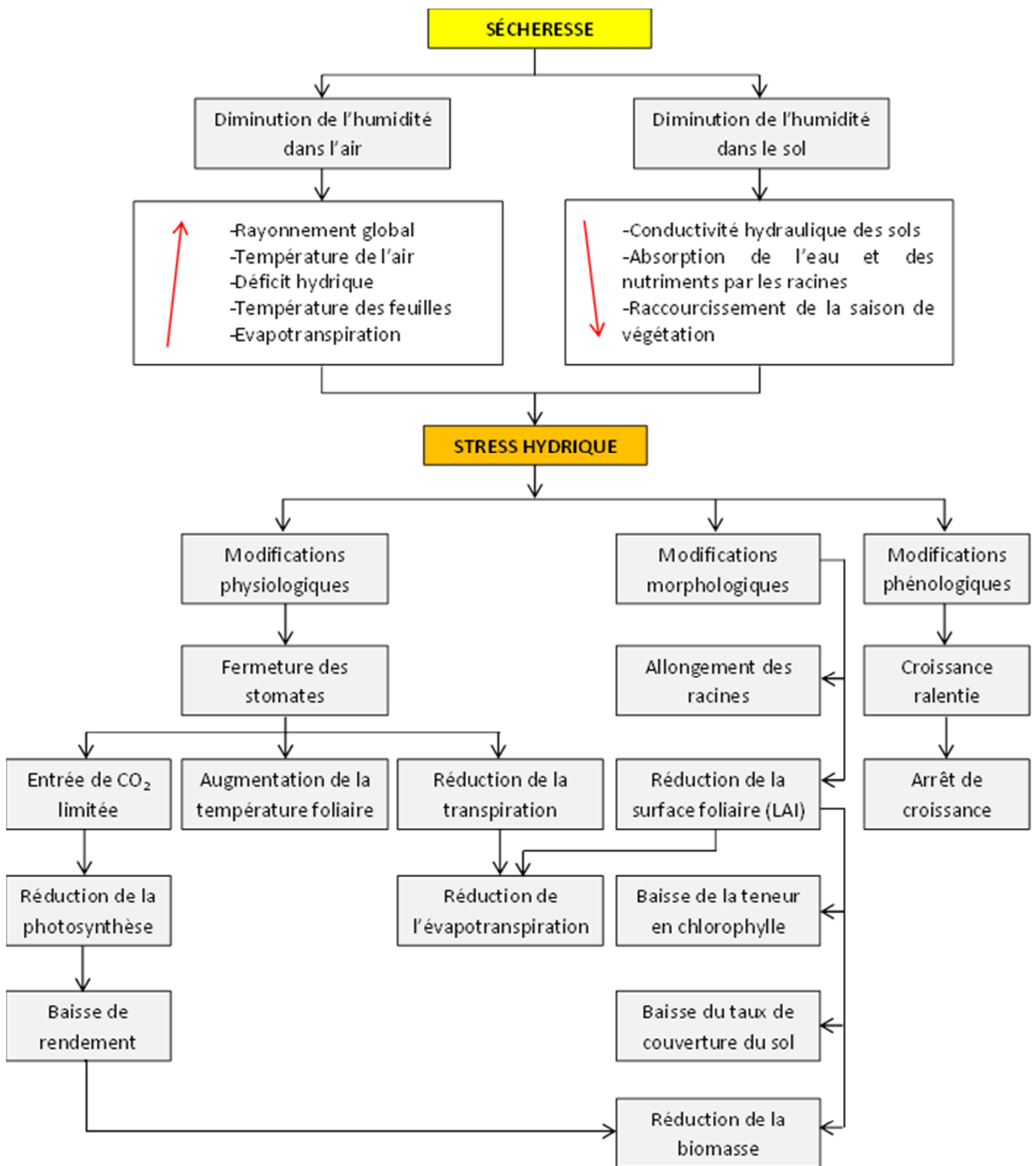
- ◆ Déterminer les zones et les périodes d'occurrence de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso ;
- ◆ Déterminer la fréquence, la sévérité et la durée de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles dans chaque province au Burkina Faso ;
- ◆ Comparer les indices de sécheresse utilisant les paramètres physiologiques et biophysiques des plantes avec ceux utilisant les données pluviométriques.

II.2. Hypothèses de recherche

La sécheresse agricole se produit lorsque l'humidité du sol est insuffisante pour répondre aux besoins en eau de la plante (Wilhite and Glantz, 1985). Dès lors, un déficit hydrique affecte différents paramètres physiologiques (vigueur et taux de verdure) et biophysiques (température foliaire, surface foliaire, photosynthèse et conductance stomatique) de la plante (Tardieu et Dreyer, 1997) (figure 10). Les capteurs satellitaires ayant la capacité de capturer des images représentant les conditions qui prévalent à la surface de la terre, il est possible d'utiliser ces images pour caractériser l'état des surfaces terrestres et en tirer des informations se rapportant à l'état de stress hydrique des végétaux. Les constats révèlent qu'en situation de sécheresse, le contenu en eau de la végétation diminue et la réponse spectrale de la végétation change. La réflectance dans le domaine du proche infrarouge diminue et la réflectance dans la région spectrale du rouge augmente (McVicar and Jupp, 1998). Une réponse des plantes à un stress hydrique est la diminution des échanges gazeux avec l'atmosphère car les stomates des feuilles se ferment pour conserver l'humidité (Mader, 1988). Cette fermeture des stomates

entraîne une diminution de la transpiration, et l'énergie entrante ne peut plus être libérée, entraînant ainsi une augmentation de la température de la plante. Les résultats d'une précédente étude ont également démontré le lien entre la température de l'air et la température de surface (Vogt et al., 1997). Au-delà de la réponse des végétaux aux conditions de sécheresse, le fonctionnement hydrologique des plateaux est différent de celui des bas-fonds. Hormis les pluies, les bas-fonds sont approvisionnés par une quantité considérable des eaux de ruissellement et des eaux souterraines issues des versants et des plateaux environnants. Dès lors, un déficit pluviométrique dans un bas-fond n'engendre pas immédiatement et obligatoirement une sécheresse. Partant de ces constats, les objectifs visés par cette étude se fondent sur les hypothèses suivantes :

- ◆ **Hypothèse 1** : Puisque la végétation réagit aux changements des conditions hydriques, il est donc possible de caractériser l'état de la végétation, et par extension les situations de stress hydrique, grâce aux indices de végétation satellitaires, comme le *NDVI* et le *VCI*. Il est donc possible d'utiliser ces indices pour la caractérisation des situations de sécheresse ;
- ◆ **Hypothèse 2** : Puisque les capteurs thermiques des satellites sont capables de détecter les variations de température à la surface de la terre, alors il est possible d'utiliser la température de surface (*LST*) pour caractériser l'état de stress hydrique des plantes, et par ailleurs l'indice de température (*TCI*) pour caractériser les situations de sécheresse ;
- ◆ **Hypothèse 3** : En cas de déficit pluviométrique, l'humidité du sol d'un bas-fond n'est affectée que si les plateaux et les versants, qui alimentent ce bas-fond, connaissent des épisodes de sécheresse. Aussi à cause du temps de réponse de la végétation à un déficit hydrique, à l'échelle d'un bas-fond, la corrélation sera faible entre les indices de sécheresse utilisant les données pluviométriques et ceux utilisant les paramètres biophysiques et physiologiques des plantes.



Source : adaptée des études de El Abidine (2003) et Kotchi et Viau (2004)

Figure 10 : Influence du stress hydrique sur les variables d'état de la plante

III. TROISIÈME PARTIE: MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1. Données satellitaires

La première étape de cette étude a consisté à l'acquisition des données sur l'étendue de la zone d'étude qui est le Burkina Faso. Les variables utilisées sont essentiellement la pluviométrie, la température de surface (*LST*) et l'indice normalisé de végétation (*NDVI*).

III.1.1. Indice normalisé de végétation (*NDVI*)

Proposé par Tucker (1979), l'indice de végétation le plus couramment utilisé en télédétection est l'indice de végétation normalisé (*NDVI*) (Karnieli et al., 2010). Une végétation saine a une faible réflectance dans la partie visible du spectre électromagnétique, due à l'absorption de la chlorophylle et d'autres pigments, et une réflectance élevée dans le proche infrarouge (PIR) à cause de la réflectance interne par le mésophylle, tissu spongieux d'une feuille verte (Owringi et al., 2011). L'algorithme du *NDVI* soustrait les valeurs de réflectance dans le rouge (visible) de celles du proche infrarouge et les divise par leur somme :

$$NDVI = \frac{\lambda_{PIR} - \lambda_R}{\lambda_{PIR} + \lambda_R}$$

où λ est la réflectance dans les bandes spectrales du proche infrarouge (PIR) et du rouge (R).

Cette formulation permet de faire face au fait que deux parties d'un couvert végétal pourraient avoir des valeurs différentes si l'une est en plein soleil, et l'autre sous un ciel nuageux. Les pixels lumineux auraient tous des valeurs plus élevées, et donc une plus grande différence absolue entre les bandes. Ceci est évité en divisant par la somme des réflectances des bandes. Selon Muthumanickam *et al.* (2011), le *NDVI* est un bon indicateur de la biomasse verte, de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la vigueur de la végétation (Thenkabail et al., 2004; Wan et al., 2004). Il a été utilisé avec succès pour identifier les cultures stressées (Singh et al., 2003), et de nombreuses études ont montré une bonne corrélation avec les pluies au Sénégal et au Sahel (Li et al., 2004; Tucker et al., 2005). Théoriquement, les valeurs de *NDVI* varient de -1 à +1, mais dans la pratique des valeurs négatives extrêmes représentent les plans d'eau, les valeurs autour de 0 représentent le sol nu et les valeurs à partir de 0.60 représentent la végétation dense et verte. D'après Du *et al.* (2013), certaines études ont montré que le *NDVI* correspond à des facteurs climatiques, tels que les précipitations et la température, et pourraient être utilisés pour surveiller la sécheresse climatique (Liu and Juárez, 2001; Wang

et al., 2001). Cependant le *NDVI* lui-même ne reflète pas la sécheresse ou les conditions de sécheresse (Thenkabail et al., 2004), mais il peut être utilisé pour calculer les indices de sécheresse.

III.1.2. La température de surface (LST)

La température de surface (*LST*) dérivée à partir de données de la bande de l'infrarouge thermique (IRT) a également été jugée pour fournir des informations essentielles et utiles sur l'état de la surface de la terre. Elle est largement mise en œuvre dans la formulation des bilans énergétique et hydrique dans l'interface sol-atmosphère (Karnieli et al., 2010). Dans ce contexte, la *LST* sert de proxy pour évaluer l'évapotranspiration, le stress hydrique de la végétation, l'humidité du sol, et l'inertie thermique (Anderson et al., 2007). Elle se calcule à partir des températures de brillance des capteurs satellitaires :

$$LST = T_4 + A(T_4 - T_5) + B(\epsilon) \quad [^{\circ}K]$$

où :

T_4 et T_5 sont les températures de brillance de canaux 4 et 5 du capteur satellitaire,

$$A = 1.0 + 0.58(T_4 - T_5)$$

$$B = 0.51 + 40(1 - \epsilon) - \beta\Delta\epsilon$$

$$\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$$

où :

β est un coefficient qui diminue selon le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, ϵ_4 et ϵ_5 sont les émissivité des canaux 4 et 5 du capteur satellitaire.

III.1.3. La pluviométrie

Les données de pluviométrie ont été utilisées pour le calcul d'un indice de sécheresse météorologique afin de vérifier le lien entre le déficit pluviométrique et la sécheresse dans les bas-fonds. La mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) est une mission de la NASA, dont les objectifs sont de mesurer les précipitations tropicales et subtropicales et estimer les échanges d'énergie associée.

III.2. Acquisition des données satellitaires

Toutes les images satellitaires des variables utilisées (*NDVI*, *LST* ou pluviométrie) ont été acquises sur des sites Web de la NASA pour la période couvrant toutes les années de 2001 à 2013. Ces données sont des produits standards. Cela signifie qu'elles ont déjà reçu un prétraitement qui les rend déjà utilisables une fois téléchargées. Selon (Thenkabail et al., 2004), le prétraitement consiste à faire des corrections d'une part pour l'atténuation atmosphérique de la poussière, de la brume et de l'absorption de l'ozone. Et d'autre part les distorsions dues à l'angle du soleil et l'angle de vue des capteurs des satellites, et l'ajustement au nadir.

Les données du *NDVI*, de référence MOD13Q1, ont été téléchargées sur le site Web <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, avec une résolution temporelle de 16 jours, et une résolution spatiale de 250 m de côté par pixel, soient 299 images satellitaires. Les données de la *LST*, de référence MOD11A2, ont été téléchargées sur le site Web <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, avec une résolution temporelle de 8 jours, et une résolution spatiale de 1 km de côté par pixel, soient 598 images satellitaires. Quant aux données de la pluviométrie, elles sont issues du site Web http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3B42_Daily. Elles correspondent à la référence 3B42, et ont été téléchargées avec une résolution temporelle journalière, et une résolution spatiale de 28 km de côté par pixel, soient 4748 images satellitaires.

III.3. Traitement des images satellitaires

Pour le traitement, toutes les opérations ont été faites avec le logiciel ArcMap 10.1. Les images ont été ramenées à une résolution spatiale de 250 m à l'aide de l'outil *resample* et, une résolution temporelle de 16 jours en faisant des moyennes pour le *NDVI* et la *LST*, et des sommes pour la pluviométrie en utilisant les outils *raster calculator* et *cell statistics* du logiciel. La résolution spatiale de 250 m correspond à la plus petite des résolutions spatiales de l'ensemble des images téléchargées pour l'étude, tandis que la résolution temporelle de 16 jours correspond à la plus grande résolution temporelle de ces mêmes images. Cela permet d'une part d'uniformiser les calculs, puisque certains indices de sécheresse combinent différentes variables dans leurs algorithmes. D'autre part, des pixels de 250 m permettent de mieux capturer les différents évènements qui surviennent à l'échelle des bas-fonds, compte tenu de la largeur de ces derniers au Burkina Faso. Concernant la résolution temporelle de 16 jours, celle-ci permet une observation précise de l'occurrence de la sécheresse durant le cycle

du riz qui dure au moins 80 jours (figure 9) soient 5 fois 16 jours. Ainsi chacune des années entre 2001 et 2013 a été découpée en 23 périodes de 16 jours. Toutefois, la présente étude s'intéresse à la principale saison des cultures qui va de la période 10 (P10) à la période 19 (P19), c'est-à-dire de fin Mai à la mi-October. Cette saison des cultures a été vérifiée en observant l'évolution annuelle de la moyenne du *NDVI* au cours des années 2001 à 2013, dans les bas-fonds du Burkina Faso (figure 11).

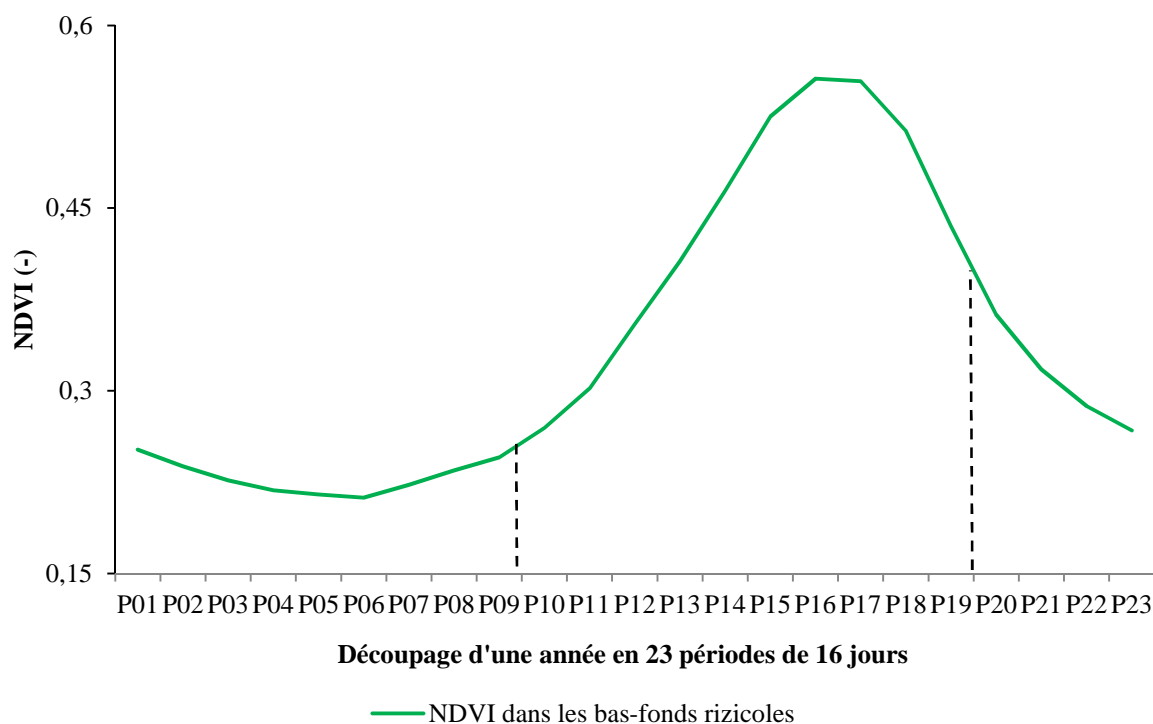


Figure 11 : Evolution du NDVI dans les bas-fonds rizicoles au cours d'une année

Après avoir défini les résolutions spatiale et temporelle, les indices de sécheresse (*VCI*, *TCI*, *VHI* et *SPI*) ont été calculés pour chaque pixel de 250 m de côté et ce, durant chacune des 10 périodes comprises entre P10 et P19 de chaque année depuis 2001 jusqu'à 2013. Ainsi pour chaque indice de sécheresse on a 130 images, soit un total de 520 images qui ont permis d'apprécier les changements survenus au niveau de la végétation, de la température et de la pluviométrie pour chaque période de 16 jours entre la fin Mai et la mi-October de chaque année depuis 2001 jusqu'à 2013. Ensuite les moyennes saisonnières, couvrant les périodes 10 à 19, ont été calculées pour toutes les années de 2001 à 2013. Enfin, pour chaque indice de sécheresse, une carte a été générée pour une moyenne saisonnière sur le long terme (2001-2013), en faisant la moyenne des moyennes saisonnières calculées précédemment. Dès lors, les coefficients de variation ont été calculés pour chacune des moyennes saisonnières sur le

long terme (2001-2013). Par la suite les fréquences de l'occurrence de la sécheresse ont été calculées en rapportant le nombre de périodes ou années sèches au nombre total de périodes ou années de l'étude. Pour chacune des variables utilisées et chacun des indices de sécheresse calculés, les moyennes ont été calculées avec la fonction *mean* de l'outil *cell statistics* du logiciel ArcMap 10.1, sauf pour le calcul des pluies saisonnières pour lesquelles la fonction *sum* du même outil a été utilisée, puisqu'il s'agissait de faire un cumul des pluies des périodes 10 à 19. Les coefficients de variation ont été calculés avec l'outil *raster calculator* en utilisant la formule suivante :

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu}$$

Où : σ est l'écart type et μ est la moyenne de l'échantillon étudié.

Après avoir effectués les calculs sur toute l'étendue du territoire du Burkina Faso, une base de données des bas-fonds a été utilisée pour extraire seulement les zones de bas-fonds. Cette base de données des bas-fonds a été établie en 2006 par le Programme d'Appui à la Filière Riz (PAFR) du Burkina Faso. Certains prétraitements ont été effectués sur cette base afin de minimiser les erreurs en évitant les interpolations des données. En effet, sur la période d'étude (2001-2013), certaines images satellitaires avaient des pixels pour lesquels il n'y avait pas d'information pour certaines des 10 périodes entre P10 et P19. C'est-à-dire que pour certaines périodes, les satellites n'ont pas pu collecter les données (*NDVI*, *LST* ou pluviométrie) sur certaines parties du pays. Ainsi les images satellitaires ont révélées une absence de données dans les pixels représentant ces zones. Dès lors, après l'extraction des données à l'échelle des bas-fonds, certains bas-fonds manquaient d'information puisque ceux-ci correspondaient à des pixels sans données. Dans la suite de l'étude, les bas-fonds ayant manqué d'information ont été retirés de la base de données initiale des bas-fonds. Ce processus a permis d'aboutir à une base finale de 27 229 bas-fonds repartis de sorte à couvrir l'ensemble de la zone d'étude (figure 12). La superficie totale de ces bas-fonds est estimée à 2 394 000 ha.

Pour terminer, des coefficients de corrélation ont été calculés, à l'aide de la formule ci-dessous, afin de déterminer les éventuelles relations qui pourraient exister entre variables, entre indices, et entre variables et indices.

$$r(x,y) = \frac{cov(x,y)}{s(x) * s(y)}$$

Où $cov(x,y)$ et $s(x)$ ou $s(y)$ représentent respectivement la covariance et les écart-types des paramètres x et y eux-mêmes étant les variables et/ou indices étudiés.

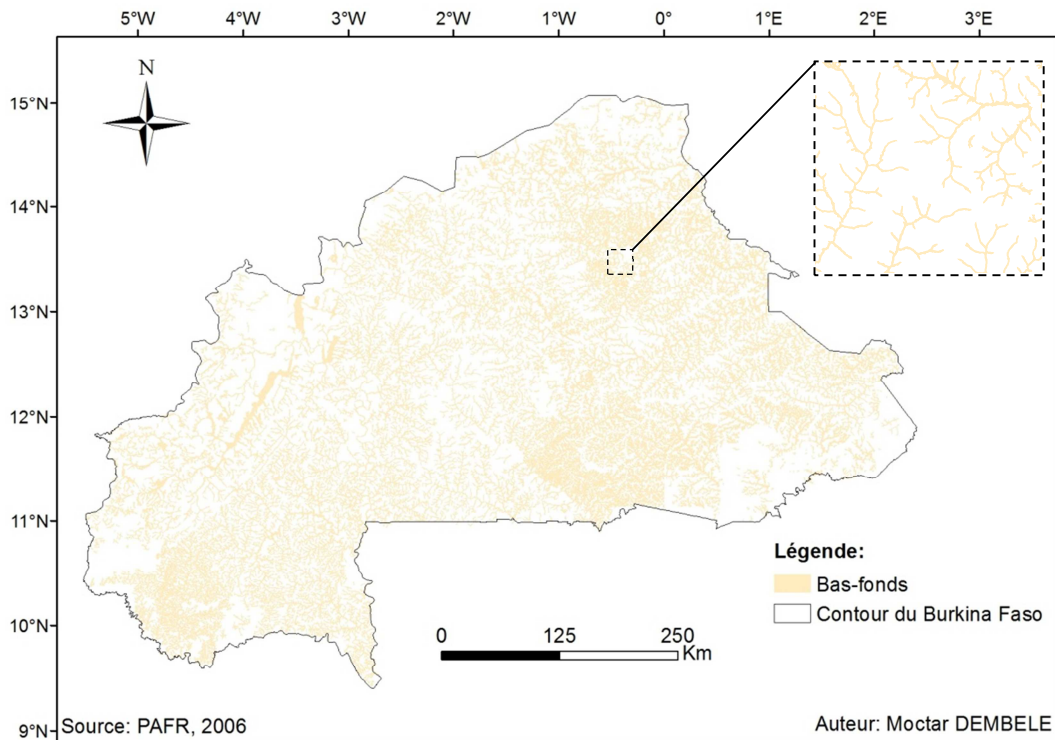


Figure 12 : Carte des 27 229 bas-fonds étudiés

Une fois les analyses faites pour chacun des 27 229 bas-fonds, les différents résultats ont été synthétisés à l'échelle des provinces du Burkina Faso (figure 13).

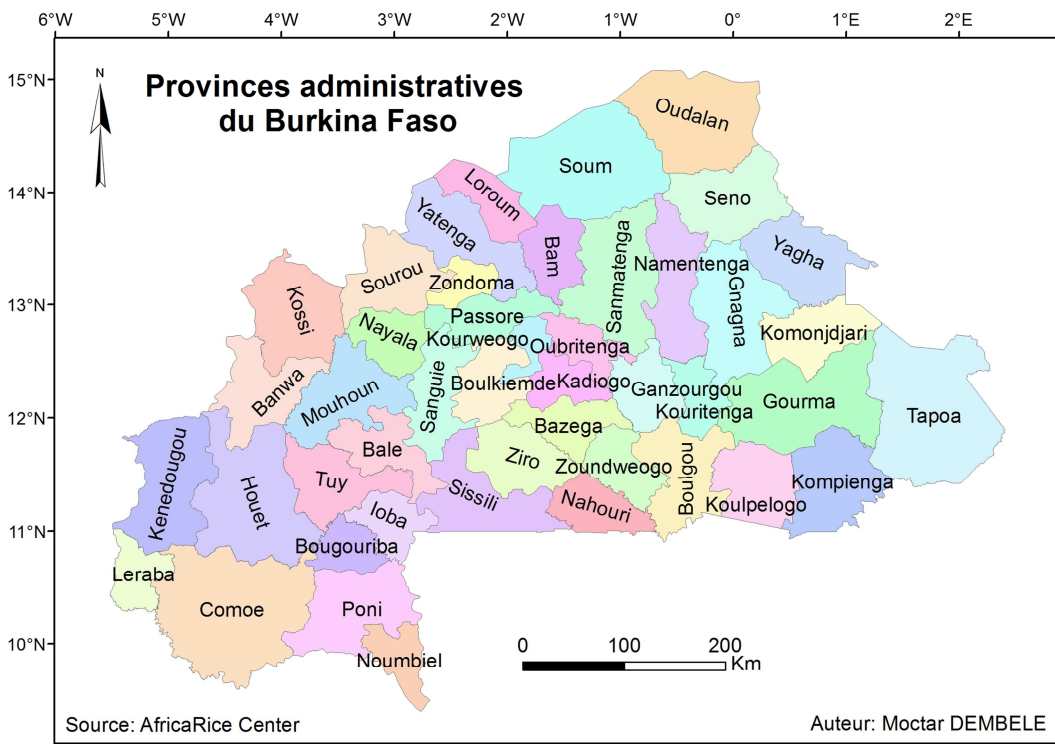


Figure 13 : Provinces administratives du Burkina Faso

Cette analyse à l'échelle provinciale se justifie par le fait que, pour des décideurs, il peut être utile de connaître l'état de la sécheresse des bas-fonds à l'échelle d'unités administratives. Cela permettrait de prioriser les zones d'interventions pour mettre en œuvre des mesures de prévision et de limitation des conséquences de la sécheresse agricoles dans les bas-fonds rizicoles. Hormis ces aspects, l'analyse à l'échelle provinciale permet de placer les bas-fonds dans un contexte bien précis, puisque les provinces peuvent entièrement appartenir à des zones agro-écologiques bien définies, avec des caractéristiques pédoclimatiques permettant une analyse plus approfondies des résultats. Ainsi, les résultats antérieurs ont été synthétisés à l'échelle des provinces en faisant une moyenne des indices de sécheresse de chaque bas-fond présent dans chaque province. Ces opérations ont été effectuées avec l'outil *zonal statistics as table*. La figure 14 est une illustration de la procédure suivie :

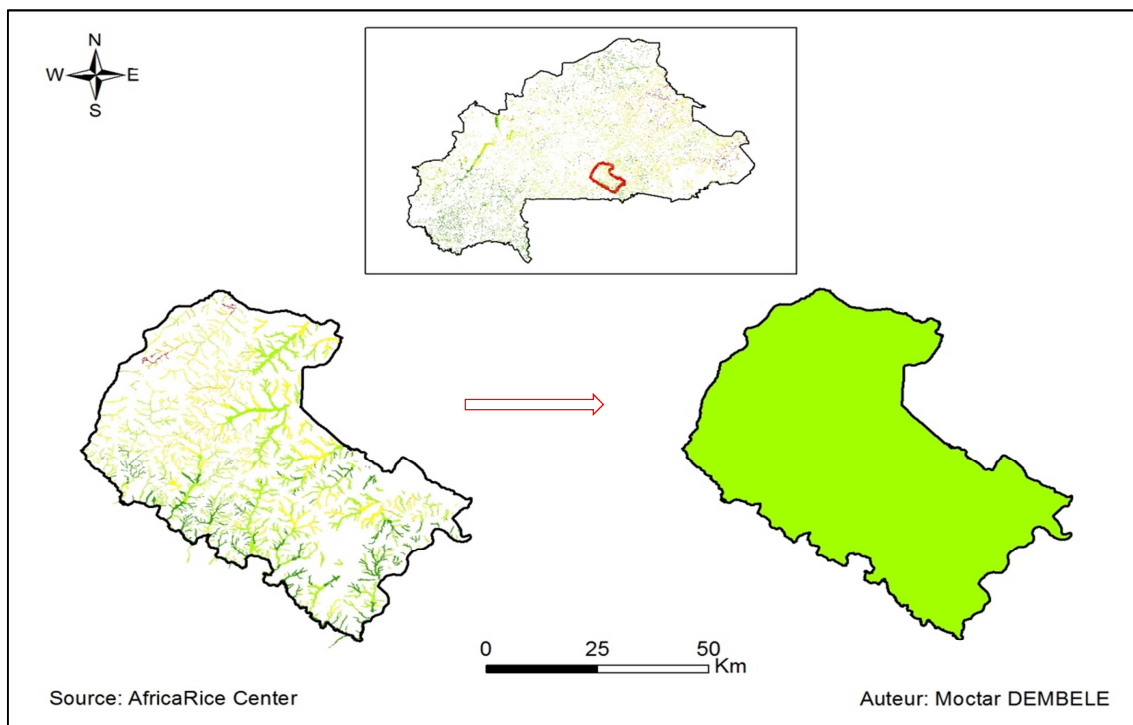


Figure 14 : Présentation par province de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles

III.4. Indices de sécheresse

III.4.1. Indice de la condition végétale (VCI)

Pour un couvert végétal, les changements du *NDVI* liés au climat sont minimes par rapport à ceux liés à l'écosystème, et les effets de la sécheresse sur la végétation ne peuvent être facilement détectés à partir des données de *NDVI*. Ainsi Kogan (1995, 1997) a suggéré

l'utilisation de l'indice de la condition végétale (*VCI*) comme un indicateur de l'état d'un couvert végétal. Cet indice est fonction des valeurs maximale et minimale de *NDVI* rencontrées pour un écosystème donné pendant de nombreuses années. Il montre l'écart entre le *NDVI* de la période en cours et le *NDVI* minimal calculé à partir d'enregistrements sur le long terme (Thenkabail et al., 2004).

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Où *NDVImax* et *NDVimin* sont les valeurs maximale et minimale respectives du *NDVI* calculées à partir des enregistrements sur le long terme (13 ans pour cette étude) pour la période considérée, et *j* est l'indice de la période en cours. Le *VCI* est une normalisation du *NDVI*, sur la base de pixels, dans laquelle le signal climatique sur le court terme du *NDVI* est filtré en le séparant du signal écologique sur le long terme. Le *VCI* capture la dynamique des précipitations mieux que le *NDVI* en particulier dans les zones géographiquement non homogènes. De plus, le *VCI* permet non seulement la description de la couverture des terres et le changement spatiale et temporelle de la végétation mais aussi permet la quantification de l'impact des conditions météorologiques sur la végétation (Unganai and Kogan, 1998). Les valeurs du *VCI* varient de 0 à 1, correspondant aux changements de l'état de la végétation de très défavorable à optimale. En cas de sécheresse, l'état de la végétation est pauvre et le *VCI* est proche ou égal à 0. Un *VCI* de 0.50 reflète un état équitable de la végétation. Dans des conditions optimales de la végétation, le *VCI* est proche de 1 (Jain et al., 2009). Plusieurs études ont utilisé le *VCI* pour la détection et la surveillance de la sécheresse (Du et al., 2013; Thenkabail et al., 2004; Wan et al., 2004).

III.4.2. Indice de la condition thermique (*TCI*)

Kogan (1995, 1997) a également suggéré l'indice de la condition thermique (*TCI*), et son algorithme est similaire à celui du *VCI* sauf que sa formulation a été modifiée pour tenir compte de la réponse de la végétation à la température (plus la température augmente, plus la sécheresse est extrême). Le *TCI* est basé sur la température de surface (*LST*) et représente l'écart entre la *LST* de la période en cours et la *LST* maximale calculée à partir d'enregistrements sur le long terme (Thenkabail et al., 2004).

$$TCI_j = \frac{LST_{max} - LST_j}{LST_{max} - LST_{min}}$$

où LST_{max} et LST_{min} sont les valeurs maximale et minimale respectives de la LST calculées à partir des enregistrements sur le long terme (13 ans pour cette étude) pour la période considérée, et j est l'indice de la période en cours.

Lorsque la valeur du TCI est d'environ 0.50, on assiste aux conditions équitables ou normales de température. Lorsque les valeurs de TCI sont proches de 1, la température de surface pour la période considérée, LST_j , est égale à la température de surface minimale enregistrée sur le long terme pour un pixel donné. Les faibles valeurs de TCI (inférieures à 0) indiquent des températures de surface élevées. Lorsque le TCI est égal à 0, la température de surface pour la période considérée, LST_j , est égale à la température de surface maximale enregistrée sur le long terme dans le pixel. Des valeurs constamment faibles de TCI sur plusieurs intervalles de temps consécutifs peuvent pointer vers le développement de la sécheresse. En combinaison avec les observations météorologiques, la relation entre la température de surface et le régime de l'humidité du sol permet de détecter les zones touchées par la sécheresse avant que la dégradation de la biomasse ne se produise. Ainsi le TCI peut jouer un rôle important dans la surveillance de la sécheresse (Thenkabail et al., 2004).

III.4.3. Indice de la santé végétale (VHI)

L'indice de la santé végétale (VHI) a été largement appliquée pour l'alerte précoce de la sécheresse (Seiler et al., 1998), le suivi du rendement des cultures et de la production (Unganai and Kogan, 1998), l'évaluation des zones irriguées (Boken et al., 2004) et l'humidité excessive (Karnieli et al., 2010). Il a été développé par Kogan (1995, 1997), puis appliqué avec succès depuis de nombreuses années, dans plusieurs études et dans diverses conditions environnementales à travers le monde (Rojas et al., 2011). Ces études comprennent l'Asie (Kogan et al., 2005), l'Afrique (Unganai and Kogan, 1998), l'Europe (Kogan, 1986), l'Amérique du Nord (Kogan, 1995; Salazar et al., 2007) et l'Amérique du Sud (Seiler et al., 2007). Le VHI est un indice composite qui regroupe l'indice de la condition végétale (VCI) et de l'indice de la condition thermique (TCI) pour une même période.

$$VHI = (w_1 * VCI) + (w_2 * TCI)$$

Le VCI identifie les zones où la végétation est plus ou moins dense que d'habitude et le TCI indique les zones qui sont plus chaudes (Choi et al., 2013). Ainsi le VHI reflète à la fois la couverture végétale et les anomalies de température. Dans certaines études, différents poids (w_1 et w_2) sont affectés au VCI et au TCI . Par exemple, Unganai et Kogan (1998) ont

déterminé les poids basé sur la corrélation entre le *VCI*, le *TCI* et des variations de rendement du maïs. Dans des conditions proches de la normale, la végétation est plus sensible à l'humidité lors de la formation des feuilles et à la température pendant la floraison. Cependant la contribution de la température et de l'humidité pendant le cycle de culture n'est actuellement pas connue (Rojas et al., 2011). Pour cela on suppose une contribution égale du *VCI* et du *TCI* ($w_1 = w_2 = 0,5$) dans le *VHI* empirique (Choi et al., 2013).

$$VHI = \frac{VCI + TCI}{2}$$

III.4.4. Indice de précipitation standardisé (*SPI*)

Les précipitations sont le principal facteur qui contrôle l'occurrence et la persistance de la sécheresse (Owringi et al., 2011). L'indice standardisé de précipitation (*SPI*), conçu par McKee *et al.* (1993), est un indice de probabilité qui est basé uniquement sur la précipitation. Son choix se justifie par le fait que : (1) il est relativement simple à calculer et n'a besoin que de données sur les précipitations en entrée, (2) il peut être calculé pour diverses échelles de temps, et (3) il a reçu un large intérêt dans la communauté scientifique au cours des dernières années. C'est un indicateur statistique qui sert à quantifier le déficit de précipitations pour des échelles de temps multiples. Ces échelles de temps reflètent l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Puisque les précipitations ne suivent pas une distribution normale pour des périodes de moins de 12 mois d'agrégation, une distribution théorique est ajustée à la distribution de la fréquence (Vogt et al., 2000). Un enregistrement des précipitations sur le long terme dans la région souhaitée est ajusté à une distribution de probabilité, qui est ensuite transformée en une distribution normale standardisée de telle sorte que le *SPI* moyen est nul. Les valeurs positives du *SPI* indiquent que la précipitation est supérieure à la moyenne, tandis que les valeurs négatives indiquent les précipitations qui sont inférieures à la moyenne (Owringi et al., 2011). Le calcul du *SPI* pour une région est basé sur les enregistrements de précipitations sur le long terme pour une période souhaitée selon l'équation suivante:

$$SPI_i = \frac{P_i - P_m}{\sigma}$$

où, P_i est la précipitation de la période d'intérêt, P_m est la précipitation moyenne sur le long terme, σ est l'écart type des précipitations enregistrées sur le long terme, et i est l'indice de la période d'intérêt.

La figure 15 décrit le cheminement suivi depuis l'acquisition des images satellitaires jusqu'à la cartographie de la sécheresse avec les différents indices de sécheresse.

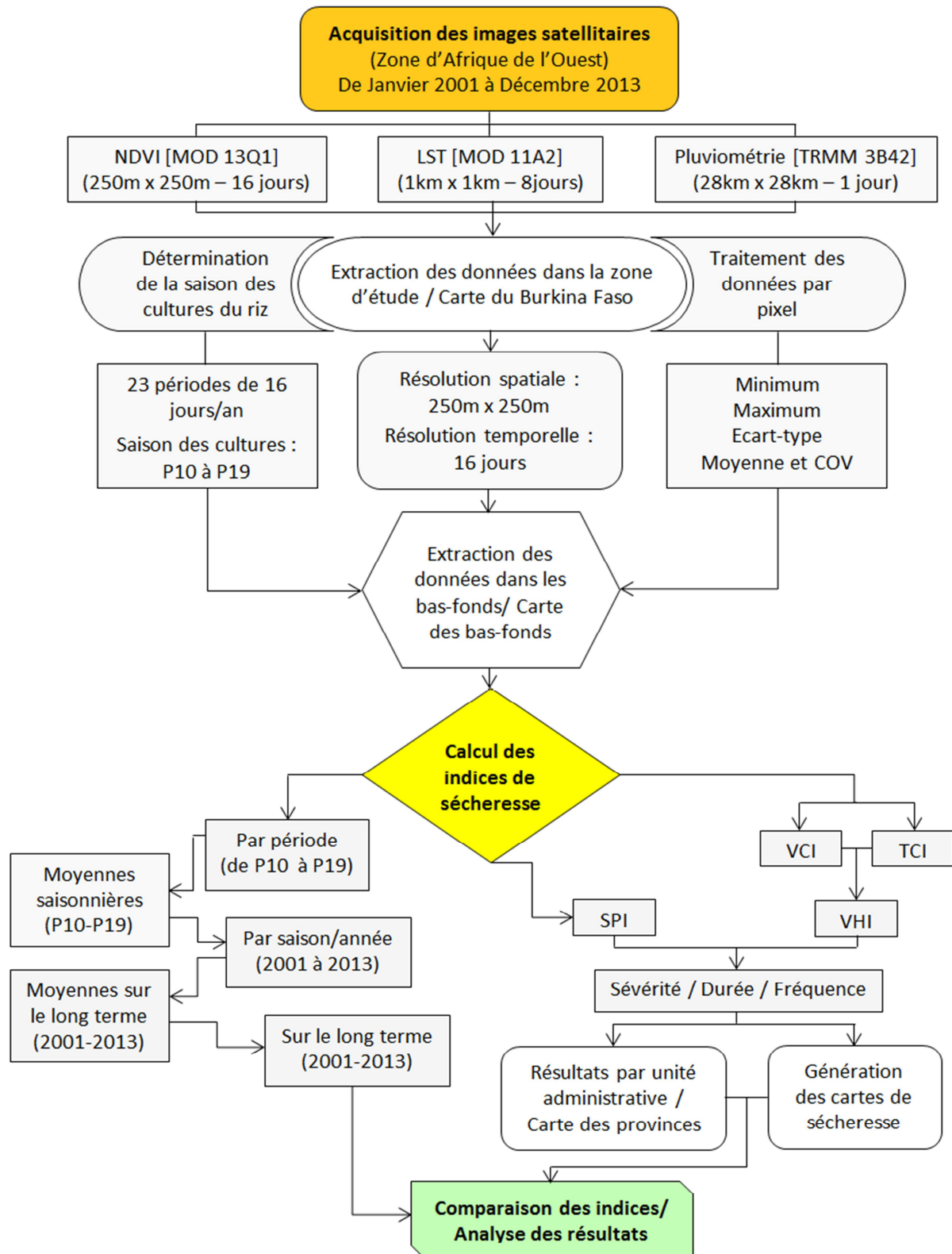


Figure 15 : Cadre méthodologique de l'étude de la sécheresse agricole dans les bas-fonds

IV. QUATRIÈME PARTIE: RÉSULTATS

IV.1. Synthèse des données utilisées

IV.1.1. La pluviométrie

Les données satellitaires des précipitations, ont permis d'établir une cartographie de la moyenne saisonnière des pluies sur la période comprise entre P10 et P19, sur le long terme (2001 à 2013). Cette cartographie (figure 16), montre une décroissance de la pluviométrie en allant du Sud (930 mm) vers le Nord (400 mm). Cette distribution spatiale de la pluviométrie coïncide avec les caractéristiques du climat au Burkina, puisque le climat est de type sahélien au Nord, avec une faible pluviométrie, et soudanien dans la partie Sud où la pluviométrie est la plus élevée (figure 3). La variation de la pluviométrie au cours de la saison considérée (P10 à P19) montre qu'en plus d'être la partie la moins arrosée, le Nord du pays connaît les irrégularités pluviométriques les plus importantes. La variation pluviométrique pour l'ensemble du pays fluctue entre 9% et 30% d'après le coefficient de variation des pluies.

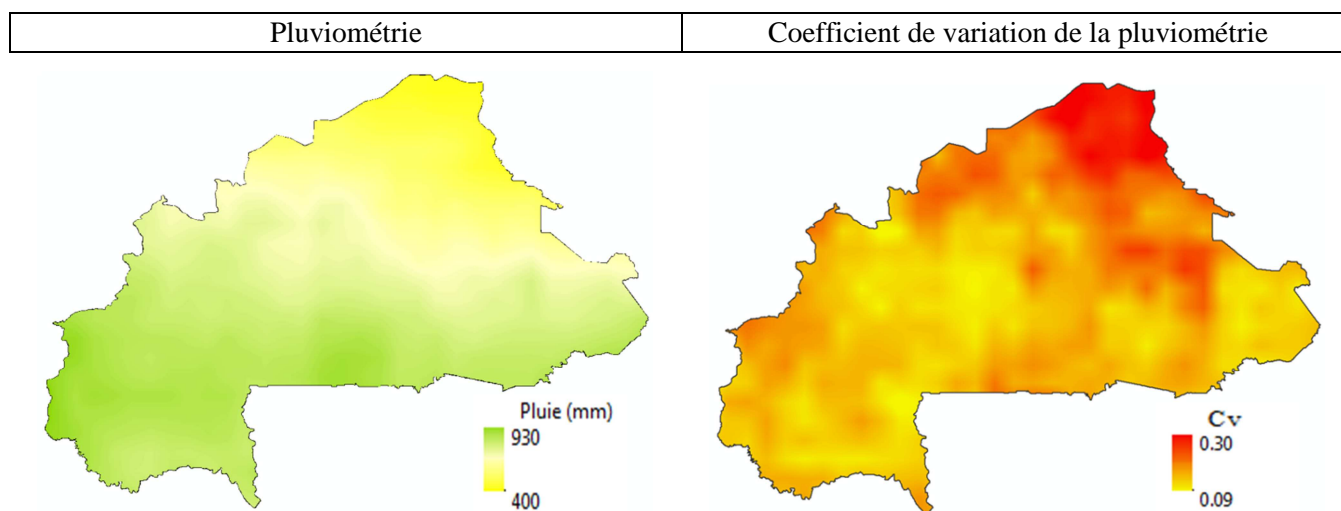


Figure 16 : Moyenne saisonnière et variation de la pluviométrie (TRMM) entre 2001 et 2013

IV.1.2. L'indice normalisé de végétation (NDVI)

L'indice normalisé de végétation (NDVI), comme indiqué plus haut, est l'indice de végétation le plus utilisé en télédétection (Karnieli et al., 2010). Son utilisation dans cette étude a permis d'établir une cartographie (figure 17) de la moyenne saisonnière de la verdure du couvert

végétal sur la période comprise entre P10 et P19, pour l'ensemble des années allant de 2001 à 2013. Cette cartographie révèle une diminution de la vigueur de la végétation lorsqu'on va du Nord vers le Sud du pays. La moyenne saisonnière du *NDVI* sur le long terme varie de -0.09 à 0.74. Les valeurs négatives représentent des plans d'eau et les valeurs à partir de 0.6 correspondent à une végétation très dense. Cette végétation très dense se rencontre surtout dans la partie Sud-ouest du pays. La distribution spatiale du couvert végétale montre une forte corrélation avec celle de la pluviométrie. De plus la variation du couvert végétal sur l'étendue du pays montre que les parties situées entre le Nord et le Centre sont celles susceptibles d'importantes variations. Ces variations peuvent atteindre 20% dans le Nord, où la pluviométrie est également la plus irrégulière.

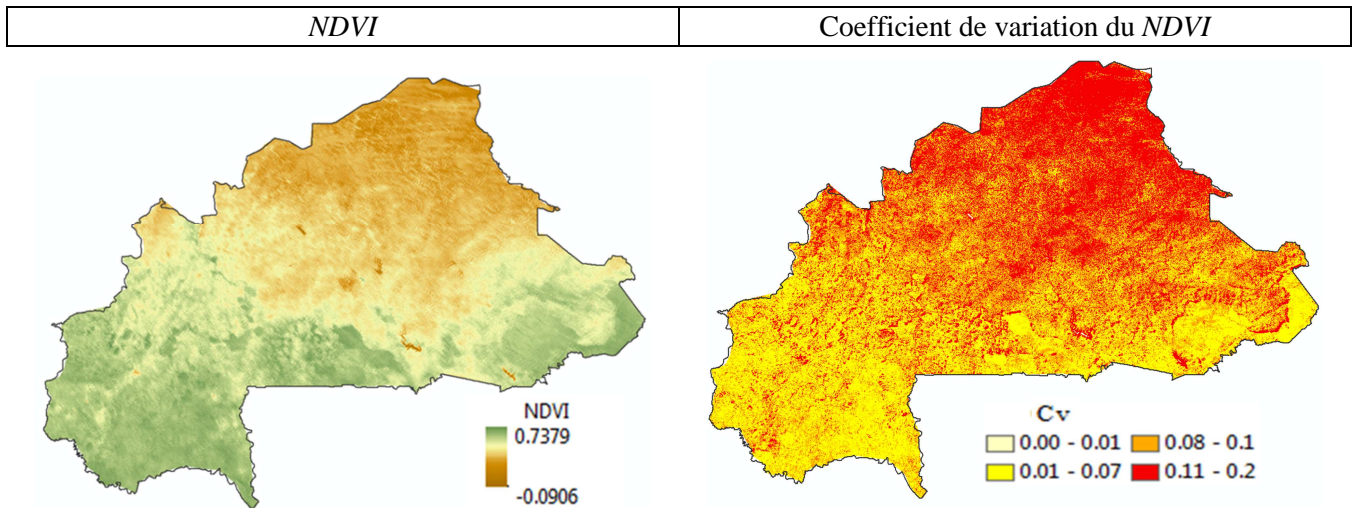


Figure 17 : Moyenne saisonnière et variation du *NDVI* sur le long terme (2001-2013)

IV.1.3. La température de surface (*LST*)

La figure 18 est une représentation de la distribution spatiale de la moyenne saisonnière de la température de surface sur la période comprise entre P10 et P19, pour l'ensemble des années allant de 2001 à 2013. Cette distribution montre un gradient qui va de 40 °C au Nord à 24 °C au Sud-Ouest. Les variations de la moyenne saisonnière de la *LST* sont très infimes mais restent moins élevées dans le Sud-Ouest. Les figures 16, 17 et 18 montrent l'existence d'une relation négative entre la *LST*, le *NDVI* et la pluviométrie.

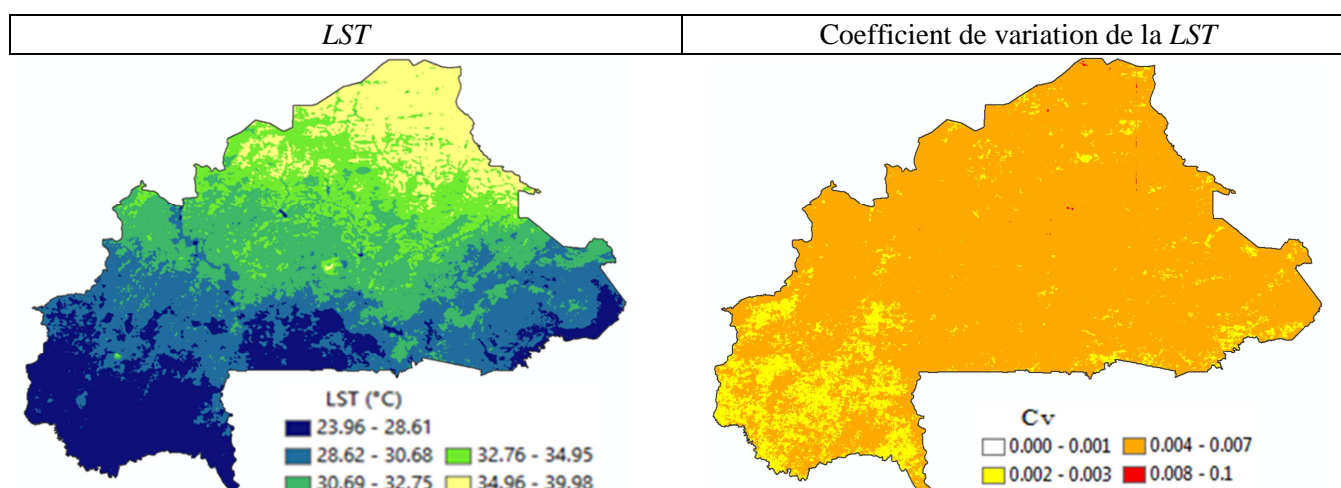


Figure 18 : Moyenne saisonnière et variation de la *LST* sur le long terme (2001-2013)

IV.2. Relation entre la *LST*, le *NDVI* et la pluviométrie dans les bas-fonds

Après extraction des valeurs moyennes de la *LST*, du *NDVI* et de la pluviométrie à l'échelle des bas-fonds, les figures 19 et 20 montrent les mêmes remarques faites lors des analyses à l'échelle de tout le pays. On peut citer entre autre l'existence d'une éventuelle relation entre la *LST*, le *NDVI* et la pluviométrie. Aussi on note que les pluies augmentent lorsqu'on part des régions situées dans le Nord vers celles situées dans le Sud (Sud-Ouest surtout), tandis que la température de surface diminue suivant le même sens de déplacement. D'après la figure 19, les pluies vont croissantes de 48 mm en période 10 à 114 mm en période 15, où elles sont maximales, avant de décroître jusqu'à 10 mm en période 19. La température de surface à une évolution opposée à celle des pluies. La moyenne de la *LST* au cours de la période 10 est de 35 °C et décroît jusqu'à 27 °C en période 16, avant de recommencer à croître jusqu'à 35 °C en période 19. Quant au *NDVI* sa progression est quasi similaire à celle des pluies, et opposée à celle de la *LST*. Le *NDVI* croît de la période 10, avec une valeur de 0.29, jusqu'à la période 16 avec une valeur de 0.57. Il connaît un plateau entre la période 16 et 17, avant de décroître lentement jusqu'à la période 19 avec une valeur de 0.45.

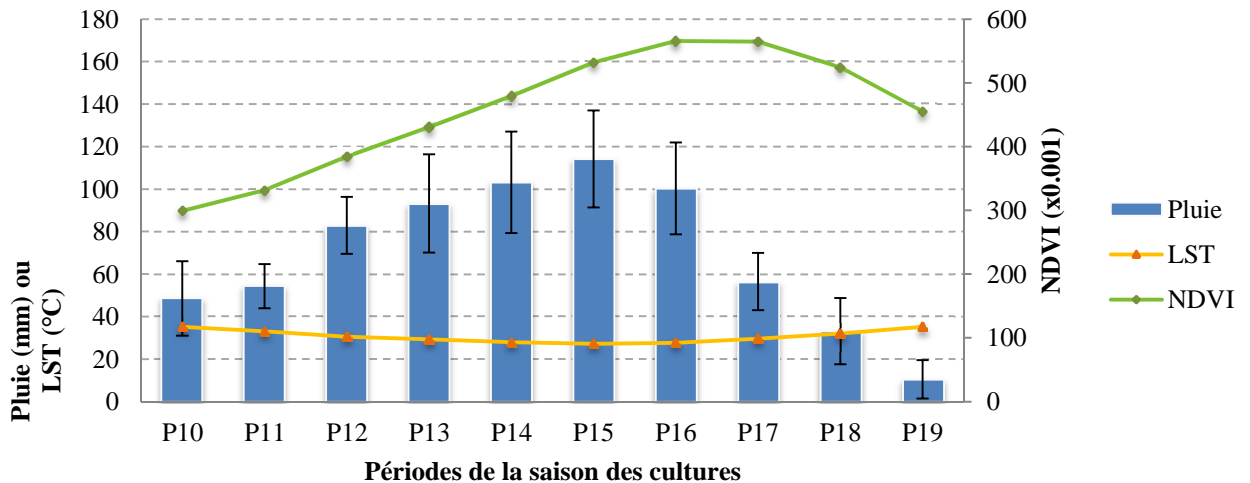


Figure 19 : Moyenne périodique de la LST, du NDVI et de la pluviométrie

La figure 20 indique que les régions situées au Nord du pays (Sahel et Centre-Nord) ont une pluviométrie et un *NDVI* plus faibles que les régions situées au Sud-Ouest (Haut-Bassins, Cascades et Sud-Ouest). Le maximum de pluviométrie saisonnière est enregistré dans la région des Haut-bassins (841 mm) tandis que le minimum est enregistré dans la région du Sahel (483 mm). On y relève également les valeurs respectives de *NDVI* égales à 0.56 et 0.28, avec une valeur maximale de 0.60 dans la région des Cascades. Quant à la *LST*, elle connaît une tendance opposée à celle du *NDVI* et de la pluviométrie. Ainsi dans la région des Haut-bassins, la moyenne saisonnière de la *LST* est de 29°C et de 35°C au Sahel, avec un minimum de 27°C dans la région des Cascades.

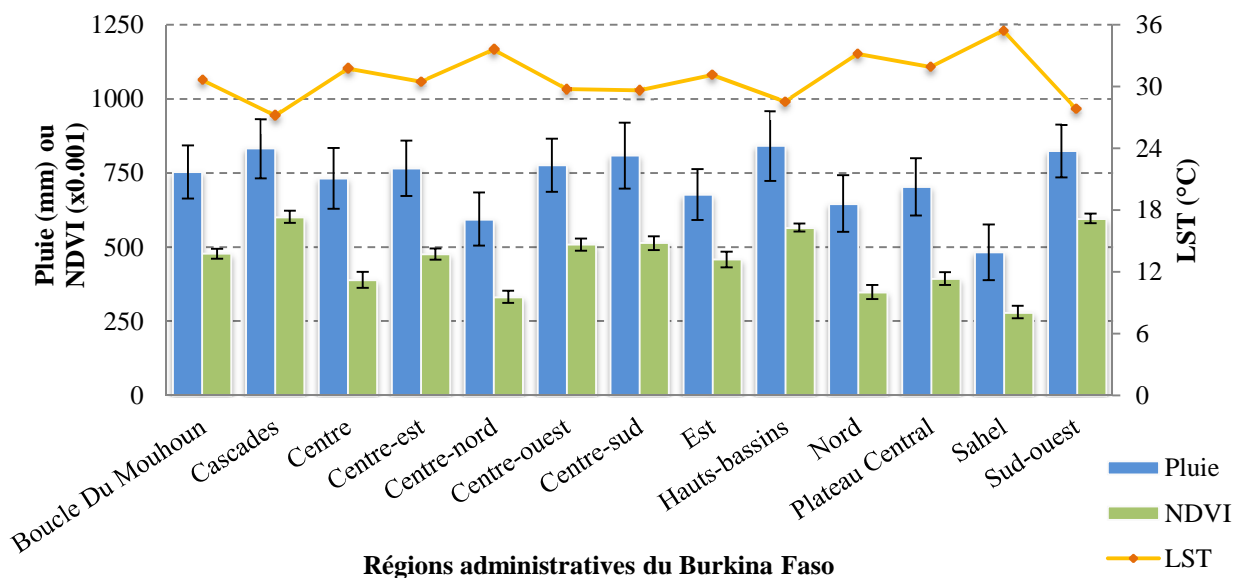


Figure 20 : Moyenne saisonnière de la LST, du NDVI et de la pluviométrie par région

IV.3. Résultat de la cartographie de la sécheresse agricole dans les bas-fonds

IV.3.1. Indice de la condition végétale (VCI)

Le VCI a été calculé pour chacune des périodes comprises entre P10 et P19 de chaque année depuis 2001 jusqu'à 2013. Ensuite les moyennes saisonnières ont été calculées pour toutes les années de 2001 à 2013. Enfin une carte a été générée pour une moyenne saisonnière sur le long terme (2001-2013). Cette carte (figure 21) montre donc l'état de la végétation sur la saison comprise entre les périodes 10 et 19, au cours des années 2001 à 2013. Le VCI varie de 0.31 à 0.70 pour l'ensemble des bas-fonds du pays. On constate que 60% des bas-fonds du pays ont connu un stress végétatif durant la saison allant de P10 à P19 puisque ces bas-fonds ont un VCI inférieur à 0.50. Aussi ces bas-fonds sont situés dans les parties Nord, Nord-Est, Centre et Nord-Ouest du pays. Cependant quelques rares bas-fonds font l'exception dans les régions susmentionnées. Seules les bas-fonds du Sud-Ouest et une partie du Sud et du Sud-Est ont un VCI supérieur à 0.50 et ne connaissent donc pas de stress végétatif au cours de la période d'étude. Cette distribution spatiale du stress végétatif dans les bas-fonds est similaire à celle de la pluviométrie. Cela laisse entrevoir que la végétation de toute la partie nord et centrale du pays est sujette au déficit pluviométrique. Aussi c'est dans cette partie qu'il y a une variation importante dans la succession des épisodes pluvieux.

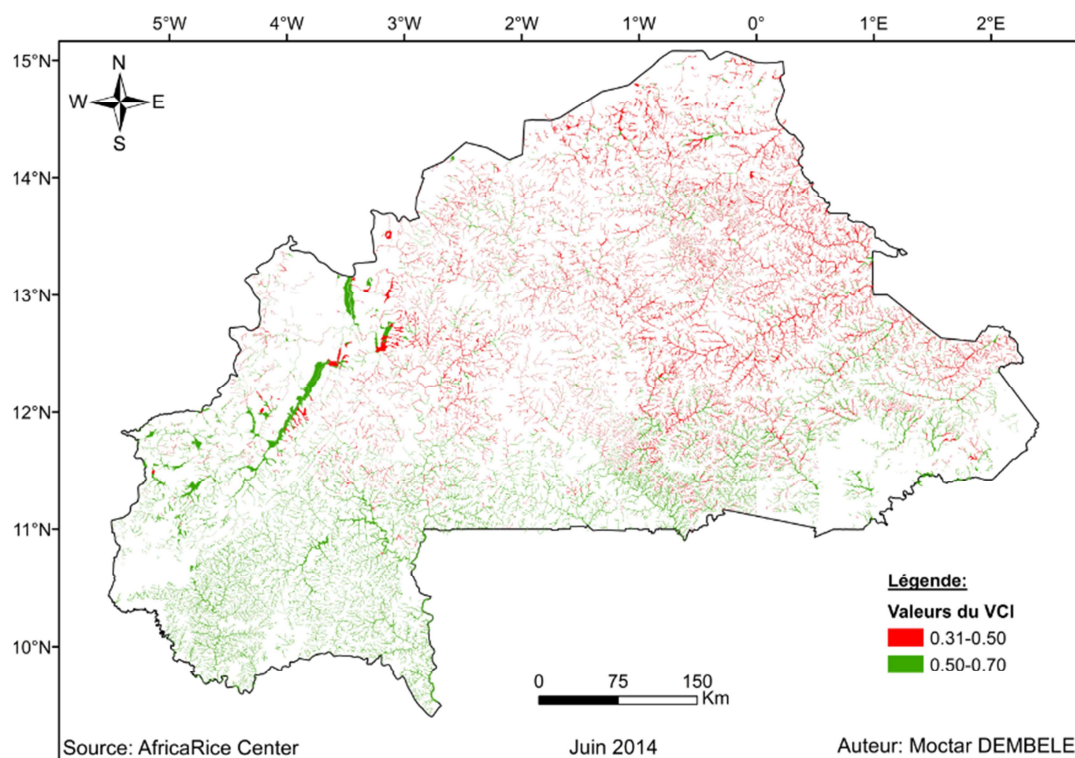


Figure 21 : Moyenne saisonnière du VCI sur le long terme (2001-2013)

L'évolution du *VCI* dans les bas-fonds entre 2001 et 2013 (annexe 1) indique que la valeur minimale ($VCI=0$) a été enregistrée en 2009 et la valeur maximale ($VCI=1$) a été enregistrée en 2003. Il ressort donc que le *NDVI* maximal et le *NDVI* minimal sur le long terme ont été respectivement enregistré en 2003 et en 2009. Les années de sécheresse, avec un *VCI* moyen annuel inférieur à 0.50, sont les années 2001, 2002, 2006, 2007, 2009, 2011 et 2013. Pour ce qui est de l'évolution du *VCI* entre les périodes 10 et 19 (annexe 1), la valeur minimale ($VCI=0.19$) a été enregistrée au cours des périodes 10 et 11, tandis que la valeur maximale ($VCI=0.84$) a été enregistrée au cours des périodes 15 et 16. Le *VCI* moyen périodique croît de la période 10, avec une valeur de 0.45, à la période 15, avec une valeur de 0.55, et décroît jusqu'à la période 19 avec une valeur de 0.49. Les périodes 10, 11, 12, 13 et 19 ont un *VCI* inférieur à 0.50, et indiquent donc des périodes de stress végétatif.

IV.3.2. Indice de la condition thermique (*TCI*)

Comme pour le *VCI*, les mêmes calculs ont été faits pour élaborer la carte de la moyenne saisonnière du *TCI* sur le long terme (2001-2013). La figure 22 montre l'état de la température de surface durant la saison comprise entre les périodes 10 et 19, au cours des années 2001 à 2013. Le *TCI* varie de 0.40 à 0.62 pour l'ensemble des bas-fonds du pays.

On constate que 47% des bas-fonds du pays ont connu un stress thermique durant la saison allant de P10 à P19 puisque ces bas-fonds ont un *TCI* inférieur à 0.50. Ces bas-fonds sont situés un peu partout dans le pays. Cependant ils sont plus concentrés dans les parties Nord-Est, Sud-Est, Centre et Sud-Ouest du pays. Malgré la présence des bas-fonds affectés par un stress thermique dans les parties susmentionnées, les bas-fonds non touchés sont répartis sur toute l'étendue du pays, avec un *TCI* supérieur à 0.50. Cette distribution spatiale du stress thermique dans les bas-fonds n'est ni similaire à celle de la pluviométrie, ni celles de la *LST* et du *NDVI*. En analysant la variation de la *LST*, la distribution du stress thermique estimé avec le *TCI* dans les bas-fonds semble être corrélée avec celle-ci. Cela pour dire que les zones subissant de fortes variations de *LST* sont sujettes au stress thermique. Néanmoins cette hypothèse est difficilement acceptable puisque la région du Sud-Ouest, où la variation de la *LST* est la plus faible du pays, est une zone majoritairement affecté par un stress thermique d'après le *TCI*. Les causes de cette distribution du stress thermique dans les bas-fonds estimée avec le *TCI* sont peut-être liées à la durée de l'insolation ou à certaines caractéristiques des écosystèmes des bas-fonds.

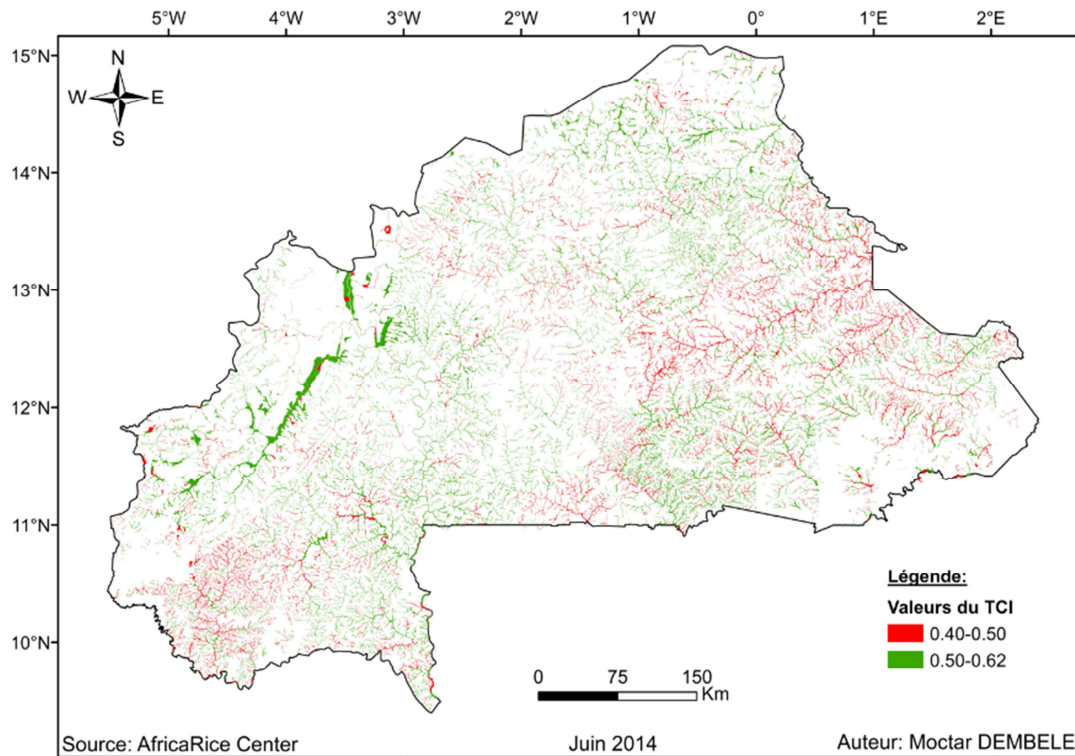


Figure 22 : Moyenne saisonnière du TCI sur le long terme (2001-2013)

L'évolution du *TCI* dans les bas-fonds entre 2001 et 2013 (annexe 2) indique que la valeur minimale ($TCI=0.01$) a été enregistrée en 2011 et la valeur maximale ($TCI=0.96$) a été enregistrée en 2003 et 2010. Il ressort donc que la *LST* maximale et la *LST* minimale sur le long terme ont été respectivement enregistrées en 2011 et en 2003 (et/ou 2010). Les années de sécheresse, avec un *TCI* moyen annuel inférieure à 0.50, sont les années 2001, 2002, 2004, 2007, 2011 et 2013. Pour ce qui est de l'évolution du *TCI* entre les périodes 10 et 19 (annexe 2), la valeur minimale ($TCI=0$) a été enregistrée au cours de la période 15, tandis que la valeur maximale ($TCI=0$) a été enregistrée au cours de la période 14. Le *TCI* moyen périodique décroît de la période 10, avec une valeur de 0.52, à la période 12, avec une valeur de 0.50, et commence à croître jusqu'à la période 16, avec une valeur de 0.53, avant de décroître à nouveau jusqu'à la période 19 avec une valeur de 0.46. Les périodes 12, 17, 18 et 19 ont un *TCI* inférieur à 0.50, et indiquent donc des périodes de stress thermique des plantes.

IV.3.3. Indice de la santé végétale (*VHI*)

Le *VHI* est le principal indice de sécheresse pour la présente étude car il résulte d'une combinaison des deux indices précédents, à savoir le *VCI* et le *TCI*. Après avoir estimé le *TCI* et le *VCI*, le *VHI* a été calculé pour chacune des périodes comprises entre P10 et P19 de

chaque année depuis 2001 jusqu'à 2013 (annexe 3). Ensuite les moyennes saisonnières (de P10 à P19) ont été calculées pour toutes les années de 2001 à 2013. Enfin une carte a été générée pour une moyenne saisonnière sur le long terme (2001-2013). Cette carte (figure 23) montre donc l'état de la sécheresse (stress végétatif et thermique) sur la saison comprise entre les périodes 10 et 19, au cours des années 2001 à 2013. Le *VHI* varie de 0.39 à 0.60 pour l'ensemble des bas-fonds du pays. On constate que seulement 06% des bas-fonds ont connu la sécheresse, de façon globale, durant toute la saison allant de P10 à P19 puisque ces bas-fonds ont un *VHI* inférieur à 0.40. Cependant 59% des bas-fonds ont un *VHI* inférieur à 0.50, d'où 53% ayant un *VHI* compris entre 0.40 et 0.50. Les 06% qui connaissent la sécheresse sont situés au Nord du pays. Les 53% qui échappent de peu à la sécheresse sont situés dans les parties Nord, Nord-Ouest et surtout dans le Nord-Est et le Centre du pays. Cependant quelques rares bas-fonds ne sont pas affectés par la sécheresse dans les régions susmentionnées. Seules les bas-fonds du Sud-Ouest et une partie du Sud et du Sud-Est ont un *VHI* supérieur à 0.50 et ne sont donc pas affectés par la sécheresse au cours de la période d'étude. Cette distribution spatiale de la sécheresse dans les bas-fonds est similaire à celle de la pluviométrie et présente une similitude importante avec celle du *VCI*. A travers la figure 23 qui est une représentation de la moyenne saisonnière (de P10 à P19) du *VHI* sur le long terme (2001-2013), il ressort que les bas-fonds analysés, hormis les 06%, n'ont pas subi de sécheresse durant la période d'étude. Cependant les résultats annuels et périodiques donnent des résultats détaillés qui indiquent un nombre plus important de bas-fonds ayant un *VHI* inférieur à 0.40, c'est-à-dire affectés par la sécheresse.

En annexe 4, on peut voir la distribution spatio-temporelle de la sécheresse (santé végétale) dans les bas-fonds d'une année à une autre, entre 2001 et 2013, et sur l'ensemble du Burkina. Le tableau 2 fait ressortir les années ayant connu les plus fortes sécheresses au cours de la saison s'étalant de P10 à P19.

Tableau 2 : Pourcentage des bas-fonds affectés par la sécheresse avec le *VHI*

Années	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
% des bas-fonds affectés par la sécheresse	26%	68%	2%	32%	11%	15%	30%	5%	24%	5%	49%	18%	31%

Il ressort que l'année 2002, est celle ayant connu le plus grand nombre de bas-fonds affectés par la sécheresse. Elle est suivie des années 2011, 2004, 2013 et 2007.

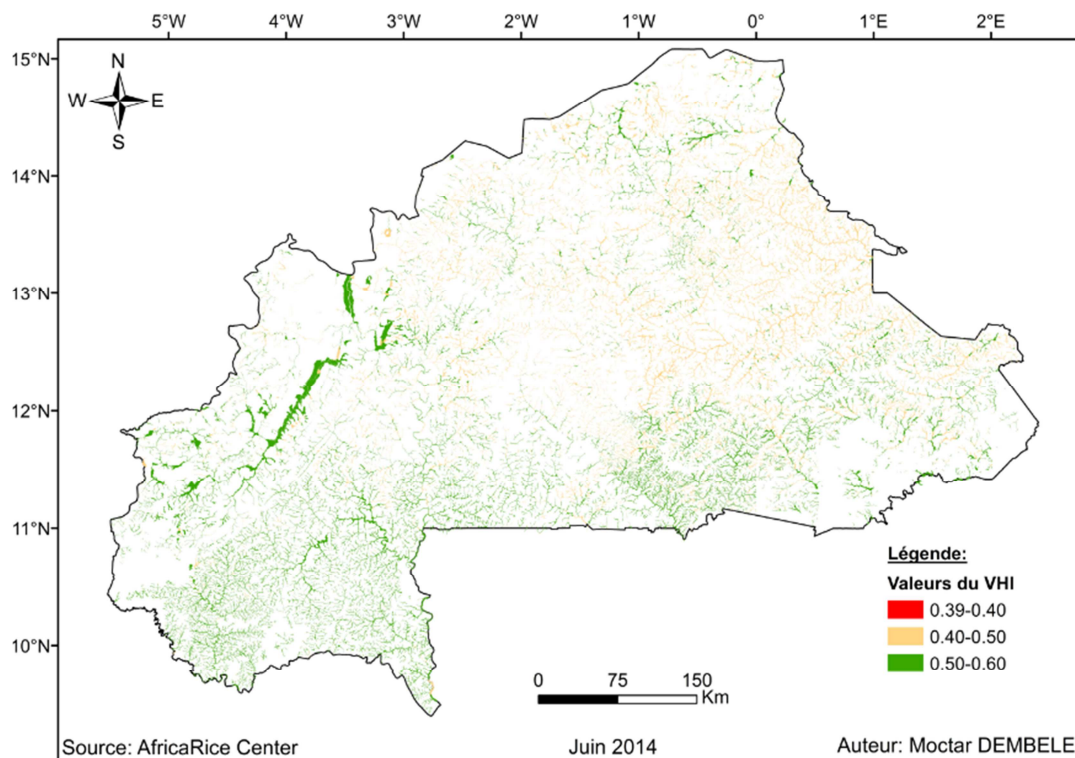


Figure 23 : Moyenne saisonnière du VHI sur le long terme (2001-2013)

L'évolution du VHI dans les bas-fonds entre 2001 et 2013 (figure 24) indique que la valeur minimale ($VHI=0.04$) a été enregistrée en 2011 et la valeur maximale ($VHI=0.95$) a été enregistrée en 2010. Seule l'année 2002 a un VHI moyen inférieure à 0.40. Les années 2002 et 2011 ont en grande partie été affectées par la sécheresse ($VHI < 0.40$). Les années 2001, 2004, 2007, 2009, 2011 et 2013 ont un VHI moyen annuel supérieure à 0.40 mais inférieure à 0.50.

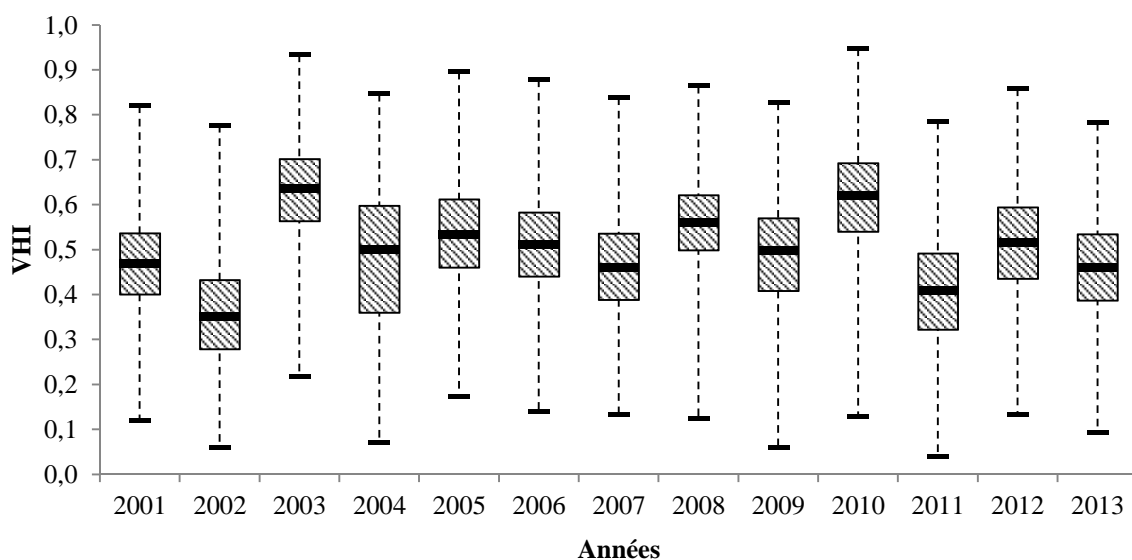


Figure 24 : Evolution du VHI dans les bas-fonds entre 2001 et 2013

D'autre part, la figure 24 montre que les années 2002, 2003, 2010 et 2011 sont statistiquement différents des autres. Sur ces 4 années, seules les années 2003 et 2010 sont semblables. La plus grande fluctuation du *VHI* est observée au cours de l'année 2004.

A partir des classes de sécheresse (tableau 3) établies par Kogan (2002), le tableau 4 permet de constater la sévérité de la sécheresse, de 2001 à 2013, sur une sélection de 25 bas-fonds choisis de sorte à couvrir l'ensemble du pays.

Tableau 3 : Classification de la sévérité de la sécheresse avec le *VHI*

<i>VHI</i>	<0.10	<0.20	<0.30	<0.40	>0.40
Sévérité	Extrême	Sévère	Modérée	Légère	Aucune

Tableau 4 : Sévérité de la sécheresse dans les bas-fonds avec le *VHI*

ID bas-fonds	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Moyenne
22810	0.62	0.55	0.77	0.52	0.61	0.45	0.20	0.57	0.31	0.51	0.26	0.37	0.40	0.47
22522	0.67	0.25	0.70	0.34	0.36	0.44	0.27	0.55	0.60	0.77	0.26	0.55	0.44	0.48
139	0.50	0.48	0.91	0.57	0.61	0.28	0.21	0.33	0.25	0.30	0.20	0.26	0.26	0.39
4659	0.43	0.19	0.40	0.34	0.32	0.60	0.62	0.76	0.63	0.83	0.42	0.48	0.37	0.49
14372	0.33	0.28	0.62	0.36	0.49	0.31	0.41	0.68	0.51	0.78	0.42	0.52	0.42	0.47
2964	0.60	0.19	0.67	0.15	0.58	0.63	0.49	0.58	0.52	0.64	0.51	0.67	0.58	0.52
12327	0.62	0.54	0.82	0.45	0.66	0.36	0.34	0.49	0.10	0.42	0.23	0.46	0.40	0.45
26718	0.34	0.38	0.80	0.20	0.44	0.48	0.35	0.51	0.30	0.80	0.30	0.52	0.45	0.45
28707	0.24	0.34	0.77	0.09	0.58	0.52	0.33	0.61	0.47	0.48	0.54	0.63	0.52	0.47
25655	0.28	0.30	0.75	0.68	0.39	0.37	0.38	0.44	0.54	0.78	0.48	0.52	0.49	0.49
11791	0.41	0.44	0.75	0.49	0.70	0.29	0.30	0.39	0.22	0.29	0.11	0.31	0.33	0.39
7953	0.40	0.40	0.77	0.75	0.62	0.52	0.26	0.64	0.56	0.60	0.35	0.35	0.10	0.49
26731	0.46	0.40	0.73	0.60	0.80	0.35	0.23	0.37	0.33	0.30	0.20	0.34	0.29	0.42
27876	0.58	0.35	0.57	0.72	0.51	0.49	0.39	0.58	0.58	0.64	0.19	0.29	0.61	0.50
27612	0.61	0.58	0.78	0.67	0.61	0.37	0.35	0.43	0.40	0.43	0.07	0.30	0.28	0.45
765	0.41	0.06	0.49	0.29	0.40	0.60	0.56	0.75	0.44	0.53	0.63	0.74	0.61	0.50
3770	0.45	0.22	0.49	0.16	0.48	0.56	0.58	0.62	0.55	0.58	0.56	0.56	0.33	0.47
524	0.52	0.17	0.48	0.24	0.47	0.34	0.57	0.59	0.51	0.56	0.31	0.72	0.67	0.47
14304	0.18	0.25	0.39	0.39	0.36	0.34	0.35	0.63	0.50	0.88	0.36	0.52	0.54	0.44
3832	0.26	0.28	0.71	0.10	0.47	0.53	0.49	0.69	0.57	0.67	0.45	0.59	0.55	0.49
3906	0.39	0.53	0.87	0.37	0.69	0.42	0.25	0.53	0.18	0.57	0.39	0.40	0.32	0.45
8559	0.36	0.21	0.27	0.10	0.36	0.36	0.53	0.44	0.36	0.60	0.67	0.73	0.58	0.43
13564	0.46	0.54	0.83	0.74	0.75	0.29	0.23	0.30	0.16	0.23	0.09	0.29	0.34	0.41
11455	0.39	0.28	0.41	0.10	0.29	0.54	0.71	0.71	0.50	0.59	0.51	0.69	0.61	0.49
13342	0.48	0.66	0.66	0.59	0.81	0.39	0.27	0.28	0.18	0.24	0.09	0.23	0.37	0.41

Le constat révèle que les années 2002, 2004, 2007 et 2011 ont été les plus affectés par la sécheresse, mais aussi celles qui présentent des bas-fonds ayant subis les sécheresses les plus sévères. Sur ces 4 années, l'année 2004 semble être celle ayant connu l'extrême compte tenu de la fluctuation de la boîte à moustache de la figure 24. Le *VHI* annuel moyen sur le long terme révèle que sur les 25 bas-fonds sélectionnés, seulement deux (ID= 139 et 11791), respectivement situés dans les provinces du Kadiogo et de la Gnagna, ont connu la sécheresse. D'autre part, les bas-fonds 13564 et 13342, respectivement situés dans les provinces du Seno et du Yagha, ont un *VHI* annuel moyen supérieure à 0.40, et ne sont donc pas en état de sécheresse, alors qu'ils ont connu huit années consécutives de sécheresse, avec une sécheresse de type extrême en 2011, une de type sévère en 2009, au moins quatre de type modéré en 2007, 2008, 2010 et 2012 (une quatrième en 2006 pour le bas-fond 13564), et enfin une autre de de sévérité légère en 2013 (une deuxième en 2006 pour le bas-fond 13342). Les *VHI* de certaines années, 2003, 2004 et 2005 pour le bas-fond 13564 et, 2002, 2003 et 2005 pour le bas-fond 13342, ont permis de ramener la moyenne sur le long terme du *VHI* à une valeur supérieure à 0.40.

Pour ce qui est de l'évolution du *VHI* entre les périodes 10 et 19 (figure 25), la valeur minimale ($VHI=0.26$) a été enregistrée au cours de la période 11, tandis que la valeur maximale ($VHI=0.74$) a été enregistrée au cours de la période 16. Le *VHI* moyen périodique croît de la période 10, avec une valeur de 0.48, à la période 15, avec une valeur de 0.54, et décroît jusqu'à la période 19 avec une valeur de 0.47. Les périodes 10, 11, 12, 13 et 19 ont un *VHI* supérieur à 0.40 mais inférieur à 0.50.

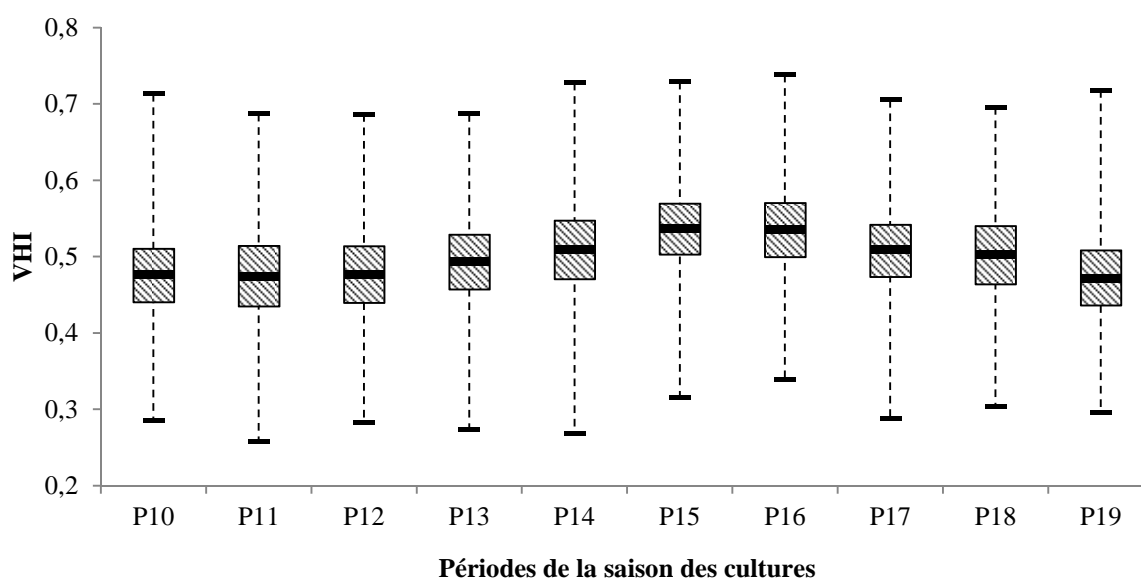


Figure 25 : Evolution du *VHI* dans les bas-fonds entre P10 et P19

Le tableau 5 renseigne sur la fréquence de l'occurrence de la sécheresse dans les bas-fonds. Cette fréquence est estimée à l'aide du *VHI* périodique pour les périodes allant de P10 à P19 de toutes les années comprises entre 2001 et 2013. La fréquence de sécheresse est plus importante à la période 10 (40%), et décroît jusqu'à la période 16 (26%), avant de remonter jusqu'à la période 19 (40%). Cela signifie que sur les 13 ans, il y a eu une sécheresse en période 10 au cours de 5 années et près de 4 années en période 16.

Tableau 5 : Fréquence de la sécheresse agricole estimée à partir du *VHI* dans les bas-fonds

Périodes	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
Fréquence de la sécheresse	40%	39%	38%	36%	33%	27%	26%	31%	33%	40%

IV.3.4. Indice de précipitation standardisé (*SPI*)

Le *SPI* est un indice de sécheresse météorologique qui, dans son algorithme, utilise les données pluviométriques historiques d'une région. Cet indicateur sert à expliquer davantage l'état de la végétation constaté avec le *VHI*. Il ne peut donc pas à lui seul indiquer l'occurrence de la sécheresse dans les bas-fonds. Comme pour le *VHI*, les mêmes calculs ont été faits pour élaborer la carte de la moyenne saisonnière du *SPI* sur le long terme (2001-2013). La moyenne saisonnière du *SPI* sur le long terme donne une valeur approximativement égale à 0, valeur à partir de laquelle il n'y a pas de sécheresse météorologique, pour tous les bas-fonds. Il n'y a donc pas une distribution spatiale de la sécheresse qui corresponde à celles de la pluie, du *NDVI*, de la *LST* ou des autres indices de sécheresse déjà calculés. Néanmoins, les résultats annuels et périodiques donnent des résultats détaillés sur l'occurrence de la sécheresse météorologique dans les bas-fonds au Burkina.

La figure 26 montre l'évolution du *SPI* dans les bas-fonds entre 2001 et 2013. Elle indique que la valeur minimale ($SPI = -0.96$) a été enregistrée en 2004 et la valeur maximale ($SPI = 1.11$) a été enregistrée en 2010. On en déduit que le maximum et le minimum de la moyenne saisonnière des pluies sur le long terme ont été respectivement enregistré en 2010 et en 2004. Ce qui pourrait éventuellement expliquer la sévérité de la sécheresse constatée avec l'évolution du *VHI* en 2004 (figure 24). Les années de sécheresse, avec un *SPI* moyen annuel inférieur à 0, sont les années 2001, 2002, 2004, 2006, 2007, 2011 et 2013.

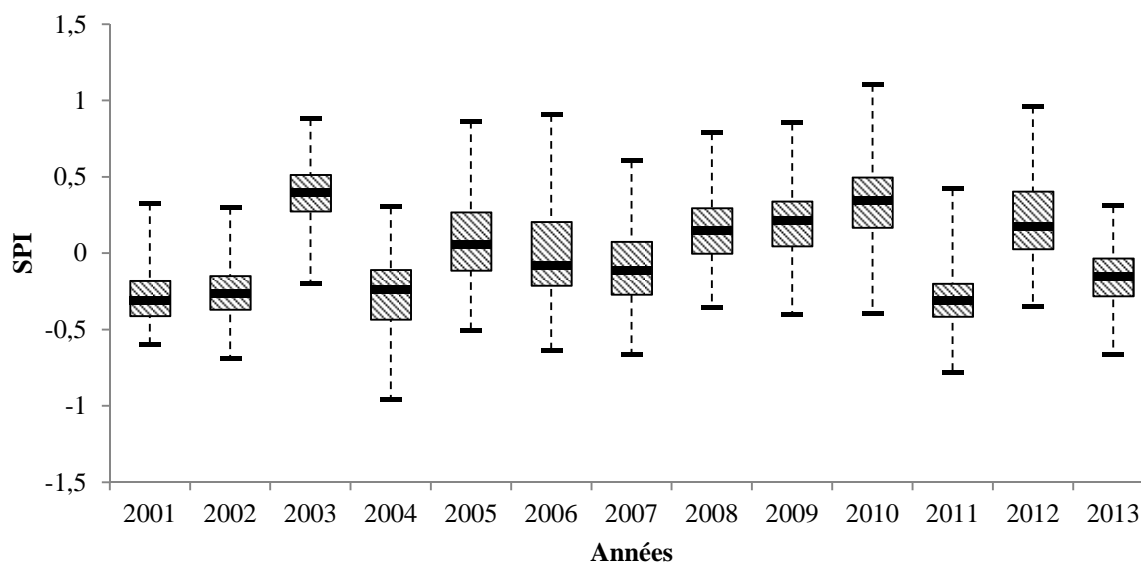


Figure 26 : Evolution du SPI dans les bas-fonds entre 2001 et 2013

En annexe 5, on peut voir la distribution spatio-temporelle de la sécheresse météorologique dans les bas-fonds d'une année à une autre, entre 2001 et 2013, et sur l'ensemble du Burkina.

Le tableau 6 fait ressortir les années ayant connu les plus fortes sécheresses.

Tableau 6 : Pourcentage des bas-fonds affectés par la sécheresse avec le SPI

Années	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
% des bas-fonds affectés par la sécheresse	93%	94%	2%	87%	43%	60%	68%	26%	20%	10%	95%	21%	81%

Il ressort que l'année 2011, est celle ayant connu le plus grand nombre de bas-fonds affectés par la sécheresse. Elle est suivie des années 2002, 2001, 2004 et 2013.

A partir des classes de sécheresse (tableau 7) établies par McKee et al. (1993), le tableau 8 permet de constater la sévérité de la sécheresse météorologique, de 2001 à 2013, sur la même sélection des 25 bas-fonds choisis pour les analyses avec le *VHI*.

Tableau 7 : Classification de la sévérité de la sécheresse avec le SPI

<i>SPI</i>	< -2	< -1.5	< -1	< 0	> 0
Sévérité	Extrême	Sévère	Modérée	Légère	Aucune

Tableau 8 : Sévérité de la sécheresse dans les bas-fonds avec le SPI

ID	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Moyenne
22810	-0.45	-0.20	0.23	-0.50	0.13	0.09	-0.05	0.38	0.10	0.50	-0.24	-0.05	0.06	0.00
22522	-0.16	-0.26	0.28	-0.46	-0.26	-0.04	0.12	0.14	0.29	0.65	-0.40	0.15	-0.06	0.00
139	-0.37	-0.18	0.50	-0.48	-0.01	-0.29	-0.13	0.48	0.17	0.44	-0.25	0.22	-0.11	0.00
4659	-0.45	-0.24	0.55	-0.16	0.07	-0.12	0.17	0.15	0.22	0.34	-0.34	0.21	-0.41	0.00
14372	-0.58	-0.42	0.47	-0.06	0.33	-0.43	-0.37	0.58	0.23	0.34	-0.45	0.23	0.12	0.00
2964	-0.43	-0.40	0.04	-0.16	-0.22	0.19	0.25	0.18	0.00	0.69	-0.15	0.19	-0.20	0.00
12327	-0.34	-0.34	0.80	-0.53	0.29	-0.12	-0.34	0.16	0.06	0.34	-0.37	0.34	0.05	0.00
26718	-0.29	-0.26	0.70	-0.63	-0.10	-0.28	-0.08	0.55	-0.03	0.56	-0.22	0.15	-0.09	0.00
28707	-0.29	-0.12	0.45	-0.19	-0.10	0.00	-0.28	0.30	-0.11	0.46	-0.29	0.45	-0.27	0.00
25655	-0.56	-0.21	0.60	-0.03	0.08	-0.07	0.39	0.33	0.10	0.39	-0.44	-0.19	-0.38	0.00
11791	-0.33	-0.09	0.39	-0.32	0.60	-0.24	-0.27	0.45	-0.07	0.10	-0.63	0.27	0.13	0.00
7953	-0.45	-0.34	0.45	0.15	0.20	-0.21	-0.56	0.14	0.43	0.24	-0.17	0.15	-0.05	0.00
26731	-0.31	-0.27	0.43	0.07	0.54	-0.23	-0.42	0.20	0.26	-0.35	-0.37	0.20	0.24	0.00
27876	-0.19	-0.40	0.62	-0.01	0.20	0.00	-0.03	-0.01	0.52	-0.03	-0.37	-0.03	-0.27	0.00
27612	-0.22	-0.10	0.48	-0.19	0.01	0.23	0.05	-0.02	0.17	0.33	-0.42	0.09	-0.42	0.00
765	-0.23	-0.29	0.08	-0.16	-0.20	0.04	0.11	0.43	0.00	0.43	-0.13	0.33	-0.43	0.00
3770	-0.44	-0.32	0.42	-0.38	-0.19	0.25	0.00	0.25	-0.05	0.51	-0.29	0.58	-0.33	0.00
524	-0.16	-0.61	-0.02	-0.18	-0.27	-0.21	0.48	0.18	-0.01	0.51	-0.28	0.50	0.06	0.00
14304	-0.48	-0.41	0.61	-0.30	0.10	-0.36	-0.29	0.36	0.31	0.49	-0.28	0.15	0.10	0.00
3832	-0.39	-0.23	0.40	-0.33	-0.18	0.00	0.01	0.34	-0.02	0.43	-0.09	0.34	-0.28	0.00
3906	-0.40	-0.23	0.74	-0.63	-0.12	-0.15	-0.04	0.53	-0.14	0.50	-0.16	0.07	0.03	0.00
8559	-0.35	-0.56	0.57	-0.95	0.47	-0.16	-0.23	0.11	-0.01	0.33	0.17	0.60	0.00	0.00
13564	-0.47	-0.06	0.57	-0.17	0.36	-0.37	-0.12	0.29	0.14	-0.05	-0.45	0.38	-0.05	0.00
11455	-0.43	-0.21	0.16	-0.54	0.11	0.08	0.19	0.35	-0.07	0.33	-0.22	0.60	-0.35	0.00
13342	-0.43	0.02	0.40	-0.30	0.53	-0.13	-0.16	-0.06	-0.12	0.12	-0.52	0.48	0.17	0.00

Le constat révèle que seule la sécheresse météorologique de sévérité légère a affecté les bas-fonds entre 2001 et 2013. Aussi, les années 2001, 2002, 2004, et 2011 ont été les plus affectés par la sécheresse météorologique. Le constat peut être fait à travers la figure 26. Le SPI annuel moyen sur le long terme est approximativement égal à 0 avec de légère tendance à la fois du côté négatif et positif. Ce résultat peut être prédit en observant la figure 27.

Pour ce qui est de l'évolution du SPI entre les périodes 10 et 19 (figure 27), la valeur minimale ($SPI \approx 0$) a été enregistrée au cours de la période 16, tandis que la valeur maximale ($SPI \approx 0$) a été enregistrée au cours de la période 12. Le SPI moyen périodique est sensiblement égal à 0 pour toutes les périodes de P10 à P19. Néanmoins, les périodes 10, 12, 13, 14, 16 et 19 ont un SPI égal à 0 avec une tendance vers le côté négatif, et indiquent normalement des périodes de sécheresse météorologique.

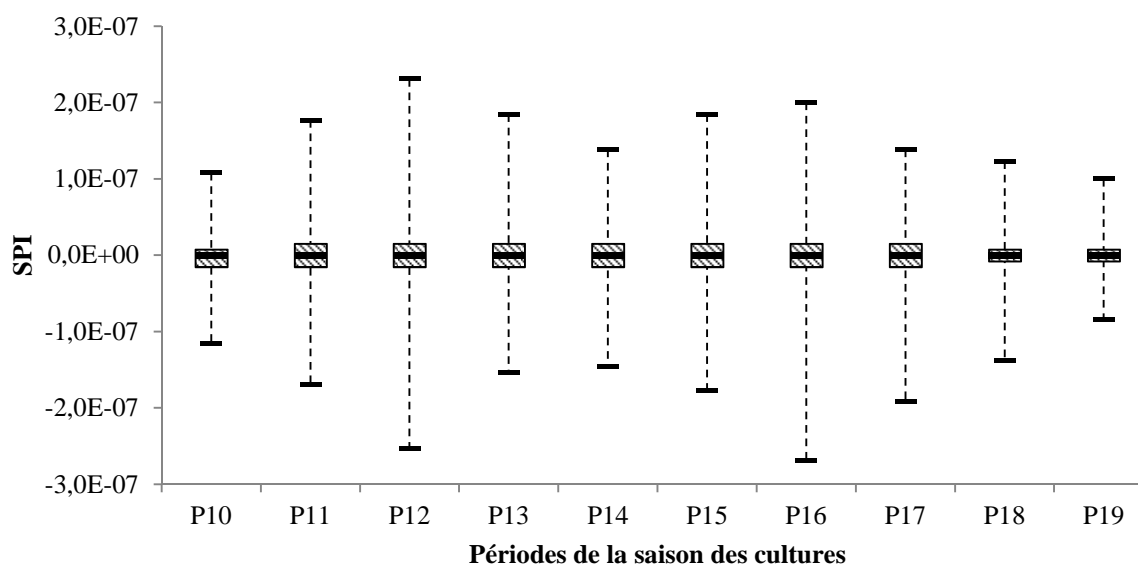


Figure 27 : Evolution du SPI dans les bas-fonds entre P10 et P19

Le tableau 9 renseigne sur la fréquence de l'occurrence de la sécheresse météorologique dans les bas-fonds à l'aide du SPI. La fréquence de sécheresse météorologique est plus importante à la période 10 (58%). Néanmoins la fréquence de la sécheresse météorologique reste supérieure à 50% dans toutes les périodes entre P10 et P19. La fréquence minimale de sécheresse météorologique est de 53% en période 11, et atteint 54% au cours des périodes 14 et 15. Cela signifie que la probabilité d'avoir une sécheresse météorologique dans chaque période allant de P10 à P19 est d'au moins une année sur deux.

Tableau 9 : Fréquence de la sécheresse météorologique dans les bas-fonds avec le SPI

Périodes	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
Fréquence de la sécheresse	58%	53%	55%	55%	54%	54%	55%	57%	56%	67%

IV.4. Résultats de la synthèse de la sécheresse dans les bas-fonds par province

Les résultats présentés plus haut donnent une idée générale sur la sécheresse dans les bas-fonds sur toute l'étendue du Burkina Faso. Toutefois, il peut être intéressant de synthétiser ces résultats à l'échelle des provinces, afin d'apprécier l'occurrence de la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles à l'échelle d'unités administratives.

L'annexe 6 montre une synthèse par province des moyennes saisonnières sur le long terme du NDVI, de la LST et des pluies.

IV.4.1. Indice de la santé végétale (VHI)

Après avoir obtenus les résultats de la sécheresse dans les bas-fonds sur toute l'étendue du Burkina à l'aide du *VHI*, une synthèse a été faite pour déterminer le *VHI* par province en faisant la moyenne des *VHI* dans les bas-fonds dans chaque province. Ainsi la figure 28 indique la moyenne saisonnière (de P10 à P19) sur le long terme (2001-2013) du *VHI* dans les bas-fonds regroupés par province. L'annexe 7 présente le *VCI* et le *TCI* dans les bas-fonds regroupés par province.

Sur la figure 28, la carte de gauche montre le *VHI* dans les bas-fonds regroupés par province, tandis que celle de droite donne une idée du coefficient de variation du *VHI* dans les bas-fonds regroupés par province entre les années 2001 et 2013.

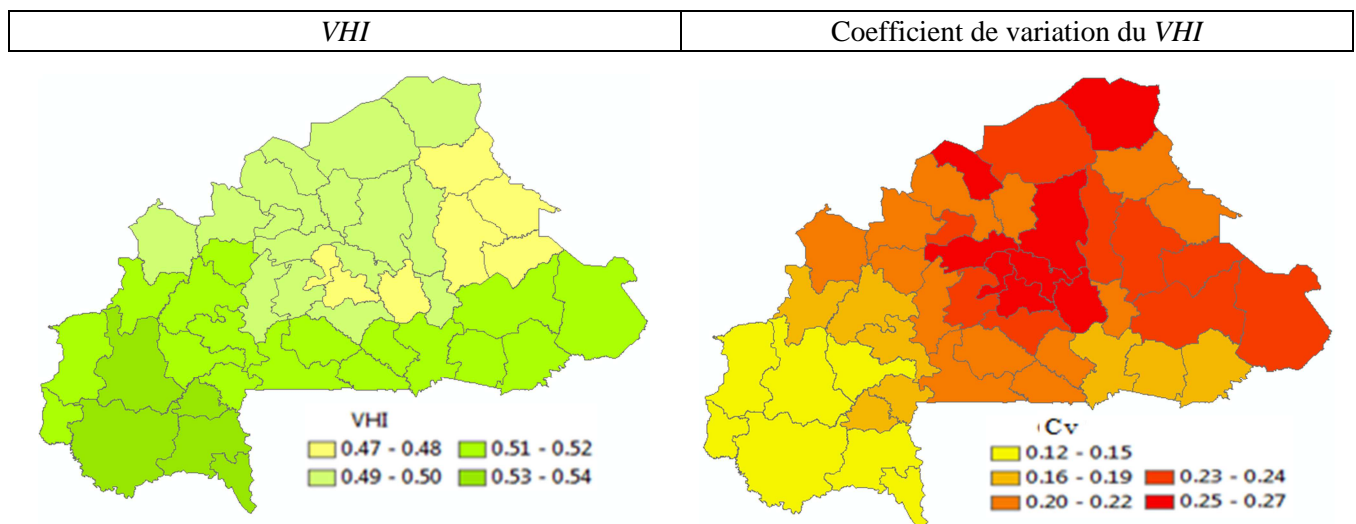


Figure 28 : *VHI* des bas-fonds par province sur le long terme (2001-2013)

On constate que toutes les provinces ont un *VHI* moyen supérieur à 0.40, et ne sont donc pas affectées par la sécheresse (stress végétatif et thermique) d'une façon générale. Cependant 23 provinces ont un *VHI* moyen inférieur à 0.50. Ces provinces sont situées dans la partie comprise entre le centre et le nord du pays. Aussi le plus faible *VHI* est enregistré dans les provinces les plus au Nord-Est du pays, et il croît au fur et à mesure que l'on se déplace vers le Sud-Ouest. Le coefficient de variation permet de constater que les provinces du Sud-Ouest sont celles qui ont connu les plus faibles variations du *VHI* entre 2001 et 2013, soit 12 à 15%. Par contre les provinces situées au Nord, au Centre et au Centre-Est sont celles où le *VHI* a le plus varié, jusqu'à 27%, entre 2001 et 2013.

IV.4.2. Indice de précipitation standardisé (*SPI*)

Le calcul du *SPI* à l'échelle des bas-fonds a montré que la moyenne saisonnière du *SPI* sur le long terme (2001-2013) donne une valeur approximativement égale à 0 pour chacun des bas-fonds concernés par la présente étude. En regroupant les bas-fonds par province et en calculant de nouveau le *SPI* à l'échelle provinciale, on obtient toujours un *SPI* sensiblement égal à 0, et donc un coefficient de variation qui tend vers l'infini pour toutes les provinces. Cependant les valeurs du *SPI* pour chaque année prise séparément entre 2001 et 2013 sont loin d'être nulles. On peut donc établir la sévérité de la sécheresse des bas-fonds regroupés par province en faisant la somme des *SPI* des années sèches. Cela permet d'avoir une idée des provinces où les sécheresses météorologiques ont été les plus intenses sur l'ensemble des années entre 2001 et 2013. Pour compléter cette information, il est intéressant de faire cas du nombre d'années sèches dans chaque province entre 2001 et 2013. La figure 29 illustre la sévérité de la sécheresse des bas-fonds regroupés par province sur la carte de gauche, et le nombre d'années affectés (sur les 13 années étudiées) par la sécheresse sur la carte de droite.

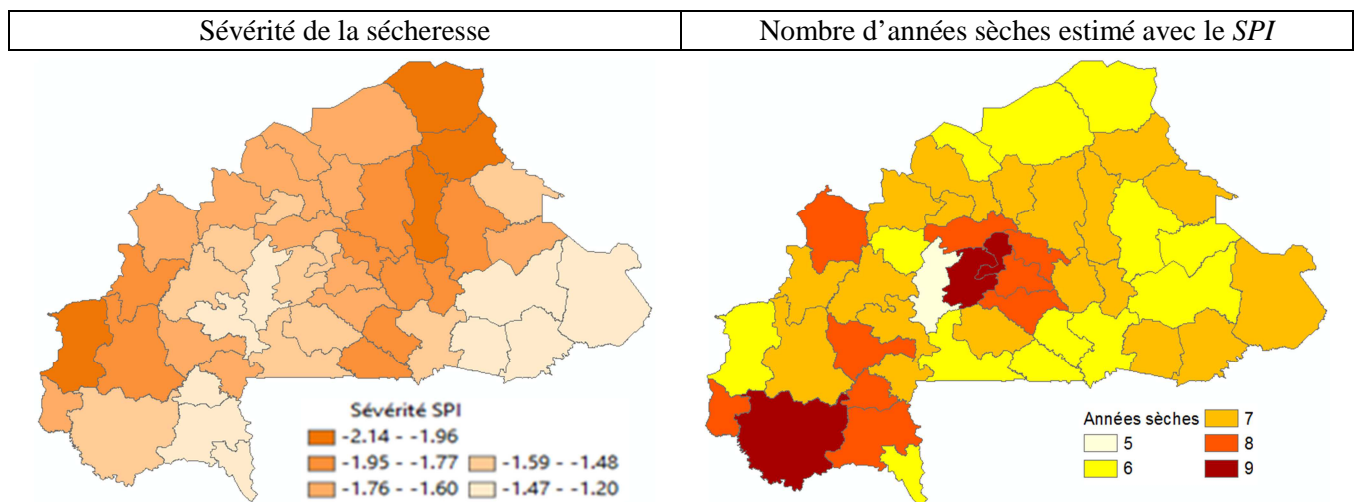


Figure 29 : *SPI* des bas-fonds par province sur le long terme (2001-2013)

Les provinces de l'Oudalan, du Seno et du Namentenga, situées au Nord, ont enregistré les sécheresses les plus sévères sans pour autant avoir le plus grand nombre d'années sèches. Cependant avec le plus grand nombre d'années sèches (9 années), la province de la Comoé, dans le Sud-Ouest, a été affecté par des sécheresses relativement moins sévères que celles des provinces du Nord. Aussi sur les 13 années couvertes par l'étude, au moins 5 ont été des années de sécheresse météorologique dans les bas-fonds.

L'annexe 8 montre l'évolution saisonnière de la pluviométrie et celle de la sécheresse dans les bas-fonds regroupés par province à l'aide du *VHI* et du *SPI* de 2001 à 2013.

IV.4.3. Fréquence de la sécheresse dans les bas-fonds regroupés par province

La cartographie de la sécheresse dans les bas-fonds à l'aide du *VHI* et du *SPI*, calculés pour chacune des périodes 10 à 19 de chaque année depuis 2001 à 2013, a permis d'estimer la fréquence de la sécheresse des bas-fonds regroupés par province. La figure 30 montre la fréquence de la sécheresse des bas-fonds regroupés par province. La carte de droite est une estimation de la fréquence de la sécheresse à l'aide du *SPI*, tandis que celle de gauche est celle faite à l'aide du *VHI*.

Avec le *VHI*, la fréquence de la sécheresse au cours de la saison allant de la période 10 à la période 19 varie de 27% à 41%. Les provinces du Sud-Ouest (Kéné Dougou, Houet, Bougouriba, Léraba, Comoé, Poni et Nounbiel) sont celles qui connaissent la fréquence de sécheresse la plus faible, au moins égale à 27% qui correspond à environ 4 saisons des cultures sur 13. Elles sont suivies par les provinces du Sud avec une fréquence de sécheresse variant entre 30% et 33%. Les provinces de l'Ouest ont une fréquence de sécheresse pouvant atteindre 35%, tandis que certaines provinces du Centre et de l'Est peuvent atteindre 38%. La plus haute fréquence de sécheresse est enregistrée dans les provinces du Nord-Est (Seno, Yagha, Gnagna et Komondjari) et quelques-unes du Centre (Kourweogo, Kadiogo et Ganzourgou). La fréquence de la sécheresse peut y atteindre 41%, soient environ 5 à 6 saisons des cultures sur 13.

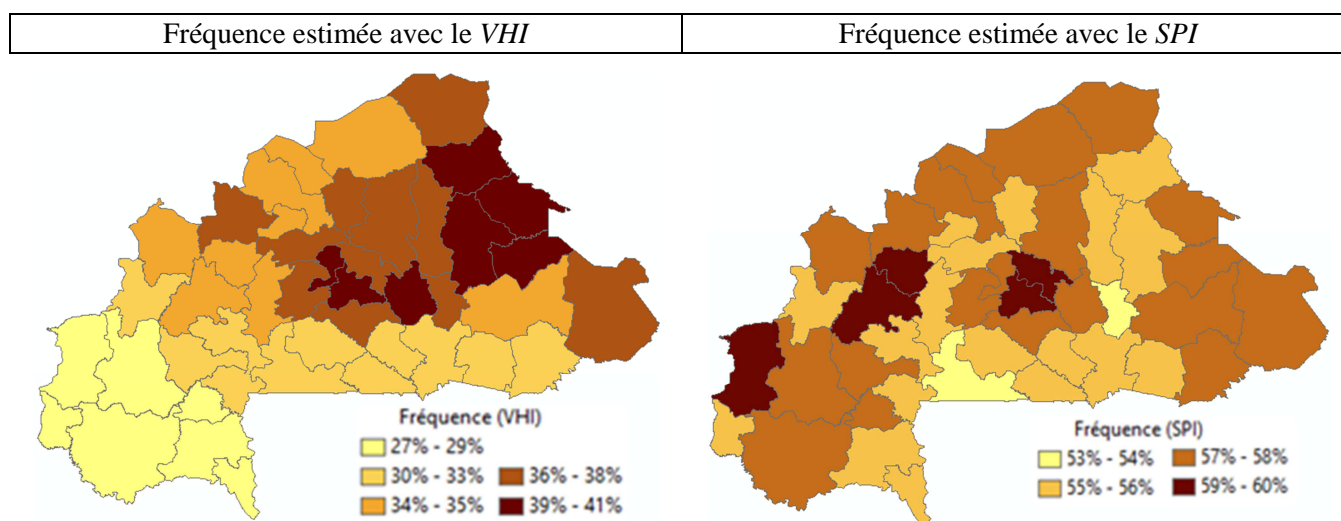


Figure 30 : Fréquence de la sécheresse dans les bas-fonds par province

Avec le *SPI*, la fréquence de la sécheresse au cours de la saison allant de la période 10 à la période 19 varie de 53% à 60%. La fréquence de sécheresse la plus faible, soit 53% qui correspondent à environ 7 saisons des cultures sur 13, est enregistrée dans une province au Sud (Sissili) et une province au Centre (Kouritenga). Elles sont suivies par certaines provinces du Sud, du Centre-Ouest et du Nord avec une fréquence de sécheresse pouvant atteindre 56%. Les provinces de l'extrême Ouest, Nord, Est et certaines provinces du Sud et du Centre ont une fréquence de sécheresse allant jusqu'à 58%. La plus haute fréquence de sécheresse est enregistrée dans une province du Sud-Ouest (Kéné Dougou), deux provinces du Centre-Ouest (Mouhoun et Nayala), et deux autres du Centre (Kadiogo et Oubritenga). La fréquence de la sécheresse peut y atteindre 60%, soient environ 8 saisons des cultures sur 13.

L'annexe 9 montre la fréquence périodique de la sécheresse dans les bas-fonds regroupés par province avec le *VHI*.

IV.5. Évolution saisonnière de la sécheresse dans les bas-fonds

Suite à la cartographie de la sécheresse dans les bas-fonds, il est intéressant de connaître l'évolution de cette sécheresse sur toute la durée de la période de l'étude. Il s'agit de mettre en exergue les caractéristiques (date de début, date du pic, date de fin, durée et sévérité) de chaque poche de sécheresse survenue durant la saison des cultures au cours des années 2001 à 2013. La figure 31 permet d'apprécier, s'il y a lieu, les caractéristiques de chaque sécheresse survenue dans les bas-fonds du Burkina Faso au cours de la saison des cultures (P10 à P19) de chaque année depuis 2001 jusqu'à 2013.

Les années 2002, 2004, 2005, 2007, 2009, 2011 et 2013 sont celles au cours desquelles, les bas-fonds ont été affectés par la sécheresse d'une façon générale. Cependant l'année 2002 est celle où la quasi-totalité de la saison des cultures a connu la sécheresse avec un pic du *VHI* égal à 0.23 en période 16. Le pic maximum de situation de bonne santé végétale est enregistré en période 19 de l'année 2010 (*VHI*=0.80). Les années 2003, 2008 et 2010 sont les années de gloire puisque aucune période de la saison des cultures ne présente un état de sécheresse.

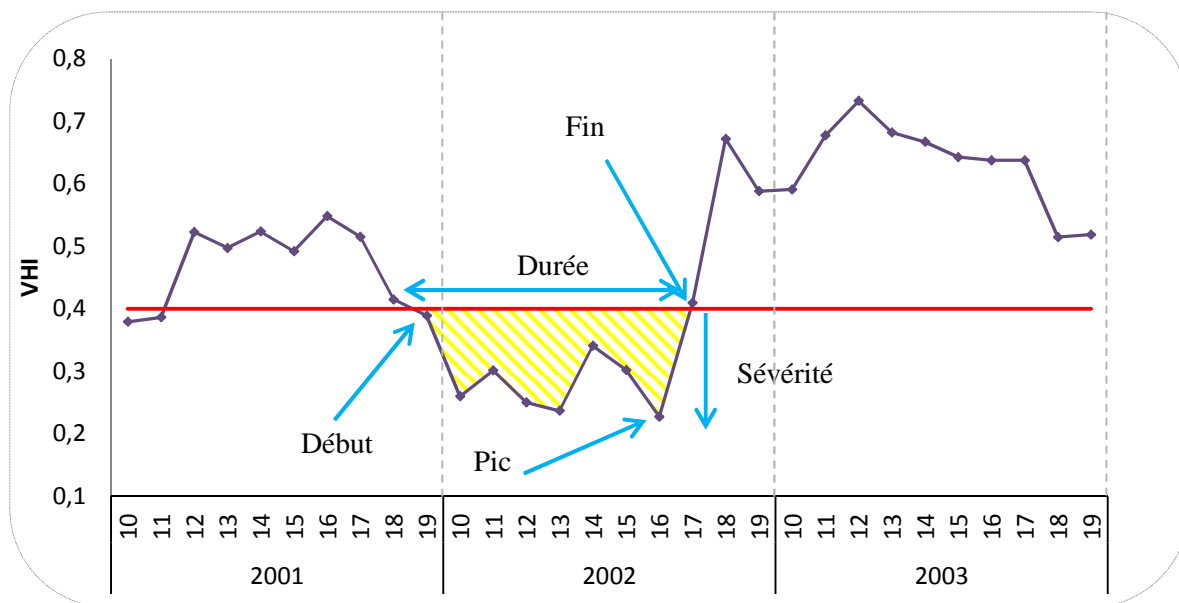
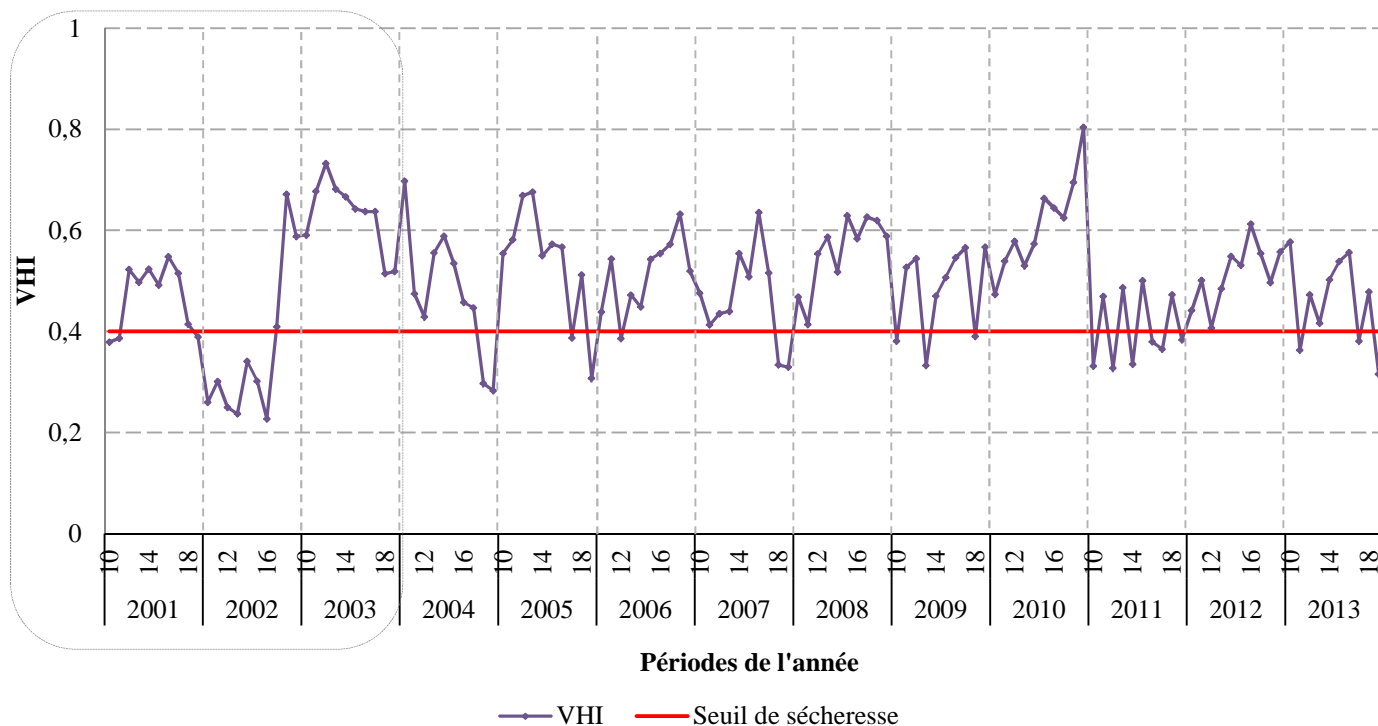


Figure 31 : Caractéristiques de la sécheresse dans les bas-fonds entre 2001 et 2013

L'analyse par province montre une différence dans l'évolution de la sécheresse d'une province à une autre (figure 32). Ainsi 3 provinces ont été choisies dans chacune des 3 régions agro-écologiques du pays afin d'y constater l'évolution de la sécheresse. Il s'agit de la province de l'Oudalan au Nord, la province du Kadiogo au Centre, et celle de la Comoé dans

le Sud-Ouest. La figure 33 permet d'approfondir l'analyse en comparant les tendances du *SPI* avec l'évolution du *VHI* entre les années de 2001 à 2013 pour les 3 provinces susmentionnées.

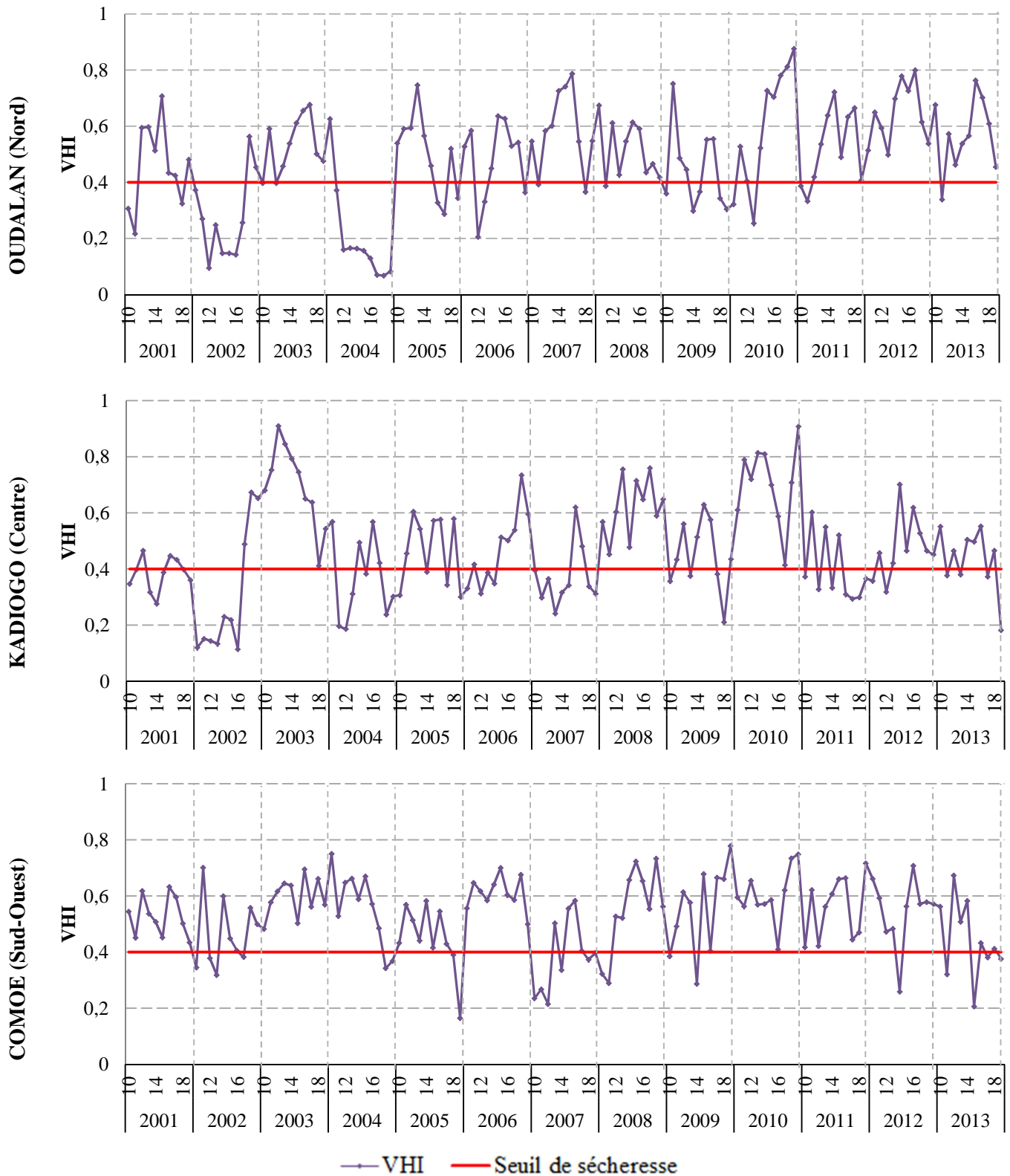


Figure 32 : Caractéristiques de la sécheresse dans les bas-fonds par province

- Dans la province de l'Oudalan au Nord, chaque année comporte au moins une période de la saison des cultures ayant un *VHI* inférieur à 0.40. Les années 2002 et 2004 sont celles ayant été marquées par les sécheresses les plus extrêmes. Les sécheresses y ont duré toute la saison des cultures et en 2004, le *VHI* a varié de 0.37 en période 10 à 0.08 en période 19. Le pic de sécheresse est enregistré en période 17 de l'année 2004, avec un *VHI* de 0.07 (figure 32). Les années 2003, 2011, 2012 et 2013 étaient favorables puisque le *VHI* est resté au-dessus du seuil de sécheresse pour la totalité (ou la quasi-totalité) de toutes les périodes de la saison des cultures. Le *VHI* maximum est enregistré en période 19 de l'année 2010, avec une valeur de 0.88. A partir de 2005 jusqu'en 2013 (figure 33), le *VHI* moyen par saison a toujours été au-dessus de 0.40, indiquant l'absence de sécheresse dans les bas-fonds de la province. Cependant, le *SPI* moyen par saison est resté en dessous de 0 pendant les années 2006, 2007 et 2013. On note une augmentation du *SPI* de -0.22 à 0.07 entre 2007 et 2008, tandis que le *VHI* diminue de 0.58 à 0.52.
- Dans la province du Kadiogo au Centre, toutes les années comportent au moins une période de la saison des cultures ayant un *VHI* inférieur à 0.40, à l'exception des années 2003, 2008 et 2010. Les années 2002, 2004, 2007 et 2011 sont celles ayant été marquées par les sécheresses les plus extrêmes, avec une particularité en 2002 où 7 périodes consécutives (P10 à P16) étaient sous sécheresse. Le pic de sécheresse est enregistré en période 16 avec un *VHI* de 0.11 (figure 32). Les années 2003, 2008, et 2010 étaient favorables puisque le *VHI* est resté au-dessus du seuil de sécheresse pour la totalité de toutes les périodes de la saison des cultures. Le *VHI* maximum est enregistré en période 12 de l'année 2003, avec une valeur de 0.91. Le *VHI* moyen par saison est resté en dessous de 0.40 pour les années 2001, 2002, 2004, 2007 et 2011, indiquant la présence de sécheresse dans les bas-fonds de la province (figure 33). Pour ce qui est du *SPI* moyen par saison, il est resté inférieur à 0 pendant les années 2001, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2011 et 2013. On constate une augmentation du *SPI* de -0.33 à -0.14 entre 2001 et 2002, tandis que le *VHI* diminue de 0.38 à 0.29. Le *VHI* garde sa valeur à 0.47 entre 2005 et 2006 et décroît à 0.37 en 2007, pendant que le *SPI* décroît de -0.05 à -0.24 entre 2005 et 2006, avant de croître à -0.17 en 2007.

- Dans la province de la Comoé dans le Sud-Ouest, toutes les années comportent au moins une période de la saison des cultures ayant un *VHI* inférieur à 0.40, à l'exception des années 2001, 2003, 2006, 2010 et 2011. Les années 2002 et 2007 sont celles ayant été marquées par les sécheresses les plus extrêmes. Cependant le pic de sécheresse est enregistré en période 19 de l'année 2005, avec un *VHI* de 0.16 (figure 32). Les années 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2010 et 2011 étaient favorables puisque le *VHI* est resté au-dessus du seuil de sécheresse pour la totalité de toutes les périodes de la saison des cultures allant de la période 10 à la période 17 au moins. Le *VHI* maximum est enregistré en période 19 de l'année 2009, avec une valeur de 0.79. Le *VHI* moyen par saison est resté en dessous de 0.40 pour seulement l'année 2007 (figure 33). Quant au *SPI* moyen par saison, il est resté inférieur à 0 pendant les années 2001, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2011 et 2013. On remarque une augmentation du *SPI* de -0.05 à 0.27 entre 2008 et 2009, tandis que le *VHI* garde sa valeur à 0.55. Entre 2011 et 2012, le *VHI* diminue de 0.56 à 0.55 pendant que le *SPI* croît de -0.28 à -0.13.

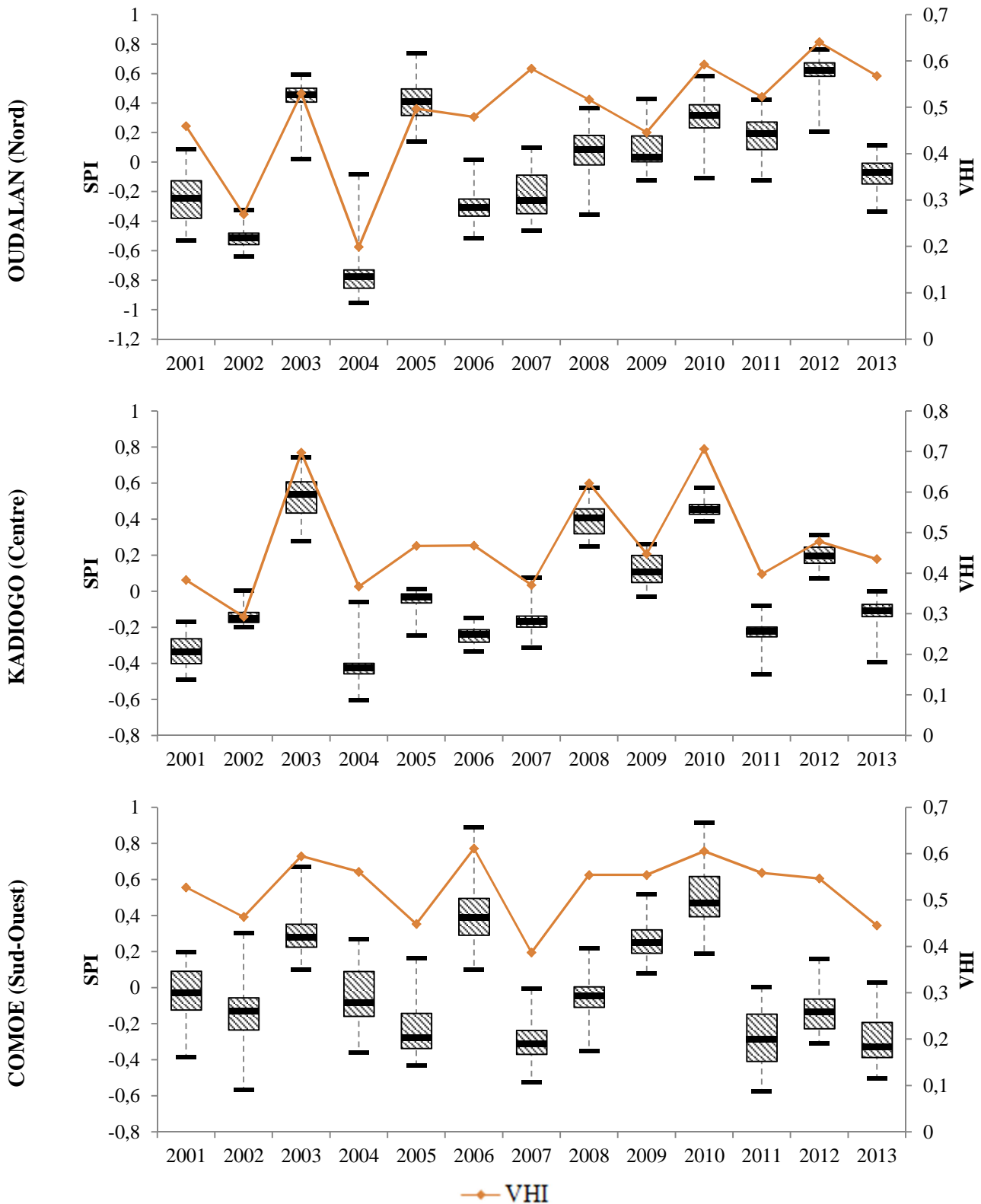


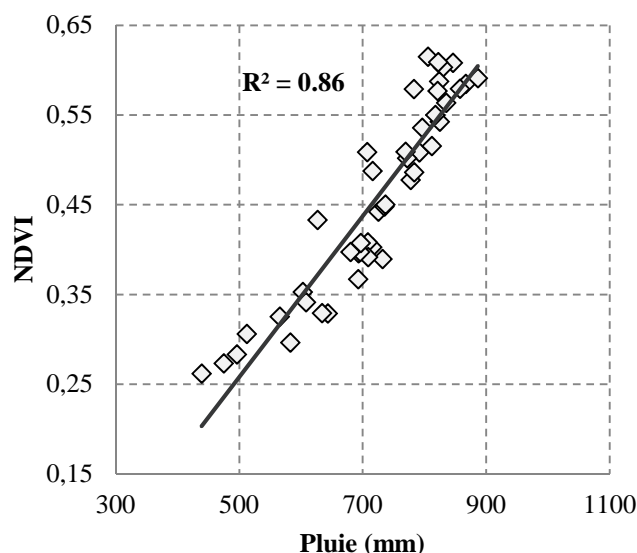
Figure 33 : Tendence du SPI et évolution du VHI dans les bas-fonds par province

V. DISCUSSION ET ANALYSES

V.1. Appréciation des données d'entrées acquises par télédétection

La figure 34 montre la relation entre les moyennes saisonnières de la pluviométrie et du *NDVI* (a), la pluviométrie et la *LST* (b), et enfin le *NDVI* et la *LST* (c) dans les 45 provinces du Burkina Faso. Il existe une très bonne corrélation entre la pluviométrie et le *NDVI* ($r= 0.93$). La variation de la pluviométrie se fait dans le même sens que celle du *NDVI*. Lorsque la pluviométrie diminue, la vigueur des végétaux baisse, et donc le *NDVI* décroît (hypothèse 1). Il s'en suit la relation entre la pluviométrie et la *LST* ($r= -0.96$). Cette relation est négative parce que lorsque la pluviométrie diminue, on remarque une hausse de la température du couvert végétal, et donc une augmentation de la *LST* (hypothèse 2). Ces constats sont importants et intéressants puisque les variables étudiées sont mesurées indépendamment.

a: *NDVI* vs Pluie



b: *LST* vs Pluie

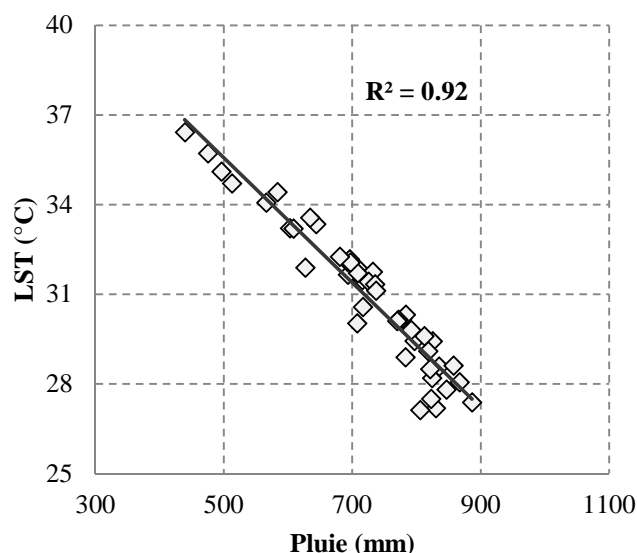


Figure 34 : Relation entre la pluviométrie, le *NDVI* et la *LST* dans les bas-fonds par province

Comme on peut l'apprécier sur la figure 35, la plus forte relation est celle entre le *NDVI* et la *LST* ($r= -0.99$). On note une augmentation de la *LST* lorsque le *NDVI* diminue. Il existe donc un lien plausible entre la *LST* et le *NDVI*, puisqu'en cas de stress hydrique, l'augmentation de la température des végétaux par la fermeture de leurs stomates (Mader, 1988) entraîne une réduction de l'activité photosynthétique, et donc une diminution de la vigueur des végétaux qui est estimée par le *NDVI* (hypothèse 2). Selon Karnieli et al. (2010), la *LST* et le *NDVI*

montrent des corrélations négatives sur les terres arides et les latitudes moyennes, comme c'est le cas dans notre zone d'étude.

La *LST* et le *NDVI*, obtenus par la télédétection, peuvent donc servir à détecter les conditions de sécheresse des végétaux au Burkina Faso (hypothèse 1 et 2).

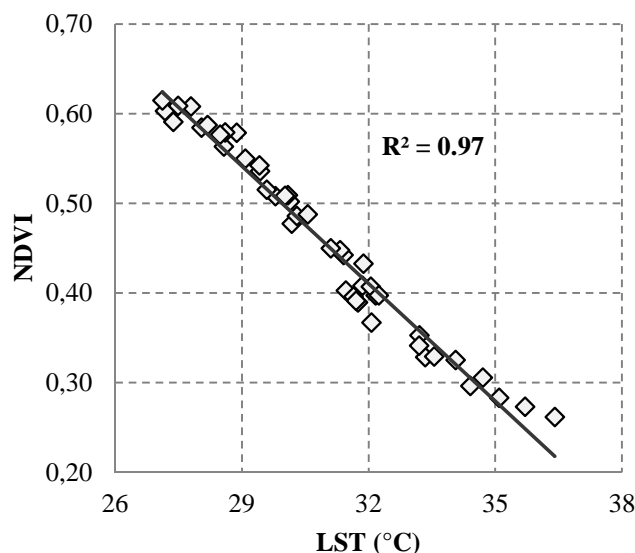


Figure 35 : Relation entre la *LST* et le *NDVI* dans les bas-fonds par province

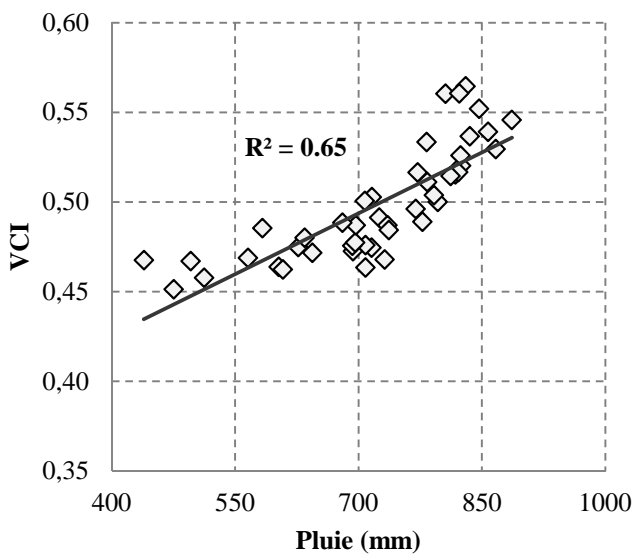
V.2. Appréciation des indices de sécheresse

Du et al. (2013) ont montré que parmi les nombreuses techniques de télédétection établies sur les indices de sécheresse, le *VCI* basé sur le *NDVI*, et le *TCI* basé sur la *LST* sont deux outils utiles pour le suivi de l'intensité, la durée et l'impact de la sécheresse au niveau régional et mondial (Singh et al., 2003). En outre, certaines études ont montré que le *VCI* et le *TCI* étaient meilleurs ensemble que séparément, d'où la naissance du *VHI* (Kogan et al., 2005; Kogan, 1997).

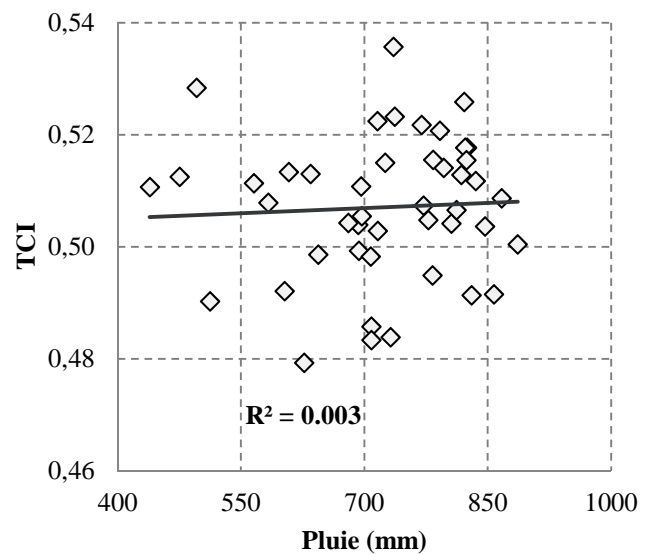
La figure 36 montre la relation entre les moyennes saisonnières de la pluviométrie et du *VCI* (a), la pluviométrie et le *TCI* (b), le *TCI* et le *VCI* (c), et la pluviométrie et le *VHI* (d). Il existe une bonne corrélation entre la pluviométrie et le *VCI* ($r = 0,81$). Le *VCI* permet donc d'évaluer les variations de la vigueur du couvert végétal sous l'effet des conditions climatiques (Unganai and Kogan, 1998). D'après Du *et al.* (2013), les premiers chercheurs ont constaté que le *VCI* est adapté pour suivre l'impact de la sécheresse à grande échelle sur la végétation, y compris la sécheresse agricole, et le *VCI* a une forte corrélation avec le rendement des cultures (Kogan et al., 2005; Salazar et al., 2007; Unganai and Kogan, 1998). Cependant tout ce qui stress la végétation comme les insectes, les maladies et le manque de nutriments sera

représentée par le *VCI* (Vicente-Serrano, 2007). La corrélation entre la pluviométrie et le *TCI* est très faible ($r= 0.05$), de même que celle entre le *TCI* et le *VCI* ($r= 0.06$). Ces résultats étaient prévisibles puisque selon Singh *et al.* (2003), il n'y a aucune relation directe entre le *VCI*, le *TCI* et la pluviométrie. Le *VCI* et le *TCI* ne peuvent donc pas à eux seules fournir des informations précises sur l'occurrence de la sécheresse agricole. Toutefois, il y a une bonne corrélation entre le *VHI* et la pluviométrie ($r= 0.78$). L'existence d'une telle relation est intéressante étant donné que le calcul du *VHI* utilise des paramètres autres que la pluviométrie.

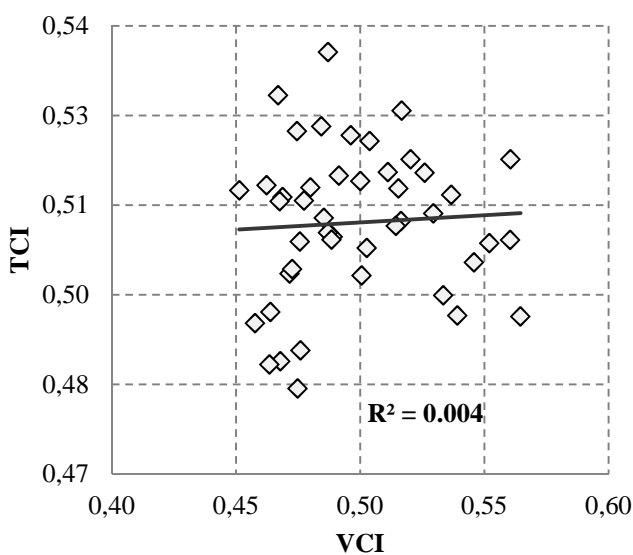
a: *VCI* vs Pluie



b: *TCI* vs Pluie



c: *TCI* vs *VCI*



d: Pluie vs *VHI*

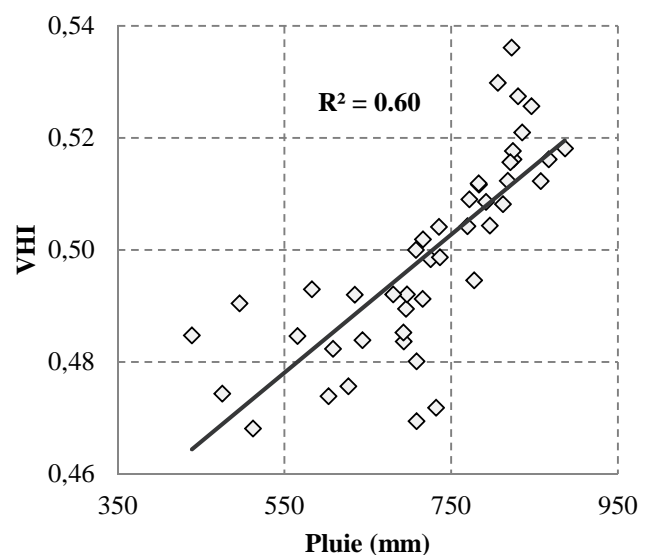


Figure 36 : Relation entre la pluviométrie, le *VCI*, le *TCI* et le *VHI* dans les bas-fonds par province

La valeur minimale du $VCI=0$ a été enregistrée en 2009. Aussi les résultats du VCI moyen annuel ont montré que la saison des cultures des années 2007 et 2009 ont connu un stress végétatif. Ensuite, la valeur minimale du $TCI=0.01$ a été enregistrée en 2011 et d'après le TCI moyen annuel, la saison des cultures de l'année 2007 a été affectée par un stress thermique. D'après le VHI moyen par saison, dont la valeur minimale a été enregistrée dans un bas-fond en 2011, seule l'année 2002 a connu la sécheresse. Cependant, les années 2001, 2004, 2007, 2009, 2011 et 2013 ont un VHI moyen annuel supérieure à 0.40 mais inférieure à 0.50. Avec le SPI , la valeur minimale ($SPI= -0.96$) a été enregistrée en 2004 et les années 2001, 2002, 2004, 2006, 2007, 2011 et 2013 sont celles pour lesquelles la saison des cultures a connu une sécheresse météorologique. Or, selon le MAFAP (2013), de graves sécheresses ont causé en 2004 et 2007, une baisse significative de la production agricole évaluée à -16% en 2007, et une perte économique estimée à 4.5% du PIB agricole en 2009, et 2.3% en 2006. Les bas-fonds étant les principales superficies de la culture du riz au Burkina Faso (figure 37), toute diminution des productions au niveau des bas-fonds devrait se faire ressentir de façon considérable sur les rendements nationaux.

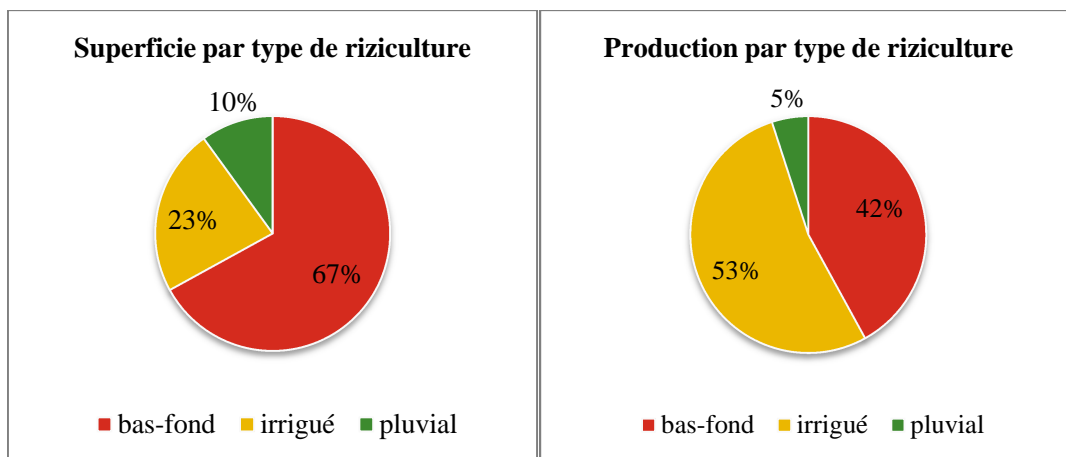
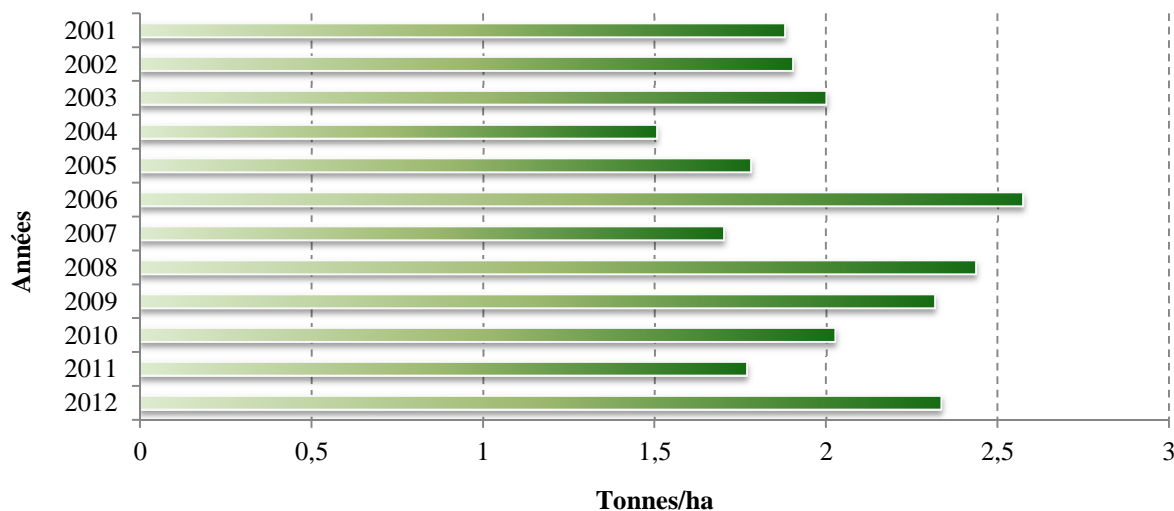


Figure 37 : Superficie occupée et production par type de riziculture au Burkina Faso

Sur la figure 38 qui montre l'évolution des rendements de la production rizicoles au Burkina Faso entre 2001 et 2012, on note un accroissement des rendements entre 2001 (1.88 tonnes/ha) et 2003 (2 tonnes/ha). L'année 2004 est celle ayant enregistrée le plus faible rendement estimé à 1.5 tonnes/ha. Ce qui laisse supposer l'occurrence d'une éventuelle sécheresse puisque les rendements recommence à croître dès l'année 2005 (1.78 tonnes/ha) jusqu'en 2006 (2.57 tonnes/ha) avant de retomber à 1.7 tonnes/ha en 2007. Les rendements remontent en 2008 (2.4 tonnes/ha) et décroissent jusqu'en 2011 (1.77 tonnes/ha) avant de

repartir à 2.33 tonnes/ha en 2012. Les années 2004 et 2007 sont donc des années critiques. Ces informations confirment les capacités du *VCI*, du *TCI*, du *VHI* et du *SPI* à détecter de façon commune la sécheresse agricole au Burkina Faso (hypothèses 1 et 2).



Source : FAOSTAT, 2014

Figure 38 : Rendement de la production rizicole entre 2001 et 2012 au Burkina Faso

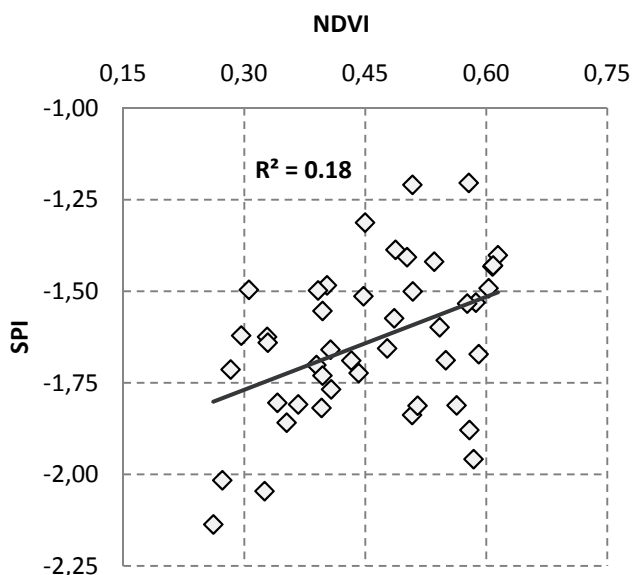
Néanmoins, le seuil de sécheresse du *VHI* correspondrait mieux s'il était fixé à 0.50, d'autant que les critères de détermination de la valeur 0.40 comme seuil de sécheresse sont méconnus, et que d'une part, le poids du *VCI* (w_1) et celui du *TCI* (w_2) ont été fixé de façon empirique dans la formule du *VHI*, et d'autre part leurs seuils de sécheresse sont égales à 0.5.

Ainsi, une comparaison entre le *SPI* et le *VHI* montrerait que ces deux indices de sécheresse ont détecté de façon commune la sécheresse agricole au cours de la saison des cultures de 6 années sur 7. Ce qui voudrait dire qu'il y a une probabilité de 86% pour que le *VHI* et le *SPI* détectent simultanément une sécheresse agricole dans les bas-fonds au Burkina Faso. En d'autres termes il y a une probabilité de 86% qu'un déficit pluviométrique sur l'étendue d'un bas-fond engendre une sécheresse agricole (hypothèse 3).

Contrairement à la bonne corrélation entre le *VHI* et la pluviométrie, la figure 39 (a) révèle une faible corrélation entre le *SPI* et le *NDVI* ($r = -0.03$). Cette information évoque les limites de la capacité du *SPI* à détecter la sécheresse dans les bas-fonds étant donné que cet indice ne tient presque pas compte des changements qui surviennent dans la vigueur de la végétation. Toutefois, cette faible corrélation entre le *NDVI* et le *SPI* peut s'expliquer par le temps qui s'écoule entre un déficit pluviométrique et la réponse de la végétation vis-à-vis de celui-ci, surtout dans les bas-fonds où la pluie n'est pas la seule source d'approvisionnement considérable en eau (hypothèse 3). En outre, il ressort dans la figure 39 (b) que la corrélation

entre le *SPI* et le *VHI* demeure faible ($r= 0.07$). En somme le *VHI* peut être utilisé pour détecter les poches de sécheresse dans les bas-fonds et, si sécheresse il y a, le *SPI* servirait à lier ou non les causes de cette sécheresse à un déficit pluviométrique et conclure sur une éventuelle sécheresse agricole.

a: *SPI* vs *NDVI*



b: *SPI* vs *VHI*

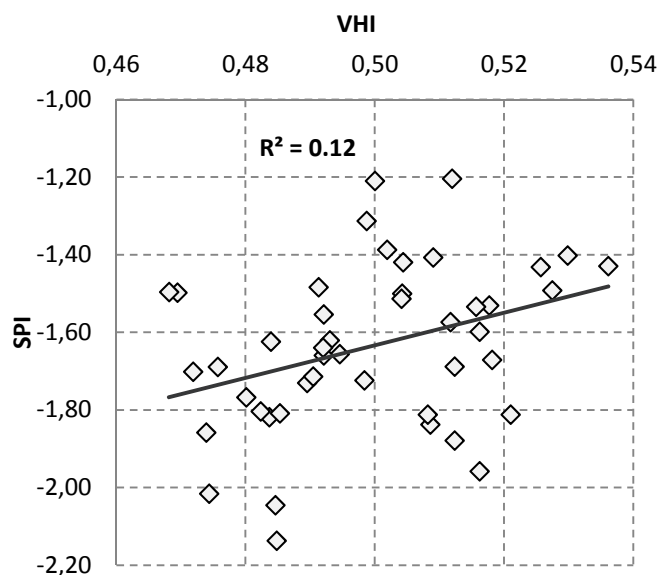


Figure 39 : Relation entre le *NDVI*, le *SPI* et le *VHI* dans les bas-fonds par province

V.3. Périodes de sécheresse et riziculture

Avec les nouvelles variétés de riz, la durée moyenne de la phénologie du riz est d'environ 90 jours pour les variétés précoces. Pour accroître les rendements, l'idéal serait de cultiver le riz pendant les périodes non affectées par la sécheresse au cours de la saison des cultures (P10 à P19). En outre, il faudrait choisir ces périodes de sorte à avoir au mieux 90 jours non affectés par la sécheresse de façon continue. Les résultats du *VHI* ont permis de savoir que la valeur minimale ($VHI=0.26$) a été enregistrée en période 11, tandis que la valeur maximale ($VHI=0.74$) a été enregistrée en période 16. Le *VHI* moyen périodique croît de la période 10 ($VHI=0.48$) à la période 15 ($VHI=0.54$), et décroît jusqu'à la période 19 ($VHI=0.47$). Les périodes 10, 11, 12, 13 et 19 ont un *VHI* supérieur à 0.40 mais inférieur à 0.50. L'évolution de la moyenne périodique du *VHI* dans les bas-fonds au Burkina Faso peut être constatée en annexe 3. Compte tenu de ces informations, la plage allant de la période 12 à la période 17 semble convenir à la culture du riz pour une amélioration des rendements. Cette plage compte 96 jours (6×16 jours) durant lesquels la probabilité de l'occurrence d'une sécheresse est tout au plus égale à 38%, avec un risque plus élevé en périodes 12 et 13.

VI. RECOMMANDATIONS

La présente étude, comme toute autre, comporte des limites qui pourraient faire l'objet d'améliorations lors de futurs travaux. Toutefois, les résultats obtenus doivent être analysés et commentés avec précaution. En effet, l'analyse des moyennes saisonnières des indices de sécheresse permet de donner une idée globale et ne devrait pas servir à tirer des conclusions définitives, puisque la notion de moyenne cache de nombreux détails. De plus, l'interprétation de l'analyse de la sécheresse dans les provinces doit se faire avec prudence puisque les situations locales dans les bas-fonds peuvent être très différentes de la situation régionale d'ensemble, soit du fait d'une hydrologie locale favorable, soit du fait d'aménagements.

Les différentes analyses ont permis de remarquer qu'en considérant le seuil de sécheresse du *VHI* égal à 0.5, les résultats fournis par nos travaux correspondaient davantage avec l'évolution des rendements rizicoles. Il serait donc intéressant de reconsidérer le seuil de sécheresse du *VHI* pour les études dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso. Quant au *SPI*, les résultats obtenus ont permis de constater que cet indice à lui seul ne peut détecter la sécheresse agricole dans les bas-fonds. Ainsi il est conseillé que l'utilisation du *SPI* se fasse en combinaison avec d'autres indices de sécheresse tenant compte des paramètres biophysiques et physiologiques des végétaux afin de détecter l'occurrence de la sécheresse agricole dans les bas-fonds.

Dans l'avenir, il serait souhaitable que cette étude soit reprise avec des images satellitaires de très haute résolution, puisqu'il y a une hétérogénéité à l'intérieur des pixels de grandes tailles. En outre, des études doivent être menées afin d'affiner la période de l'année qui est propice à la riziculture de bas-fonds. Cela permettra d'ajuster la résolution temporelle afin de mieux détecter les poches de sécheresse qui surviennent au cours du cycle de développement du riz.

Du fait de la récurrence des pénuries d'eau, il est essentiel d'encourager la recherche et le développement des variétés de riz résistantes à la sécheresse, et par la suite soutenir la vulgarisation des semences améliorées.

Enfin, pour limiter les impacts de la sécheresse dans les bas-fonds, il convient de faire recours à l'aménagement des bas-fonds, où la non maîtrise de l'eau engendre également des pertes importantes au niveau des rendements rizicoles.

CONCLUSION

La sécheresse est un phénomène naturel dont l'occurrence varie en fréquence, en sévérité et en durée (Paulo et al., 2012). Au Burkina, la sécheresse des bas-fonds rizicoles engendre une baisse de la production et d'énormes pertes économiques (MAFAP, 2013). Au cours des dernières décennies, la télédétection s'est révélée être un outil indispensable pour la réalisation des études de sécheresse sur de vastes étendues et ce, en temps quasi réel (Singh et al., 2003; Son et al., 2012). C'est ainsi que des indices de sécheresse ont été calculés à partir de données acquises par télédétection pour caractériser la sécheresse agricole dans les bas-fonds rizicoles au Burkina Faso. L'indice de la condition végétale (*VCI*) a montré une distribution du stress végétatif qui montre une bonne corrélation avec celle de la pluviométrie, tandis que l'indice de condition thermique (*TCI*) a montré une distribution du stress thermique qui ne correspond ni à celle de la pluviométrie, ni celle de la température de surface (*LST*) ou de l'indice normalisé de végétation (*NDVI*). Cependant, en combinant le *VCI* et le *TCI*, l'indice de la santé végétale (*VHI*) parvient à donner une bonne corrélation avec la pluviométrie ($r= 0.78$). Quant à l'indice de précipitation standardisé (*SPI*), il a une faible corrélation ($r= -0.03$) avec le *NDVI*. Toutefois le *VHI* semble être plus pertinent pour la détection de la sécheresse lorsque le seuil de sécheresse est fixé à 0.50. Dès lors les résultats fournis par le *VHI* sont quasi similaires à ceux du *SPI*, et concordent avec l'évolution des productions agricoles et des pertes économiques associées aux années de sécheresse. La validité du *VHI* comme un outil de détection de la sécheresse repose sur l'hypothèse que le *NDVI* et la *LST* à un pixel donné varient inversement avec le temps. Un couvert végétal sous stress hydrique intense (*VHI* très faible) est généralement associé à des conditions défavorables d'humidité du sol (faible *VCI*) et de stress thermique (faible *TCI*) et vice versa. Pour ce qui est de la sévérité de la sécheresse lorsqu'elle survient dans les bas-fonds, on constate plutôt des sécheresses de sévérité légère à modérée avec le *VHI*, tandis qu'elles sont de sévérité légère avec le *SPI*. Néanmoins il existe des cas de sécheresse sévère et extrême.

L'analyse à l'échelle d'unités administratives a permis de constater que la moitié des provinces a un *VHI* moyen par saison compris entre 0.40 et 0.50. Ces provinces sont situées au centre, au Nord et surtout au Nord-Est du pays. Les provinces du Sud-Est au Sud-Ouest sont moins affectées par la sécheresse. Avec le *SPI* moyen par saison, on note que sur les 13 années couvertes par l'étude (2001-2013), au moins 5 ont été des années de sécheresse météorologique dans les bas-fonds. En outre, le plus grand nombre d'années sèches (9 années) a été enregistré dans la province de la Comoé au Sud-Ouest du pays. Toutefois, ces

sécheresses sont relativement moins sévères que celles des provinces du Nord, où les provinces enregistrent entre 6 et 7 années de sécheresse météorologique. En ce qui concerne la fréquence de la sécheresse estimée avec le *VHI*, les provinces du Sud-Ouest sont celles qui connaissent la fréquence de sécheresse la plus faible (27 à 29%). La plus haute fréquence de sécheresse est enregistrée dans les provinces du Nord-Est et quelques-unes de la région du Centre et peut atteindre 41%. Avec le *SPI*, la fréquence de sécheresse la plus faible (53%) a été enregistrée dans une province au Sud (Sissili) et une province au Centre (Kouritenga). La plus haute fréquence de sécheresse (60%) a été enregistrée dans une province du Sud-Ouest (Kéné Dougou), deux provinces du Centre-Ouest (Mouhoun et Nayala), et deux autres du Centre (Kadiogo et Ouhritenga). Les années 2001, 2002, 2004, 2007, 2011 et 2013 sont les années de sécheresses pour lesquelles le *VHI* et le *SPI* étaient simultanément au rouge, indiquant éventuellement des années de sécheresse agricole.

Les limites de cette étude résident d'une part, dans la résolution des images satellitaires utilisées pour la *LST* et la pluviométrie. Néanmoins ce sont les meilleures résolutions que l'on puisse trouver pour la zone d'étude. D'autre part, il convient de faire un choix judicieux de l'échelle temporelle sur laquelle l'étude est menée. Avec des périodes trop courtes, le *SPI* indique des fréquences de sécheresse élevées à cause de l'irrégularité des pluies. Cependant des périodes trop longues tendent à dissimuler certaines poches de sécheresse. Puisqu'on s'intéresse à la culture du riz, le choix de notre échelle temporelle semble convenir, car une sécheresse de 16 jours peut être fatale pendant le développement du riz. L'interprétation de l'analyse de la sécheresse dans les provinces doit se faire avec attention puisque les situations locales dans les bas-fonds peuvent être très différentes de la situation régionale d'ensemble, soit du fait d'une hydrologie locale favorable, soit du fait d'aménagements.

Afin de limiter les impacts de la sécheresse agricole dans les bas-fonds, il convient de faire recours aux techniques de conservation des eaux et des sols. La pratique de l'irrigation, qui d'une part nécessite de mobiliser l'eau et d'autre part nécessite de la maintenir dans les bas-fonds pendant une certaine durée, est un moyen de limitation des dommages dus à la sécheresse. L'utilité de l'aménagement des bas-fonds n'est donc plus à démontrer, d'autant plus que l'aménagement de 2500 ha de bas-fonds rizicoles se traduit par un accroissement de la production de 5%.

BIBLIOGRAPHIE

- ADRAO. (2008) Africa Rice Trend 2007, WARDA, Cotonou, Benin.
- AfricaRice. (2010) Template for annual technical update report. GCP Project N°: G7010.04.01, 24 p.
- Anderson M.C., Norman J.M., Mecikalski J.R., Otkin J.A., Kustas W.P. (2007) A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) 112.
- Bado B.V., Aw A., Ndiaye M. (2010) Long-term effect of continuous cropping of irrigated rice on soil and yield trends in the Sahel of West Africa. *Nutrient cycling in agroecosystems* 88:133-141.
- Bates B., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J. (2008) Climate change and water Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Boken V.K., Hoogenboom G., Kogan F.N., Hook J.E., Thomas D.L., Harrison K.A. (2004) Potential of using NOAA-AVHRR data for estimating irrigated area to help solve an inter-state water dispute. *International Journal of Remote Sensing* 25:2277-2286.
- Bordi I., Sutera A. (2007) Drought monitoring and forecasting at large scale, *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*, Springer. pp. 3-27.
- CCNUCC. (2001) Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Communication Nationale du Burkina Faso. 126p.
- Choi M., Jacobs J.M., Anderson M.C., Bosch D.D. (2013) Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology* 476:265-273.
- De Jager J., Howard M., Fouche H. (2000) Computing drought severity and forecasting its future impact on grazing in a GIS. *Drought: A global assessment*:269-278.
- Defoer T., Wopereis M.C.S., Diack S., Idinoba P., AKF I.é.d.P. (2008) Curriculum d'apprentissage participatif et recherche action (APRA) pour la gestion intégrée de la culture de riz de bas-fonds (GIR) à Madagascar. Manuel du facilitateur. ADRAO, Cotonou, Bénin et AKF, Genève, Suisse.
- DGPER. (2009) Analyse de la compétitivité de la filière riz local au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique, Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale.
- Du L., Tian Q., Yu T., Meng Q., Jancso T., Udvardy P., Huang Y. (2013) A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23:245-253.

- El Abidine A.Z. (2003) Le dépérissement des forêts au Maroc: analyse des causes et stratégie de lutte. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 14:209-218.
- Fuchs B. (2012) Drought Indices and Indicators in use around the World, National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, Caribbean Drought Workshop May 22-24, 2012 27p.
- Gocic M., Trajkovic S. (2013) Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010. *Journal of Hydrology* 494:32-42.
- Guissou R., Ilboudo F. (2012) Analyse des incitations et pénalisations pour le riz au Burkina Faso. Série notes techniques, SPAAA, FAO, Rome. 44p.
- Herceg D., Sobel A.H., Sun L. (2007) Regional modeling of decadal rainfall variability over the Sahel. *Climate dynamics* 29:89-99.
- Hisdal H., Tallaksen L., Peters E., Stahl K., Zaidman M. (2000) Drought event definition. ARIDE Technical Rep 6.
- Jain S.K., Keshri R., Goswami A., Sarkar A., Chaudhry A. (2009) Identification of drought vulnerable areas using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 30:2653-2668.
- Jeyaseelan A. (2003) Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*:291-313.
- Karnieli A., Agam N., Pinker R.T., Anderson M., Imhoff M.L., Gutman G.G., Panov N., Goldberg A. (2010) Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. *Journal of Climate* 23:618-633.
- Khalili D., Farnoud T., Jamshidi H., Kamgar-Haghighi A.A., Zand-Parsa S. (2011) Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water resources management* 25:1737-1757.
- Kogan F. (1986) The impact of climate and technology on Soviet grain production. *Delphic emigre series (USA)*.
- Kogan F. (1995) Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* 15:91-100.
- Kogan F. (1998) A typical pattern of vegetation conditions in southern Africa during El Nino years detected from AVHRR data using three-channel numerical index. *International Journal of Remote Sensing* 19:3688-3694.
- Kogan F. (2002) World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 83:557-563.

- Kogan F., Yang B., Wei G., Zhiyuan P., Xianfeng J. (2005) Modelling corn production in China using AVHRR based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing* 26:2325-2336.
- Kogan F.N. (1997) Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:621-636.
- Kotchi S.O., Viau A.A. (2004) Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre, Université Laval.
- Landsberg H.E. (1975) Sahel drought: Change of climate or part of climate? *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B* 23:193-200.
- Li J., Lewis J., Rowland J., Tappan G., Tieszen L.L. (2004) Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series *Journal of Arid Environments* 59:463-480.
- Liu W., Juárez R.N. (2001) ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 22:3483-3501.
- Mader S.S. (1988) *Biologie: évolution, diversité et environnement* Bruxelles: De Boeck;[Montréal]: Éditions R. Goulet.
- MAFAP. (2013) *Revue des politiques agricoles et alimentaires au Burkina Faso Série rapport pays SPAAA*, FAO, Rome, Italie. 234p.
- Mahé G., Paturol J.-E. (2009) 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience* 341:538-546.
- MAHRH. (2009) *Analyse de la compétitivité de la filière riz local au Burkina Faso. Rapport provisoire*. 98p.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society Boston, MA. pp. 179-183.
- McVicar T.R., Jupp D.L. (1998) The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural systems* 57:399-468.
- MECV. (2011) *Troisième rapport sur l'état de l'environnement au Burkina Faso (version provisoire)*. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- Mirabbasi R., Anagnostoub E., Fakheri-Farda A., Dinpashoha Y., Eslamianc S. (2013) Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology* 492:35-48.
- Mishra A.K., Desai V.R. (2005) Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati River Basin. *India. Int. J. River Basin Manage.* 3 (1):31-41.

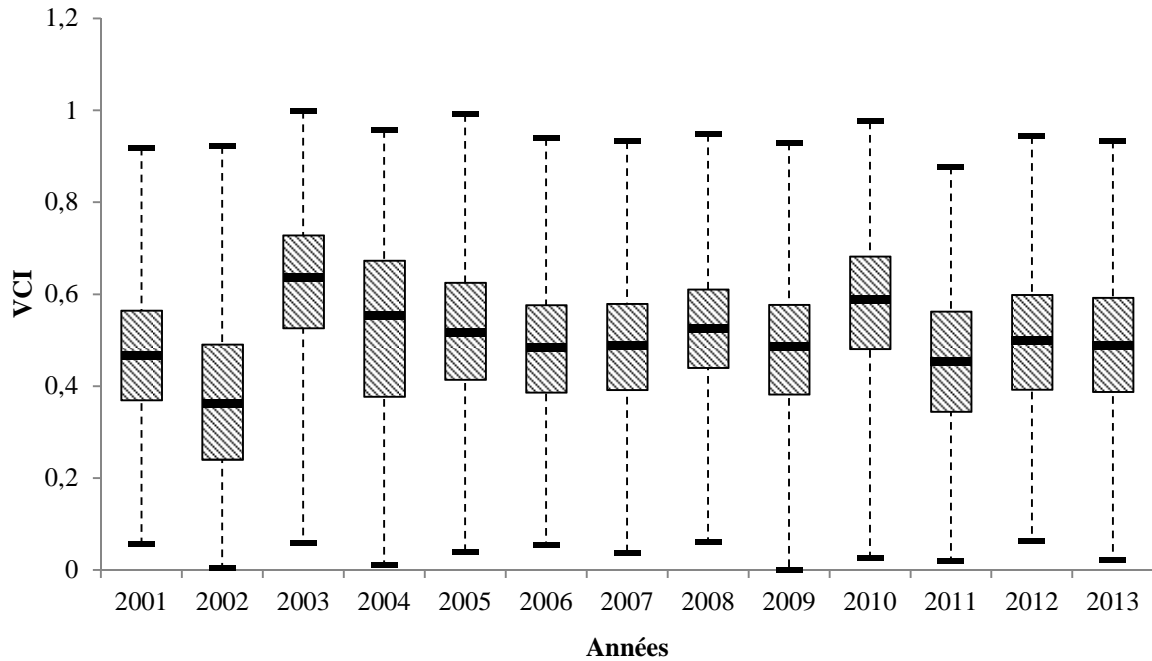
- Muthumanickam D., Kannan P., Kumaraperumal R., Natarajan S., Sivasamy R., Poongodi C. (2011) Drought assessment and monitoring through remote sensing and GIS in western tracts of Tamil Nadu, India. *International Journal of Remote Sensing* 32:5157-5176.
- Owringi M.A., Adamowski J., Rahnamaei M., Mohammadzadeh A., Sharifan R.A. (2011) Drought monitoring methodology based on AVHRR images and SPOT vegetation maps. *Journal of Water Resource and Protection* 2011.
- Paulo A., Rosa R., Pereira L. (2012) Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal.
- Raunet M. (1985) Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structural comparative, *Agron. Trop* 40:181-201.
- Rojas O., Vrieling A., Rembold F. (2011) Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment* 115:343-352.
- Rossi S. (2009) Remote Sensing for drought monitoring, 1st joint DMCSEE-JRC Workshop on Drought Monitoring Ljubljana.
- Salazar L., Kogan F., Roytman L. (2007) Use of remote sensing data for estimation of winter wheat yield in the United States. *International Journal of Remote Sensing* 28:3795-3811.
- Seiler R., Kogan F., Sullivan J. (1998) AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Advances in Space Research* 21:481-484.
- Seiler R., Kogan F., Wei G., Vinocur M. (2007) Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Cordoba–Argentina assessed by AVHRR derived vegetation indices. *Advances in Space Research* 39:88-94.
- Singh R.P., Roy S., Kogan F. (2003) Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing* 24:4393-4402.
- Son N., Chen C., Chen C., Chang L., Minh V. (2012) Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18:417-427.
- Tardieu F., Dreyer E. (1997) Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. *L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau.* edited by INRA-Éditions. Institut National de Recherche Agronomique:41-59.
- Thenkabail P.S., Gamage M.S.D.N., Smakhtin V.U. (2004) The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

- Thiruvengadachari S., Gopalkrishna H. (1993) An integrated PC environment for assessment of drought. *International Journal of Remote Sensing* 14:3201-3208.
- Tsakiris G., Loukas A., Pangalou D., Vangelis H., Tigkas D., Rossi G., Cancelliere A. (2007) Drought characterization. Drought management guidelines technical annex.
- Tucker C., Pinzon J., Brown M., Slayback D., Pak E., Mahoney R., Vermote E., Saleous E.L., Nazmi E.S. (2005) An extended AVHRR 8 km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 26:4485–4498.
- Tucker C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150.
- Unganai L.S., Kogan F.N. (1998) Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* 63:219-232.
- Vicente-Serrano S.M. (2007) Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. *Natural Hazards* 40 (1):173–208.
- Vogt J., Niemeyer S., Somma F., Beaudin I., Viau A. (2000) Drought monitoring from space, Drought and drought mitigation in Europe, Springer. pp. 167-183.
- Vogt J.V., Viau A.A., Paquet F. (1997) Mapping regional air temperature fields using satellite-derived surface skin temperatures. *International Journal of Climatology* 17:1559-1579.
- Wan Z., Wang P., Li X. (2004) Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing* 25:61-72.
- Wang J., Price K., Rich P. (2001) Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing* 22:3827-3844.
- Wilhite D.A. (2000) Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *Drought, a global assessment* 1:3-18.
- Wilhite D.A., Glantz M.H. (1985) Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international* 10:111-120.
- Wopereis M., Defoer T., Idinoba P., Diack S., Dugué M. (2008) Participatory learning and action research (PLAR) for integrated rice management (IRM) in inland valleys of sub-Saharan Africa: technical manual. WARDA Training Series. Africa Rice Center, Cotonou, Benin 128.

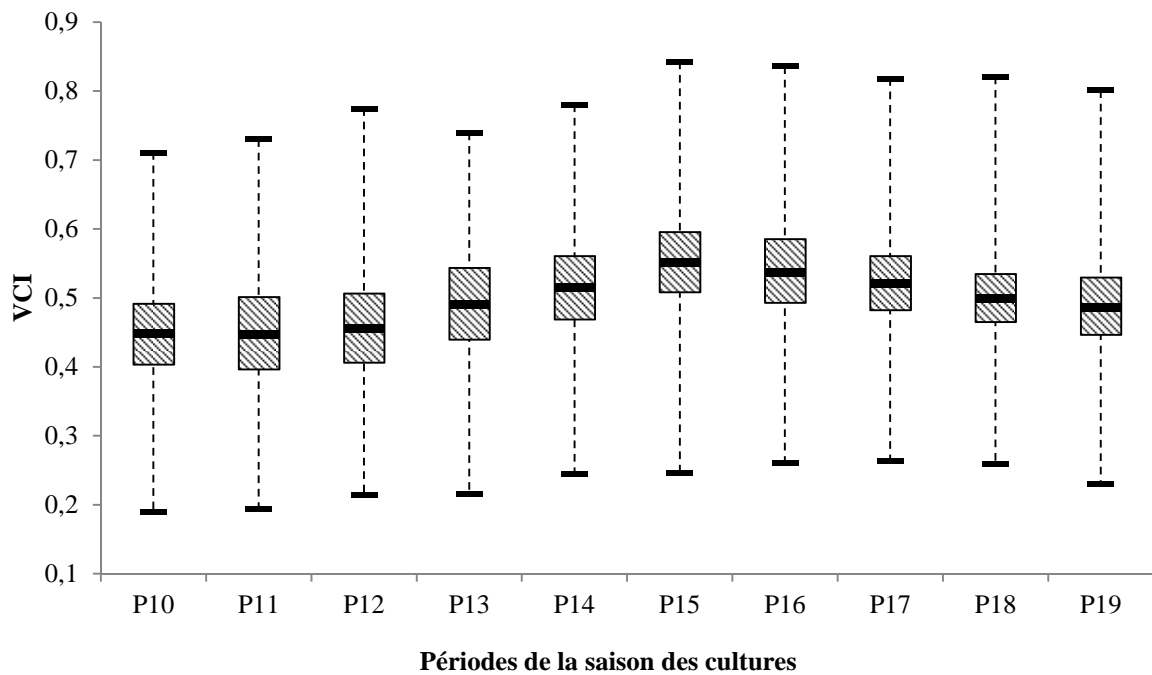
ANNEXES

Annexe 1 : Evolution saisonnière et périodique du VCI dans les bas-fonds

Evolution saisonnière du VCI dans les bas-fonds entre 2001 et 2013

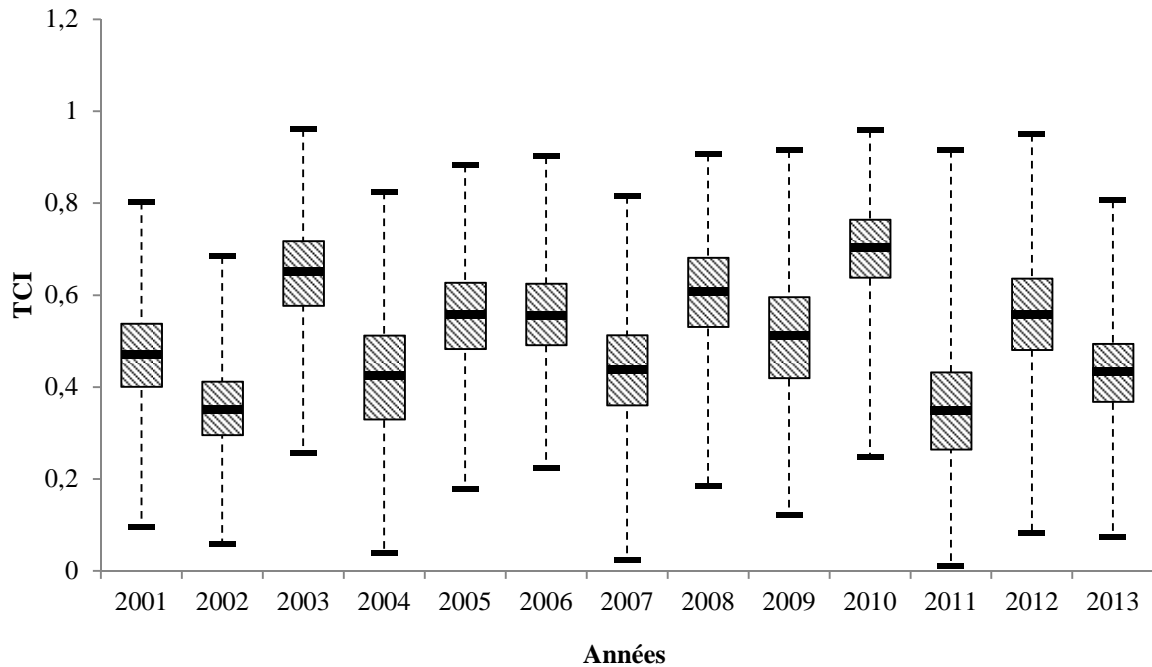


Evolution périodique du VCI dans les bas-fonds entre P10 et P19

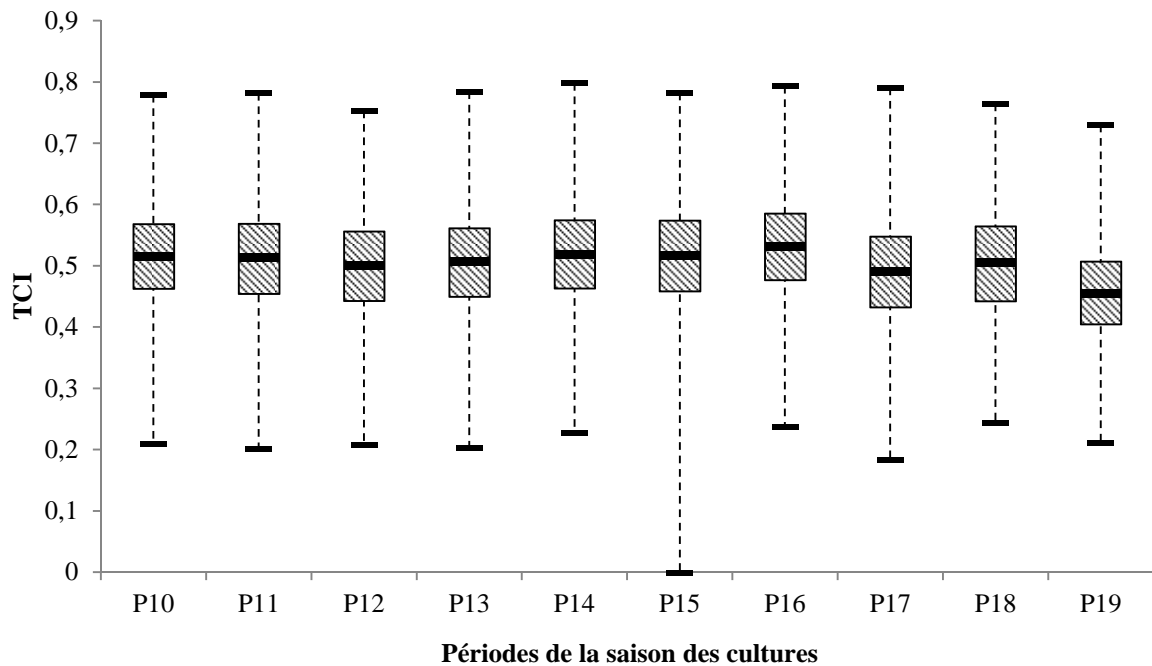


Annexe 2 : Evolution saisonnière et périodique du TCI dans les bas-fonds

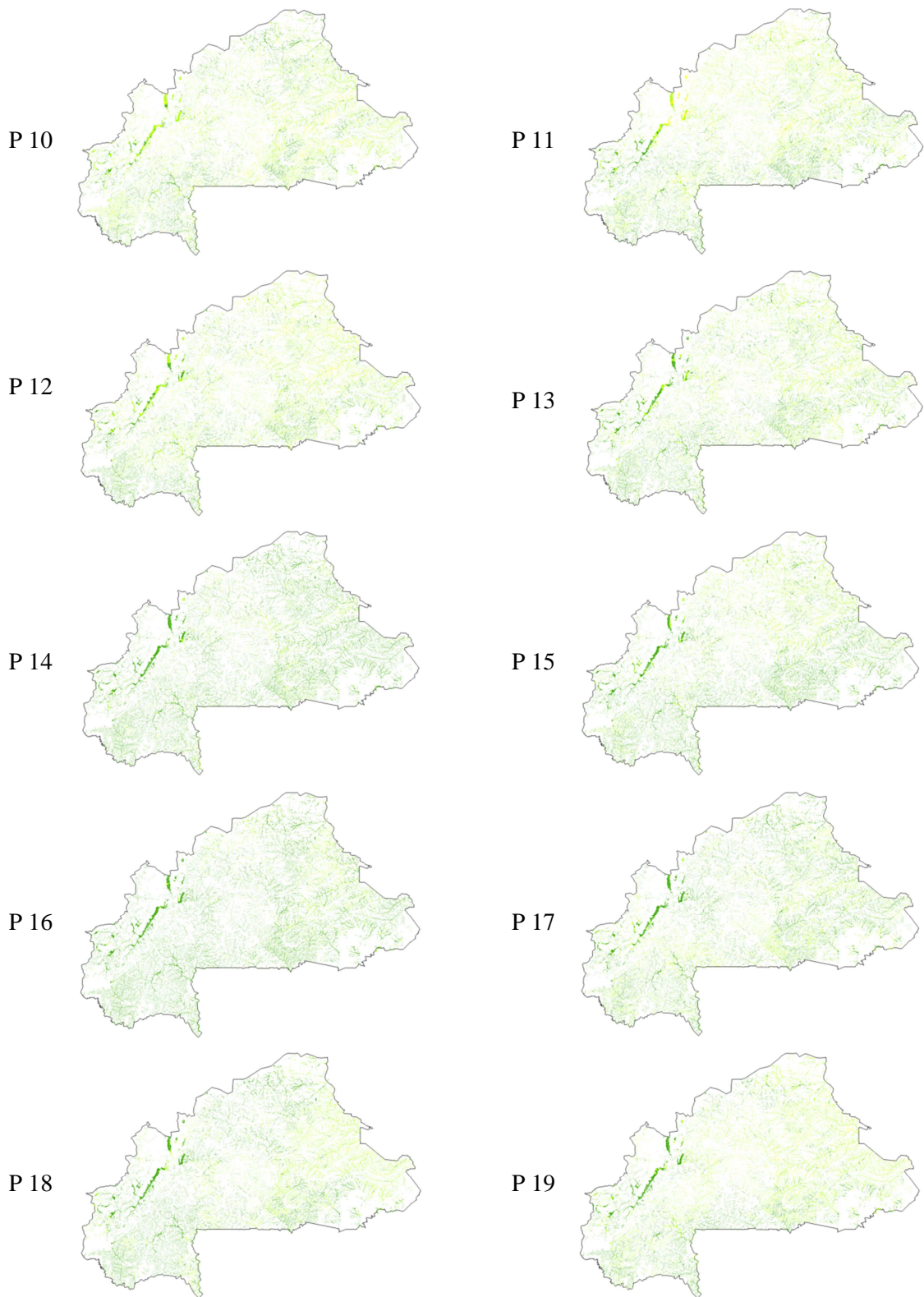
Evolution saisonnière du TCI dans les bas-fonds entre 2001 et 2013



Evolution périodique du TCI dans les bas-fonds entre P10 et P19

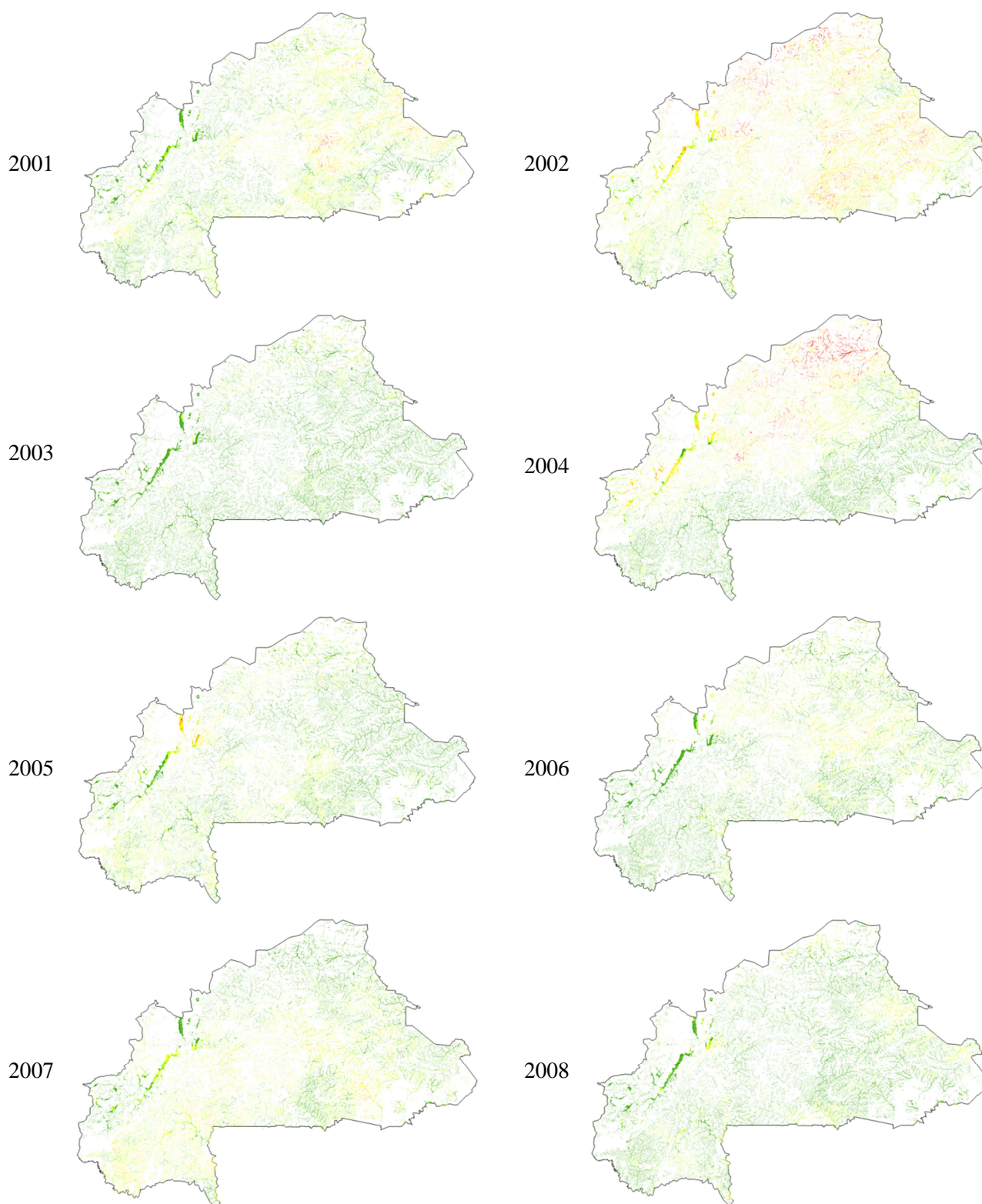


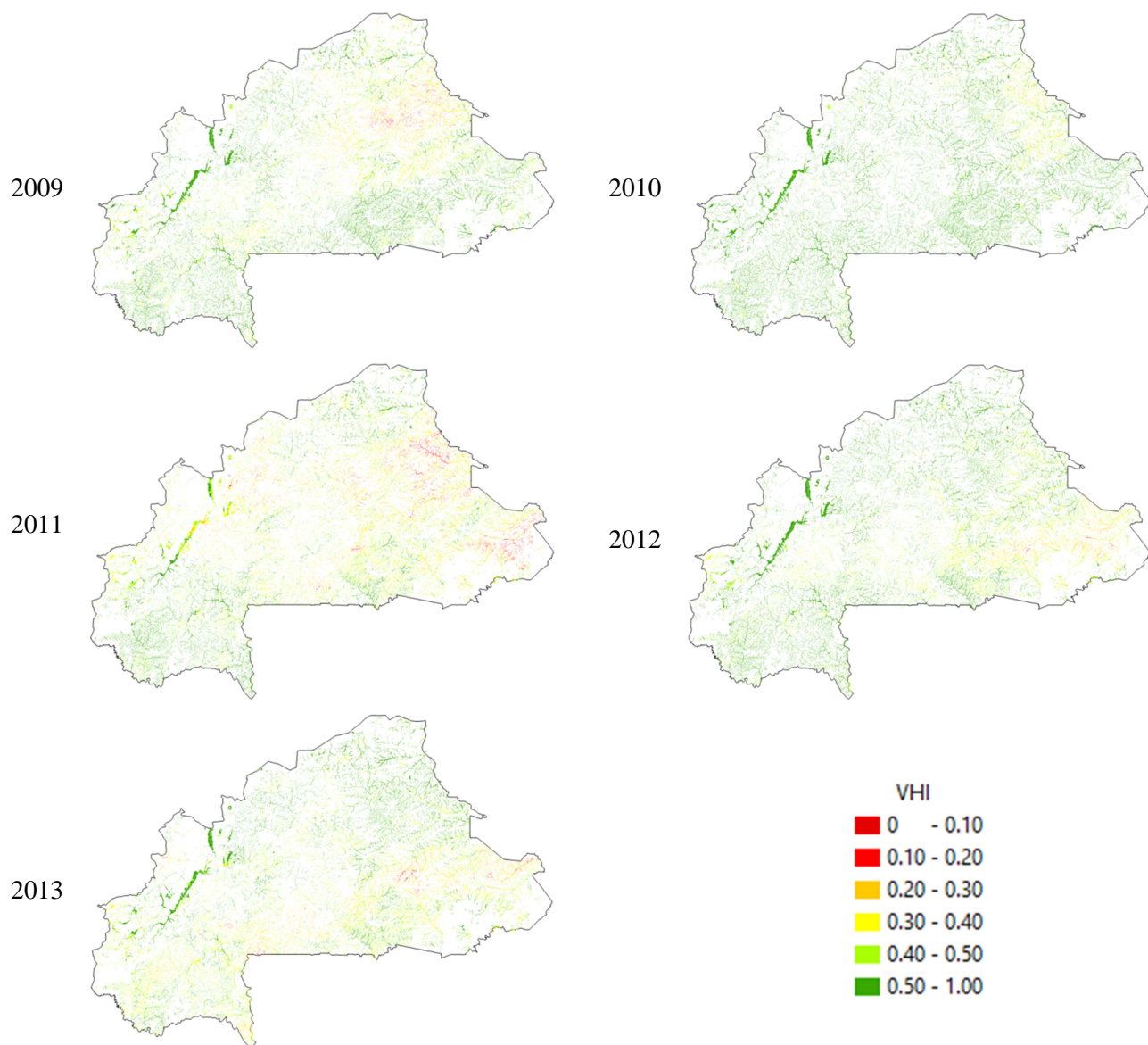
Annexe 3 : Moyenne périodique du *VHI* sur le long terme (2001-2013)



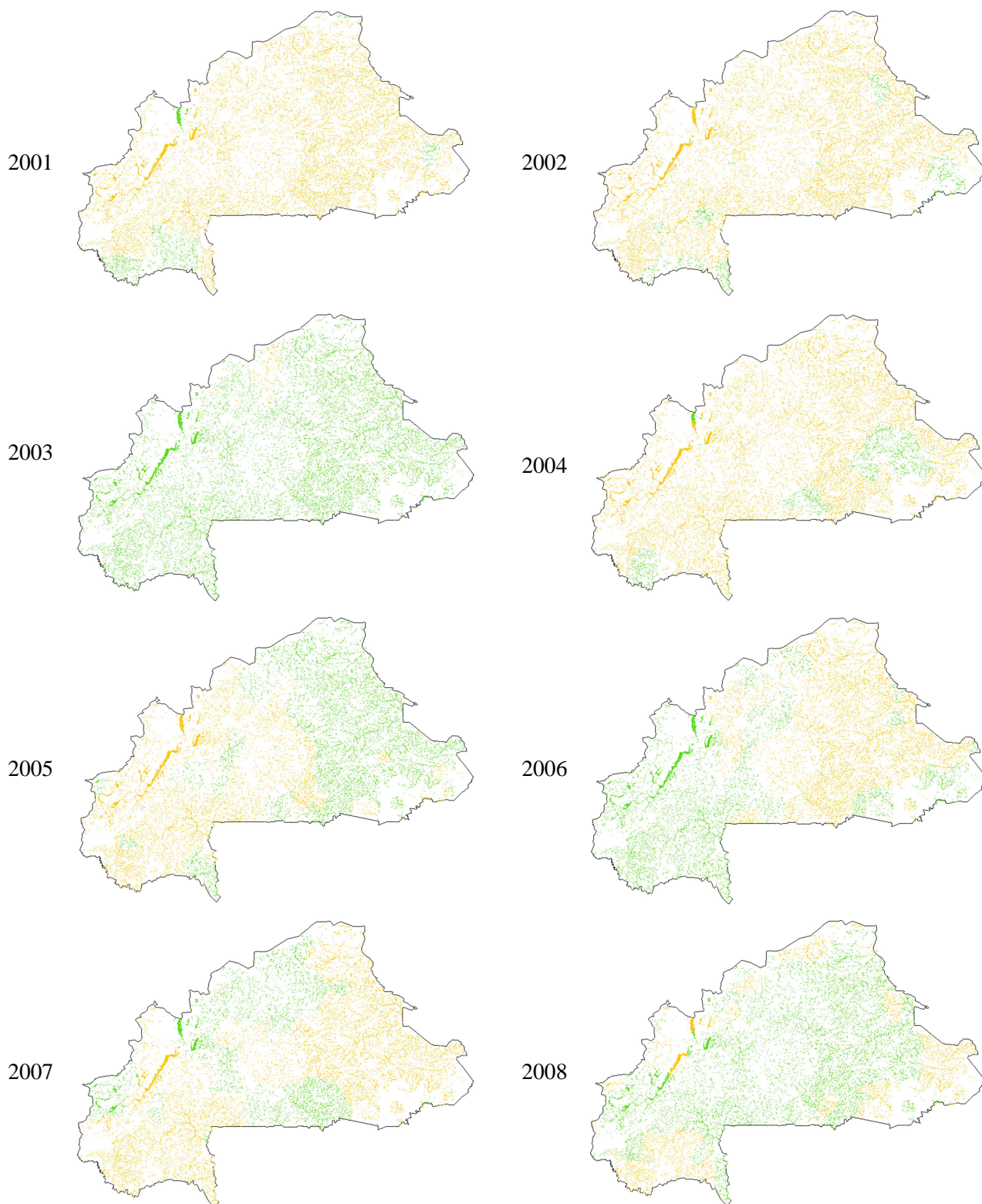
VHI 0 - 0.10 0.10 - 0.20 0.20 - 0.30 0.30 - 0.40 0.40 - 0.50 0.50 - 1.00

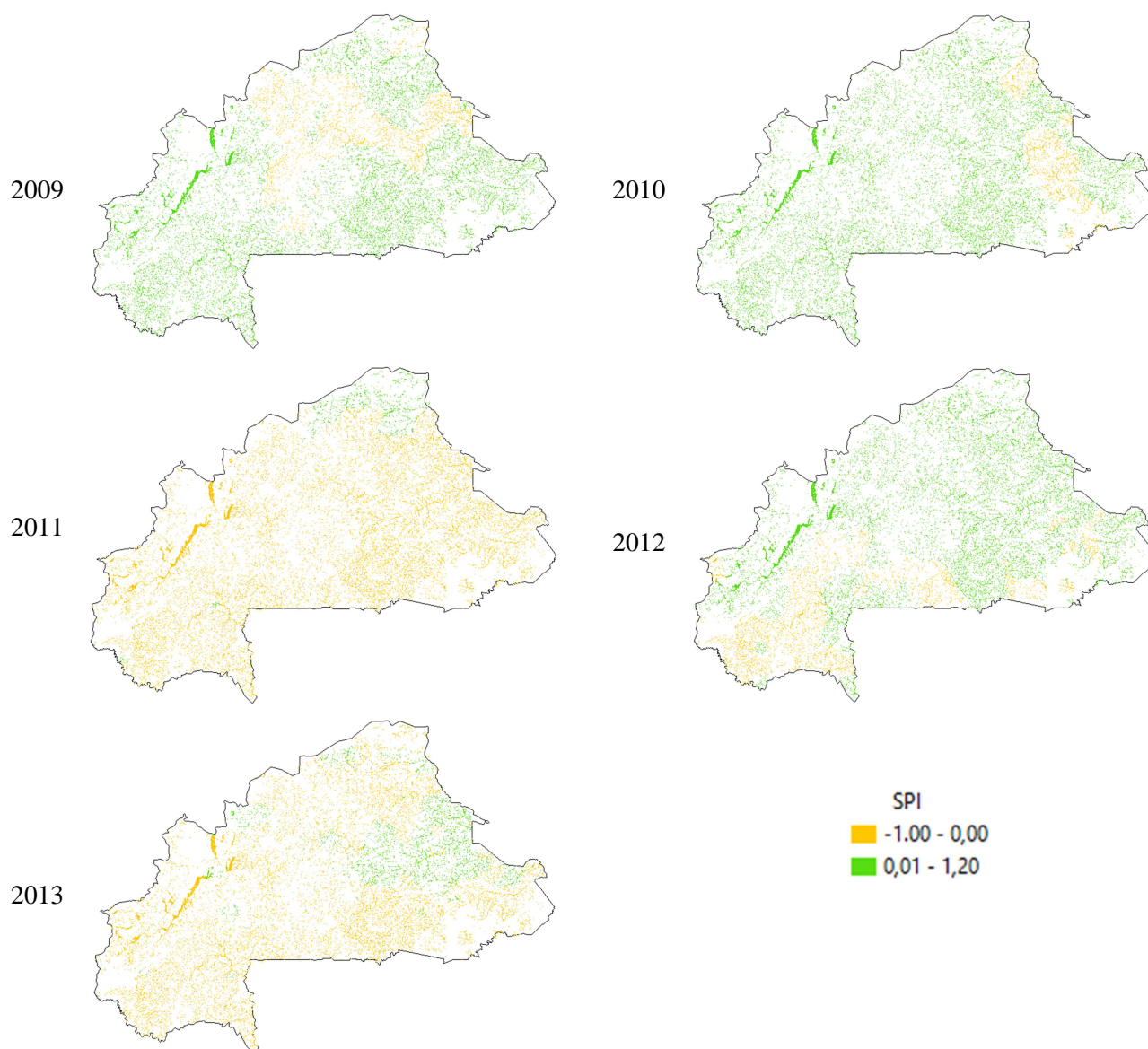
Annexe 4 : Moyenne saisonnière (P10 à P19) du *VHI* sur le long terme



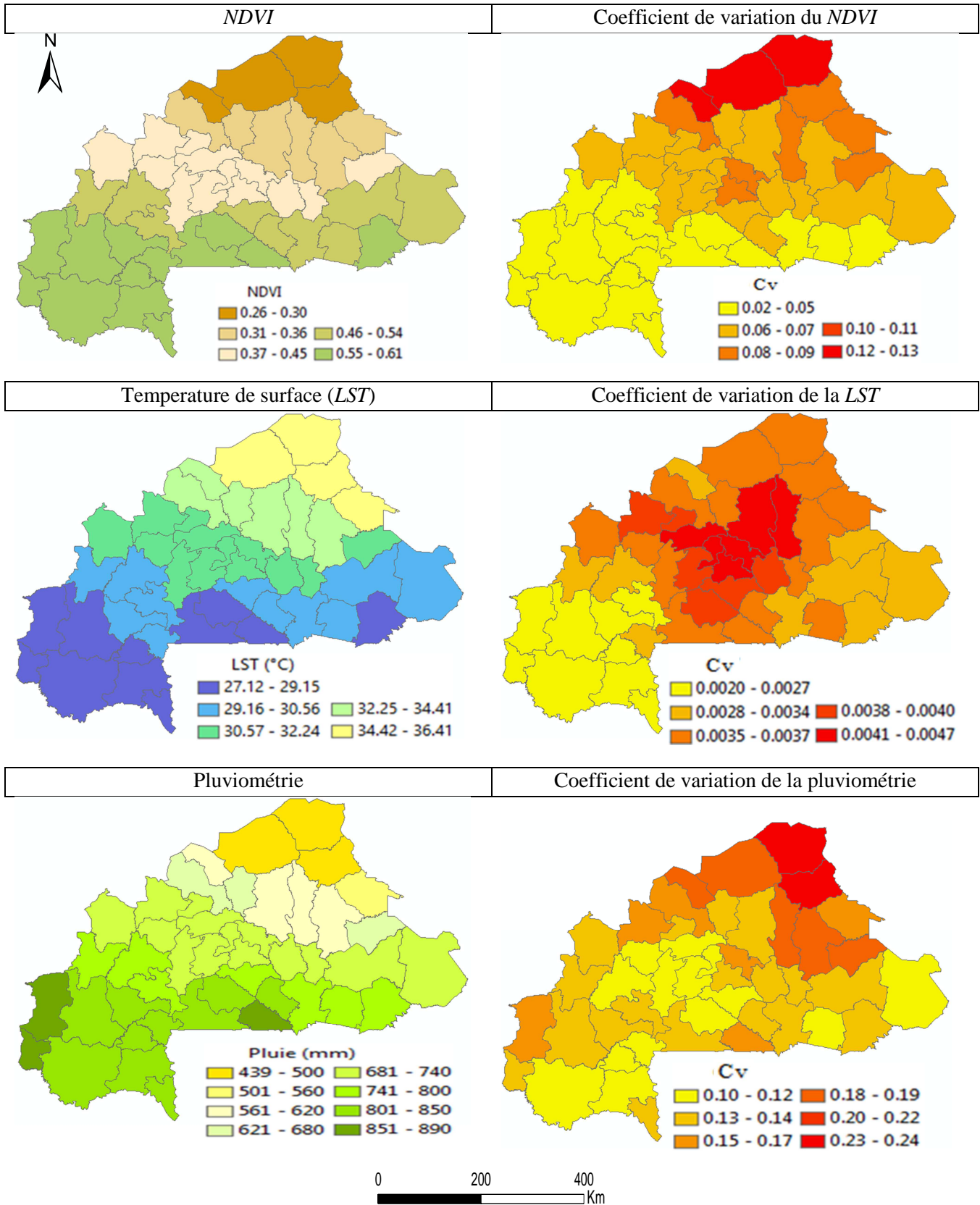


Annexe 5 : Moyenne saisonnière (P10 à P19) du SPI sur le long terme

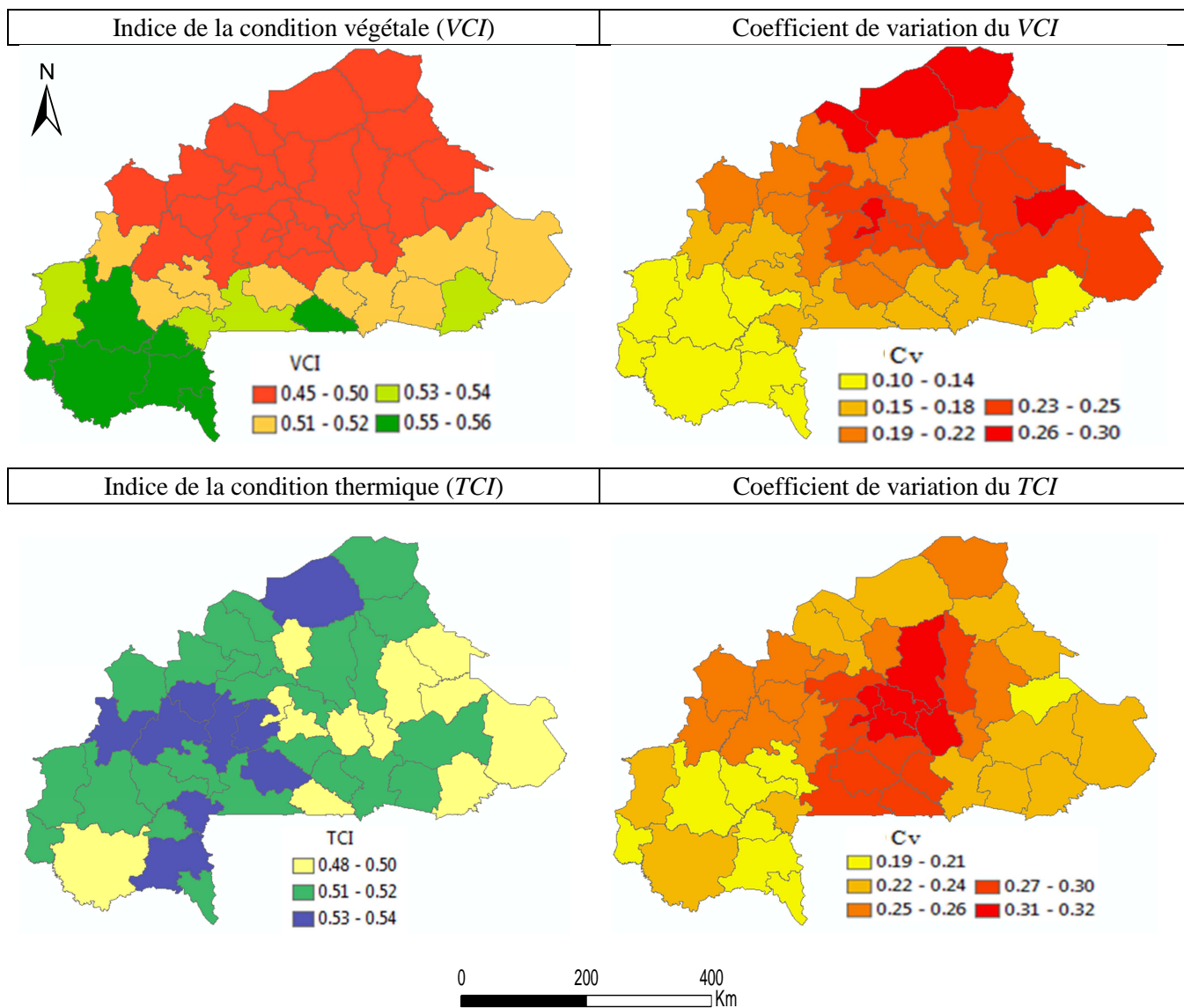




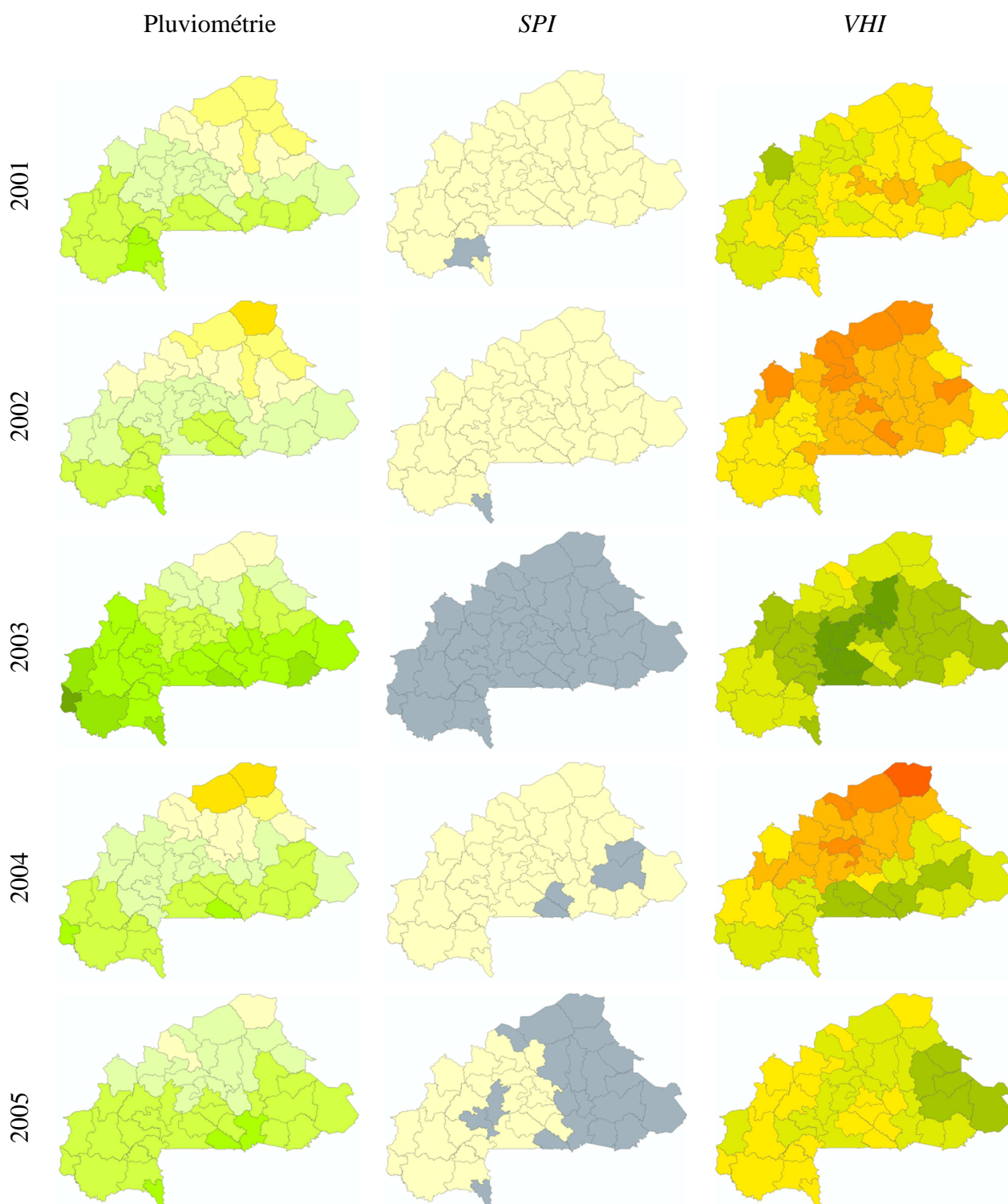
Annexe 6 : Moyenne saisonnière du NDVI, de la LST et de la pluviométrie par province

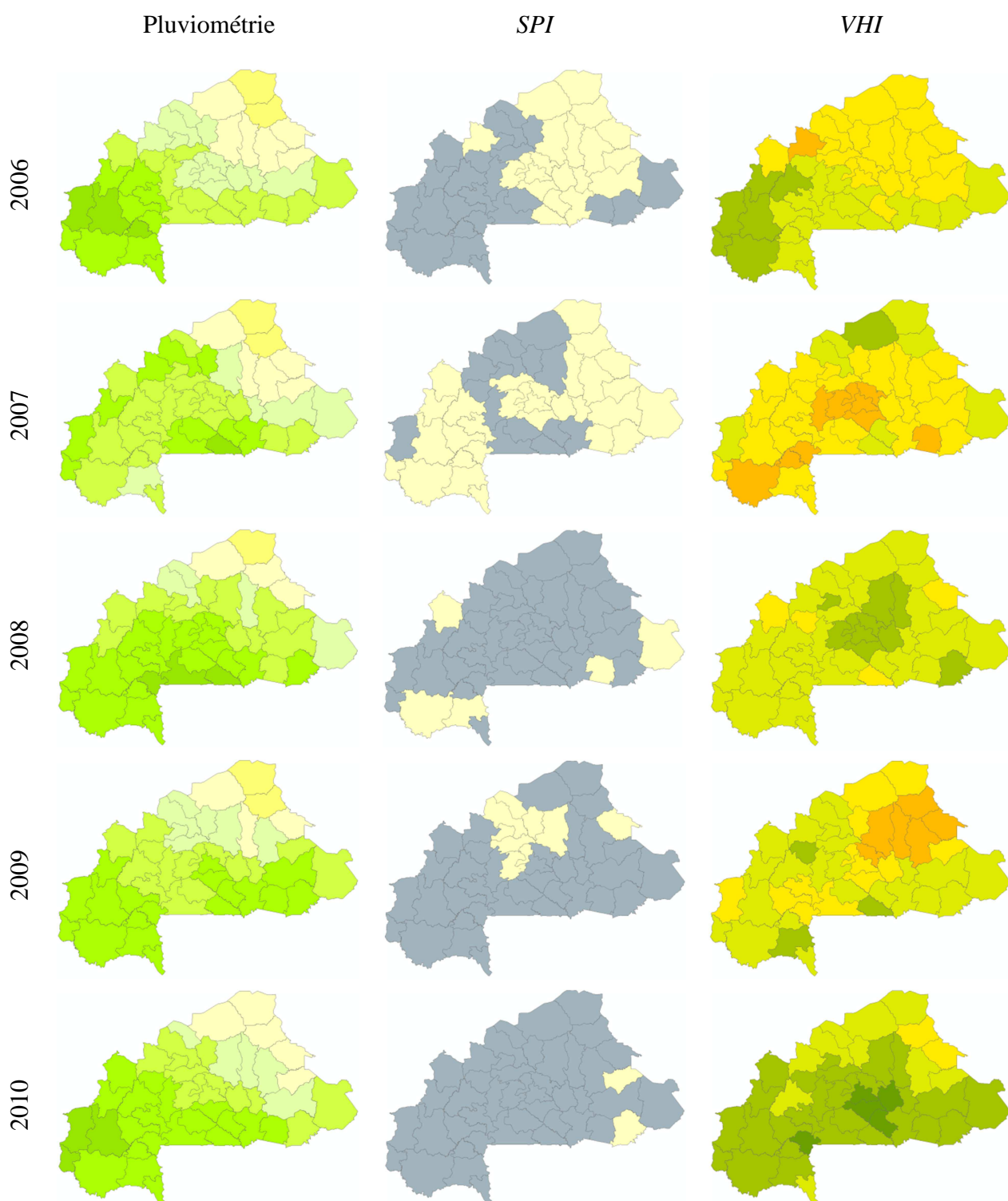


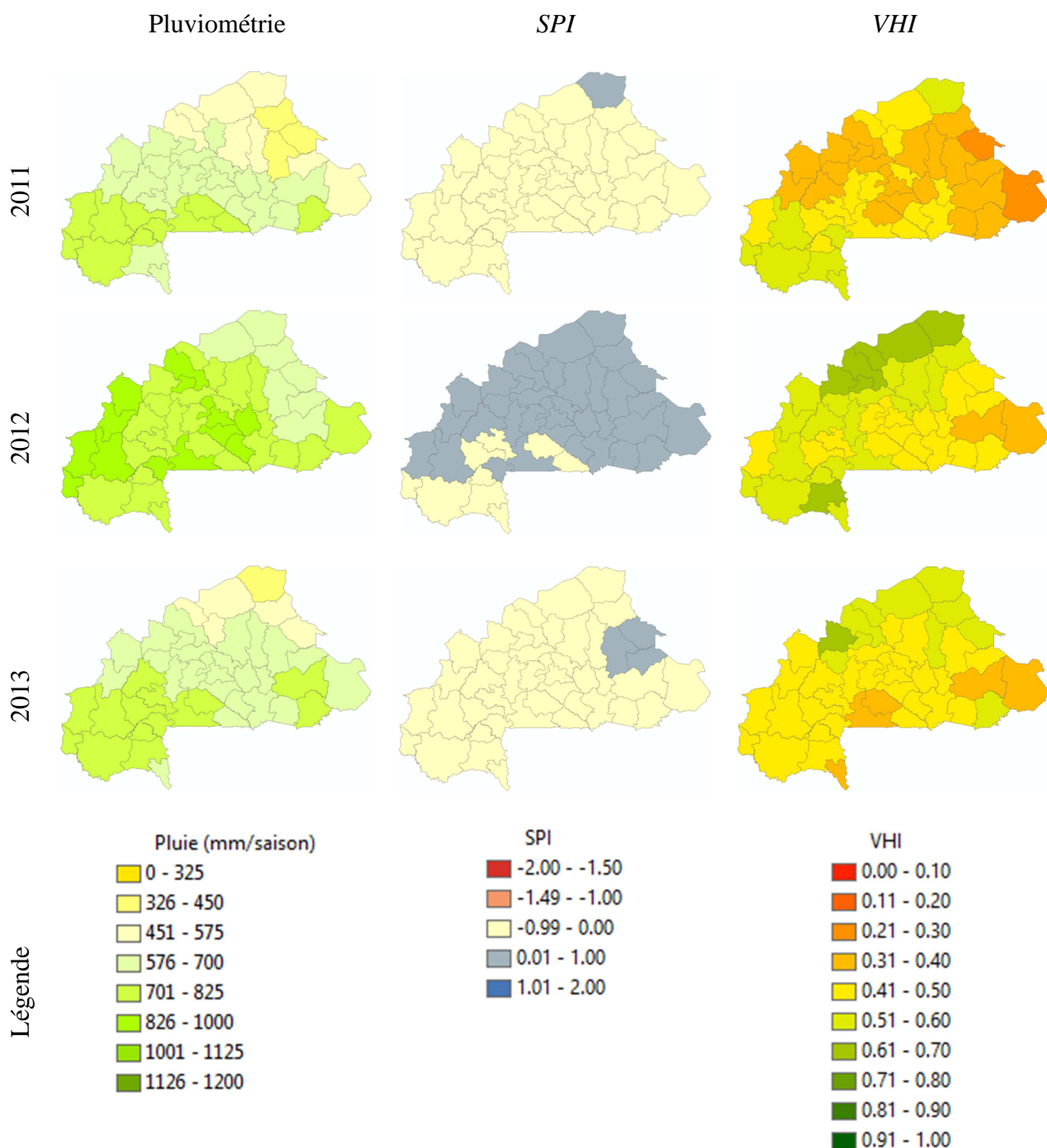
Annexe 7 : Moyenne saisonnière du VCI et du TCI des bas-fonds regroupés par province



Annexe 8 : Evolution saisonnière de la pluviométrie, du *SPI* et du *VHI* entre 2001 et 2013







Annexe 9 : Fréquence périodique de la sécheresse avec le VHI

