



HAL
open science

**Apport de la télédétection spatiale pour l'étude
multiscale des interactions climat-surface en Afrique
de l'Ouest : étude du bassin versant de l'Ouémé
supérieur (Bénin)**

Thi Phuong Thao Do

► **To cite this version:**

Thi Phuong Thao Do. Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiscale des interactions climat-surface en Afrique de l'Ouest : étude du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin). Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2014. Français. NNT : 2014GRENU025 . tel-01548482

HAL Id: tel-01548482

<https://theses.hal.science/tel-01548482>

Submitted on 27 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Thi Phuong Thao DO

Thèse dirigée par **Sylvain BIGOT**

préparée au sein du **Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)**
dans l'**École Doctorale Terre - Univers - Environnement**

Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiscalaire des interactions climat - surface en Afrique de l'Ouest : Etude du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin)

Thèse soutenue publiquement le **03 novembre 2014**,
devant le jury composé de :

M. Téléphore BROU

PR, Université de la Réunion (Rapporteur)

M. Vincent DUBREUIL

PR, Université Rennes 2 – Haute Bretagne (Rapporteur)

M. Luc DESCROIX

DR IRD, Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (Examinateur)

Mme Nadine DESSAY

IR, Maison de la Télédétection de Montpellier (Examinatrice)

Mme Sylvie GALLE

CR IRD, LTHE, Grenoble (Examinatrice)

Mme Sandra ROME

MCf, Université Joseph Fourier - LTHE, Grenoble (Examinatrice)

M. Sylvain BIGOT

PR, Université Joseph Fourier - LTHE, Grenoble (Directeur de thèse)



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont collaboré, directement ou indirectement, à l'élaboration de cette thèse.

Je remercie en premier lieu les Directeurs de l'École Doctorale Terre-Univers-Environnement de l'Université de Grenoble, **Jean BRAUN** et **Guy DELRIEU**, pour m'avoir accepté en tant que doctorante au sein de cette école.

Je tiens également à remercier **Thierry LEBEL**, Directeur du LTHE pour son chaleureux accueil au sein du laboratoire, et toute l'équipe HYBIS au sein de laquelle j'ai développé cette thèse, et notamment sa responsable, **Sylvie GALLE**, pour son aide et sa confiance.

Mes plus grands remerciements s'adressent bien évidemment à mon Directeur de thèse, **Sylvain BIGOT**, pour la confiance qu'il m'a donné en acceptant d'encadrer ce travail de doctorat, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacré à diriger cette recherche. J'ai énormément apprécié sa rigueur au travail qui m'a permis de progresser de manière régulière. Il m'a surtout apporté un soutien sans faille, prodiguant de nombreux conseils judicieux et donné les moyens d'effectuer mon travail de recherche dans de très bonnes conditions. Je lui suis très reconnaissante pour son soutien et ses encouragements pendant toute la durée de ce travail.

J'ai aussi pu profiter du soutien d'**Isabella ZIN** au début de ma thèse. Grâce à son enthousiasme et son courage pour m'expliquer les premières approches en utilisant IDL, ses compétences en informatique se sont avérées très utiles pour me lancer dans la thèse.

Au détour de ce travail, j'ai également eu la chance de rencontrer au LTHE **Guillaume QUANTIN** et **Véronique CHAFFARD** ; ils ont toujours été prêts à me fournir des données *in situ* provenant du projet AMMA-Catch dont j'avais besoin au fur et à mesure des analyses. Je les remercie aussi tous les deux pour avoir largement facilité mon intégration.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres de mon Comité de thèse pour leurs précieux conseils, apports et soutiens tout au long de ce travail, en particulier **Sandra LUQUE** et **Luc DESCROIX**.

J'adresse mes remerciements également à **Sandra ROME** et **Nadine DESSAY**, pour avoir accepté d'être membres du jury, et particulièrement aussi à **Télesphore BROU** et **Vincent DUBREUIL** pour avoir accepté d'être aussi rapporteurs de ce travail.

Ensuite, je tiens à remercier profondément mes collègues de l'équipe de Cartographie à l'Université des Mines et de Géologie de Hanoï pour leurs encouragements pour faire cette thèse.

Une grande merci sincèrement à toute ma famille, mes amis, mes collègues de France et du Vietnam, pour leur soutien moral et leurs encouragements durant cette expérience très riche et intéressante, sans oublier d'adresser une profonde reconnaissance à mon mari et ma fille pour m'avoir toujours soutenu pendant ces quatre années de travail.

Enfin, je tiens à remercier le gouvernement du Vietnam, le Ministère de l'Education et de la Formation, l'ambassade de France au Vietnam et l'IRD à Montpellier, qui m'ont soutenu financièrement d'une manière ou d'une autre au cours de cette thèse.

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	3
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	5
INTRODUCTION GENERALE	7
CONTEXTE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE.....	7
PROBLEMATIQUE ET QUESTIONNEMENT	12
OBJECTIFS ET RESULTATS ATTENDUS.....	13
ORGANISATION DE LA THESE.....	13
PARTIE 1 : LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	15
1.1. LA VARIABILITE CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST : LES PRINCIPALES EVOLUTIONS OBSERVEES AU COURS DES 60 DERNIERES ANNEES	17
1.1.1. Mécanismes principaux du climat en Afrique de l'Ouest.....	17
1.1.2. Synthèse sur la variabilité interannuelle des précipitations ouest-africaines.....	19
1.1.3. Les évolutions constatées de la relation pluie-débit.....	21
1.1.4. Les conséquences environnementales à l'échelle des interactions climat-végétation	23
1.2. LE PROGRAMME AMMA : OBJECTIFS ET APPROCHES MULTI-EHELLES.....	25
1.2.1. Les objectifs scientifiques, mesures et dispositifs	25
1.2.2. Les principales échelles spatiales d'analyse.....	26
1.2.3. Les projets en lien avec AMMA.....	26
1.2.3.1. Système d'observation de AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique).....	26
1.2.4. Justification du choix de la zone d'étude de l'Ouémé Supérieur.....	29
1.3. LE BASSIN VERSANT EXPERIMENTAL DE L'OUEME SUPERIEUR AU BENIN	30
1.3.1. Localisation géographique.....	30
1.3.2. Les conditions hydro-climatiques moyennes	31
1.3.3. L'occupation du sol et les principales associations végétales.....	33
1.4. CONCLUSION DE LA PARTIE 1	38
PARTIE 2 : DONNEES SATELLITAIRES ANALYSEES ET METHODOLOGIES RETENUES	39
2.1. LA TELEDETECTION SATELLITAIRE POUR L'ETUDE DES INTERACTIONS BIOPHYSIQUES CLIMAT-VEGETATION	41
2.1.1. Rappel des fondements théoriques de la télédétection.....	41
2.1.2. Construction d'indices néo-canaux (de type NDVI ou LAI).....	41
2.1.3. Capacité de l'information satellitaire dans l'étude des interactions climat-végétation	44
2.2. LES DONNEES ENVIRONNEMENTALES ANALYSEES	46
2.2.1. Les données satellitaires disponibles	46
2.2.2. Les données pluviométriques stationnelles analysées.....	51
2.2.3. Les cartes d'occupation du sol à l'échelle de l'Ouémé supérieur.....	52
2.3. METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES	57
2.3.1. La classification des images issues de la télédétection.....	57
2.3.2. L'Analyse en Composantes Principales (ACP)	58
2.3.3. La Singular Value Decomposition (SVD)	59
2.4. CONCLUSION DE LA PARTIE 2	61
PARTIE 3 : OCCUPATION DU SOL ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES : PRINCIPALES TENDANCES ET TYPOLOGIE EN PERSPECTIVE D'UNE ANALYSE ECO-CLIMATIQUE	63
3.1. L'HETEROGENEITE SPATIALE ET APPROCHE MULTISCALEIRE	64

3.2. ÉCHELLES ADAPTEES POUR LE SUIVI DE LA VEGETATION DE L'OUEME	66
3.2.1. Définition de l'occupation du sol sur la période 2002-2012	66
3.2.2. Mise en perspective des évolutions d'occupation du sol	87
3.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 3	91
PARTIE 4 : ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ACTIVITE VEGETALE AUX ECHELLES SAISONNIERE ET INTERANNUELLE	93
4.1. COMPARAISON DES PRODUITS SATELLITAIRES ET CARACTERISATION DES VARIABILITES PHENOLOGIQUES	95
4.1.1. Les principales différenciations saisonnières	95
4.1.2. La prise en compte de la nébulosité dans l'analyse des phénophases saisonnières	99
4.1.3. Synthèse sur l'utilisation des données SPOT-VGT et MODIS pour l'estimation de la dynamique interannuelle.....	103
4.2. L'ACTIVITE VEGETALE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME SUPERIEUR SELON L'OCCUPATION DU SOL (2002-2012)	110
4.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 4	124
PARTIE 5 : LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE ET LES RELATIONS SPATIO-TEMPORELLES AVEC L'ACTIVITE VEGETALE A L'ECHELLE DE L'OUEME SUPERIEUR	125
5.1. ANALYSES DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES.....	126
5.1.1. La variabilité pluviométrique ouest-africaine au cours des dernières décennies	126
5.1.2. Quelle variabilité observée à l'échelle du Bénin et de l'Ouémé supérieur ?	127
5.2. L'ACTIVITE DE LA VEGETATION EN REPOSE AUX PRECIPITATIONS (2002-2012)	138
5.2.1. La variabilité spatio-temporelle des liens climat-végétation.....	139
5.2.2. Le déphasage temporel régional entre précipitations et NDVI	142
5.2.3. Synthèse sur les modes de variabilité interannuelle entre NDVI et précipitations	146
5.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 5	153
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	155
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	159
ANNEXES.....	177
LISTE DES FIGURES.....	203
LISTE DES TABLEAUX	211
LISTE DES ANNEXES	212
TABLE DES MATIERES	213

Liste des abréviations et acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales
ALMIP	AMMA Land Surface Model Intercomparison Project
AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CATCH	Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
EROS	Earth Resources Observation & Science
ETM +	Enhanced Thematic Mapper Plus
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation
FVC	Fractional Vegetation Cover
GLC	Global Land Cover
GDEM	Global Digital Elevation Model
GHCN	Global Historical Climatology Network
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies
HDF-EOS	Hierarchical Data Format - Earth Observing System
HRV	High Resolution Visible
IJRSA	International Journal of Remote Sensing Applications
IMPETUS	Integratives Management-Projekt für einen Effizienten und Tragfähigen Umgang mit Süßwasser in Westafrika (<i>Approche intégrée pour la gestion efficace des ressources en eau en Afrique occidentale</i>)
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
LAI	Leaf Area Index
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite (System)
LSA-SAF	Land Surface Analysis of Satellite Application Facility
LSM	Land Surface Model
LU / LC	Land Use / Land Cover
MIR	Moyen InfraRouge
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Seconde Génération
MSS	Multi-spectral Scanner
MVC	Maximum Value Composite
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OHHVO	Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé
OLI	Operational Land Imager
ORE	Observatoire de Recherche en Environnement
PIR	Proche Infrarouge
RFE	Rainfall Estimation
RIVERTWIN	Regional Model for Integrated Water Management in Twinned River Basins
ROI	Region of Interest
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SPOT/VGT	Satellite Pour l'Observation de la Terre / Vegetation
SVD	Singulier Values Decomposition
TIRs	Thermal InfraRed Sensor
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
VITO	Flemish Institute for Technological Research
ZCIT	Zone de Convergence InterTropicale

INTRODUCTION GENERALE

Contexte et positionnement scientifique

Selon les nouveaux résultats publiés par le GIEC (2013), depuis les années 1950, beaucoup de changements climatiques observés, particulièrement le réchauffement, sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. Les mesures indiquent une hausse de la température moyenne mondiale de l'ordre de 0,2 à 0,6°C depuis la fin du XIX^{ème} siècle (GIEC, 2007). Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude enregistrée, conduisant à des changements significatifs du cycle mondial de l'eau en réponse au réchauffement. Les changements projetés à l'échelle régionale seront donc fortement influencés par la variabilité climatique observée aux échelles supérieures (globale ou hémisphérique). Dans de nombreuses régions des moyennes latitudes et dans les régions subtropicales arides, les précipitations diminueront probablement, tandis que dans de nombreuses régions humides des moyennes latitudes, elles augmenteront a priori, les épisodes de précipitations extrêmes devenant très probablement plus intenses et fréquents (GIEC, 2013).

Le changement climatique exacerbe d'autres impacts sur la biodiversité, et les écosystèmes terrestres sont substantiellement modifiés par exemple par le changement de couverture végétale, de biomasse, de la phénologie des plantes ou de la domination de certains groupes végétaux. En parallèle, d'autres mécanismes tels que la conversion d'espaces naturels pour l'agriculture ou les différents établissements humains (urbains et agricoles), influencent et modifient les climats locaux et régionaux. Au fil du temps, les régions où le climat est affecté peuvent d'ailleurs s'étendre au-delà de l'emplacement où l'écosystème a changé (GIEC, 2014).

En Afrique de l'Ouest, la température a augmenté de plus de 2°C au cours des dernières décennies en raison des changements climatiques (Sultan *et al.*, 2013). Le cas du Bénin est assez représentatif de ces évolutions thermiques (figure 0.1).

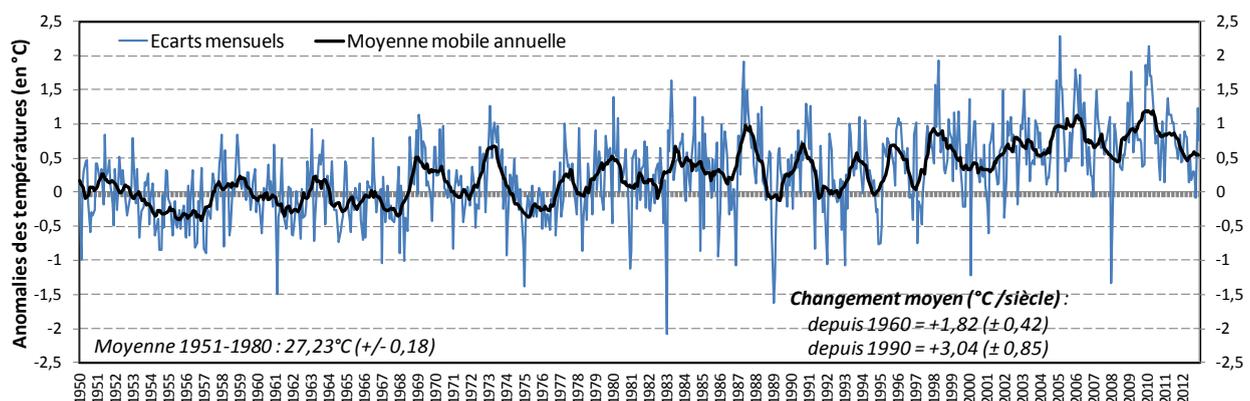


Figure 0.1 : Ecarts à la moyenne 1950-1980 des températures mensuelles moyennes calculées au Bénin sur la période 1950-2012 à partir de 7 stations réparties dans le pays (la moyenne mobile annuelle est indiquée par la courbe en gras). Calculés grâce aux données mises à disposition par le Berkeley Earth.

L'ensemble de ces évolutions aboutit à une hausse de plus de 1,8°C depuis 1960, et plus de 3°C depuis 1990, soit de l'ordre de celles observées à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, mais supérieures à celles observées pour la moyenne africaine (tableau 0.1). L'augmentation moyenne au Bénin est d'environ +0,24°C par décennie, le taux d'augmentation étant plus rapide en avril-mai-juin, avec +0,31°C (Mc Sweeney *et al.*, 2010). En parallèle, et selon les

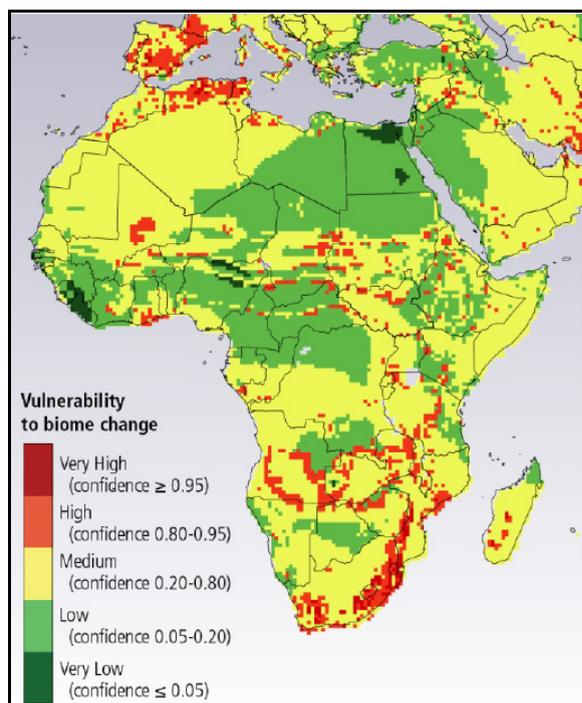
mêmes auteurs, le nombre de jours très chauds enregistré chaque année au Bénin est passé à 39, soit une augmentation de 10,7 % entre 1960 et 2003. En même temps, les précipitations ont diminué entre les années 1960 et 1980, surtout en avril-mai-juin, avec un taux moyen de 3,9 mm par mois, soit 3,5 % par décennie. Mais les observations semblent suggérer certaines hausses des précipitations depuis les années 1990 au Bénin, et plus généralement, en Afrique de l'Ouest.

Tableau 0.1 : Comparaison entre les évolutions thermiques (en °C par siècle) observées au Bénin et celles observées à des échelles géographiques supérieures depuis quatre dates seuils (les évolutions au Bénin sont calculées à partir de 7 stations nationales ; les taux d'incertitude sont indiqués en italique ; adapté à partir des résultats fournis par le Berkeley Earth).

Domaines géographiques	1860	1910	1960	1990
Bénin	0,99 <i>± 0,22</i>	0,63 <i>± 0,13</i>	1,82 <i>± 0,42</i>	3,04 <i>± 0,85</i>
Afrique de l'Ouest	0,92 <i>± 0,20</i>	0,86 <i>± 0,13</i>	2,02 <i>± 0,31</i>	3,09 <i>± 0,54</i>
Afrique	0,83 <i>± 0,20</i>	0,92 <i>± 0,12</i>	1,99 <i>± 0,21</i>	2,49 <i>± 0,45</i>
Hémisphère Nord	0,96 <i>± 0,10</i>	1,19 <i>± 0,05</i>	2,56 <i>± 0,20</i>	3,56 <i>± 0,20</i>
Moyenne continentale	0,91 <i>± 0,08</i>	1,11 <i>± 0,03</i>	2,16 <i>± 0,11</i>	2,78 <i>± 0,13</i>

L'Afrique de l'Ouest est également une région que le GIEC (2007) a identifié comme très vulnérable aux variations naturelles, et particulièrement sensible au changement climatique en cours (figure 0.2).

Figure 0.2 : Vulnérabilité des principaux biomes africains qui changeront sous l'influence du changement climatique entre la période historique 1901-2002 et celle projetée 2071-2100, et incertitude des simulations se basant sur la synthèse des 9 principaux scénarios de changement climatique potentiel (adapté d'après un document du GIEC de 2013, qui cite un document de Gonzalez *et al.*, 2010).



En conséquence, tous les types d'écosystèmes terrestres en Afrique, y compris les déserts, les prairies et les zones arborées (arbustives, savaniques et forestières) ont changé, influencées dans leur distribution, leur évolution ou dynamique. Il y a donc un ensemble complexe de changements dans la répartition spatiale des formations végétales naturelles restantes (Bégué *et al.*, 2011), avec une forte augmentation des terres cultivées et des surfaces d'érosion liées à la végétation clairsemée (Ruelland *et al.*, 2011).

Régionalement, les interactions sol-atmosphère pourraient avoir un rôle important sur les variations et changements des précipitations. Selon Abou Ali (2010), la pluviométrie peut donc être considérée comme le paramètre le plus pertinent pour caractériser ou analyser l'évolution du climat ouest-africain. Ces dernières années, la variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest a montré de fortes alternances entre des années très humides et des années très sèches (d'une année à l'autre). Ce nouveau mode de variabilité rend donc les prévisions interannuelles encore plus difficiles (Ali et Lebel, 2009). Selon les rapports du GIEC (2007, 2013), les projections climatiques produites en moyennant un large éventail de modélisations sont inappropriées ou ne concordent guère pour le cas de l'Afrique de l'Ouest (figure 0.3).

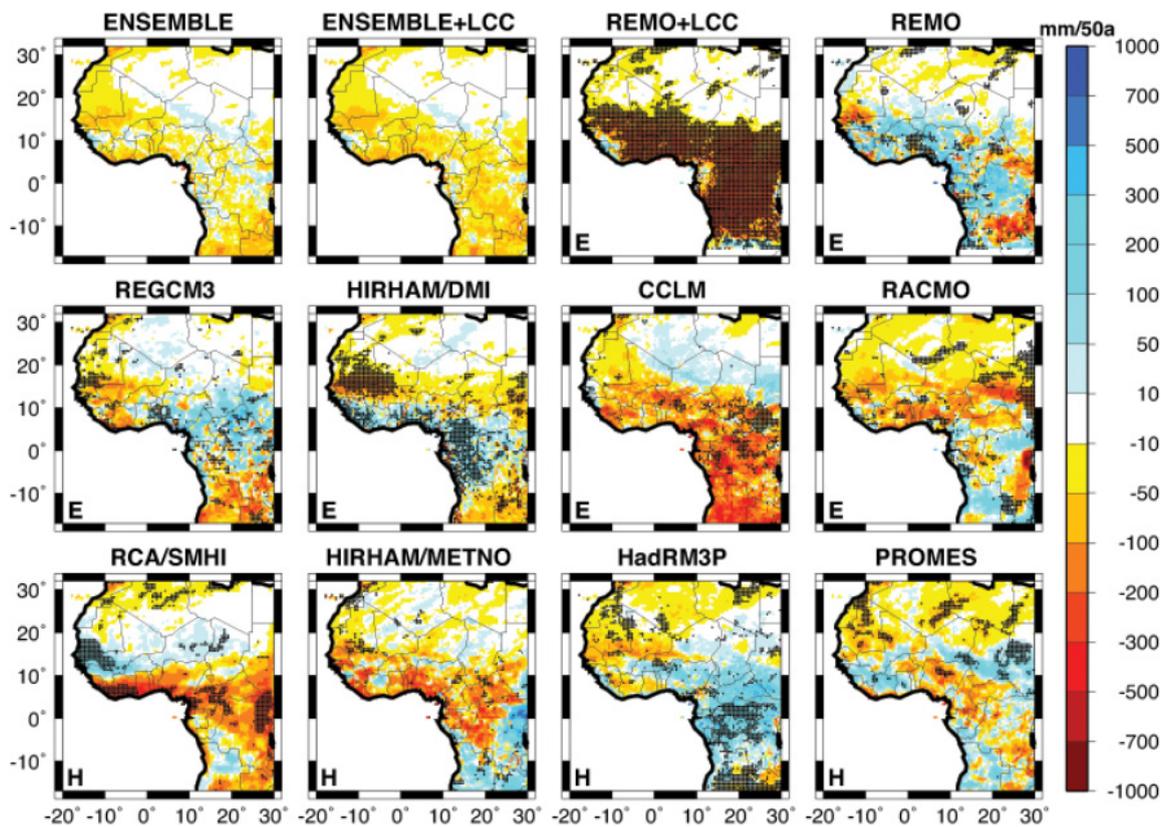


Figure 0.3 : Changements attendus, à l'échelle d'une partie de l'Afrique, des précipitations annuelles sur la période 2001-2050, et selon différentes simulations et combinaisons numériques régionales du climat utilisant le même scénario de base (SRES A1B) ; les résultats significatifs au seuil de 95 % sont indiqués par des points grisés (adapté d'après GIEC, 2013, citant un document de Paeth *et al.*, 2011).

Les modèles climatiques ne peuvent ainsi pas rendre compte des caractéristiques fondamentales de la variabilité actuelle du climat de cette région tropicale (Sultan *et al.*, 2013). Pourtant, malgré les incertitudes et la gamme attendue des grandes variations ainsi que des tendances prévues des précipitations et des températures, les prévisions indiquent qu'elles ont déjà un impact essentiel sur les écosystèmes (Ali, 2010 ; figures 0.4 et 0.5).

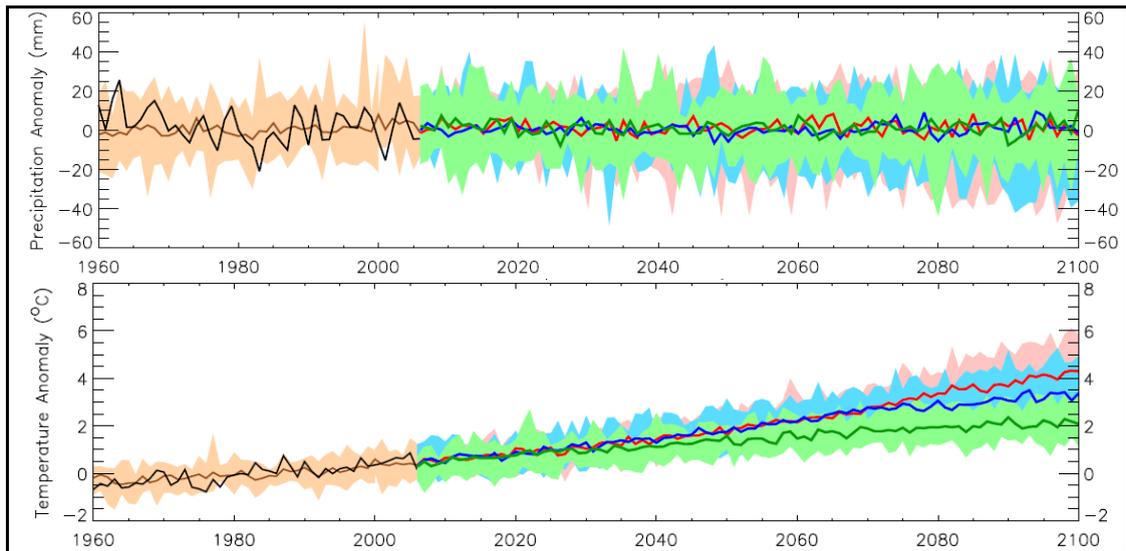


Figure 0.4 : Tendances et amplitudes (graphique du haut) des anomalies des températures moyennes de surface et (graphique du bas) des anomalies pluviométriques moyennes au Bénin sur la période observée (1960-2006) et simulée (2007-2100) selon les 3 principaux scénarios du GIEC (2007), A2 en rouge, A1B en bleu et B1 en vert ; toutes les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1979-99 ; les simulations sont issues de la synthèse de 15 modèles ; sur la période observée, les courbes en gras signalent la moyenne et la médiane ; sur la période simulée, les courbes en gras signalent les médianes). D'après Mc Sweeney *et al.* (2010).

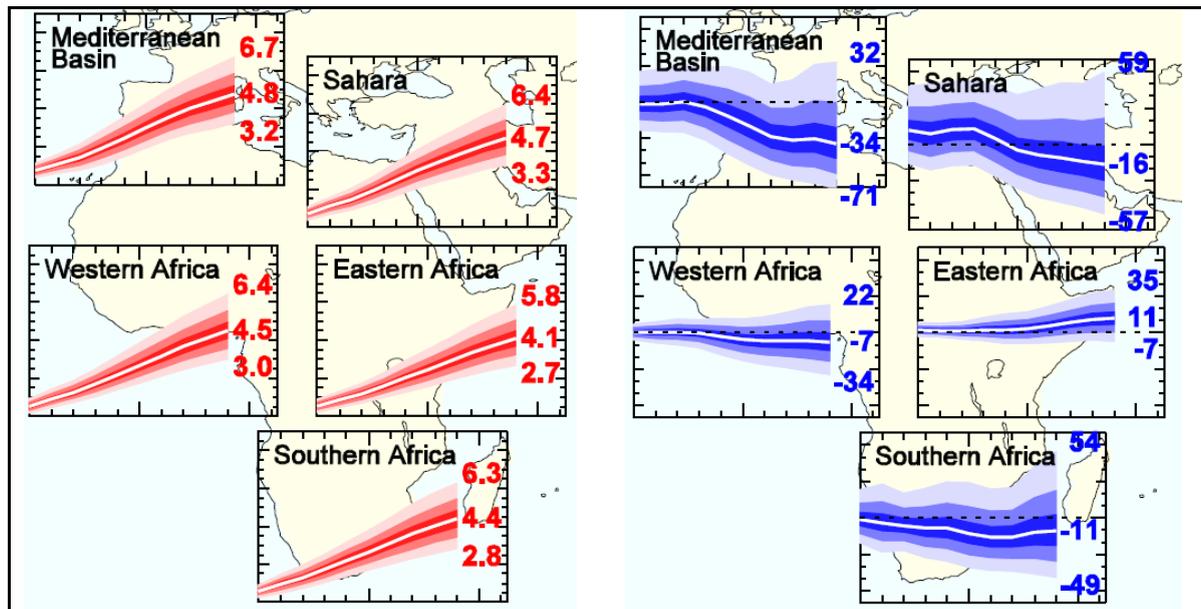


Figure 0.5 : Résumé des principales évolutions attendues à l'échelle africaine sur la période 2080-2099 des fonctions de distribution des percentiles (5, 17, 33, 50, 66, 83 et 95 %) des températures (graphique de gauche) et des précipitations (graphique de droite), selon une combinaison des résultats issus du scénario SRES A1B et CMIP3-Ensemble, et en se basant sur la moyenne de 1961-1990 (adapté à partir de GIEC, 2013, citant un document de Harris *et al.*, 2012).

Charney (1975) a été le précurseur de l'étude de ces interactions, en évoquant le rôle important des changements de végétation et d'usage du sol. Ce point de vue est désormais consensuel dans la communauté scientifique, mais il demeure de nombreux paramètres, interactions complexes et facteurs d'échelles mal compris, particulièrement dans l'établissement des prévisions climatiques pour le 21^{ème} siècle. Ainsi, par exemple, on citera

le rôle d'un changement dans les conditions océaniques affectant la mousson (figure 0.6 ; Druyan, 2010 ; Leduc, 2012), celui des rétroactions entre l'atmosphère et les états de surface du sol ou un changement dans les grands courants de la circulation atmosphérique (Mahé, 2006). Ainsi, depuis surtout deux décennies, de nombreuses études s'attellent à la compréhension du climat en Afrique de l'Ouest. Cependant, la complexité du phénomène de mousson alliée au manque d'observations rendent les recherches difficiles.

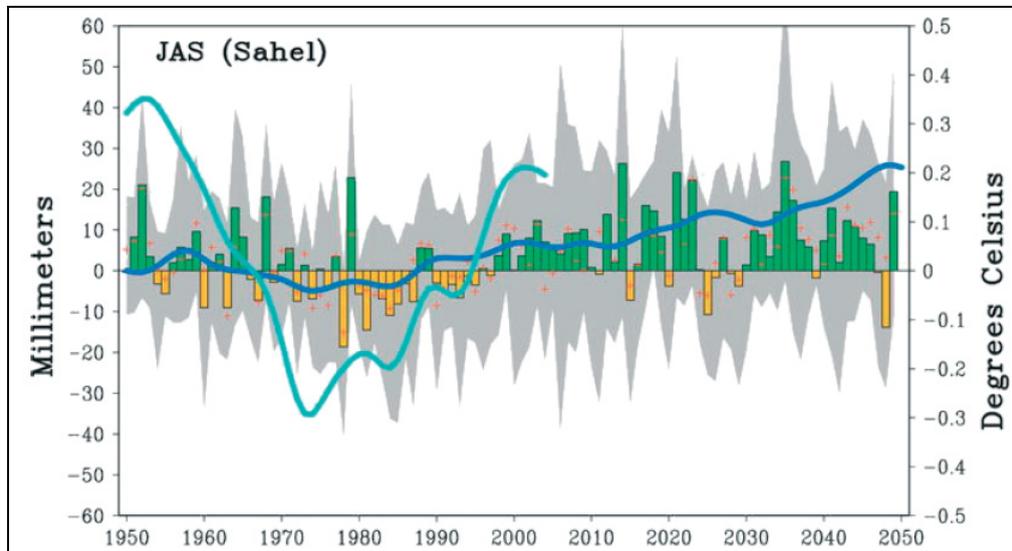


Figure 0.6 : Synthèse de la variabilité des anomalies pluviométriques de l'espace sahélien (10–20°N / 17°W–38°E) en juin-juillet-août sur la période 1950-2049, selon le scénario A1B du GIEC (les anomalies indiquées en histogrammes sont calculées à l'échelle mensuelle par rapport à la moyenne 1950-99 ; elles sont définies à partir de la moyenne des sorties de 18 modèles couplés océan-atmosphère issues de la base de données IPCC/PCMDI/AR4 ; les croix rouges correspondent à la médiane des 18 modèles ; la zone grisée définit leur amplitude interquartile ; les courbes en bleu indiquent l'évolution observée (bleu clair) ou simulée (bleu foncé) d'un indice thermique de surface atlantiques, avec Atlantique Nord moins Atlantique Sud) ; tiré de Druyan (2010).

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) dont l'objectif principal est de mieux connaître les mécanismes et facettes de la mousson africaine, ainsi que les dynamiques régionales et répercussions des variations climatiques et environnementales sur les populations. En Afrique de l'Ouest, le climat crée une distribution spatiale assez lisible de la mosaïque des principaux types de végétation. Mais la définition aux échelles régionales et inférieures devient beaucoup plus complexe et moins documentée. Il est donc nécessaire désormais, après avoir longtemps étudié les variations pour des domaines relativement vastes, de prioriser les études faisant apparaître les contrastes, variabilités et différenciations dans le temps et dans l'espace pour des ensembles géographiques plus restreints, typiquement des espaces réduits mais assez cohérents.

L'apport de la télédétection satellitaire est fondamental dans ces suivis et analyses des évolutions environnementales, en particulier pour les zones tropicales où les réseaux de mesure sont parcellaires et difficiles à pérenniser. C'est aussi un moyen adapté pour établir des comparaisons spatialisées entre domaines, pour déterminer les sensibilités et impacts des variations climatiques, surtout pour le suivi de la végétation et des bilans hydrologiques en surface. Les approches peuvent être saisonnières et/ou interannuelles, avec des résolutions spatio-temporelles diverses, mais aussi des qualités de données très variables. La production

et mise à disposition de plus en plus importantes de ces bases de données satellitaires permettent la définition de nombreux indicateurs environnementaux calculés à partir de séries comportant souvent désormais plus de 10 ans de profondeur temporelle, et souvent même déjà deux décennies (Boschetti *et al.*, 2012). On citera par exemple, les plus connus et utilisés de ces indicateurs comme le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), le NDWI (*Normalized Difference Water Index*), le LAI (*Leaf Area Index*), le LST (*Land Surface Temperature*) ou le fCover (*fractional vegetation Cover*). Mais il en existe beaucoup d'autres plus spécifiques, pour des analyses plus ciblées, comme le sNDVI (*Standardized NDVI*), VCI (*Vegetation Condition Index*), NGI (*Normalized Growth Index*), VPI (*Vegetation Productivity Index*), TCI (*Temperature Condition Index*), VHI (*Vegetation Health Index*) ou encore SWB (*Surface Water Body*).

Problématique et questionnement

Situé en Afrique de l'Ouest, le bassin versant de l'Ouémé supérieur occupe une position centrale au Bénin où les éléments du climat, la circulation atmosphérique, le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle des paramètres climatiques et environnementaux dépendent, pour l'essentiel, du système de mousson africain. C'est là précisément où les gradients latitudinaux entre golfe de Guinée et zone sahélienne s'expriment le mieux. **En conséquence, il faut cerner la corrélation qui lie climat et végétation, en expliquant l'impact de la variabilité climatique sur l'activité végétale.** La meilleure définition de ces liaisons régionales pourra ainsi permettre d'une part d'améliorer les études menées sur des approches physiques, nécessitant la modélisation des processus climat/eau/sol/végétation, et d'autre part, de favoriser les études d'impacts en lien avec les sociétés, par exemple le poids des contraintes climatiques sur les espaces agricoles ou encore, la capacité de résilience de la végétation naturelle (forêt ou savane) ou anthropisée (champs ou jachères) à de fortes variations climatiques. C'est aussi une façon de mieux comprendre les variations futures prévues, mais encore mal comprises et cernées en Afrique, dans le cadre du changement climatique (GIEC, 2007 et 2013).

Cette thèse est une contribution à l'étude de la variabilité de l'activité de la végétation, en fonction des différents types d'occupation du sol et de leur possibles variations, et sous contrainte des variations saisonnières et interannuelles de la pluviométrie sur le bassin versant supérieur de l'Ouémé, au Bénin, espace instrumenté qui possède un réseau de surveillance hydroclimatique au sol, le réseau AMMA-Catch. Il ne s'agit donc pas d'actualiser l'ensemble des connaissances sur ce domaine, mais plutôt de compléter l'étude spécifique des liaisons climat-formations végétales. La période d'étude retenue est volontairement courte, essentiellement entre 2002 et 2012, pour bénéficier de données climatiques *in situ* originales, et de données satellitaires complètes et validées. C'est aussi une façon d'analyser la variabilité sur une période a priori moins sèche sur le plan climatique, succédant aux nombreuses études portant sur les sécheresses sévères des décennies 1970 à 90.

L'étude porte donc sur les questions principales suivantes :

- **Quelles sont les modifications des états de surface récemment observées à méso-échelle de la zone expérimentale de l'Ouémé supérieur,** modifications associées à la variabilité climatique observée régionalement mais aussi au regard de l'échelle supérieure de la sous-région ouest-africaine ?
- **Comment valoriser différentes données (à multi-échelles spatiales et temporelles) issues de la télédétection satellitaire** pour diagnostiquer la variabilité bioclimatique à l'échelle régionale grâce à l'analyse de l'activité de la végétation ?

- **Comment mieux comprendre les processus et interactions à l'interface climat/végétation**, et interpréter certaines variations bioclimatiques intra- et interannuelles en fonction des principaux états de surface du site d'étude choisi au Bénin ?

Objectifs et résultats attendus

La réponse à ces questions nécessite une progression en deux grandes étapes.

1) Documenter la variabilité de la surface continentale (en termes d'occupation du sol, type de végétation, indices de végétation) à différents pas de temps et d'espace (approche multiscalaire). L'analyse des indices de végétation par des méthodes de télédétection et d'analyse spatiale permettra de montrer l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal aux bonnes échelles pour la zone d'étude. Dans la partie appliquée de cette thèse, la couverture végétale occupe une place centrale, sa définition reposant sur l'utilisation de données satellites multi-sources à différentes résolutions spatiales pour analyser l'hétérogénéité spatiale associée aux classifications des différents types de végétation.

2) Définir les principales variations saisonnières et interannuelles de l'activité végétale selon les principaux états de surface du bassin versant de l'Ouémé supérieur. La disponibilité des données ne permet pas d'appréhender les dynamiques de la surface sur une longue période, mais la profondeur temporelle semble toutefois suffisante pour des analyses pertinentes à différentes échelles (annuelle, interannuelle, saisonnière et intra-saisonnière). L'étude de l'évolution de l'activité végétale est aussi réalisée dans un contexte associant l'occupation du sol pour distinguer les formations naturelles de celles anthropisées, ou subissant une forte anthropisation.

Organisation de la thèse

Le mémoire est articulé en 5 parties :

La première partie présente les principales évolutions observées au cours des dernières décennies de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest, avec un accent particulier sur la mousson, ses mécanismes et interactions entre climat et surface (précipitation, débit et végétation). Cette partie est aussi dévolue à la description succincte du programme AMMA, ainsi que des caractéristiques géographiques et physiques de la zone d'étude.

La deuxième partie présente l'apport des techniques de télédétection pour l'analyse des interactions biophysiques climat-végétation, et introduit ensuite les données SPOT-VGT, MODIS, ECOCLIMAP-2, SEVIRI et LANDSAT utilisées dans cette thèse, ainsi qu'une synthèse bibliographique sur la cartographie de l'occupation et utilisation du sol déjà menée sur le domaine étudié. Les données pluviométriques sont également présentées ici, avec un résumé des techniques analytiques utilisées et largement connues par la communauté scientifique.

La troisième partie est complétée par une analyse des effets de l'hétérogénéité spatio-temporelle à partir de certaines images à différentes résolutions spatiales et temporelles. L'objectif est de définir les résolutions les plus adaptées à la caractérisation du climat sans perdre la connaissance des formations végétales sous-jacentes au sol, et en minimisant les biais possibles des données satellitaires (par exemple lié à la nébulosité).

La quatrième partie présente les caractéristiques dominantes de la variabilité de la végétation aux échelles interannuelles et intra-saisonnières, en définissant et analysant les premiers modes de variations d'un indice de végétation, le NDVI, et en les confrontant avec les principales classes d'occupation du sol. Un article publié fin 2014 dans une revue internationale est intégré ici, car il détaille l'essentiel de cette approche.

La cinquième partie documente les couplages entre la végétation et des indicateurs de la variabilité pluviométrique, essentiellement au travers des analyses multicritères et multifactorielles. Elle définit aussi les paramètres intrasaisonniers susceptibles d'expliquer la variabilité des précipitations, ainsi que les décalages observés entre climat et réponse des cycles végétatifs associés.

Partie 1 :

Le contexte scientifique de l'étude

Avant de présenter les analyses à proprement parler, nous détaillons dans ce chapitre une synthèse sur les principaux éléments ayant trait à la mousson africaine ainsi qu'au projet de recherche AMMA, éléments contextuels utiles pour comprendre la région d'étude au Bénin ainsi que le cadre scientifique de cette recherche qui ne représente qu'un élément parmi toutes les études et programmes en cours.

1.1. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest : les principales évolutions observées au cours des 60 dernières années

1.1.1. Mécanismes principaux du climat en Afrique de l'Ouest

Le climat en Afrique de l'Ouest enregistre des variations considérables, en particulier dans le Sahel, où la pluviométrie est plus faible que dans le domaine guinéen côtier, variant de plus de 1000 mm sur une distance d'environ 750 km du Nord au Sud. En outre, l'Afrique de l'Ouest est extrêmement sensible aux changements des précipitations d'une année à l'autre et il peut ainsi y avoir des variations interannuelles de plus de 30 % de la longueur de la saison des pluies (FAO, 2008). Afin de comprendre la variabilité pluviométrique, il est important de replacer l'Afrique de l'Ouest dans le contexte plus large de la circulation atmosphérique à méso-échelle. Située à proximité de l'équateur, entourée d'eau sur trois de ses façades (Atlantique au sud et à l'ouest, Méditerranée au nord) et bordée au nord par le Sahara, le plus grand désert chaud du monde, son système climatique se traduit essentiellement par un système bidimensionnel : une source chaude située dans les régions intertropicales et une source relativement plus fraîche près de l'Équateur. Sous l'effet de ce contraste, les alizés de sud-est traversent l'équateur, pivotent en un vent de sud-ouest formant le flux de mousson dans les basses couches de l'atmosphère (Lafore *et al.*, 2012). Le réchauffement continental est maximal sur le Sahara où s'installe un immense dôme d'air chaud appelé dépression thermique saharienne. La convergence entre le flux de mousson (frais et humide) et les alizés de nord (chauds et secs – flux d'Harmattan) forme une zone d'intense convection : la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). A moyenne altitude (niveau 600-700 hPa), le contraste entre ces deux masses d'air induit un fort gradient méridien de température, responsable de la formation du Jet d'Est Africain (JEA) (Janicot *et al.*, 2012 ; Lafore *et al.*, 2012). L'existence du JEA favorise le développement des ondes d'est, qui s'organisent au sud du Front InterTropical (FIT) et du JEA, où se forme la ZCIT. Dans la haute troposphère, la ZCIT induit un écoulement divergent anticyclonique qui renforce au sud le Jet d'Est Tropical (JET) et au nord le Jet d'Ouest SubTropical (JOST) (figure 1.1). Enfin, la Dépression Thermique Saharienne (DTS) est surmontée au-dessus de 500 hPa par une forte subsidence correspondant à la circulation indirecte de la cellule de Hadley locale, empêchant le développement de la convection profonde sur le Sahara (Sultan et Janicot, 2003 ; Sultan et Janicot, 2004 ; Ghanssan, 2010 ; Janicot *et al.*, 2012 ; Lafore *et al.*, 2012).

- **Le Jet d'Est Africain (JEA)** est un phénomène thermique situé au niveau du gradient thermique méridien entre le Sahara et le golfe de Guinée. Il permet d'entretenir un vent thermique qui joue un rôle important dans le climat sahélien (Cook, 1999 ; Thorncroft et Blackburn, 1999).
- **Le Jet d'Est Tropical (JET)** est un vent thermique de plus large échelle localisé sur l'Afrique à la limite de la troposphère, au niveau des branches supérieures des circulations divergentes. Son existence provient de la différence de température entre l'océan Indien et les hauts plateaux asiatiques. Le JET se renforce sur l'Afrique en raison du gradient thermique entre zones continentales et océaniques (Chen, 1982).

La pluie demeure le paramètre climatique essentiel en Afrique de l'Ouest. De même, le régime de mousson est le facteur explicatif primordial des différentes phases régionales saisonnières, notamment l'alternance des saisons des pluies et saisons (dites) sèches.

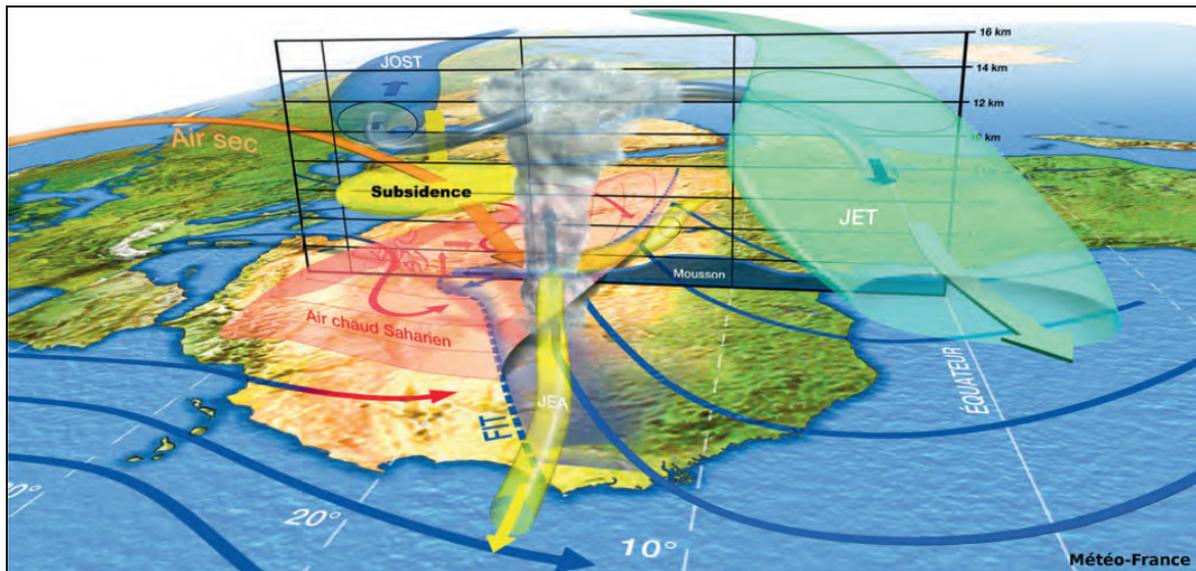


Figure 1.1 : Schéma des composantes essentielles de la mousson de l'Afrique de l'Ouest (d'après Lafore *et al.*, 2012).

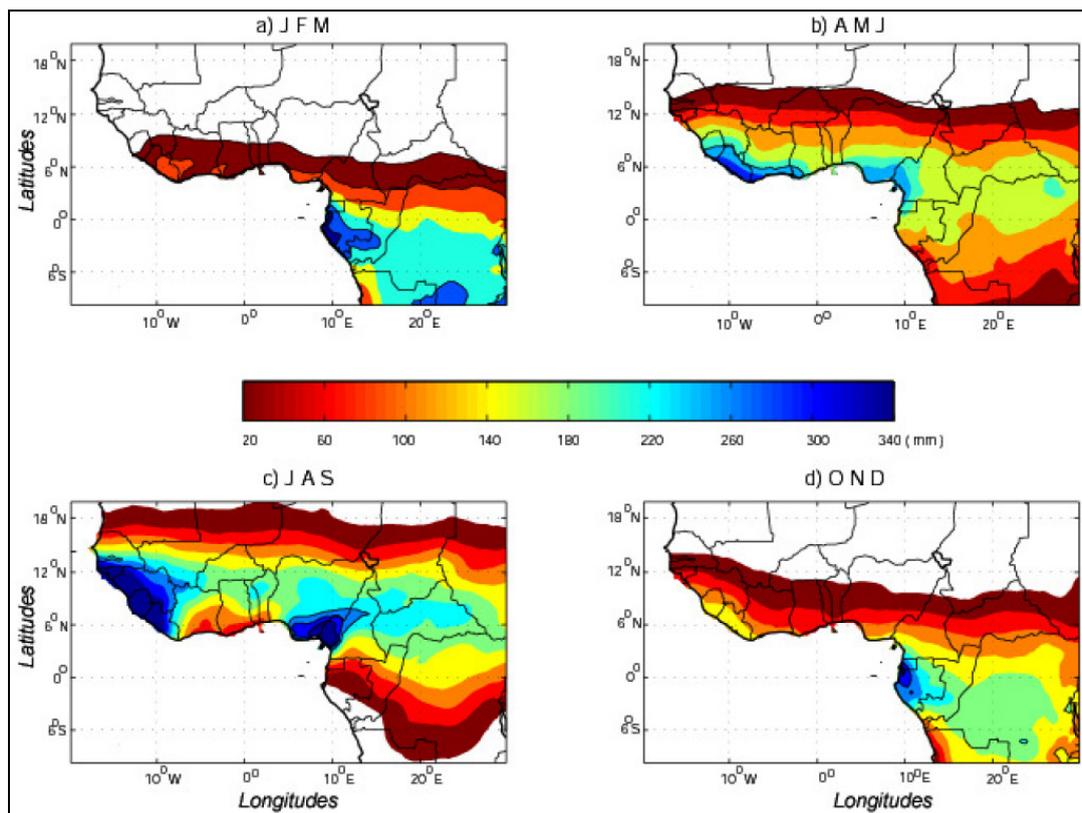


Figure 1.2 : Schéma résumant la migration de la mousson africaine en visualisant le cycle saisonnier des précipitations (moyennes trimestrielles, calculées sur la période 1951-2002 ; d'après Djoufack-Manetsa, 2011).

Le cycle annuel du soleil régle le déplacement saisonnier de la ZCIT, entre une position méridionale moyenne autour de 5°N (décembre à février) et une position septentrionale autour de 15°N (juin à août). La migration latitudinale de la mousson comprend deux phases principales. La première correspond à l'arrivée du Front InterTropical (FIT) à 15°N

occasionnant le développement de systèmes convectifs isolés, pendant que la ZCIT est positionnée vers 5°N, apportant les premières pluies annuelles en Afrique de l'Ouest, et le début de la saison humide aux mois de mai-juin. Lors de la seconde phase, la ZCIT se décale brusquement de la position de 5°N, à une position plus au Nord à 15°N. C'est ce que l'on appelle communément le « saut de mousson » (Sultan et Janicot, 2003). Des nuages à fort développement vertical apparaissent alors plus au nord, conjointement à des épisodes de fortes précipitations, marquant le début de la mousson. Cette période correspond environ à juillet-août, et apporte de 70 à 90 % des pluies en zones soudanienne et sahélienne (figure 1.2).

En termes de cumuls annuels moyens, l'évolution de la ZCIT implique une forte variabilité des précipitations régionales, allant de l'absence quasi-totale de pluies au Sahara et ses marges (au nord) jusqu'à plus de 4000 mm/an sur le littoral de l'océan Atlantique au sud. La répartition des précipitations du nord au sud à une allure zonale assez régulière jusqu'aux latitudes 13°N à l'ouest et plutôt 9-10°N à l'est. L'Afrique de l'Ouest, et en particulier la bande sahélienne, est ainsi une région où les fluctuations interannuelles de précipitation peuvent être importantes, même pour des variations faibles dans le cycle saisonnier de la ZCIT (Janicot *et al.*, 2012).

1.1.2. Synthèse sur la variabilité interannuelle des précipitations ouest-africaines

L'Afrique de l'Ouest a enregistré un profond changement climatique au cours du 20^{ème} siècle (Boulain *et al.*, 2009), avec une sécheresse prolongée durant plus de 20 ans (Lebel et Ali, 2009). De nombreuses études sur les précipitations se concentrent sur les variations interannuelles, les fluctuations du nombre d'événements, l'intensité moyenne, ainsi que le déficit pluviométrique à l'échelle décennale et/ou saisonnière.

Selon le GIEC (2007), au cours du XX^{ème} siècle, l'Afrique de l'Ouest et le Sahel sont confrontés à la baisse des précipitations et à une évolution des isohyètes vers le sud (Gautier *et al.*, 1998 ; Mahé *et al.*, 2009). Durant les 30 dernières années du 20^{ème} siècle, les précipitations ont en moyenne baissé de 25 %, comme dans la zone tropicale de forêt humide, la décroissance moyenne des précipitations annuelles ayant été de moins de 2,4 % depuis le milieu des années 1970 (Nicholson *et al.*, 1998). Des années 1970 jusqu'au milieu des années 1990, il y a des changements pluviométriques très significatifs, avec une période sèche, et notamment deux grands épisodes de sécheresse extrême en 1972-1973 et 1984-1985 (Paturel *et al.*, 1998 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Ali et Lebel, 2008), alors que les conditions pluviométriques ont été très bonnes dans les années 1950 et au début des années 1960. Paturel *et al.* (1998) ont ainsi montré que la décennie 1950 a constitué une période excédentaire de précipitation (figure 1.3), suivie par la décennie 1960, également excédentaire sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest.

Au début de la décennie 1970 se produit une nouvelle fluctuation climatique qui se traduit par un déficit quasi généralisé en Afrique de l'Ouest (certains indices pluviométriques pouvant atteindre des valeurs très négatives). Lebel et Ali (2009) ont documenté la variabilité des précipitations au Sahel en étudiant les tendances du régime des précipitations de la période 1990-2007 par rapport au régime des décennies précédentes, à savoir la période humide 1950-1969 et la période sèche 1970-1989. L'Hôte *et al.* (2002) ont calculé un indice de précipitations annuelles sur la période 1896-2000 puis, Mahé *et al.* (2009) ont également étudié des données de précipitation jusqu'en 2006, pour voir l'évolution de la pluviométrie au

Sahel. Ils comparent la variabilité des précipitations et du ruissellement sur plusieurs bassins versants grâce aux coefficients de ruissellement, pour confirmer l'augmentation du ruissellement à l'échelle régionale. Le Barbé *et al.* (2002) utilisent les données quotidiennes d'environ 300 pluviomètres couvrant 1,7 millions de km² afin de caractériser les régimes de précipitations en Afrique de l'Ouest et les différentes évolutions hydroclimatiques sur la période 1951-1990.

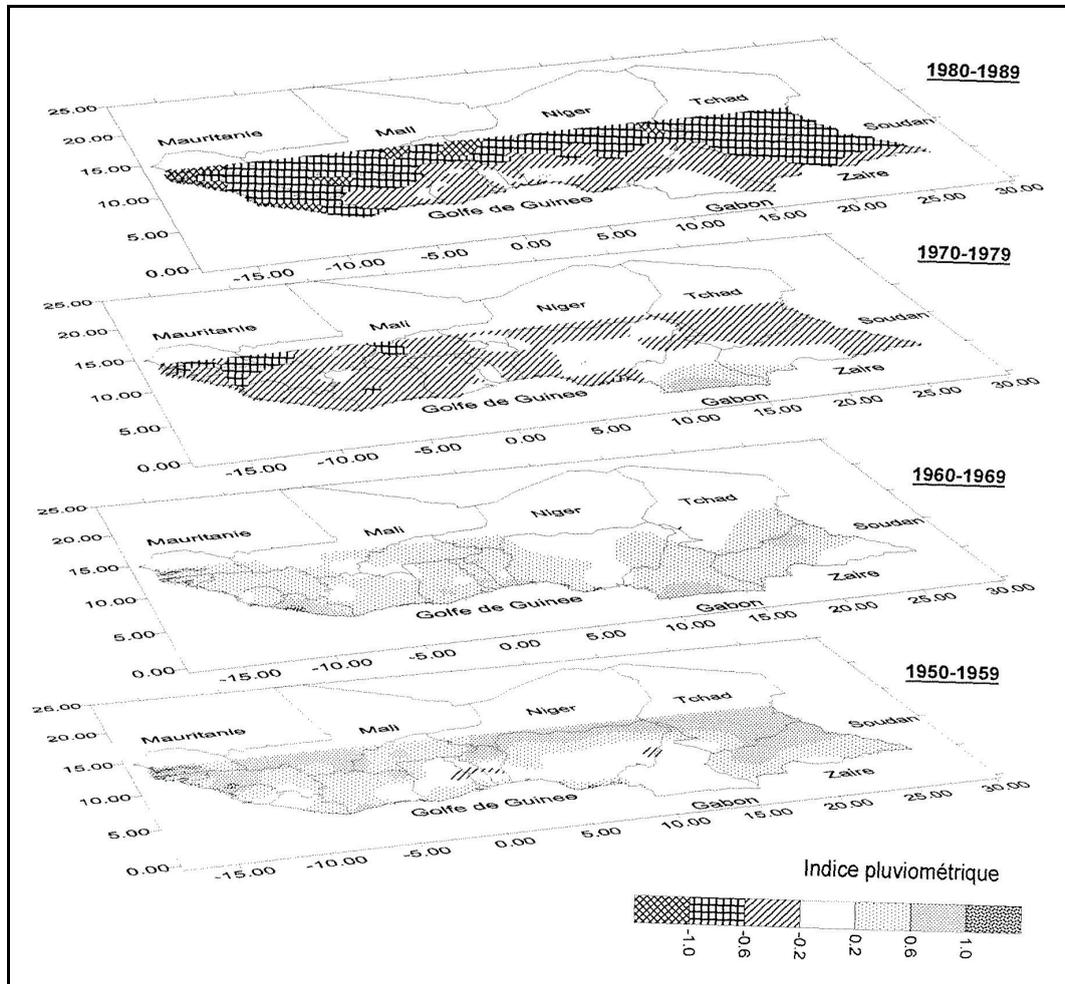


Figure 1.3 : Evolution des indices pluviométriques en Afrique de l'Ouest de la décennie 1950 à la décennie 1980 (d'après Paturol *et al.*, 1998).

Le diagnostic pour les années 1980 est une généralisation et une intensification du phénomène déficitaire qui touche l'ensemble de la zone étudiée et présente des valeurs d'indices pluviométriques en diminution, jusqu'à -1,4, ce qui correspond environ à une diminution de 60 % de la moyenne à long terme (Paturol *et al.*, 1998 ; Nicholson, 2005). La variabilité des précipitations sur l'Afrique Occidentale dans les années 1980, par rapport à la décennie 1950, équivaut à une réduction des précipitations d'environ 15 à 20 % sur le Sahel (Lebel et Ali, 2009).

Depuis le milieu des années 1990, la pluviométrie moyenne sur la région a légèrement augmenté pour atteindre le niveau des années 1970 (figure 1.4). En conséquence, la proportion des précipitations annuelles associée à des précipitations extrêmes a augmenté de 17 % dans les années 1970-1990 à 19 % dans les années 1991-2000, et à 22 % dans les années 2001-2010 (Panthou, 2013). En 2008, la pluviométrie dans le Sahel central était proche ou au-dessus de la moyenne à long terme, et en 2010, avec de très fortes précipitations, comparable

aux années 1950. En d'autres mots, plusieurs rapports ont suggéré qu'il semble y avoir une "reprise" des précipitations en Afrique de l'Ouest et sahélienne au cours des dernières années (Nicholson, 2005 ; Lebel et Ali, 2009 ; Mahé *et al.*, 2009 ; Panthou, 2013). Dans son étude, Nicholson (2005) met l'accent sur la période 1998-2003 et montre qu'il y a eu une certaine reprise par rapport à la période précédente très sèche, la reprise ayant été plus marquée dans l'ouest du Sahel. Les années les plus humides sont 1998, 1999 et 2003. Les résultats suggèrent également une reprise limitée dans l'est du Sahel/Soudan. Cependant, des conditions anormalement sèches sont à nouveau observées en 2011 (Fontaine *et al.*, 2011).

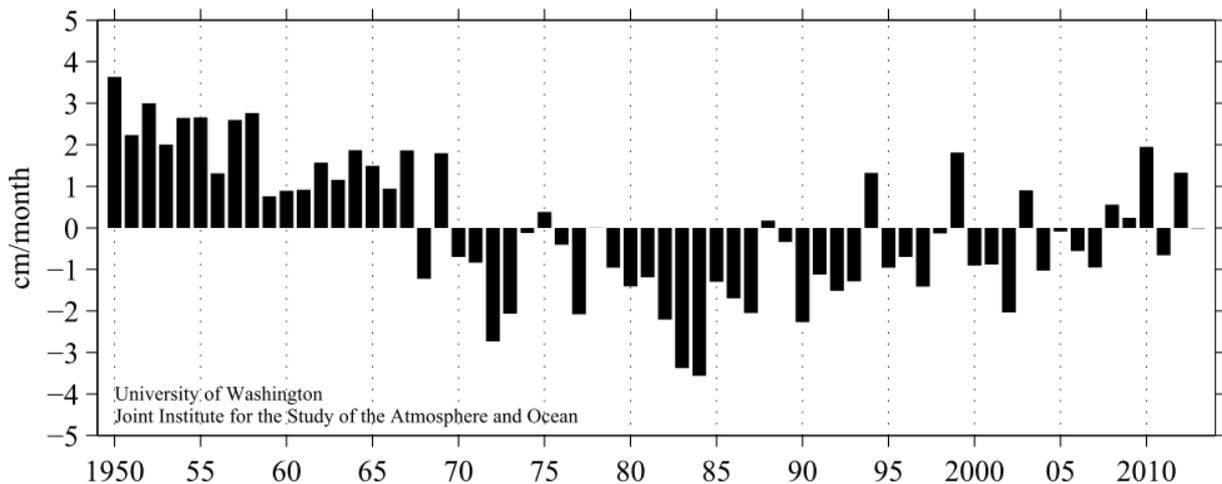


Figure 1.4 : Anomalies pluviométriques en saison des pluies (de juin à octobre) pour un indice régional correspondant au Sahel sur la période 1950-2012.

1.1.3. Les évolutions constatées de la relation pluie-débit

Sur le plan hydrologique, il existe de nombreuses études des processus de ruissellement, de l'impact de longs déficits des précipitations sur le ruissellement (diminution du débit moyen annuel, augmentation du ruissellement), de la variabilité du niveau des eaux souterraines,... Boulain *et al.* (2009) ont par exemple expliqué la question de l'équilibre hydrologique en fonction du changement d'occupation du sol et des conditions climatiques dans le Sahel, en quantifiant les effets respectifs et combinés de modifications sur le comportement d'un bassin versant typique. Ils ont pu reconstituer l'historique probable de ruissellement dans ces changements concomitants depuis le milieu du siècle dernier, résultats qui semblent correspondre aux étapes observées dans les hausses dynamiques de la nappe, argument qui conforte l'idée selon laquelle la recharge des nappes est étroitement dépendante du ruissellement dans ce milieu semi-aride.

En fonction des périodes de déficit des précipitations, certains aspects affectent plus particulièrement l'hydrologie ouest-africaine et l'ensemble du cycle de l'eau, résultat d'interactions complexes entre l'atmosphère et le continent, selon les échelles spatio-temporelles et les régions concernées (Peugeot *et al.*, 2012). Les rivières en Afrique de l'Ouest affichent généralement des relations très fortes avec les précipitations (variables qui représentent environ 60-70 % de la variabilité du débit des rivières). Cependant, ces relations sont non stationnaires. Ainsi, au cours des périodes 1931-1960 (ou surtout 1961-1990), les précipitations expliquent environ 40 à 60 % (ou 60 à 80 %) de la variabilité des écoulements des rivières (Casenave et Valentin, 1992 ; Conway *et al.*, 2009).

Le manque d'information hydrométrique en Afrique tropicale pour la période du début du 20^{ème} siècle ne permet pas toujours une comparaison entre les différents événements climatiques survenus au cours de l'ensemble du siècle. Car jusqu'en 1950, le réseau hydrométrique ne mesurait que quelques grands paramètres régulièrement (Paturel *et al.*, 2003). C'est pourquoi la plupart des études en Afrique de l'Ouest qui comparent habituellement les précipitations et le débit se focalisent sur les liens avec les conditions humides des années 1950-60 (Conway *et al.*, 2009).

En raison de la discontinuité pluviométrique significative enregistrée autour des années 1960-70, il y a de graves répercussions sur les écoulements pour presque tous les fleuves de l'Afrique de l'Ouest, avec une forte baisse de beaucoup d'affluents de la région (figure 1.5 ; Mahé et Olivry, 1991 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Paturel *et al.*, 2003). Durant les années de sécheresse consécutives, on trouve des déficits pluviométriques de l'ordre de 15 à 20 % en moyenne en Afrique de l'Ouest, tandis que le déficit d'écoulement des rivières est d'environ 30-50 % et parfois plus (Mahé *et al.*, 2003 ; Paturel *et al.*, 2003 ; Descroix *et al.*, 2009). Mais la variation des débits de tous les fleuves africains ne suit pas une tendance unique. Dans le domaine sahélien, au nord de l'isohyète 700 mm de précipitation annuelle, par exemple sur le bassin du Nakambé (haut bassin de la Volta au Burkina Faso), les écoulements ont augmenté malgré la diminution des pluies observée depuis 1970 (Mahé *et al.*, 2003).

En revanche, dans les domaines soudanien et guinéen (5 à 10°N), on observe une amplification du déficit pluviométrique, ainsi qu'une baisse du niveau des nappes, par exemple sur le bassin du Bani (le principal affluent à droite du fleuve Niger, au Mali) avec une diminution des écoulements des rivières de 40 à 60 % (Mahé, 2009 ; Descroix *et al.*, 2009 ; Peugeot *et al.*, 2012). Pour les années 1990, les études s'accordent à dire que même pendant cette décennie, un déficit hydrique a été observé (Paturel *et al.*, 2003).

Les anomalies pluviométriques interannuelles, et leurs conséquences intra-saisonniers, influencent également la variabilité du niveau des eaux souterraines et peuvent affecter les eaux de ruissellement sur des périodes prolongées, indépendamment de l'anomalie de précipitations d'une année particulière (Mahé *et al.*, 2000). Ainsi, suite à la baisse des précipitations et du ruissellement, les ressources en eaux souterraines ont diminué rapidement depuis les années 1970 et la recharge des aquifères d'eau souterraine dans la région ont également diminué sensiblement (Niasse *et al.*, 2004).

A cause d'un "paradoxe" des écoulements des rivières en Afrique de l'Ouest, les ressources en eau du sol ont également changé. Dans les zones soudano-guinéennes, la sécheresse semble avoir un impact durable sur les niveaux d'eau souterraine. Simultanément, avec la grande variabilité interannuelle de débit de base d'une année à l'autre, l'aquifère répond très rapidement à la variabilité des précipitations (Mahé, 2009). En revanche, dans le domaine sahélien, on observe une augmentation des écoulements depuis la fin des années 1980 malgré la baisse concomitante des précipitations (Leduc *et al.*, 2001 ; Favreau *et al.*, 2002 ; Mahé et Paturel, 2009). Cela se traduit par des apports accrus aux mares et par l'apparition de nouvelles formes de mares, ce qui explique la hausse du niveau de l'eau du sol (Leblanc *et al.*, 2008).

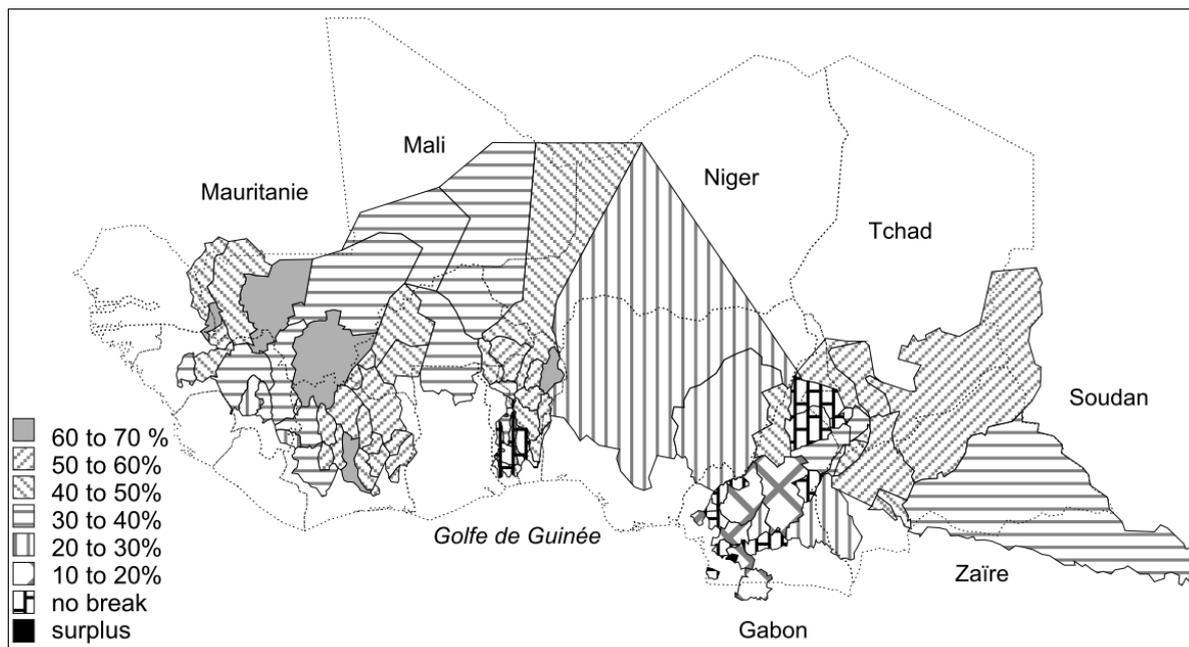


Figure 1.5 : Déficit annuel moyen du débit observé dans la plupart des bassins versants en Afrique de l’Ouest de part et d’autre de la discontinuité hydroclimatique enregistrée dans les années 1970 (d’après Servat *et al.*, 1997).

1.1.4. Les conséquences environnementales à l’échelle des interactions climat-végétation

En Afrique de l’Ouest, en raison des caractéristiques de la mousson, le climat est marqué par une pluviométrie annuelle décroissante du Nord au Sud, déterminant des grandes zones éco-climatiques (figure 1.6). De même, la répartition spatiale des différents biotopes ouest-africains est fortement dépendante des ressources en eau des sols et donc, des abats pluviométriques.

Selon la pluviosité annuelle moyenne, on peut distinguer trois principaux types de climat en partant de la côte atlantique : (i) le climat tropical humide ou guinéen pour les zones proches de l’équateur et pour lesquelles les précipitations sont supérieures à 1400 mm par an ; (ii) le climat tropical sec ou soudanien pour lequel les précipitations sont comprises entre 700 et 1400 mm environ ; (iii) le climat sahélien pour lequel les précipitations sont inférieures à 700 mm, limité au nord par les zones désertiques (l’Hôte *et al.*, 1996 ; Le Lay, 2006 ; Guyot, 2010). Selon les zones climatiques, on observe les principaux écosystèmes naturels fortement influencés par les précipitations, avec notamment quatre grands types de végétation (White, 1986) : 1) la forêt tropicale ; 2) la mosaïque de forêt décidue, de forêt claire et de savane boisée ; 3) la savane arbustive et herbacée secondaire ; 4) la formation de jachère (à forte composante anthropique) incluant les formations buissonnantes, herbeuses et arbustives. L’espace sahélien compte aussi les formations herbeuses à végétation semi aquatique du delta intérieur du Niger au Mali, ou marécageuse et aquatique vers le lac Tchad ; il existe aussi certaines forêts de montagne (Do *et al.*, 2011) et des portions du littoral occupées par des mangroves (figure 1.6).

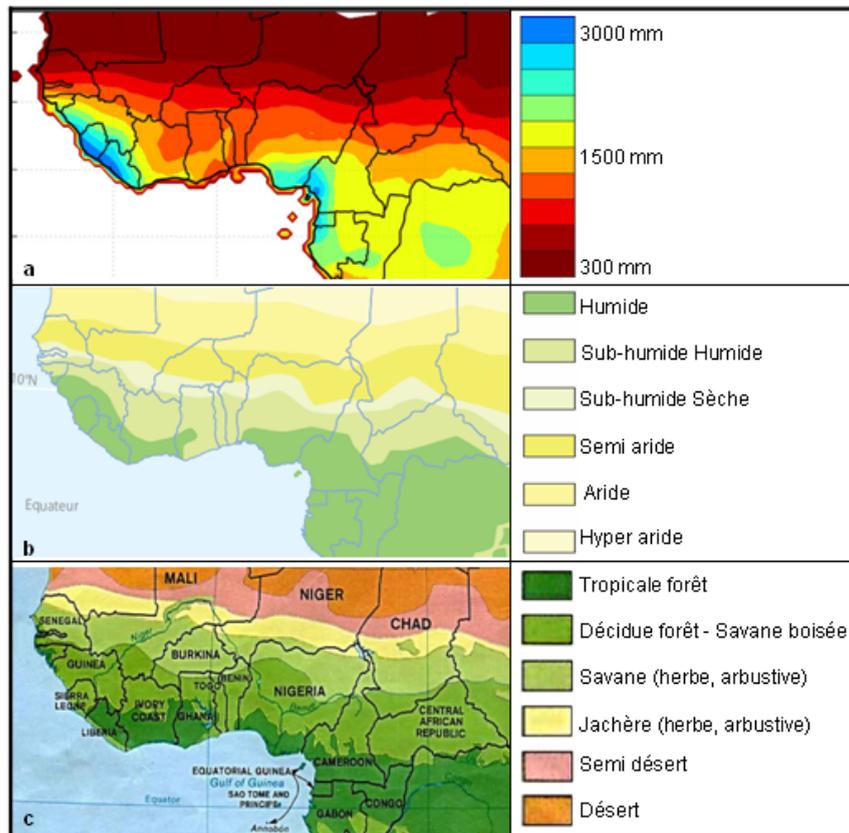


Figure 1.6 : Comparaison des grands espaces climatiques et des formations végétales en Afrique de l’Ouest et Centrale : a) les moyennes des précipitations totales annuelles (1951-2002) ; b) les principales transitions climatiques ; c) la distribution des principales formations végétales ; adapté d’après Djoufack-Manetsa (2011), l’Atlas sur l’intégration régionale en Afrique de l’Ouest (2008), la bibliothèque de l’Université du Texas.

Depuis la dernière période très sèche (1970-1980), de nombreuses études ont exploré, par l’observation et/ou la modélisation, les liens entre les changements climatiques et les états de surface en Afrique de l’Ouest (Zeng *et al.*, 1998 ; Zeng *et al.*, 1999 ; Philippon *et al.*, 2006 ; Boulain *et al.*, 2009), et ont montré que l’une des conséquences de la diminution des précipitations moyennes et de l’augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations est le changement des états de surface (Taylor *et al.*, 2002 ; Caminade *et al.*, 2006). La grande période de sécheresse a eu un impact sévère sur la végétation naturelle, mais aussi sur les cultures, les espaces forestiers, le bétail et plus généralement, sur les pratiques culturelles et agricoles. L’observation diachronique de photographies aériennes (1960 et 1975) atteste par exemple des dégâts sur les plantes ligneuses et de pertes accélérées de la savane boisée qui ne pouvait résister sur le court terme (Leblanc *et al.*, 2008). Une partie de cette évolution est attribuée aux sécheresses climatiques ou leur impact direct sur les nappes ; une autre partie est aussi imputée à la gestion des ressources naturelles par les populations rurales : coupe des arbres pour nourrir le bétail affamé, pour le combustible, la construction ou pour étendre des terres cultivées, en particulier dans les basses terres (Hiernaux *et al.*, 2009a,c). La haute pression de pâturage affecte aussi la production d’herbe et accélère l’érosion des sols par la couverture herbacée réduite et l’augmentation du piétinement en surface (Hiernaux *et al.*, 1999), d’abord pour ouvrir de nouveaux domaines à l’agriculture et d’autre part, pour l’approvisionnement en bois de chauffage (Leblanc *et al.*, 2008).

En outre, dans certaines régions en Afrique de l’Ouest, l’augmentation des surfaces cultivées entre 1950 et 1975 a été très rapide et s’est accompagnée d’une augmentation des surfaces en

jachère, de sorte que l'expansion du taux des terres agricoles (cultures avec les champs en jachère) a atteint 13,5 % par an. La zone de récolte a encore augmenté entre 1975 et 1994, mais seulement de 3,3 % par an. Après les années humides 1994 et 1999, la végétation sahélienne connaît une progression, au point qu'on a pu parler d'un « retour vert » au Sahel, quoique celui-ci apparaisse très inégalement réparti spatialement (Herrmann *et al.*, 2005). Il est difficile cependant de savoir quelle est la contribution de la variabilité climatique et de la composante anthropique dans le processus de reverdissement après une phase de dégradation du couvert végétal. Il est également difficile de prévoir les tendances dans la réponse de la couverture de la végétation sous changement de climat en raison de la complexité des relations entre la phénologie (saisonnière et interannuelle) et les facteurs géophysiques (Seghieri *et al.*, 2009 ; Hiernaux *et al.*, 2009b). Ces changements ont suscité de nombreuses études, surtout depuis une vingtaine d'années, sur les précipitations, la sécheresse, la couverture végétale et le changement climatique en Afrique de l'Ouest.

1.2. Le programme AMMA : objectifs et approches multi-échelles

1.2.1. Les objectifs scientifiques, mesures et dispositifs

La mousson d'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une très forte variabilité interannuelle et décennale, avec des caractéristiques pluviométriques changeantes. Les faibles capacités de prédiction et les modifications rapides de cet environnement ouest-africain ont été les principales justifications du programme AMMA (Analyses multidisciplinaires de la Mousson Africaine ; <http://www.amma-international.org>), projet international destiné à fournir des observations à long terme de la mousson d'Afrique de l'Ouest et de ses composants (Redelsperger *et al.*, 2006a). Il est en effet apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilité du climat en Afrique de l'Ouest pour en améliorer les prévisions des interactions entre précipitations, végétation et cycles biogéochimiques en réponse au changement climatique et de l'utilisation des terres. Cette information est essentielle pour les décideurs politiques et les gestionnaires dans la planification pour le développement économique futur, le développement durable et les moyens de subsistance des populations en croissance de la région (Lebel *et al.*, 2009). Le programme avait trois grands objectifs (Redelsperger *et al.*, 2006a) :

- Améliorer la compréhension du climat de l'Afrique de l'Ouest et de son influence sur l'environnement physique, chimique et biologique aux échelles régionale et globale ;
- Produire les connaissances nécessaires pour relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées ;
- S'assurer que les résultats des recherches multidisciplinaires du projet soient effectivement intégrés dans les activités de prévision et de décision.

AMMA est un programme à forte visibilité internationale avec plus de 500 scientifiques de 30 pays et 140 différentes institutions (Afrique, Europe, USA). "AMMA a ainsi mobilisé six avions instrumentés - ce furent les premières missions de l'ATR42 de Météo France et du Falcon20 du CNRS, gérés par SAFIRE, trois navires océanographiques et plusieurs dispositifs expérimentaux exceptionnels. Certains systèmes mis en œuvre sont des premières mondiales : les drifts ondes sur le Sahel et l'Atlantique, les mesures aéroportées radar/lidar sous la trace de Cloudsat/Calipso. C'est donc une spectaculaire armada scientifique" (Bisch, 2006).

1.2.2. Les principales échelles spatiales d'analyse

Ce programme a démarré en 2001 avec plusieurs périodes d'observations intensives lors du cycle de la mousson africaine, notamment sur la période 2005-2007. La stratégie d'observation est basée sur plusieurs échelles de temps et d'espace, qui vont de l'observation locale (stations météorologiques, radiosondages, mesures de biomasse, ...) à l'observation régionale et globale (mesures aéroportées, observations spatiales, ...). Ainsi, le programme AMMA est structuré autour de quatre échelles spatiales d'intérêt (Lebel *et al.*, 2010) :

- (i) *l'échelle globale* à laquelle la mousson africaine interagit avec le reste du globe. Les échelles de temps correspondent à la variabilité saisonnière jusqu'à celle d'ordre décennale.
- (ii) *l'échelle régionale* permet d'étudier les processus et les interactions d'échelles régissant la mousson. Les échelles principales de temps vont des cycles annuels et saisonniers à l'interannuel.
- (iii) *la méso-échelle* est centrale pour l'étude de la variabilité des précipitations à l'échelle saisonnière et le couplage entre hydrologie et atmosphère à l'échelle des bassins versants.
- (iv) *l'échelle sub-méso (i.e. <10 km)* est l'échelle des cellules convectives auxquelles correspondent les maxima de précipitations. C'est l'échelle principale pour les études de processus au niveau de la végétation naturelle et cultivée.

La stratégie d'observation du programme AMMA a aussi reposé sur trois périodes d'observations (Redelsperger *et al.*, 2006 ; Lebel *et al.*, 2010) :

- La période d'observation à long terme (LOP / 2001-2010) : elle a permis de documenter et d'analyser les variations interannuelles des interactions climat-surface-végétation à trois échelles spatiales (régionale, méso et locale) ;
- La période d'observations renforcées (EOP / 2004-2007) : elle a fourni de nombreuses données sur la variabilité saisonnière du climat, en liaison avec les conditions continentales ;
- La période d'observations spécifiques (SOP / 2006) : elle a correspondu à des mesures intensives réalisées tout au long de la saison des pluies (début, maximum et retrait de la mousson).

Ces activités de surveillance contribuent à une meilleure compréhension des processus et à l'amélioration de la qualité des prévisions climatiques et météorologiques, afin d'imaginer des stratégies d'adaptations adéquates.

1.2.3. Les projets en lien avec AMMA

1.2.3.1. Système d'observation de AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique)

Un volet important est donc la compréhension du cycle hydrologique et de ses interactions avec le changement du climat. Le support de ces études est l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE), labellisé sous le nom AMMA-CATCH (Observatoire hydrométéorologique sur l'Afrique de l'Ouest). L'objectif d'AMMA-CATCH est de documenter le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle des bilans d'eau et de la

végétation, en association avec des évolutions environnementales et le forçage climatique, sur la base d'intégration régionale et en appui à des études de processus (Lebel *et al.*, 2009). Dans le cadre de AMMA-CATCH, trois sites de méso-échelle ont été instrumentés (figure 1.7) : le site de Gourma (Mali), le site du Degré Carré de Niamey (Niger) et le site de la haute vallée de l'Ouémé (Bénin). Ces sites intègrent des échelles spatiales emboîtées (méso-échelle, super-site et sites locaux) qui renferment les réseaux d'instruments de mesures et qui font l'objet d'un suivi par satellites à différentes résolutions spatiales, de la très haute (1 m) à la très basse (50 km). L'ensemble du dispositif fournit les paramètres et les variables de forçage qui doivent servir à initialiser et tester les modèles de surfaces à différentes échelles spatiales (Redelsperger *et al.*, 2006b ; Lebel *et al.*, 2009). Le descriptif des instruments et la base de données AMMA-CATCH est accessible en ligne à <http://www.amma-catch.org/>.

- **Le site de Gourma** est localisé au nord Mali (14,8°-17,3°N ; 2°-1°W) et couvre une superficie de 40 000 km², dans un climat sahélien (entre les isohyètes 400 et 100 mm) et avec des activités principalement pastorales. La végétation est composée d'une strate herbacée avec les buissons épars, des arbustes et petits arbres (Mougin *et al.*, 2009 ; Frappart *et al.*, 2009). Sur la période 1950-2007, la moyenne annuelle des précipitations est de 372 mm à Hombori, et une longue période de sécheresse a commencé à la fin des années 1960 jusqu'à la fin des années 1980. Depuis les années 1990, on observe une augmentation de la pluviométrie (Cappelaere *et al.*, 2009 ; Mougin *et al.*, 2009 ; Lebel *et al.*, 2009).
- **Le site de Niamey** est situé dans le sud-ouest du Niger (13°-14°N ; 1,6°-3°E) et couvre une superficie de 16 000 km². Le climat est typique du Sahel, la moyenne annuelle des précipitations étant de 562 mm (1905-1989). La végétation se caractérise par trois grands types : culture de mil, jachère et brousse tigrée sur les plateaux (Peugeot *et al.*, 2003 ; Cappelaere *et al.*, 2009). Cette zone a été soumise à la sécheresse depuis 30 ans, et entre les périodes 1940-1967 et 1968-1990, la pluviométrie annuelle moyenne a diminué de 140 mm (Lebel *et al.*, 1997 ; Lebel et Le Barbé, 1997).
- **Le site de l'Ouémé** est une zone située au centre du Bénin (8,5°-10,5°N / 1,5°-3,0°W) et couvre une superficie de 14 366 km². Cette zone possède un climat soudanien avec des précipitations moyennes annuelles entre 1100-1300 mm (Redelsperger *et al.*, 2006a ; Lawin, 2007 ; Zin *et al.*, 2009). Lors de la sécheresse des années 1970 et 1980, les précipitations moyennes (733-780 mm) ont baissé de 18 % (Redelsperger *et al.*, 2006a ; Séguis *et al.*, 2011). Mais à partir de 1994, les précipitations ont augmenté à nouveau (Lawin, 2007).

C'est ce site béninois qui a été retenu pour objet d'étude dans cette thèse.

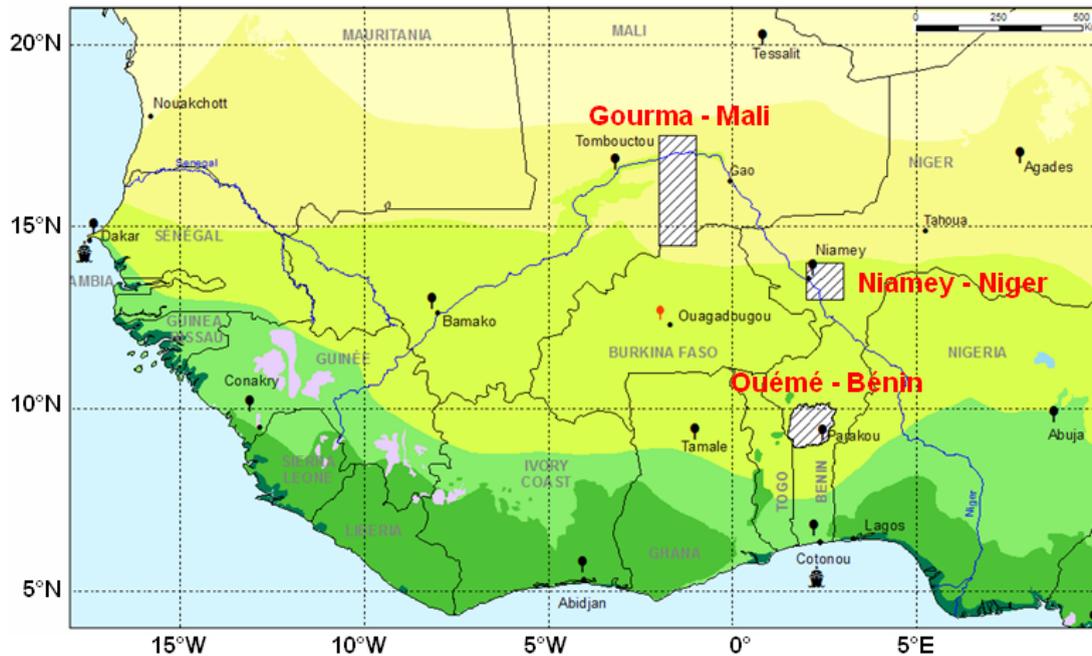


Figure 1.7 : Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA-CATCH ; source : <http://www.amma-catch.org>.

1.2.3.2. Le programme ALMIP (AMMA Land Surface Model intercomparison Project)

Les efforts visant à obtenir une meilleure compréhension et prévision des états de surface en réponse à la mousson ouest-africaine sont toujours un besoin urgent. Ils sont abordés par une approche reposant sur la modélisation multi-échelle, en utilisant conjointement des modèles de la surface terrestre qui s'appuient sur des produits satellitaires, des paramètres décrivant la surface terrestre et des données issues de campagnes de terrain du programme AMMA. Le programme ALMIP actuellement en cours est orienté vers la simulation multi-modèles pour établir un produit de réanalyse multi-modèle qui représente actuellement la meilleure estimation des processus de surface en Afrique de l'Ouest à partir de 2004 (de Rosnay *et al.*, 2009 ; Boone *et al.*, 2009).

En phase 1, les études se sont concentrées sur l'échelle régionale, pour développer un modèle hydroclimatique "réaliste" à haute résolution (multi-échelle) pour diagnostiquer le bilan de l'humidité du sol, des flux de surface, de l'eau et de l'énergie à la surface (figure 1.8 ; Grippa *et al.*, 2009 ; Peugeot *et al.*, 2010 ; Bock *et al.*, 2011). La phase 2 d'ALMIP met l'accent sur la modélisation à méso-échelle et échelle locale, pour déterminer les processus encore mal compris et les interactions d'échelles (analyse dite en LSMS, pour *Land Surface model Scaling*). L'objet est notamment d'évaluer les modèles à l'échelle locale en utilisant des données satellitaires, en fonction de processus de végétation qui ont déjà été largement détaillés et validés sur cette région (Lebel *et al.*, 2009 ; Boone *et al.*, 2009 ; Boone *et al.*, 2012). Les résultats seront utilisés avec ceux obtenus dans ALMIP 1 pour évaluer l'effet du changement d'échelle sur la représentation des processus les plus importants du niveau local au niveau méso échelle, puis à l'échelle régionale.

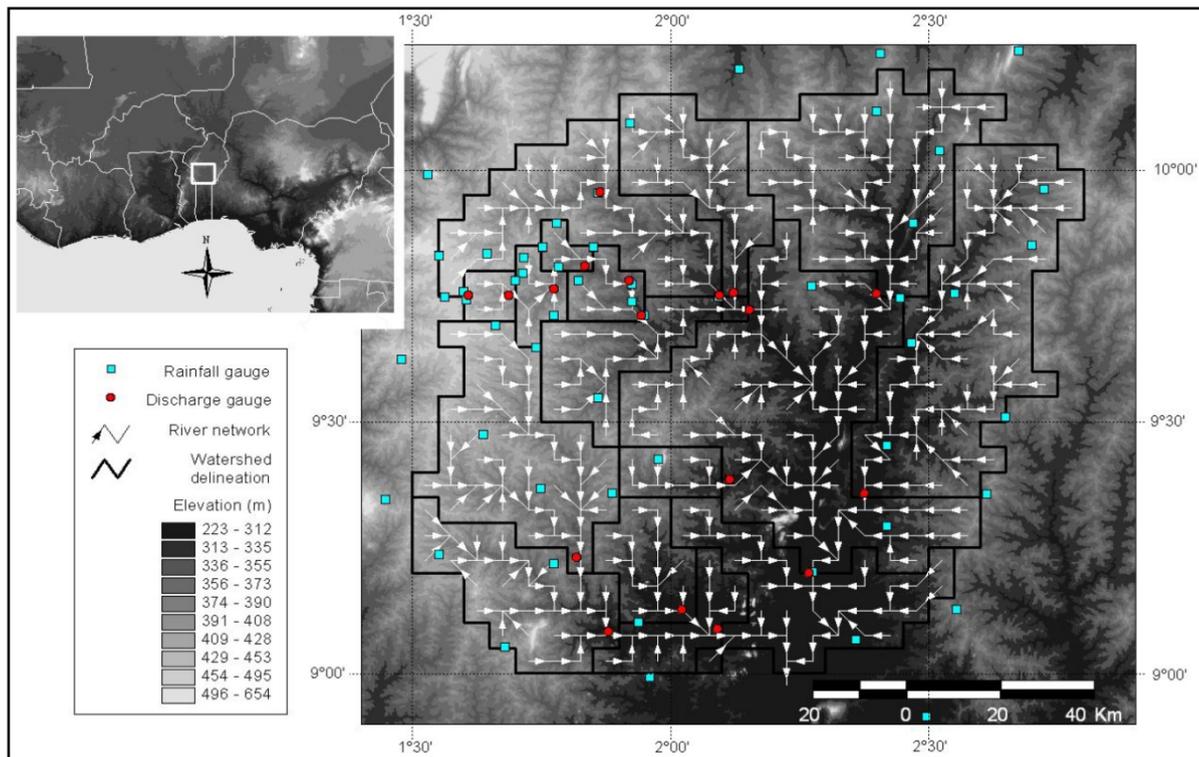


Figure 1.8 : Exemple du réseau hydrographique idéalisé utilisé dans ALMIP à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé pour modéliser les ruissellements et processus hydriques (d'après Boone *et al.*, 2012).

1.2.4. Justification du choix de la zone d'étude de l'Ouémé Supérieur

Les deux zones ateliers de Gourma et Niamey étudiées dans le cadre d'AMMA possèdent un climat de type sahélien, situées dans le centre-nord du Sahel avec une couverture naturelle semi-aride composée de graminées annuelles, de brousse tigrée sur les plateaux, avec une présence d'arbres rare ; les activités agricoles se répartissent entre culture et élevage, avec la présence de jachères et de récolte de bois pour la cuisson des aliments. Ce prélèvement ligneux participe d'ailleurs à la modification rapide des états de surface et des terres (Cappelaere *et al.*, 2009 ; Mougin *et al.*, 2009 ; Hiernaux *et al.*, 2009b). La différence principale avec la région béninoise de l'Ouémé qui possède un climat de type soudanien est d'abord la présence de formations ligneuses, forêts naturelles et savanes boisées, ainsi que de cultures intercalées et relativement denses comme celles du maïs ou du niébé (Lebel *et al.*, 2009). En outre, comme l'observent ces auteurs, dans le bassin de l'Ouémé, le gradient pluviométrique n'est pas méridien (comme on l'observe généralement plus au nord en domaine strictement sahélien), mais plutôt zonale.

Sur le plan de la dynamique végétale, la période d'activité est également différente entre les sites. Les études sur la végétation date de 1984 sur le site de Gourma (Mougin *et al.*, 2009). L'instrumentation et le suivi sur le site de l'Ouémé est plus récent, datant de 1997, surtout orienté pour l'analyse des interactions entre dynamique de couvert végétal et évolution du cycle de l'eau, ce bassin versant ayant un environnement hydrologique différent de ceux étudiés en domaine sahélien (Redelsperger *et al.*, 2006b ; Lebel *et al.*, 2009). Ainsi, ce bassin de l'Ouémé enregistre une baisse plus faible des débits en période de sécheresse (Olivry, 2002 ; Descroix *et al.*, 2009), alors que dans le sud-ouest du Niger, les ressources hydrologiques de surface et souterraines ont augmenté depuis plusieurs décennies, en dépit de

la diminution des précipitations (Leblanc *et al.*, 2008). Finalement, tandis que la dégradation des sols et de la couverture végétale fournit une explication logique de la liaison forte entre climat et hydrologie de surface en sites sahéliens (Favreau *et al.*, 2009), il n'y a pas de conclusion si évidente à l'échelle d'une région telle que celle de l'Ouémé, où l'observation et l'analyse sur le long terme restent nécessaires.

Cet espace complexe sur le plan hydroclimatique et par ses contraintes anthropiques peut donc utilement servir d'exemple représentatif à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest pour comprendre les principales évolutions en cours, associant changements climatiques, ressources en eau et variations de l'occupation du sol via les pratiques agricoles et forestières.

1.3. Le bassin versant expérimental de l'Ouémé supérieur au Bénin

1.3.1. Localisation géographique

Le terrain de la zone d'étude est relativement plat, ne variant que de quelques centaines de mètres (entre 250 et 500 m environ) entre la plaine côtière et la topographie au nord du bassin de l'Ouémé (figure 1.9). Ce relief s'élève de la plaine de l'Ouémé (au Sud) au plateau de Djougou (à l'Ouest) et à celui de Parakou (à l'Est). Au sud du domaine d'étude, il y a certains inselbergs dispersés et isolés (Judex *et al.*, 2006). La zone d'étude occupe deux grands espaces topographiques caractérisant le Bénin : la pénélaine cristalline avec de nombreuses collines et la chaîne de l'Atacora (Adam et Boko, 1993 ; Thamm *et al.*, 2008).

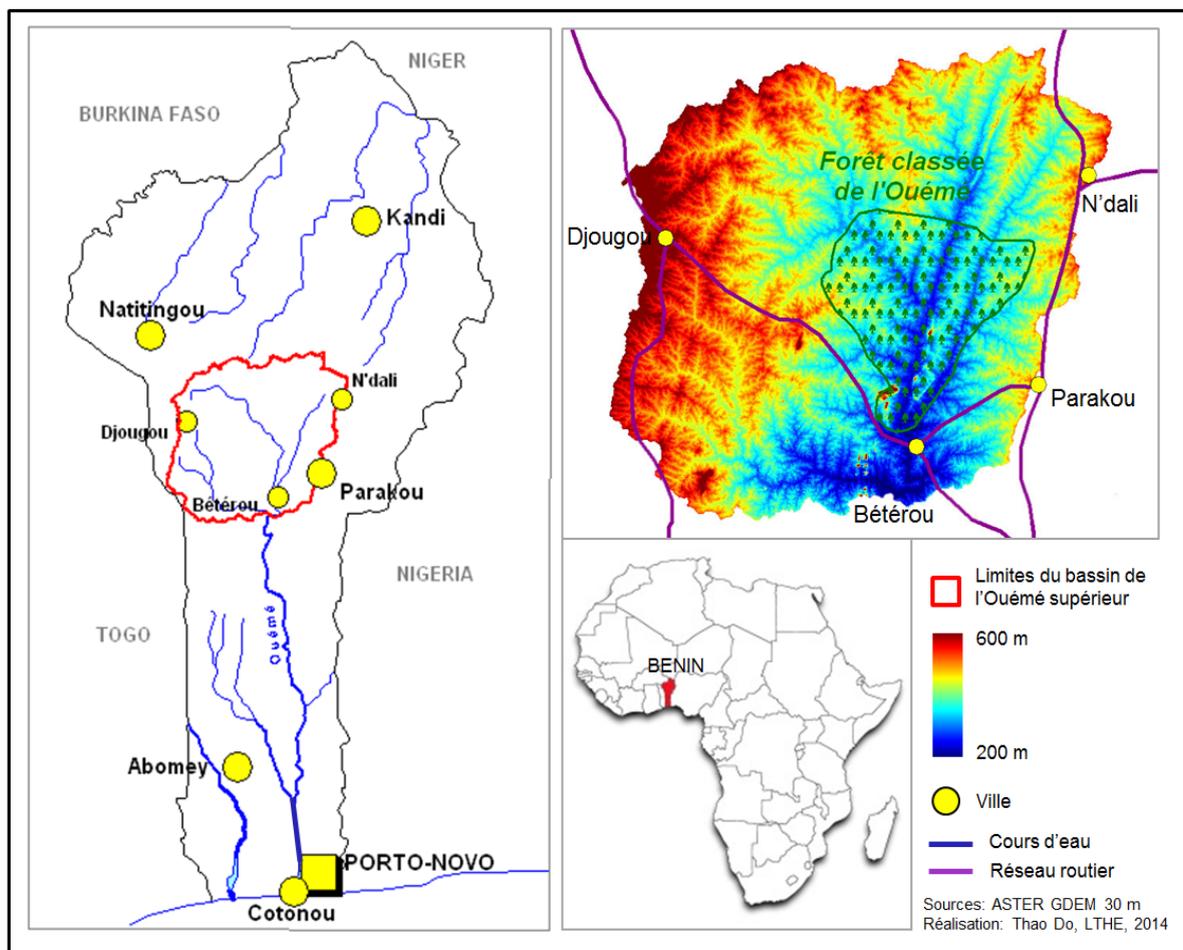


Figure 1.9 : Localisation du bassin supérieur de l'Ouémé et vue d'ensemble géographique.

1.3.2. Les conditions hydro-climatiques moyennes

Le haut bassin de l'Ouémé se situe dans la zone soudanienne, avec une saison des pluies (95 % de la pluie annuelle) qui débute en avril (plus ou moins tôt selon les années), et qui se termine en octobre (figure 1.10 ; Mulindabigwi, 2005 ; Lawin, 2007 ; Thamm *et al.*, 2008 ; Zin *et al.*, 2009 ; Bel, 2010). La plupart de la pluviométrie annuelle est enregistrée entre août et septembre.

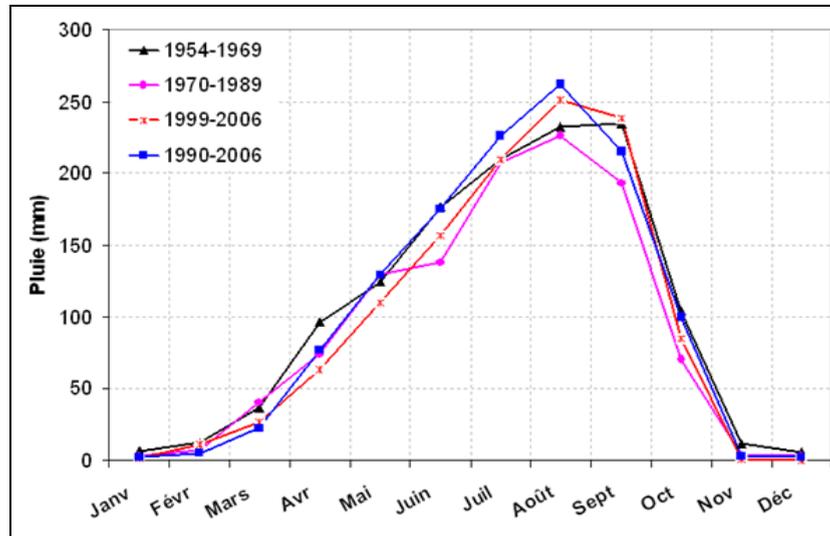


Figure 1.10 : Régimes pluviométriques annuels moyens calculés dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur pour quatre sous-périodes différentes entre 1954 et 2006 (d'après Lawin, 2007).

En saison sèche, l'humidité relative de l'air est très faible, avec des valeurs inférieures à 40 %. En revanche, en saison pluvieuse, les valeurs augmentent jusqu'à 95 %, et tendent le plus souvent vers 100 % (Roko, 2007). L'évapotranspiration en saison pluvieuse, associée à une forte couverture nuageuse, diminue considérablement pour atteindre son niveau le plus bas, soit en moyenne 3 mm.j^{-1} . En revanche, en saison sèche, lorsque l'air est sec et la couverture nuageuse réduite, l'évapotranspiration est élevée, entre 2 et 8 mm.j^{-1} (Roko, 2007). La même auteure indique que la vitesse du vent moyen journalier dépasse rarement 6 m.s^{-1} , avec un maximum de $8,3 \text{ m.s}^{-1}$ durant la période moyenne 1965-2006.

Sur le plan hydrographique, l'Ouémé est le plus grand bassin fluvial du Bénin, son cours principal ayant une longueur de 510 km environ. Deux grandes parties se distinguent dans le bassin : l'Ouémé supérieur et l'Ouémé inférieur (figure 1.11). L'Ouémé supérieur (*i.e.* la zone d'étude) est la partie du bassin avec un réseau hydrographique assez dense dont certains cours d'eau ont un régime d'écoulement saisonnier. Il est constitué d'importants sous-bassins (Le Barbé *et al.*, 1993) :

- L'Afont-Pont : $1\,165 \text{ km}^2$;
- La Donga-Pont : $1\,330 \text{ km}^2$;
- La Bétérou : $10\,050 \text{ km}^2$;
- La Savè : $23\,485 \text{ km}^2$;
- La Térrou : $3\,320 \text{ km}^2$;

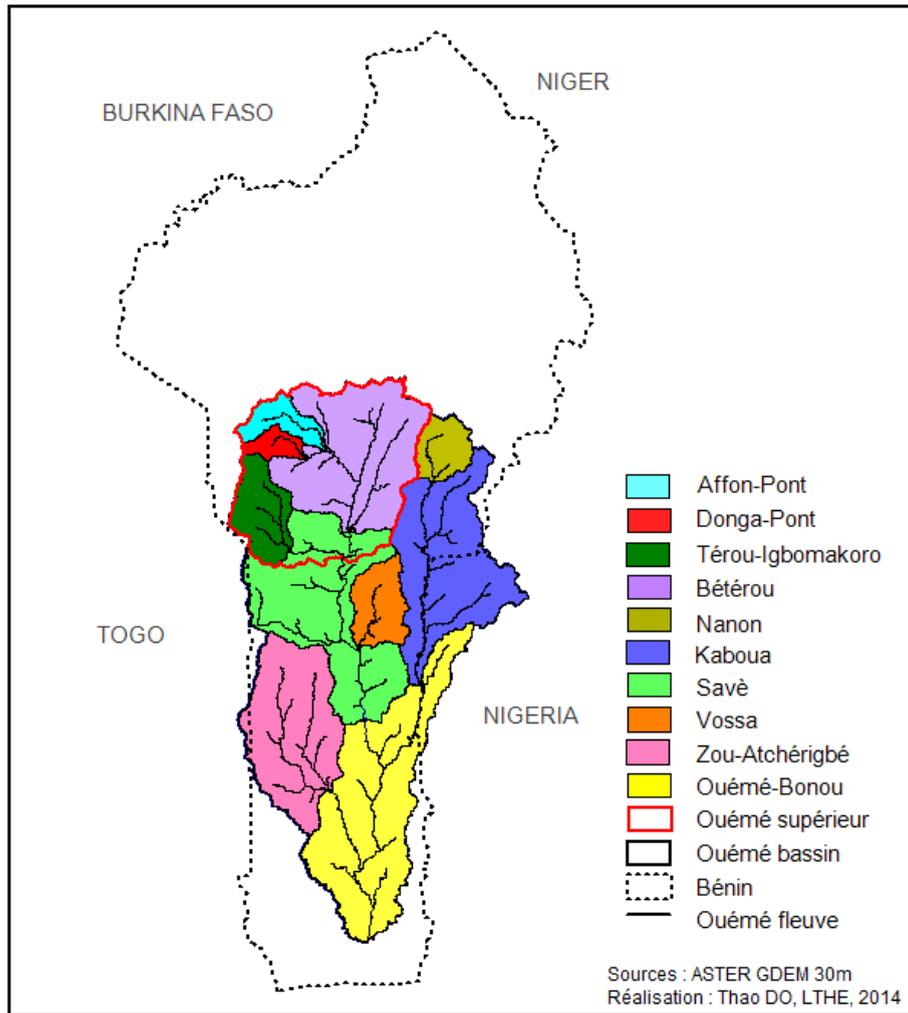


Figure 1.11 : Réseau hydrographique et distinction des sous-bassins versants du fleuve Ouémé.

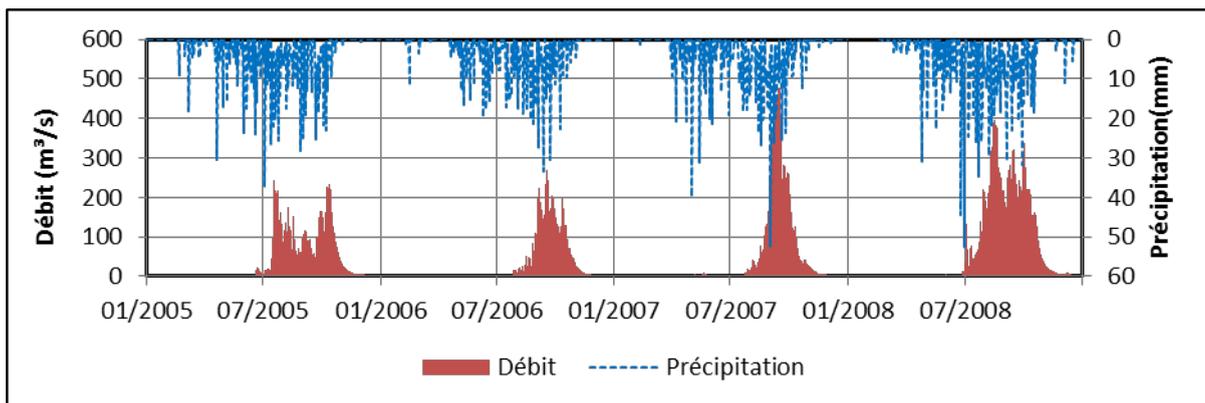


Figure 1.12 : Régime pluie-débit dans le bassin versant de Bétérou sur la période 2005-2008 mesuré à la station C328 (Bétérou) ; calculé à partir des données AMMA-Catch.

Son régime (de type tropical) se caractérise par une seule période de basses eaux, de novembre à avril, et par une seule période de crue, de trois à quatre mois environ (figure 1.12). La crue commence habituellement vers fin juillet et finit avant novembre. Le débit moyen augmente en saison des pluies (septembre) pour atteindre, durant la période de mesure 1952-2002, de 0,1 à 249 m³/s pour l’Ouémé à Bétérou, avec un débit de pointe maximal de

787 m³/s en 1963 (Totin *et al.*, 2004 ; Thamm *et al.*, 2008). Les débits moyens baissent de l'ordre de 90 % en novembre. L'arrêt des pluies correspond aussi à la diminution des ressources en eau dans le bassin. La disponibilité en eau superficielle et souterraine a été étudiée en fonction de la variation mensuelle des volumes et des lames d'eau écoulée dans le sous-bassin de Bétérou (Totin *et al.*, 2004) : ces volumes écoulés varient de 98 m³ à 642 millions de m³, avec en conséquence, des lames d'eau écoulée à l'exutoire fluctuant entre 9,5 et 62 mm.

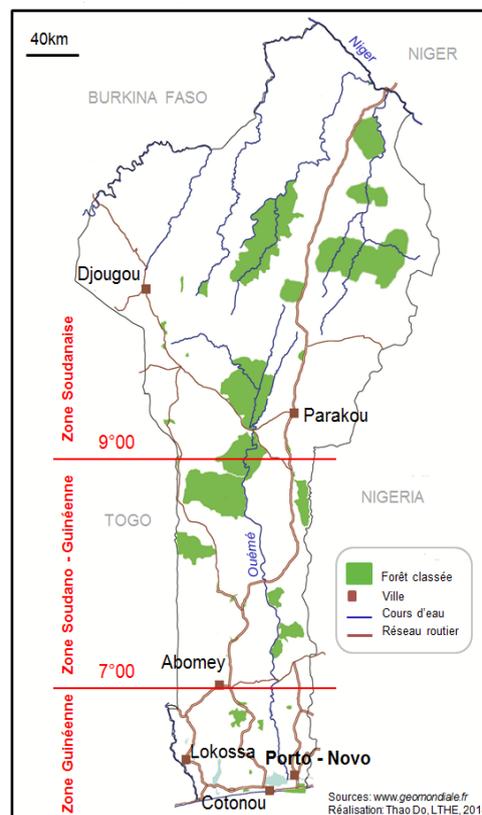
1.3.3. L'occupation du sol et les principales associations végétales

Selon Le Barbé *et al.* (1993), Mama *et al.* (1998) ou Mulindabigwi (2005), le regroupement des écosystèmes du Bénin se divise en trois principaux types qui correspondent surtout à la pluviométrie de ces espaces :

- les écosystèmes du climat guinéen (ou zone littorale avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 850 et 1300 mm) ;
- les écosystèmes du climat soudano-guinéen (ou zone continentale sèche avec une moyenne pluviométrique d'environ 1000-1400 mm/an) ;
- les écosystèmes du climat soudanien (ou zone continentale très sèche avec moins de 1000 mm/an).

La région de l'Ouémé supérieur se situant dans ce dernier type, la majorité de la région est constituée d'une mosaïque de forêts et de savanes, associées à des champs et jachères plus ou moins anciennes (Klein *et al.*, 2006). La plupart des forêts protégées du Bénin (appelées forêts classées) se situent plutôt dans les deux dernières zones climatiques (figure 1.13).

Figure 1.13 : Carte des forêts classées du Bénin en fonction des trois principales zones climatiques.



La végétation naturelle se caractérise par des savanes arborées ou boisées, avec la présence de forêts classées et de forêts galeries le long des principales rivières, ainsi que de savanes arborées et arbustives. Ces formations observées résultent des caractéristiques hydro-pluviométriques et édaphiques. Elles sont une conséquence à long terme de l'utilisation des terres agricoles, en particulier via les systèmes de jachère associés à la culture itinérante, à l'élevage et à l'exploitation forestière. Aujourd'hui, le bassin versant de l'Ouémé supérieur se caractérise par une mosaïque paysagère associant forêt et différentes formes de savanes, en remplacement des espèces végétales initiales ou bien, selon une succession d'étapes (figure 1.14).

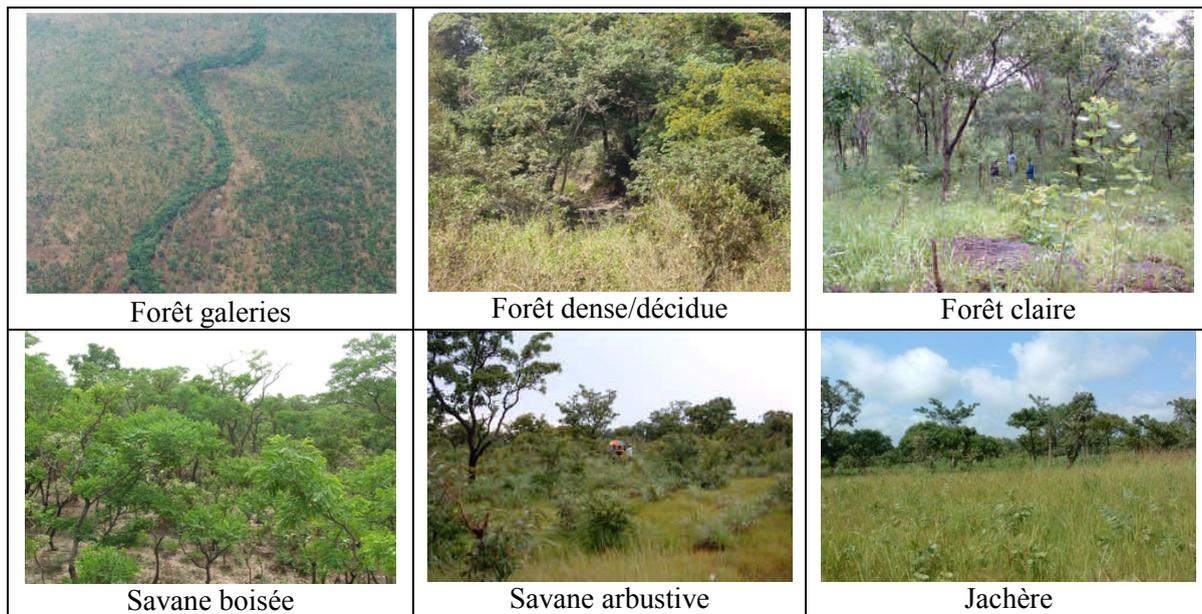


Figure 1.14 : Exemple des différents types des végétations observés dans le bassin versant de l'Ouémé ; source des clichés : Bouchez J.-M. (LTHE/IRD), Seghieri J. (CESBIO/IRD), Varado N. (LTHE).

Les types de végétation dans la région peuvent être classés en sept types selon de nombreux scientifiques qui ont étudié ce domaine (Thamm *et al.*, 2008 ; Hiepe, 2008 ; Bel, 2010 ; Leroux, 2012). La classification est basée principalement sur les aspects physiologiques de la végétation (tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Description des principaux types de végétation dans le bassin supérieur de l'Ouémé (d'après Roehring *et al.*, 2005 ; Hiepe, 2008 ; Leroux, 2012).

Type de végétation	Physionomie générale	Couvert de la canopée
Forêt galerie (<i>Gallery forest</i>)	Forêts le long des rivières	> 75 %
Forêt dense (<i>Dense forest</i>)	Forêts dense ou semi-décidues, généralement dans des zones protégées, pas ou peu influencées par le feu	> 75 %
Forêt claire (<i>Open forest</i>)	Avec des arbres moins denses que les précédentes, herbe clairsemée, influencée par le feu ; souvent sur de petites collines latéritiques	50-75 %
Savane boisée (<i>Woodland savannah</i>)	Arbres et arbustes formant une canopée ouverte et un couvert de type jachère ancienne ou herbacé (souvent sur de grands sites latéritiques)	25-50 %
Savane arborée (<i>Tree savannah</i>)	Arbres et arbustes épars avec savane herbeuse	2-25 %
Savane arbustive (<i>Bush savannah</i>)	Savane herbeuse avec des arbustes épars	arbres < 2 %
Savane herbeuse (<i>Grass savannah</i>)	Couche herbacée dominante, pas d'arbres ni d'arbustes ; souvent dans les vallées et sur des terrains latéritiques peu profonds	0

Au cours de la dernière décennie, on observe un taux élevé de l'expansion des superficies agricoles (Judex *et al.*, 2006), la végétation naturelle étant remplacée progressivement par des champs, des jachères et des agglomérations de tailles variables. Cette situation s'explique d'abord par la forte croissance démographique nationale, et donc par les besoins associés, aussi bien la demande très forte en bois pour la fabrication de charbon, en bois de feu et bois de service, mais aussi en terre agricole (figure 1.15).

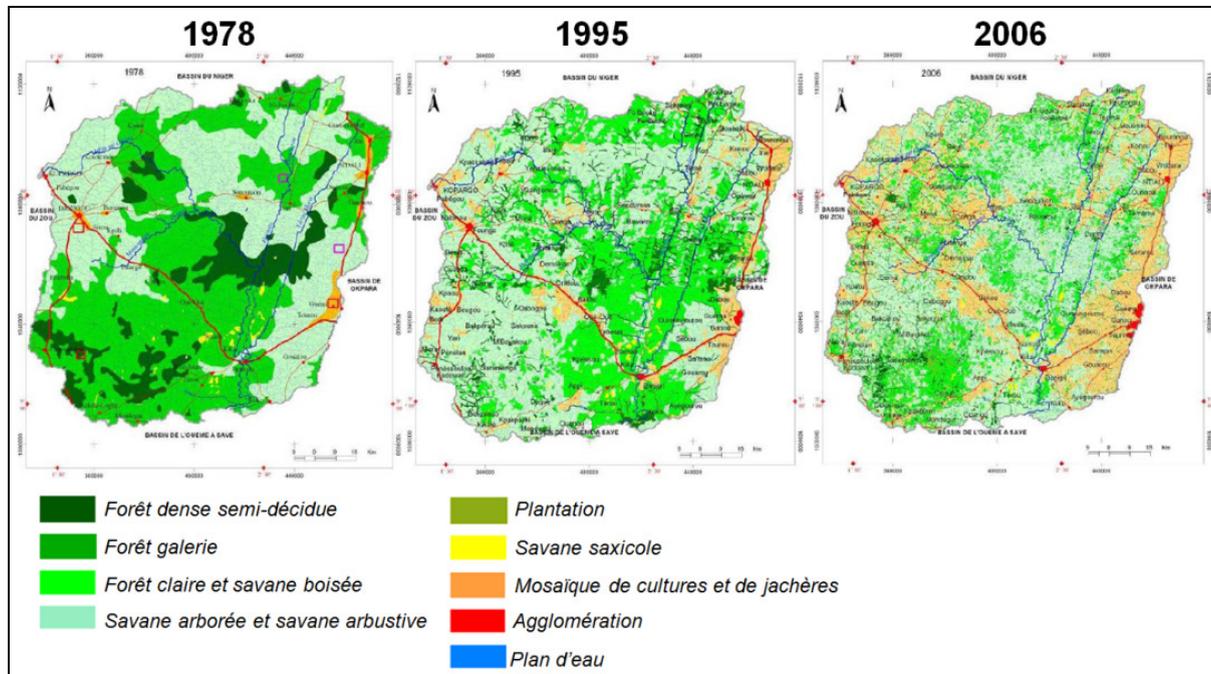


Figure 1.15 : Exemple de l'évolution de l'occupation du sol à trois dates différentes (1978, 1995 et 2006) analysée grâce à la télédétection satellitaire à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur (d'après Zanou, 2011).

La production agricole, basée sur le système pluvial, est surtout caractérisée localement par des petites exploitations de taille familiale avec des parcelles de faible taille, utilisant des intrants externes et des cycles de jachère. Les principales cultures sont l'igname, le manioc, le maïs, le millet et les arachides. Le coton et l'anacarde sont les cultures de rente les plus représentées régionalement (Judex *et al.*, 2006). Les calendriers culturaux (qui s'étendent de la date de semis à la date de récolte) sont déterminés par le régime des pluies et varient d'une variété à une autre (en fonction des travaux pastoraux). La plupart des cultures vivrières comme le manioc, l'anacardier ou la patate douce sont généralement des semis de début de saison des pluies (figure 1.16). Mais pour les cultures à cycle végétatif court comme le haricot, l'arachide ou le maïs, les dates de semis sont généralement échelonnées pendant la saison des pluies.

D'un point de vue démographique, le haut Ouémé est peu peuplé, situé sur la zone de transition entre le centre et le nord du Bénin, et il se caractérise aussi par un afflux d'immigrants permanents ou saisonniers (notamment en lien avec les activités agricoles) venant de différentes régions du pays, voire même des pays limitrophes (Thamm *et al.*, 2008).

Calendrier culturel: période de semis/plantation et période de récolte													
Zone	Dec.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	
Ouémé supérieur	Feux de brousse							Saison des pluies					
	Igname												
							Igname						
				Manioc									
					Mais								
									Mais				
										Arachide			

Figure 1.16 : Les principaux calendriers culturels dans l’Ouémé supérieur (d’après Mulidabigwi, 2005).

Selon les projections de Doevenspeck (d’après Mulidabigwi, 2005), la population dans le bassin versant de l’Ouémé supérieur va plus que doubler sur la période 2002-2025 (figure 1.17). Les implantations le long des routes principales et dans la partie nord-est du bassin versant sont prévues pour croître plus vite que les colonies de peuplement dans la région de Djougou où la terre est déjà rare (Mulidabigwi, 2005).

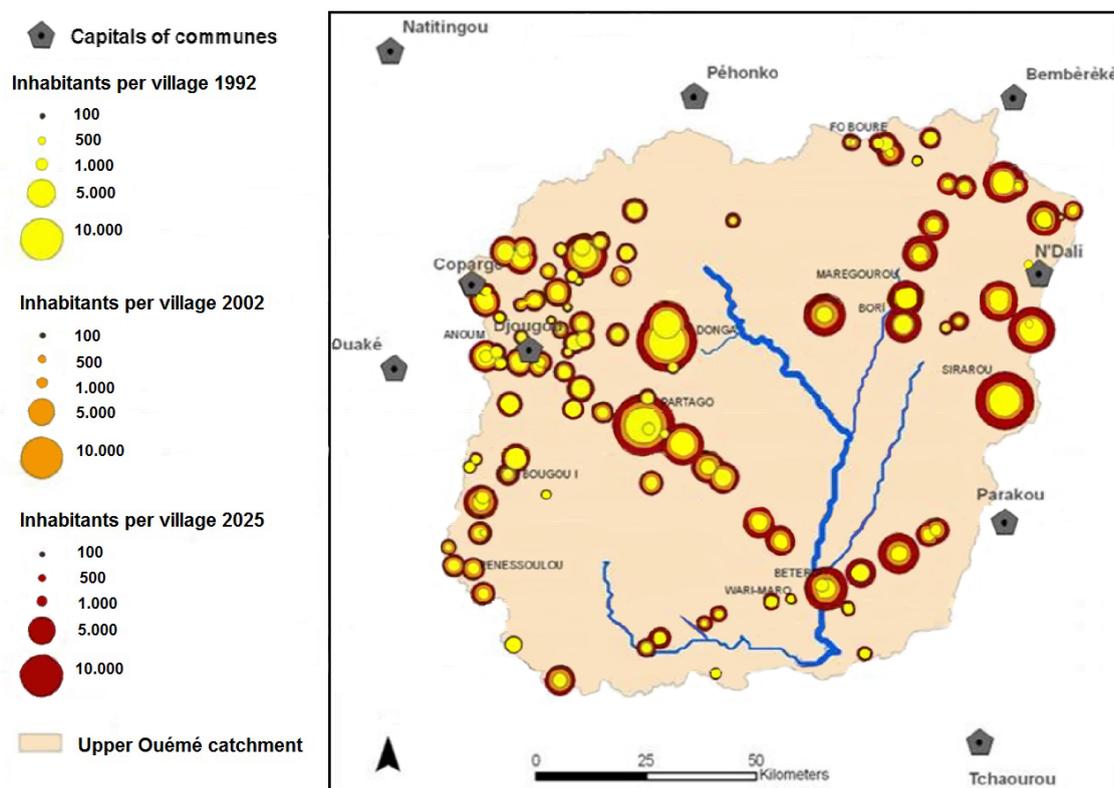


Figure 1.17 : Etablissements humains, évolutions démographiques entre 1992 et 2002, ainsi que les projections pour 2025 à l’échelle du bassin de l’Ouémé supérieur (d’après Mulidabigwi, 2005).

Dans ce contexte de fortes évolutions climatiques et socio-environnementales, certaines actions de recherche concertées ont déjà été développées sur le Bénin, et spécifiquement dans

le bassin versant de l'Ouémé. On notera par exemple les trois suivantes qui sont les plus représentatives en termes de résultats et de productions :

- **Le projet IMPETUS Atlas Bénin** (approche intégrée pour la gestion efficace des ressources en eau en Afrique occidentale ; <http://www.impetus.uni-koeln.de/en/impetus-atlas/>) qui a étudié le cycle de l'eau régional sur la base de deux bassins hydrographiques expérimentaux au Bénin et au Maroc. Le but du projet (réalisé par des instituts et universités allemands) était d'aider les pays partenaires à gérer durablement les ressources en eau, et à développer des systèmes de soutien pour gérer les périodes de crise. IMPETUS a démarré en 2000, divisé en trois phases : i) 2000-2003 pour la collecte des données et la modélisation ; ii) 2003-2006 pour le montage des scénarios et l'analyse du développement futur ; iii) 2006-2009 pour le transfert des compétences et l'application à travers la formation et l'aide à la décision.
- **Le projet RIVERTWIN** (Regional Model for Integrated Water Management in Twinned River Basins ; http://www.rivertwin.de/html/Oueme_Index.htm) réalisé sur la période 2003-2007 grâce à l'appui de l'UE (www.euwi.net) visait à soutenir les objectifs de l'Initiative Mondiale sur l'Eau en développant un modèle régional intégré pour la planification stratégique de gestion des ressources hydriques dans les bassins fluviaux. Le modèle régional devait aider les autorités de planification et les décideurs à évaluer les impacts du développement économique et technologique, ainsi que les effets du changement climatique mondial et les changements d'utilisation des terres sur la disponibilité à long terme et la qualité des ressources en eau. Le modèle se basait sur un Système d'Information Géographique (SIG) qui intègre l'écologie (disponibilité de l'eau et sa qualité) et les aspects économiques (la demande et l'utilisation de l'eau) liés à la gestion de l'eau. Trois bassins ont été sélectionnés, dont celui de l'Ouémé au Bénin.
- **Le projet OUEME-2025** (Analyse de la Dynamique et de la Disponibilité des Ressources en Eau du Bassin de l'Ouémé à l'horizon 2025 ; <http://www.oueme2025.org/>) avait également pour objet l'étude du bassin de l'Ouémé. Ce projet a été financé dans le cadre du FSP-RIPIECSA (Fonds de Solidarité Prioritaire – Recherche Interdisciplinaire et Participative sur les Interactions entre les Ecosystèmes, le Climat et les Sociétés d'Afrique de l'Ouest) par le Ministère Français des Affaires Etrangères sur la période 2007-2011. Il avait trois principaux objectifs : i) comprendre les processus hydrologiques à l'échelle du bassin de l'Ouémé dans un contexte de changement climatique ; ii) identifier la contribution opérationnelle pour l'adaptation du socio-écosystème (systèmes d'approvisionnement en eau potable, politique d'aménagement du territoire, développement rural,...) ; iii) former/renforcer les capacités des jeunes scientifiques à répondre aux enjeux du développement, notamment dans le secteur des ressources en eau.

Cependant, malgré différents développements et résultats obtenus dans ces programmes grâce aux données issues de la télédétection, il demeure encore beaucoup de travaux à réaliser dans ce domaine pour définir un bilan précis des évolutions écoclimatiques et environnementales à l'échelle régionale. Il faut notamment arriver à des bilans plus systématiques et basés sur des séries plus longues, et moins sur des exemples ponctuels dans le temps et dans l'espace. C'est un des principaux objectifs de cette thèse.

1.4. Conclusion de la partie 1

L'Afrique de l'Ouest a connu des changements climatiques très significatifs durant les 60 dernières années, spécifiquement avec une phase humide d'environ 20 ans (1950-69) et une période sèche de 20 années consécutives (1970-89). Mais récemment (de 1994 à aujourd'hui), il y a une phase progressivement humide malgré aussi l'existence d'alternances brusques entre année humide et année sèche. Ces changements liés principalement aux inhabituels décalages nord-sud de la ZCIT, provoquent des changements très nets sur les précipitations, l'hydrologie et l'activité végétale dans toute l'Afrique de l'Ouest.

Dans ce contexte, le projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) a été initié avec pour objectif central une meilleure compréhension des mécanismes océaniques, atmosphériques et biophysiques qui contrôlent la variabilité de la mousson africaine, processus eux-mêmes responsables des interactions avec les surfaces continentales, que ce soit aux échelles supérieures ou régionales. Les recherches menées au sein du programme sont axées autour du système couplé terre-océan-atmosphère, et reposent surtout sur trois sites de méso-échelle instrumentés le long d'un gradient bioclimatique nord-sud. Le bassin versant de l'Ouémé supérieur, au Bénin, à l'instar des autres sites d'Afrique de l'Ouest, connaît depuis les années 70-80 une phase de sécheresse prolongée qui s'est surtout traduite sur le plan climatique par une baisse de la pluviométrie annuelle, avec une descente en latitude des isohyètes et une diminution du nombre de jours de pluie. Cette phase peut également être associée à la dégradation du milieu naturel (dégradation des sols, perte de biodiversité, disparition de certaines formations végétales, diminution des espaces forestiers), sans oublier que ces évolutions interagissent également fortement avec les pressions anthropiques, notamment par l'extension des surfaces cultivées, le surpâturage et l'urbanisation.

Partie 2

Données satellitaires analysées et méthodologies retenues

La télédétection satellitaire connaît véritablement son développement dans les années 1970-1980 (Bonn et Rochon, 1992), permettant alors de mieux appréhender l'évolution des états de surface et de mieux interpréter leurs modifications spatio-temporelles, leurs vulnérabilités et les phénomènes associés (Tidjani et al., 2009). Aujourd'hui, grâce à l'évolution des capteurs, des techniques d'acquisition et des méthodes de diffusion, les données provenant de la télédétection sont de plus en plus nombreuses et riches d'informations environnementales, ouvrant de nombreuses capacités pour de nouvelles recherches, en particulier pour un espace comme l'Afrique de l'Ouest où les moyens de surveillance au sol sont peu nombreux.

Etant donné ce large choix, l'objectif principal de cette partie est de présenter les données satellitaires nécessaires aux analyses des parties suivantes, en expliquant comment les paramètres essentiels pour le suivi de la végétation sont obtenus. Une présentation rapide des données climatiques et des principales méthodes de traitement de données est également proposée.

2.1. La télédétection satellitaire pour l'étude des interactions biophysiques climat-végétation

2.1.1. Rappel des fondements théoriques de la télédétection

Grâce aux progrès technologiques liés à la télédétection au cours des dernières décennies, les données d'observation de la Terre par des capteurs embarqués à bord d'avions ou d'engins spatiaux sont de plus en plus diverses (suivi des ressources végétales, des précipitations, de l'atmosphère...) et disponibles rapidement (Toukiloglou, 2007 ; Dubreuil, 2010 ; Diwakar *et al.*, 2013). Ces données issues de la télédétection sont le plus souvent d'abord accessibles sous forme d'images. L'interprétation d'une image satellite est principalement fondée sur l'hypothèse qu'il est possible de reconnaître un certain nombre d'éléments présents à la surface de la terre à partir des valeurs de luminance de ces objets dans les différentes fenêtres du spectre électromagnétique (*i.e.* leur signature spectrale). Les données fournies par les satellites d'observation de la Terre sont surtout définies par trois principales caractéristiques (Caloz et Collet, 2001) :

- **La résolution spatiale** : c'est l'aptitude du capteur à distinguer deux objets rapprochés. Elle s'exprime en termes de taille du pixel. L'image possédant une résolution spatiale fine fournit une bonne fonctionnalité d'identification des objets de base. L'image possédant une résolution spatiale grossière apporte moins de fonctionnalité d'identification.
- **La résolution temporelle** : elle fait référence à la fréquence d'acquisition des images à un emplacement constant. C'est la période nécessaire au satellite pour revenir au même endroit (cycle orbital complet). Une collection d'images au fil du temps d'un même lieu est souvent appelée « images multi-temporelles », qui permet, par intercomparaison, de détecter des changements d'occupation du sol. Les plus basses résolutions temporelles (*i.e.* plusieurs semaines ou mois) permettent l'observation occasionnelle de ces changements à long terme (à l'inverse des hautes résolutions temporelles d'ordre journalier). Le principal déterminant de la résolution temporelle est l'orbite du satellite, mais aussi en fait la plupart de ses caractéristiques techniques et orbitologiques.
- **La résolution spectrale** : c'est la plus petite largeur de la bande spectrale enregistrée par le capteur. Strictement parlant, la "résolution" spectrale se réfère à la "largeur" d'une bande de fréquence spectrale utilisée pour générer une bande d'image. Il est plus utile de considérer le "nombre", la "position" et la "largeur" de toutes les bandes de fréquences spectrales comprises dans une image. Il y a deux modes de résolution spectrale : *i)* le mode panchromatique comprenant une large bande de fréquences spectrales, avec une faible résolution spectrale. *ii)* le mode multispectral comportant plusieurs bandes de fréquences spectrales, et avec une haute résolution.

Ainsi, la télédétection est le seul outil actuellement capable de fournir à un pas de temps court, et à presque toutes les échelles spatiales, des informations sur l'état des phénomènes ou des surfaces naturelles (atmosphère, océan ou surface de la terre).

2.1.2. Construction d'indices néo-canaux (de type NDVI ou LAI)

En mesurant l'énergie réfléchie par les objets en surface et à différentes longueurs d'onde, on peut construire une signature spectrale à chaque longueur d'onde spécifique et ainsi étudier certaines caractéristiques propres aux objets naturels. Reconnaître ces caractéristiques est l'objectif principal de la télédétection ; par conséquent, il faut chercher à rassembler

rapidement ces informations nécessaires à l'objet d'étude (Girard *et al.*, 2010). Le but et l'intérêt de la création de néo-canaux est alors d'extraire une information plus précise et plus adaptée qu'un seul canal, à un traitement en particulier, par exemple, en affectant à chaque pixel de l'image une valeur résultant d'une combinaison dans deux ou plusieurs canaux (Lambert, 2008). Les nouvelles informations calculées n'expriment plus directement une mesure radiométrique car ils concentrent une partie de l'information utile. Les plus courants sont les indices de végétation (Bouraoui, 2013). Les deux plus connus et utilisés sont le NDVI et le LAI.

- **L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** est un néo-canal construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR). Son principe repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande rouge et réfléchit beaucoup dans le proche infrarouge, d'où la formule suivante (Rouse *et al.*, 1973 ; Tucker, 1979) où le NDVI équivaut à $(PIR - R) / (PIR + R)$. Une forte activité photosynthétique implique une forte biomasse et donc, de fortes valeurs du NDVI. Il peut varier entre -1 et 1. Les très faibles valeurs (-0,9 à 0) surviennent dans les régions dépourvues de végétation (les zones rocheuses, les sols nus, l'eau, la neige) ou alors, si la végétation est sénescente. Les valeurs modérées (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et la plupart des types de cultures alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,9) traduisent une végétation dense abondante (Pettorelli *et al.*, 2005). Le NDVI est un bon indicateur du comportement de l'activité photosynthétique de la végétation, des productions de biomasse et des différences de paysages. Il est bien adapté pour l'étude de leur variabilité spatiale et temporelle (Philippon *et al.*, 2006). On citera par exemple dans les travaux récents ceux de Vrieling *et al.* (2013) qui ont utilisé l'indice NDVI à résolution de 8 km (avec les données NDVI3g, c'est-à-dire celles de troisième génération recensées dans la base de données quasi globale GIMMS – Global Inventory Modeling and Mapping Studies, qui couvre la période allant de juillet 1981 à décembre 2011) pour étudier la durée de la période de croissance en Afrique (figure 2.1). Leur analyse fournit des informations utiles pour la cartographie des systèmes d'exploitation agricole, et pour l'étude des effets de la variabilité du climat et d'autres facteurs de changement sur la végétation et l'aptitude aux cultures.
- **L'indice foliaire LAI (Leaf Area Index)** est un paramètre biophysique de la végétation pour l'estimation des relations entre le sol, la plante et l'atmosphère. Il est défini comme le ratio de la surface foliaire totale par unité de surface au sol, soit la fraction de la photosynthèse active (Fan *et al.*, 2009). Il s'agit d'un indice maintenant communément utilisé pour étudier la vitalité de la végétation, et pour mesurer ou contrôler (prédire) la végétation saisonnière (Myneni *et al.*, 2002). Le LAI reflète l'adaptation des plantes en fonction de l'état et du changement climatique, en particulier dans les zones arides et semi-arides où les variations interannuelles du climat sont importantes (Soudani *et al.*, 2008). Les valeurs normalisées du LAI sont comprises entre 0 et 7. Les fortes valeurs de LAI correspondent aux densités les plus importantes de biomasse verte (Shabanov *et al.*, 2005). Le LAI est l'indice de plus en plus développé et largement utilisé par les différents capteurs satellitaires. Gessner *et al.* (2013) ont ainsi fourni une comparaison relativement exhaustive du LAI à partir de quatre produits disponibles gratuitement et pour un large gradient des écosystèmes en Afrique de l'Ouest (figure 2.2). Dans le contexte du programme ALMIP2, Kaptchue *et al.* (2010) ont cherché à obtenir une meilleure compréhension de la dynamique végétale et des processus hydrologiques en Afrique de l'Ouest. Ils ont donc utilisé le LAI comme critère de cohérence entre les classifications de la couverture terrestre (période 2000-2007), et ont constitué une base de données

régionalisée (appelée ECOCLIMAP-2) résumant les informations physiographiques. A long terme et à échelle planétaire, les données LAI sont essentielles pour la surveillance dynamique de la végétation et pour la modélisation des échanges d'énergie, de biomasse et des dynamiques de la surface de la terre. Ainsi, Zhu *et al.* (2013) proposent un algorithme basé sur la période 2000-2009 entre le nouveau NDVI3g (issus de GIMMS) et les produits LAI (issus de MODIS) afin de pouvoir ensuite générer conjointement des données LAI3g (*LAI de 3^{ème} génération*) et FPAR3g (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation de 3^{ème} génération*), avec une fréquence temporelle de 15 jours et une résolution spatiale de 1/12 de degré résolution spatiale, sur la période reconstituée allant de juillet 1981 à décembre 2011.

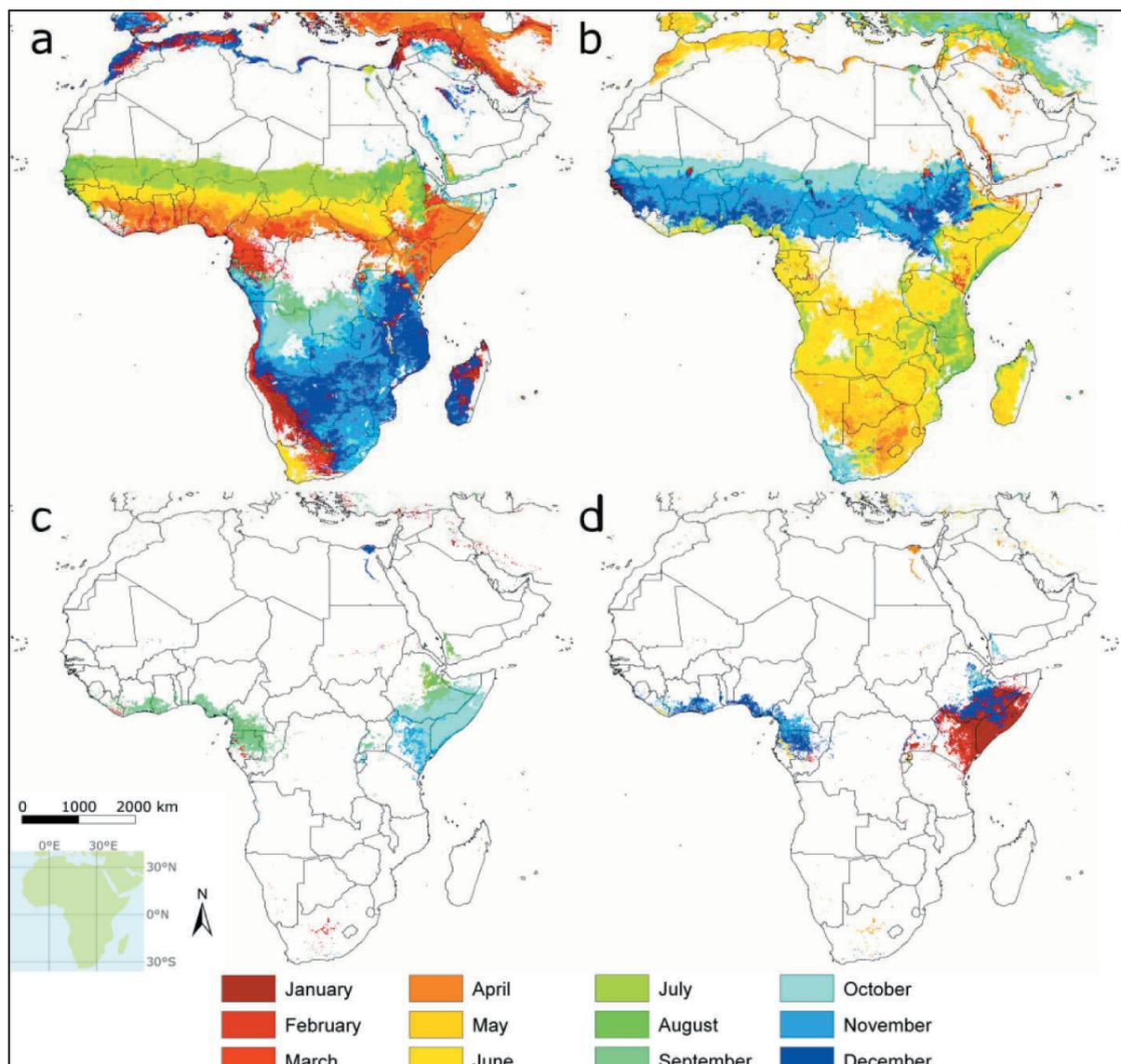


Figure 2.1 : a) Début moyen de l'activité végétale en Afrique (pour la première saison de l'année civile) calculé avec les données NDVI3g sur la période 1981-2011 en utilisant le seuil d'une méthode adaptative ; b) la fin moyenne de l'activité ; c et d) le début et la fin d'activité pour les zones enregistrant une deuxième saison (d'après Vrieling *et al.*, 2013).

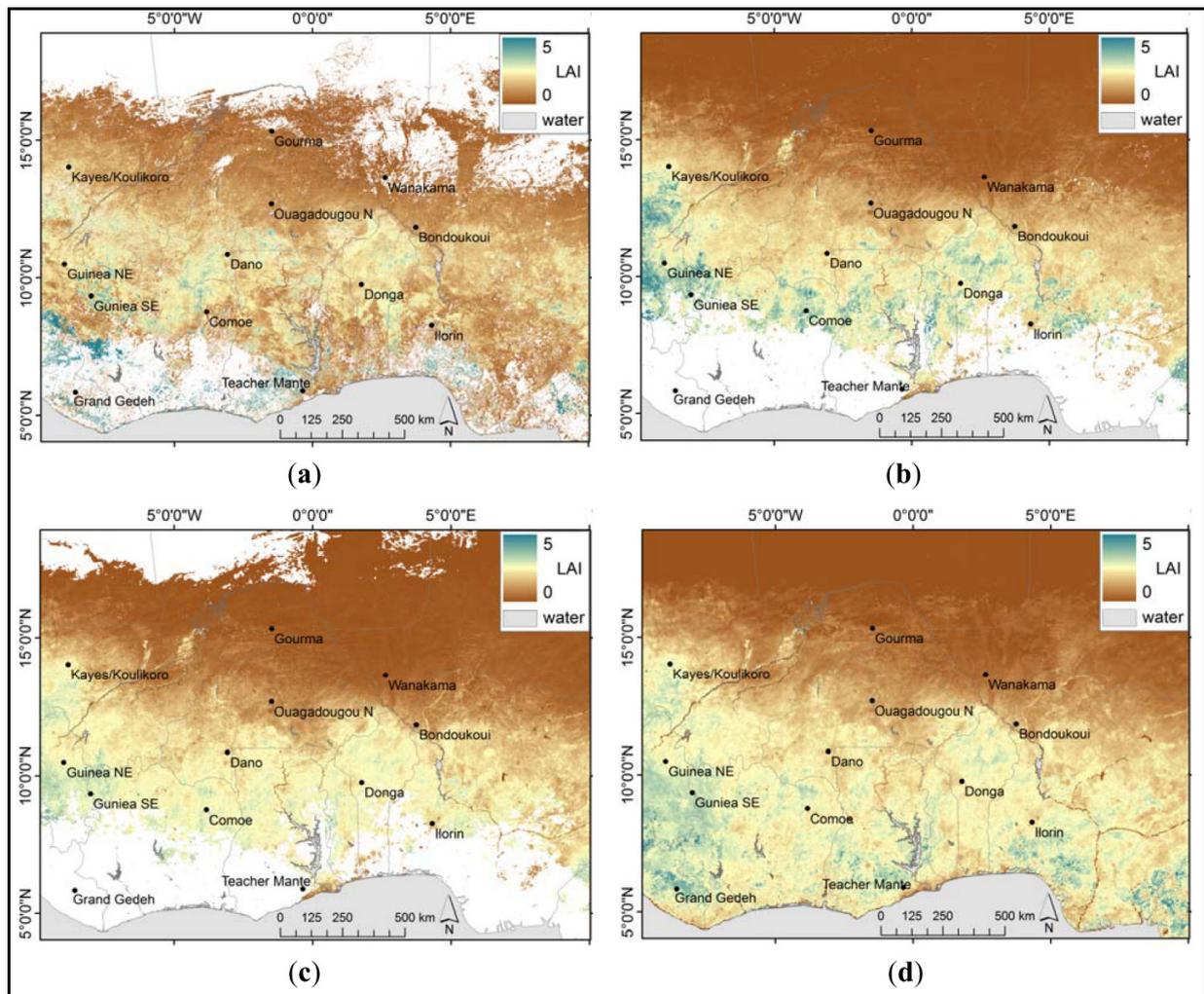


Figure 2.2 : Carte des différents LAI produits à l'échelle d'une partie de l'Afrique de l'Ouest à la fin de septembre 2007 à partir de quatre types de données (d'après Gessner *et al.*, 2013) : a) MODIS (MOD15A2), b) GEOV1, c) CYCLOPES et d) LSA-SAF.

2.1.3. Capacité de l'information satellitaire dans l'étude des interactions climat-végétation

Dans la littérature scientifique, on trouve beaucoup de travaux sur l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation en utilisant différentes données, méthodes et outils de la télédétection. Justice *et al.* (1985) concluent que les données satellitaires à résolution grossière (NOAA-AVHRR) constituent un outil précieux pour la cartographie de la végétation et sa surveillance à l'échelle régionale et mondiale, des images du NDVI servant par exemple aux échelles continentales pour établir une description et des comparaisons des dynamiques saisonnières des principales formations végétales. Le projet Global Land Cover est le plus connu à ce sujet (développé à l'échelle continentale, avec des données mondiales AVHRR à résolution 1 km). Les données sont distribuées par l'EROS (Earth Resources Observation & Science – <http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php>) pour l'utilisation dans une large gamme d'applications de recherche environnementale et de modélisation.

Au niveau de l'Afrique de l'Ouest et dans le cadre de AMMA, Anyamba et Tucker (2005) montrent que les données NDVI issues de NOAA-AVHRR permettent de créer des séries longues (23 ans pour leur exemple) appropriées pour des études à long terme pour des espaces

subissant de profondes mutations comme le Sahel. Le couplage étroit entre précipitations et croissance de la végétation en domaine sahélien permet en effet d'utiliser les données NDVI comme un bon descripteur de la réponse de la surface à la variabilité pluviométrique. Ils ont également souligné que continuer de recueillir de telles séries de données satellite à long terme aidera à comprendre les changements dans le cadre d'une évolution globale du climat et des changements des conditions de la surface terrestre aux échelles régionales et locales. Sur la base d'analyses de séries NDVI-AVHRR pour la période 1982-2003, Herrmann *et al.* (2005) recensent les tendances spatio-temporelles de la végétation et leurs interrelations avec les précipitations à l'échelle du Sahel. Ils observent une augmentation récente de l'activité de la végétation selon la saison, contrairement à l'idée répandue que la désertification est irréversible dans le Sahel. Dardel *et al.* (2014) étudient également le nouveau produit GIMMS-3g NDVI (par comparaison avec les autres ensembles de données de type AVHRR-NDVI et MODIS-NDVI) pour analyser les tendances régionales sahéliennes (plus précisément au Mali et au Niger, entre 1981 et 2011). Les tendances de l'activité végétale sont plutôt positives selon une analyse de régression linéaire effectuée entre NDVI moyen saisonnier et moyenne pondérée issue des mesures *in situ*. Les auteurs affirment ainsi que ces résultats démontrent la capacité de résilience des écosystèmes des zones arides sahéliennes depuis la période très sèche des années 1980. Dans le même temps, ils concluent également qu'une tendance à la dégradation peut aussi être observée à partir de ces données satellitaires et pour certains espaces ouest-africains.

Camberlin *et al.* (2007) examinent également la réponse de l'activité photosynthétique aux variations pluviométriques interannuelles en Afrique au sud du Sahara sur une période de 20 ans (1981-2000), en précisant une certaine hiérarchie des déterminants dans la réponse de la végétation aux variations interannuelles des précipitations. En 2009, Fensholt *et al.* ont évalué les variations à long terme de la végétation au Sahel par comparaison des tendances du NDVI issues de trois sources de données : AVHRR-GIMMS, Terra-MODIS et SPOT-VGT. Une bonne relation générale a été observée entre les mesures *in situ* et tous les produits NDVI d'origine satellitaire, en dépit des problèmes inhérents aux échelles. Ceci suggère que dans des paysages homogènes, les données de faible résolution spatiale peuvent être utiles pour les études de la végétation à long terme, même à l'échelle régionale et locale. Par la suite, Fensholt *et al.* (2011) ont utilisé les données de type SEVIRI-MSG (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager – Meteosat Second Generation*), sous forme de composites de 5 jours et pour l'échelle continentale, pour évaluer les conditions environnementales et l'amélioration de l'alerte précoce des catastrophes sur le continent africain (tels que les inondations ou les sécheresses). Fensholt *et al.* (2012) fournissent enfin une analyse des tendances de la végétation dans les espaces semi-arides en utilisant les données AVHRR-GIMMS 1981-2007. En croisant les variations saisonnières et interannuelles, ils observent également certaines augmentations de l'activité photosynthétique dans plusieurs zones semi-arides du monde, notamment en Afrique.

Bobée *et al.* (2012) démontrent que le couplage des données d'observation de la Terre (informations sur la végétation et sur les sols) avec les données de précipitations fournit une méthode fiable pour le suivi de la dynamique végétale, et pour évaluer l'impact de la pression humaine sur la dégradation de la végétation. Bien que certaines restrictions demeurent, les résultats permettent ainsi de mieux comprendre et quantifier les relations solides entre l'activité saisonnière de la végétation et les précipitations en milieu sahélien.

Au niveau méso échelle et à l'échelle de l'Ouémé, Bigot *et al.* (2005b) ont utilisé des données satellitaires de type SPOT/HRV et SPOT-VGT pour fournir une carte d'occupation du sol (avec cinq formations végétales principales) et pour définir les principales variations

phénologiques saisonnières et interannuelles. Les corrélations entre variations climatiques et végétales semblent finalement très dépendantes de l'échelle d'observation choisie (elle-même imposée par la résolution spatiale de base de l'image satellitaire). Cette analyse paysagère peut cependant permettre de comprendre l'évolution de la mosaïque des formations végétales, et donc aussi celle des échanges sol-végétation-atmosphère.

2.2. Les données environnementales analysées

2.2.1. Les données satellitaires disponibles

2.2.1.1. Les données issues de SPOT Végétation (2002-2012)

Les produits SPOT Vegetation (SPOT/VGT) sont disponibles à partir d'avril 1998, gratuitement sur le site du VITO (Flemish Institute for Technological Research) à l'adresse <http://free.vgt.vito.be>. L'instrument VEGETATION comprend un système imageur dans quatre bandes spectrales (Bleu, Rouge, PIR, MIR) avec une haute définition spectrale (précision de l'étalonnage absolu d'environ 5 %) et une bonne précision géométrique (moins de 0,3 pixel). Toutes ces images ont été géoréférencées et co-enregistrées en projection latitude/longitude et en intégrant les corrections atmosphériques (Bartholomé *et al.*, 2006 ; Anim *et al.*, 2013). Les images sont reçues en format HDF (16 bits) et transformées en valeurs radiométriques codées sur 8 bits (0-255). Une image SPOT/VGT intègre toutes les signatures spectrales de chaque type de couverture terrestre inclus dans un pixel d'environ 1 km² (Bartholomé *et al.*, 2006). Pour le cas particulier de la végétation, cette intégration correspond à une valeur de réflectance moyenne dans le Bleu (B0 : 0,50-0,59 µm), le Rouge (B2 : 0,61-0,68 µm), le Proche Infrarouge (PIR ou B3 : 0,78-0,89 µm) et le Moyen Infrarouge (MIR ou B4 : 1,58-1,75 µm), qui constituent l'ensemble minimal adapté pour l'étude du couvert végétal. Cette intégration permet en effet de représenter de nombreux types d'occupation du sol (Ceccato, 2002).

Les données collectées subissent des prétraitements avant d'être livrées sous plusieurs formes (Maisongrande *et al.*, 2004) : VGT-P (Primary), VGT-S (Synthesis) ou VGT-D (Directional). Notre étude utilise les produits VGT-S. Les images de type S sont obtenues en calculant une synthèse de plusieurs images sur la même zone acquises à des dates différentes. C'est une synthèse de type Maximum Value Composite (MVC), ce qui signifie que pour chaque pixel de l'image finale, on sélectionne les valeurs radiométriques sur l'image présentant un indice NDVI le plus élevé (Bartholomé *et al.*, 2006 ; Yin *et al.*, 2012). Le fait d'appliquer cette méthode du MVC permet de réduire les effets et biais des nuages. Il y a deux produits de type S : les S1 (synthèses journalières, incomplètes en dessous de 35° de latitude) et les S10 (synthèses effectuées sur dix jours, du 1^{er} au 10, du 11 au 20 et du 21 à la fin du mois), à une résolution spatiale de 1 km.

2.2.1.2. Les données MODIS (2002-2009)

Le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a été lancé par la NASA en décembre 1999 pour la surveillance de l'atmosphère terrestre, des océans et des terres émergées. Le produit LAI MOD15A2 est utilisé dans notre travail (figure 2.3). Il possède une résolution spatiale de 1 km, et correspond à une composite établie à l'échelle planétaire sur 8 journées et sur la période 2002-2009 (Myneni *et al.*, 2002 ; Shabanov *et al.*, 2005).

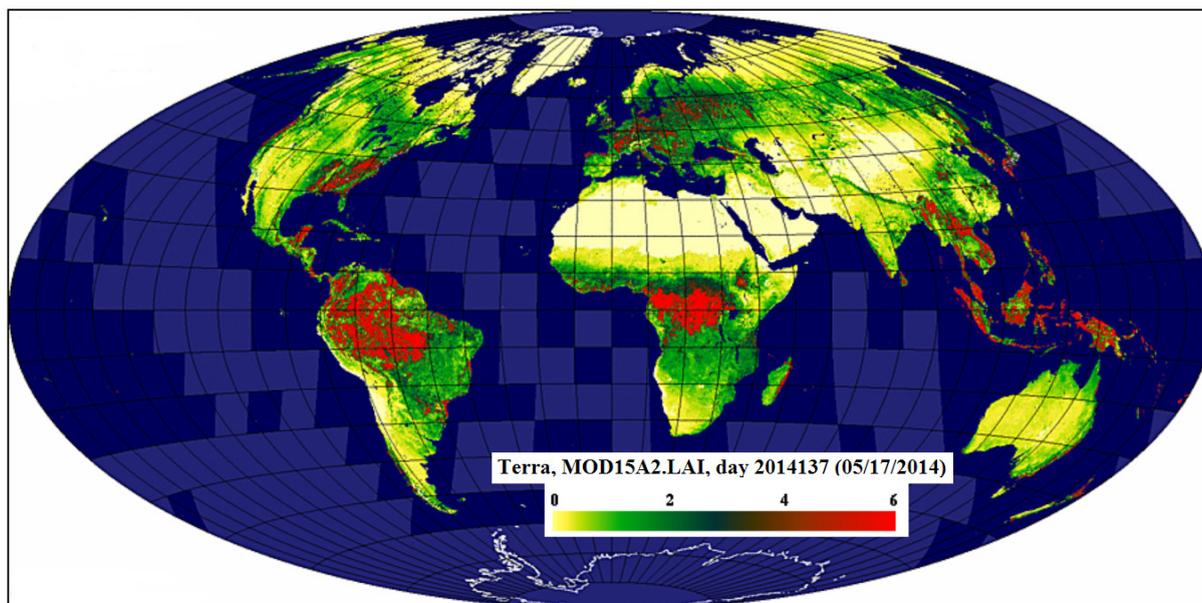


Figure 2.3 : Exemple de la cartographie planétaire d’une synthèse sur 8 jours du LAI issue des données MODIS (MOD15A2) valable pour le 17 mai 2014 (source : <http://landweb.nascom.nasa.gov/>).

Les données sont téléchargées avec l’outil de l’USGS Global Visualization Viewer (Glovis : <https://glovis.usgs.gov/>). Le produit de type MODIS LAI/FPAR a aussi été utilisé dans de nombreuses études pour l’étude du cycle saisonnier (Wang *et al.*, 2006 ; Garrigues *et al.*, 2008). En raison des caractéristiques du format HDF-EOS (format de téléchargement), les données sont produites dans un type "uint8", qui correspond à une variable de 8 bits entier dont les valeurs peuvent varier de 0 à 255. Les valeurs sont donc stockées avec un facteur d’échelle qui doit être appliqué pour les transformer en valeurs biophysiques pour l’analyse selon l’expression et les paramètres suivants (tableau 2.1) :

$$\text{Analytical}_{\text{pixel}} = \text{scale}_{\text{factor}} * (\text{digital}_{\text{pixel}} - \text{offset}).$$

Tableau 2.1 : Ensemble des spécifications concernant les produits MODIS de type MOD15A2 (d’après <https://lpdaac.usgs.gov/>).

Data sets	Units	Scale factor	Valid range	Offset	Fill value
FPAR_1km	Percent	0,01	0 – 100	0,0	255
LAI_1km	m ² plant/ m ² ground	0,1	0 – 100	0,0	255
FPAR/LAI_QC	Class flag	na	0 – 254	0,0	255

Note : Fpar (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) ; FPAR/LAI (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active, absorbée par la canopée dans la gamme 0,4-0,7 nm ; QC (Quality control) ; Class flag (classe établissant la qualité des différents produits MODIS) ; na (not applicable).

2.2.1.3. Les données SEVIRI (2006-2009)

Le satellite MSG (*Météosat Seconde Génération*) a été lancé le 29 août 2002, les opérations de routine avec MSG-1 ayant commencé le 28 janvier 2004 avec depuis, des données disponibles pour la communauté scientifique (Hanson et Mueller, 2004). Le capteur SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) est un radiomètre embarqué sur la plateforme MSG qui possède une résolution de 3 km (distance d’échantillonnage) au nadir et équipé de 12 canaux spectraux (tableau 2.2), allant des longueurs d’onde visibles aux

longueurs d'onde dans l'infrarouge lointain, très intéressantes pour l'évaluation des paramètres biophysiques de la végétation ou les applications terrestres (Product User Manual, 2011).

Tableau 2.2 : Principales caractéristiques radiométriques du capteur SEVIRI embarqué par MSG (Jiang *et al.*, 2006 ; Fensholt *et al.*, 2006).

Bandes de fréquence de l'instrument SEVIRI	Bandes spectrales	Longueur d'onde (μm)	Résolution spatiale (km)
Bande 1	VIS (Visible)	0,56 – 0,71	3
Bande 2	VIS (Visible)	0,74 – 0,88	3
Bande 3	IR (infrarouge)	1,50 – 1,78	3
Bande 4	IR (infrarouge)	3,48 – 4,36	3
Bande 5	WV (vapeur d'eau)	5,35 – 7,15	3
Bande 6	WV (vapeur d'eau)	6,85 – 7,85	3
Bande 7	IR (infrarouge)	8,30 – 9,10	3
Bande 8	IR (infrarouge)	9,38 – 9,94	3
Bande 9	IR (infrarouge)	9,80 – 11,80	3
Bande 10	IR (infrarouge)	11,00 – 13,00	3
Bande 11	IR (infrarouge)	12,40 – 14,40	3
Bande 12	HRV (Visible Haute résolution)	0,50 – 0,90	1

Les produits LSASAF (*Land Surface Analysis of Satellite Application Facility*) sont basés sur quatre différentes zones géographiques (figure 2.4) : l'Europe (Euro), l'Afrique du Nord (NAfr), l'Afrique du Sud (SAfr) et l'Amérique du Sud (SAmé). Les produits LSASAF SEVIRI incluent la fraction de couvert de la végétation (FVC), l'indice foliaire (LAI) et la fraction du rayonnement photosynthétique actif (FAPAR). Ces produits sont fournis au format HDF5 avec un facteur d'échelle 1/1000 et sont actuellement disponibles à partir du site web <http://landsaf.meteo.pt> (García-Haro *et al.*, 2008 ; Barbosa, 2011). La période d'étude retenue ici est 2006-2009, cette séquence ayant déjà été largement validée dans la littérature et comporte des données homogènes de qualité.

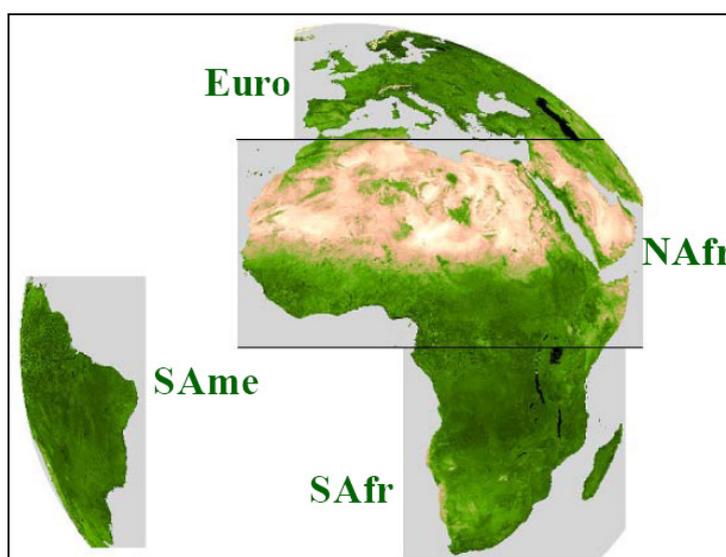


Figure 2.4 : Les quatre principaux domaines géographiques couverts par les produits de type LSASAF, avec l'Europe (Euro), l'Afrique du Nord (NAfr), l'Afrique du Sud (SAfr) et l'Amérique du Sud (SAmé) ; d'après Barbosa (2011).

2.2.1.4. Les données de type ECOCLIMAP-2 (2005-2007)

ECOCLIMAP-2 est une base de données à résolution spatiale de 1 km (à l'échelle mondiale, désormais actualisée jusqu'en 2010) qui comprend deux composantes : une classification des écosystèmes et un ensemble cohérent de paramètres des surfaces continentales. La définition des paramètres de surface dépend de plusieurs variables essentielles, notamment le sol (pourcentage de sable et d'argile, la profondeur du sol), la végétation (fraction de la végétation, indice foliaire, fraction du rayonnement photosynthétique actif, minimum de la résistance stomatique, longueur de rugosité, états de surface du sol et de la végétation avec l'albédo et l'émissivité). Le produit a été spécialement développé dans le cadre du programme AMMA (figure 2.5 ; Masson *et al.*, 2003 ; Kaptue *et al.*, 2010).

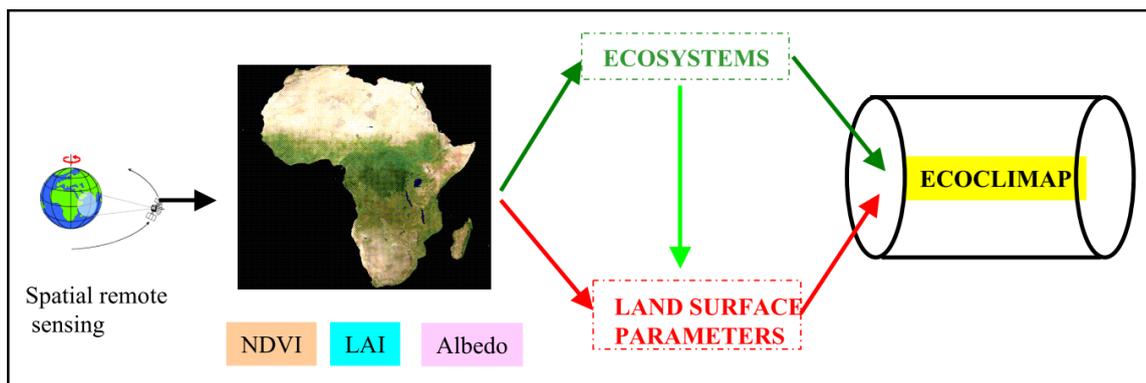


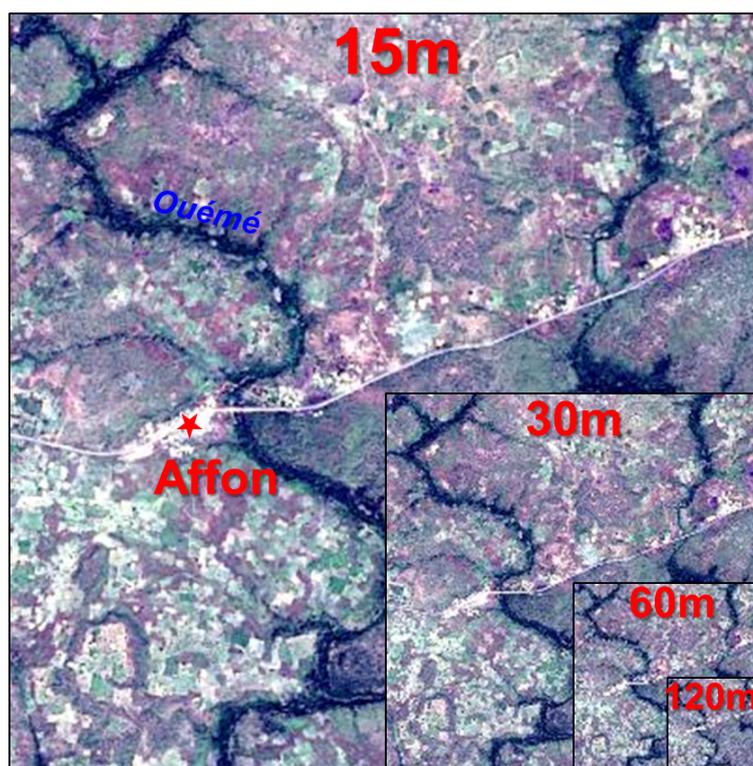
Figure 2.5 : Description des principales étapes de construction de la base de données ECOCLIMAP-2 (d'après www.meteo.fr).

A l'échelle de l'étude menée ici pour une partie du Bénin, les données ECOCLIMAP-2 ont été fournies directement par Christophe Peugeot (IRD Montpellier), responsable du projet 'Hydrologie, flux d'énergie et fonctionnement de la végétation en Afrique de l'Ouest : inter-comparaison et évaluation de modèles à méso-échelle' dans le cadre du programme ALMIP-2. Les données ont été ré-échantillonnées à la résolution spatiale de 5 km, sur la période 2005-2007, et fournies au format Net-CDF (car dans le contexte du projet ALMIP-1, les résultats ont révélé certains désaccords importants entre modèles utilisés, amenant à travailler ensuite à une plus haute résolution spatiale). Les données de forçages seront donc ainsi produites ensuite à la résolution spatiale de $0,05^\circ$, soit environ 5 km.

2.2.1.5. Les données LANDSAT ETM+

LANDSAT a une longue histoire de fonctionnement avec des applications larges pour la surveillance de la Terre depuis l'espace. Le premier satellite LANDSAT a été lancé en 1972 pour acquérir les images MSS (*Multi-Spectral Scanner*), une série plus sophistiquée de capteurs multi-spectraux (nommés TM - *Thematic Mapper*) a été rajoutée, avec LANDSAT 4 (1982), LANDSAT 5 (1984), LANDSAT 6 (1993, lancement raté), LANDSAT 7 (1999, *Enhanced Thematic Mapper Plus* – ETM+) et récemment, LANDSAT 8 (2013, avec deux capteurs : OLI – *Operational Land Imager*, et TIRS – *Thermal InfraRed Sensor*). Les capteurs LANDSAT TM et LANDSAT ETM+ ont archivé des millions d'images presque en continue depuis leur lancement (NASA, 2002 ; Chander *et al.*, 2009). Les images LANDSAT fournissent des données allant d'une résolution spatiale haute à moyenne (entre 15 et 120 m environ, selon les capteurs et les bandes spectrales), résolution qui influence donc fondamentalement la discrimination des objets au sol, ainsi que les interprétations possibles (figure 2.6).

Figure 2.6 : Exemple d'un zoom multiscalaire sur la commune d'Affon, au Bénin (en bordure du fleuve Ouémé) à partir d'images LANDSAT possédant une résolution spatiale variant entre 15 et 120 m.



LANDSAT 7 possède à son bord le capteur multi-spectral ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – <http://landsat.gsfc.nasa.gov>). Ce capteur enregistre la réflectance de la surface terrestre dans sept bandes spectrales (tableau 2.3) : quatre dans le Visible et Proche Infrarouge, deux dans l’Infrarouge Moyen, une dans l’Infrarouge Thermique et une bande en mode panchromatique (l’image panchromatique est obtenue à partir de données acquises dans une seule bande spectrale, correspondant à la partie visible du spectre à l’exception du bleu, la bande couvre la région du spectre comprise entre 0,52 et 0,90 μm).

Tableau 2.3 : Les principales caractéristiques radiométriques des bandes LANDSAT 7 ETM+ (Source : NASA, 2002).

Bandes ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale (m)	Longueur d’onde (μm)
Bande 1	Bleu (visible)	30	0,45 - 0,5
Bande 2	Vert (visible)	30	0,52 - 0,6
Bande 3	Rouge (visible)	30	0,63 - 0,69
Bande 4	IR proche	30	0,75 - 0,9
Bande 5	IR moyen	30	1,5 - 1,7
Bande 6/1	IR Thermique/lointain	60	10,4 - 12,5
Bande 6/2		(30)*	
Bande 7	IR moyen	30	2,08 - 2,35
Bande 8	Panchromatique (vert-rouge-IR)	15	520 - 900 nm

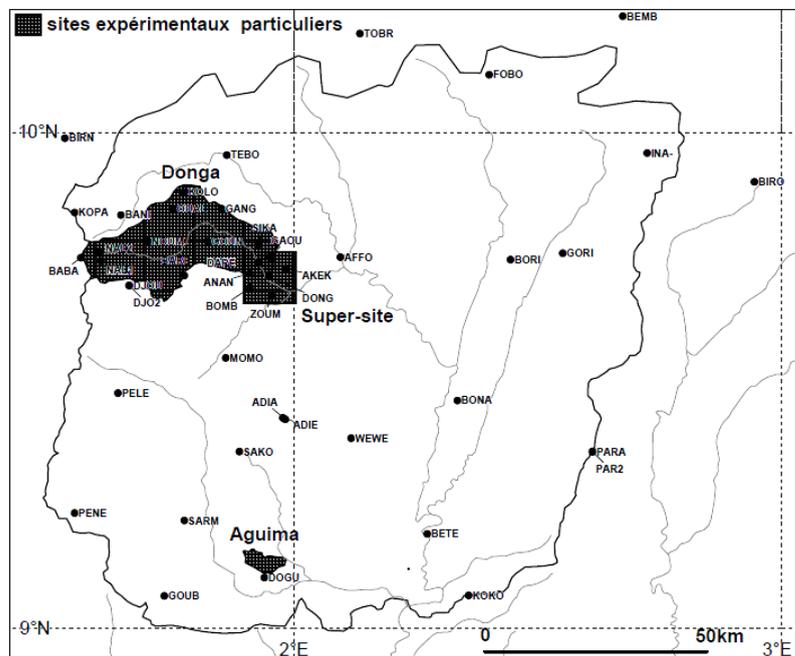
* Produits transformés après le 25 février 2010 avec le ré-échantillonnage des pixels à 30 m (<http://landsat.usgs.gov/band>).

2.2.2. Les données pluviométriques stationnelles analysées

2.2.2.1 Le réseau de l'OHHVO

L'Observatoire de Recherche pour l'Environnement (ORE) AMMA/CATCH est actuellement l'un des meilleurs et des plus complets pour le suivi et l'observation hydroclimatique en milieu tropical. L'OHHVO (Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé) est également celui qui fournit les séries de meilleure qualité pour de nombreux paramètres physiques (sol et atmosphère) pour la partie soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest. Le réseau de méso-échelle (RME, défini dans la vision multiscalaire des réseaux de mesures installés durant AMMA) est constitué par un ensemble de stations pluviographiques réparties de façon régulière sur l'ensemble de l'OHHVO (figure 2.7). Au sein du RME, le réseau du bassin de la Donga (RBD) et le réseau du supersite (RS) au sud-est de la Donga sont définis comme des sites à instrumentation renforcée, permettant d'effectuer des bilans hydroclimatique plus précis de ce petit bassin (593 km²).

Figure 2.7 : Exemple du réseau en activité en 2002 à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur, avec la localisation des deux sites à instrumentation renforcée, celui du bassin de la Donga et le super-site à son extrémité sud-est (document extrait du rapport de campagne 2002 : <http://www.amma-catch.org/>).

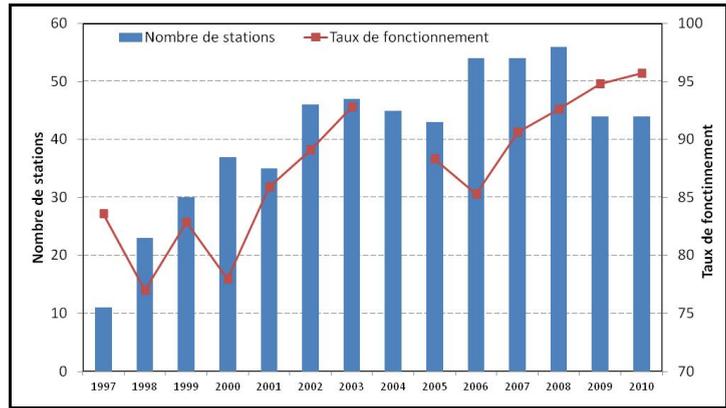


Un suivi météorologique constant est effectué, qui permet notamment d'aboutir à des séries pluviométriques de qualité, vérifiées et possédant des métadonnées détaillées. L'ensemble de ces informations peut être consulté par exemple dans les rapports de campagne annuels, documents qui nous serviront par ailleurs pour appuyer nos diagnostics éco-climatiques sur les relations entre précipitations saisonnières et variations de l'activité végétale.

2.2.2.2 Qualité du réseau

Sur la période 1997-2010, on observe que le réseau pluviométrique a été en croissance continue, surtout depuis 2002, pour aboutir à un niveau stable de 40 stations environ permettant de bien caractériser la pluviométrie régionale, avec un taux de fonctionnement des équipements proches de 85 à 90 %, ce qui est exceptionnel pour un réseau géophysique de cette ampleur en Afrique (figure 2.8).

Figure 2.8 : Evolution du nombre de stations pluviométriques en activité dans le réseau AMMA-Catch de l’Ouémé supérieur, et de son taux de fonctionnement, sur la période 1997-2010 (pas de données disponibles pour 2004) ; établi à partir des données du rapport de campagne 2010 disponible à partir de <http://www.amma-catch.org/>).



Le réseau évolue entre 44 et 56 stations sur la période 2002-2012, en fonction des nombreuses contraintes météorologiques rencontrées sur le terrain par le matériel et par les équipes en charge de leur gestion. Les stations sont réparties de manière assez homogène, et elles fonctionnent au moins de mars à octobre (pour prendre en compte l’intégralité de la saison des pluies), à l’échelle journalière et décadaire (figure 2.9). L’ensemble des données et des descriptions des champs pluviométriques peut être analysé grâce aux rapports de campagne établis annuellement depuis 2002 : <http://www.amma-catch.org>.

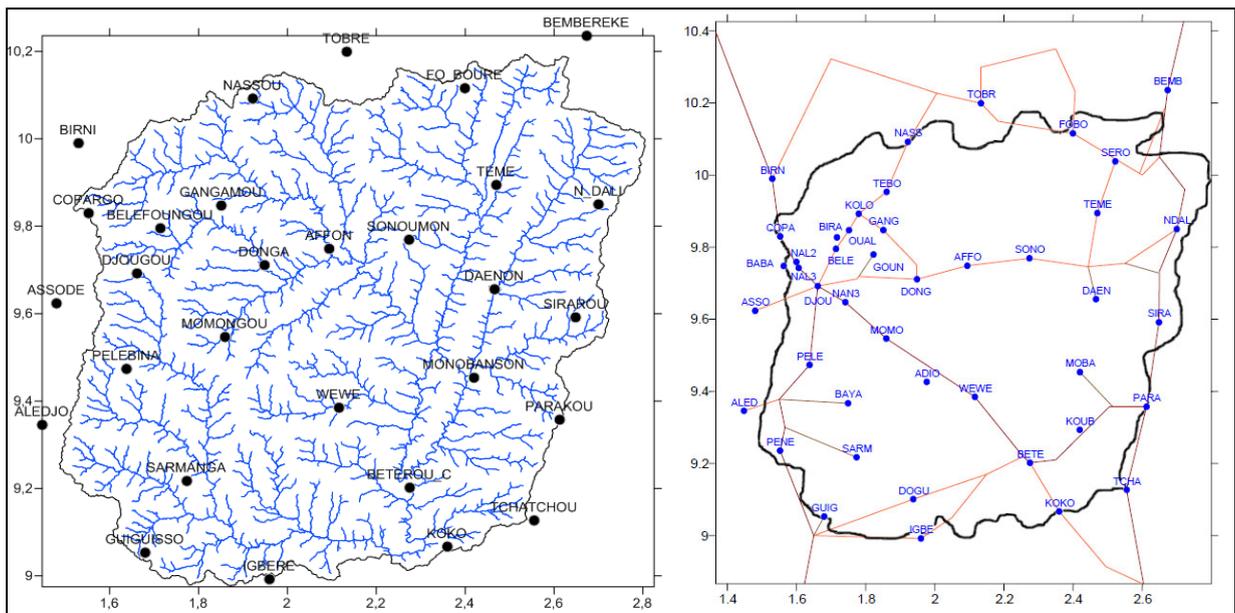


Figure 2.9 : Principales stations pluviométriques du réseau AMMA-Catch dans le bassin de l’Ouémé supérieur (carte de gauche, avec le réseau hydrographique), et stations en fonctionnement en 2010 (carte de droite, avec les principales routes et pistes).

2.2.3. Les cartes d’occupation du sol à l’échelle de l’Ouémé supérieur

2.2.3.1. La carte d’occupation créée par le projet IMPETUS

Cette carte est construite à partir d’images LANDSAT de 2000 et 2001 possédant une résolution spatiale de 30 x 30 m (Judex *et al.*, 2006 ; Thamm *et al.*, 2008), et grâce à une base de données détaillée constituée de centaines d’aires d’entraînement collectées *in situ* par GPS (figure 2.10). Les différentes classes ont été déterminées selon une approche supervisée basée

sur douze classes pour caractériser l'utilisation des terres et l'occupation du sol. La précision totale de la classification est de plus de 80 % (Judex *et al.*, 2006 ; Thamm *et al.*, 2008).

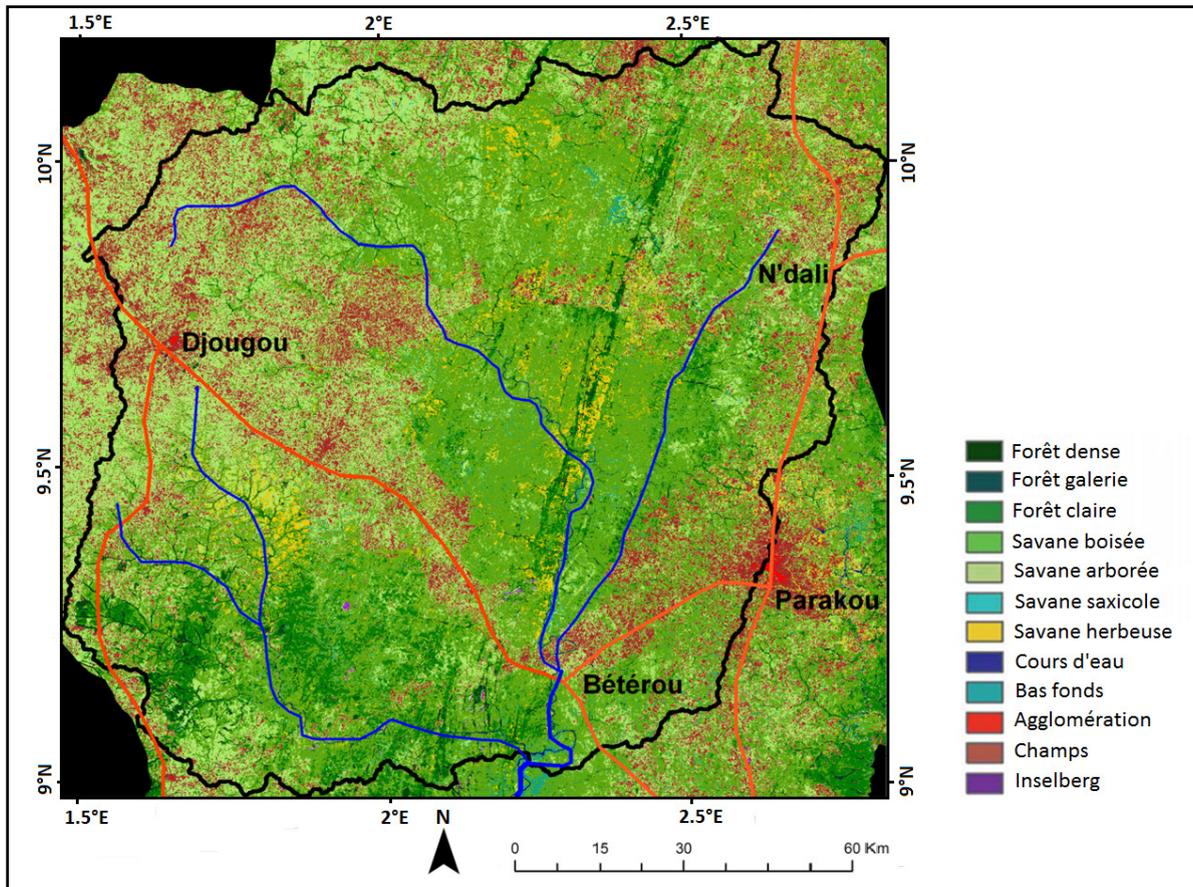


Figure 2.10 : Carte de l'occupation du sol sur le bassin de l'Ouémé supérieur en 2000 à partir d'une classification de scènes Landsat (figure adaptée d'après la carte de synthèse fournie par Thamm *et al.*, 2008).

Judex *et al.* (2006) ont aussi cartographié, à partir de classifications, les principales utilisations du sol en 1991 et 2000 pour calculer les changements sur cette décennie (tableau 2.4). L'augmentation des superficies en terre agricole est évidente, lié à la très forte croissance démographique nationale et régionale (Thamm *et al.*, 2008).

Tableau 2.4 : Dynamique d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé selon les données dérivées de la classification de scènes LANDSAT entre 1991 et 2000, et en fonction de cinq types d'occupation du sol (Judex *et al.*, 2006).

Classes d'occupation du sol	1991		2000	
	ha	% total	ha	% total
Forêt	613 010	42,1	733 507	50,4
Savane	222 432	15,3	522 132	35,8
Agglomération	2 882	0,2	1 379	0,1
Champs	112 419	7,7	197 799	13,6
Zones brûlées	504 081	34,6	0	0

Ces résultats indiquent aussi une diminution de la superficie associée aux agglomérations, variation due en fait à une erreur de classification de l'image LANDSAT de 1991, en raison d'une mauvaise discrimination des zones de végétation sèche et clairsemée. Les espaces de forêt et de savane ont augmenté de près de 30% sur cette période d'étude, et environ 35 % de la superficie étudiée en 1991 est affectée par les feux de brousse (ce qui n'est pas le cas de l'image de 2000, prise en dehors de la saison des feux), la précision optimale des comparaisons n'étant pas ici possible (Judex *et al.*, 2006).

2.2.3.2. La carte d'occupation du sol définie par C. Bel (2010)

Les données utilisées pour construire cette carte réalisée par Bel (2010) regroupent huit images SPOT/HRV à haute résolution spatiale (20 m) sélectionnées en octobre 2007. Près de 200 points de contrôle ont été utilisés pour réaliser la mosaïque des images. Cinq principaux types d'occupation du sol ont ensuite été distingués à partir de deux méthodes différentes de classification : une méthode supervisée classant les pixels selon le critère du maximum de vraisemblance (*'maximum likelihood'*) et une méthode non supervisée segmentant l'image par un algorithme de type K-means (figure 2.11).

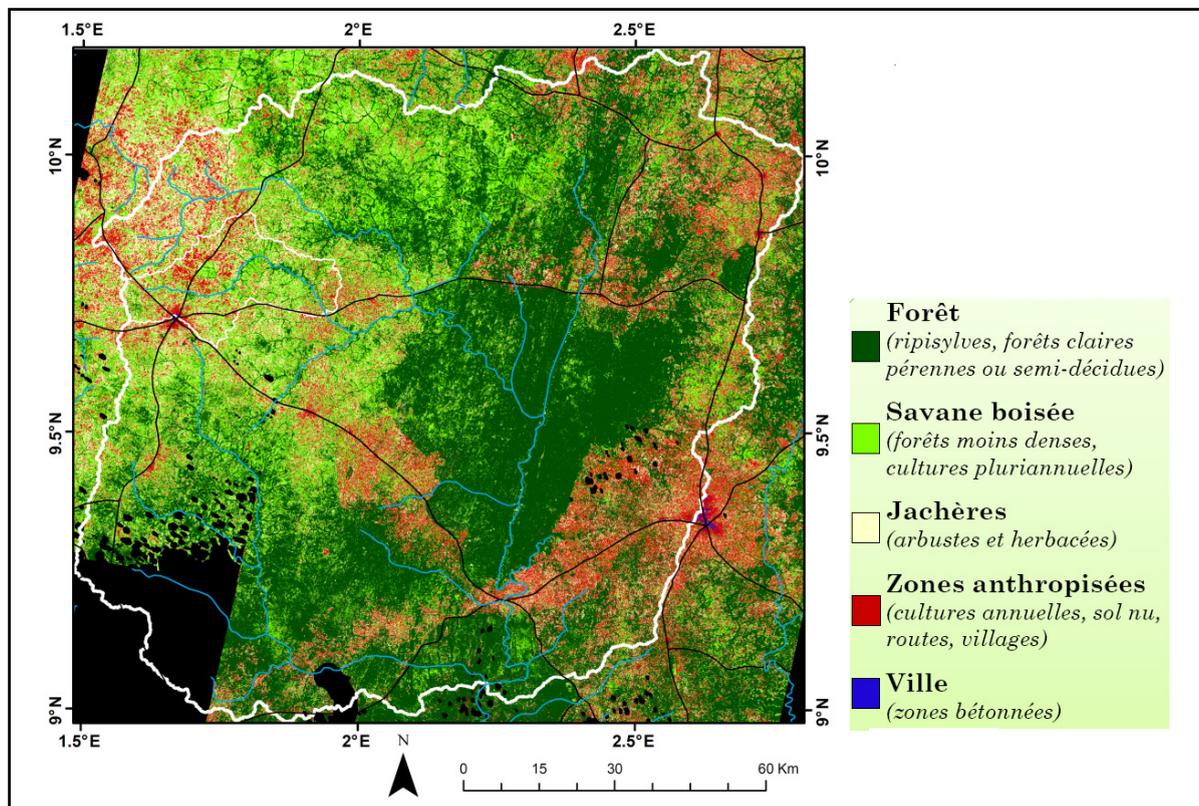
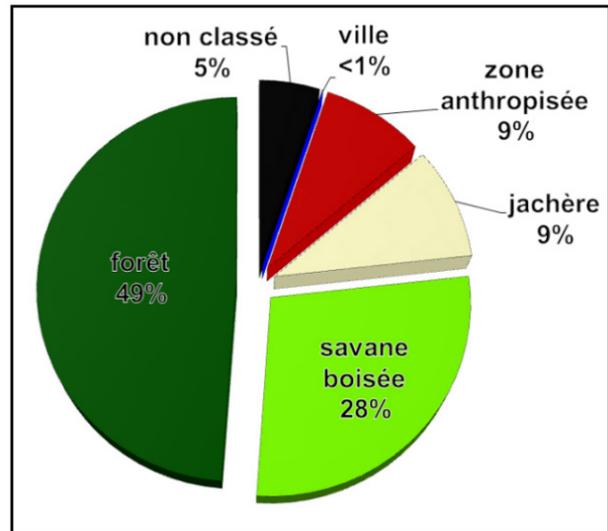


Figure 2.11 : Carte de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé supérieur établie pour l'année 2007 (en trait blanc : le bassin de l'Ouémé et, en son sein, celui de la Donga ; en trait bleu : le réseau hydrographique ; en trait noir : les routes principales) ; figure adaptée d'après la carte de Bel (2010).

Les résultats ont été validés avec des observations de terrain, et plus de 80 % des pixels sont bien classés, et aboutissent à une classification en cinq types principaux sur le bassin de l'Ouémé supérieur (figure 2.12).

Figure 2.12 : Les pourcentages d'occupation du sol selon cinq types dans le bassin versant l'Ouémé supérieur en 2007, obtenus à partir de la classification établie par Bel (2010).



2.2.3.3. Les cartes produites pour 2000 et 2012 par L. Leroux (2012)

Pour la classification de l'année 2000, des images LANDSAT ETM+ ont été utilisées avec une résolution spatiale de 30 m permettant de caractériser des éléments paysagers relativement précis, pour une partie du bassin de l'Ouémé supérieur (figure 2.13). Un algorithme de type Maximum de vraisemblance a été appliqué en retenant cinq classes, validées grâce à des points GPS représentatifs de chaque classe d'occupation du sol. La précision des classifications obtenues a été évaluée par un indice de Kappa de 0,85 pour l'année 2000 (Leroux, 2012).

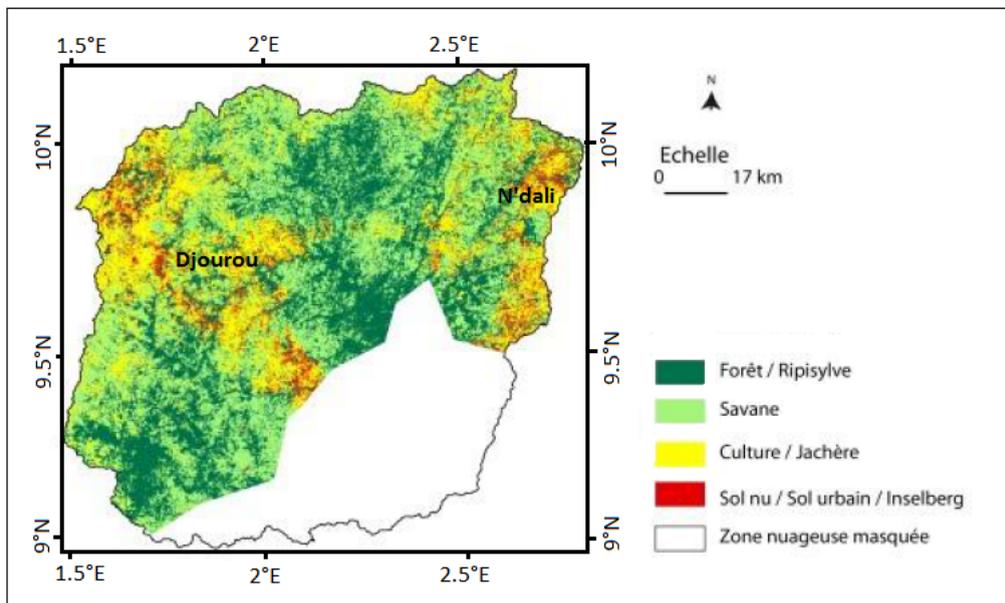


Figure 2.13 : Cartographie de l'occupation du sol sur une partie du bassin de l'Ouémé supérieur en 2000, établie à partir d'une classification d'images LANDSAT ETM+ (d'après Leroux, 2012).

Une image MODIS (MOD9A1) de 2012 issue de la plateforme TERRA a également été analysée pour compléter la cartographie plus récente de l'occupation du sol (figure 2.14). Toujours grâce à un algorithme de type Maximum de vraisemblance, seules 3 classes ont été ici discriminées. La précision globale est de 79 % (indice de Kappa de 0,68), aboutissant donc

à une classification très correcte, malgré des résultats inférieurs aux classifications menées à partir de l'imagerie LANDSAT.

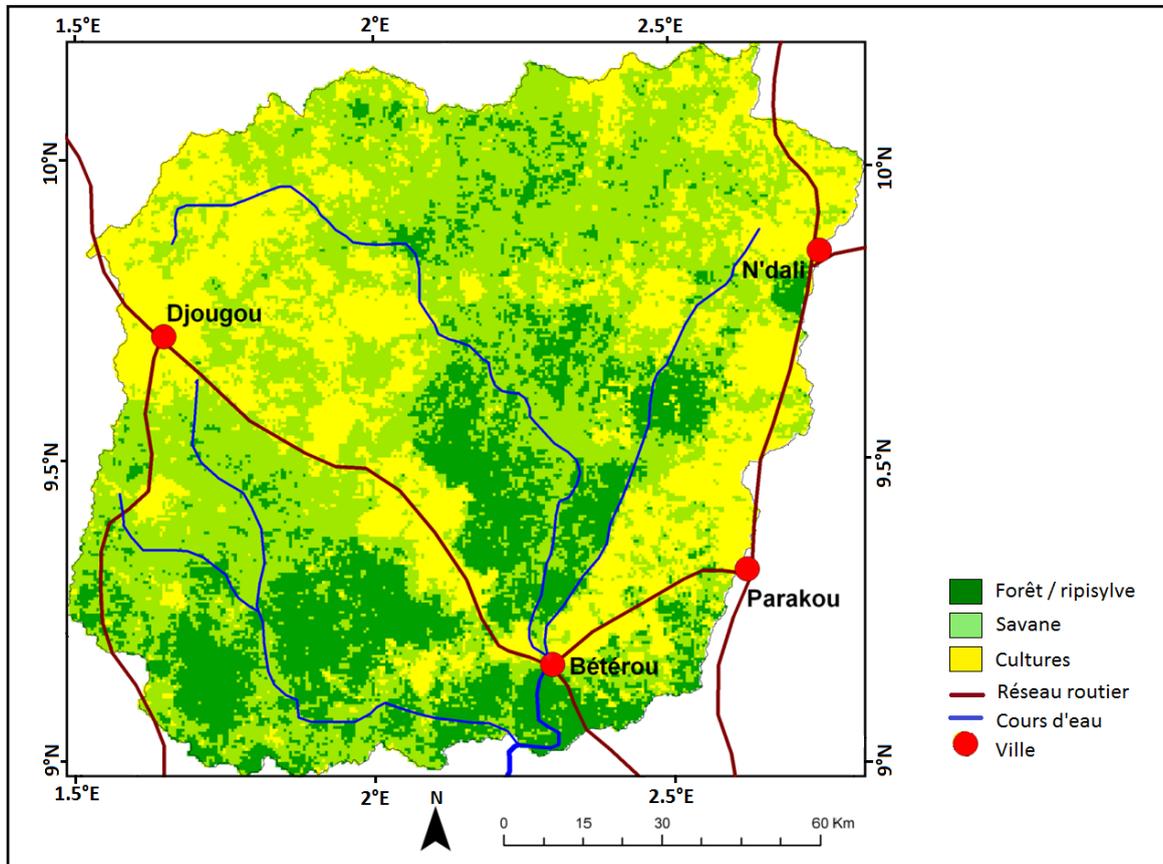
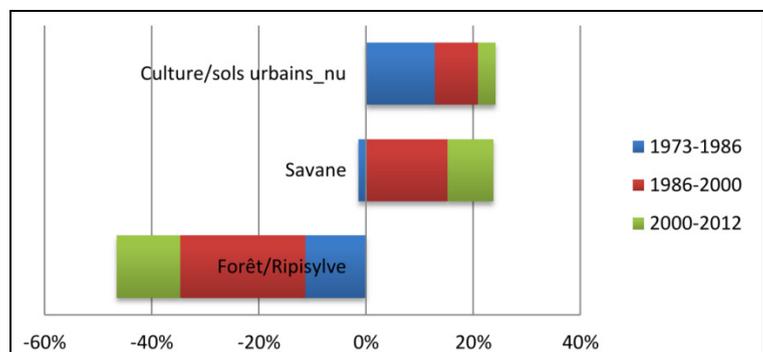


Figure 2.14 : Cartographie de l'occupation du sol en trois principaux types sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé supérieur en 2012 établie à partir d'une image MODIS (d'après Leroux, 2012).

En menant des comparaisons diachroniques pour des images prises en 1973, 1986, 2000 et 2012 (figure 15), Leroux (2012) montre une baisse continue de la végétation dense (-47 %) et en revanche, une augmentation des espaces anthropisés de jachères (+24 %) ainsi que des types savaniques (+22 %). En particulier, la déforestation et le déboisement sont le plus évident entre 1986 et 2000 (-23 %) par rapport à la période 1973-1986 (-12 %) ou 2000-2012 (-11 %).

Figure 2.15 : Evolution des trois principales occupations du sol entre 1973, 1986, 2000 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé (d'après Leroux, 2012).



2.3. Méthodes de traitement des données

2.3.1. La classification des images issues de la télédétection

La classification est essentiellement un processus de reconnaissance de forme. En télédétection, elle consiste à établir la correspondance entre les éléments d'une scène de l'image qui sont définis par leurs valeurs radiométriques et des classes connues a priori ou non par l'utilisateur (Ducrot, 2005). Deux principaux types d'approches peuvent être distingués : d'une part, les classifications non supervisées qui ne requiert a priori aucune connaissance et observations sur le terrain étudié, et d'autre part, les classifications supervisées (qui au contraire demandent des relevés *in situ* précis, ou une expertise de l'occupation du sol).

2.3.1.1. La classification non supervisée

La classification non supervisée détermine automatiquement les classes, et l'utilisateur fixe seulement leur nombre. Le principe de base est d'attribuer automatiquement chaque pixel à une classe suivant sa signature spectrale. Tout d'abord, des 'clusters' (*i.e.* classes) sont arbitrairement construits en fonction de centres mobiles (nuées dynamiques). La moyenne de chaque cluster est calculée sur la base des nouveaux pixels qui leur sont assignés. Puis, les clusters sont regroupés en fonction de proximité de certains seuils statistiques (ou si le nombre de pixels dans une classe est trop petit). Les clusters sont séparés dans le cas où l'écart type dépasse une certaine valeur (Richard et Jia, 2005). Les algorithmes sont répétés jusqu'à ce que les changements entre les itérations soient moindres (comme critères d'arrêt des itérations, il faut choisir le nombre maximal ou un seuil de stabilité des classes). La classification est alors totalement non supervisée (Ducrot, 2005).

Après cette phase automatique, une interprétation visuelle est requise pour assigner à chaque cluster une description cohérente. A la fin, elle peut être une combinaison avec une approche semi-supervisée quand certains paramètres sont fixés par l'utilisateur, par exemple le regroupement manuel de classes jugées comme superflues. Les algorithmes les plus utilisés sont les méthodes ISODATA (figure 2.16) et K-MEANS.

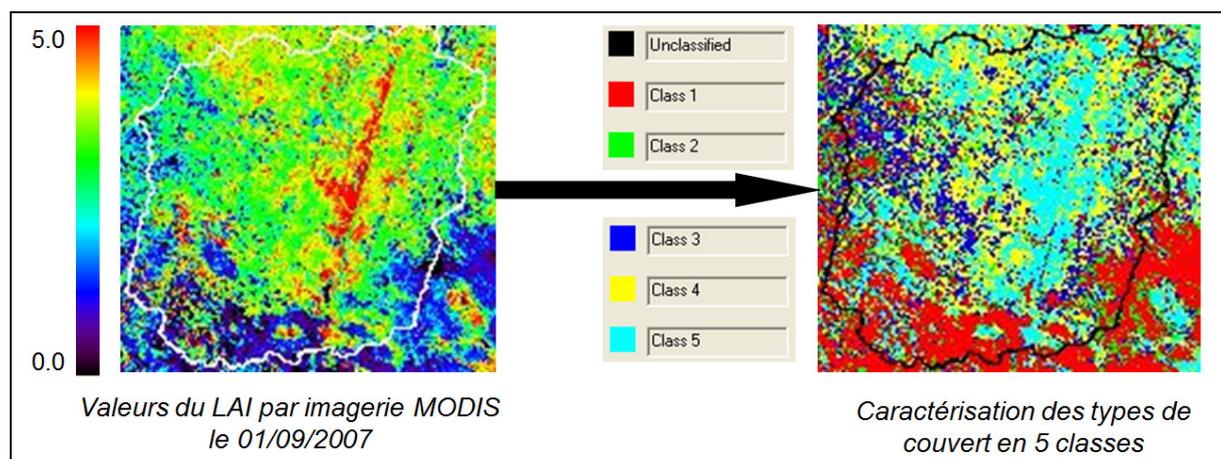
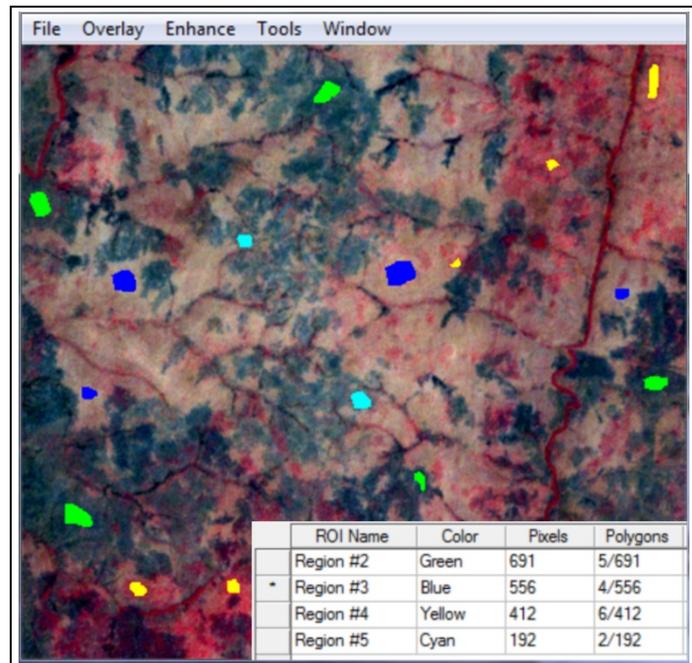


Figure 2.16 : Exemple du traitement du LAI-MODIS à l'échelle de l'Ouémé Supérieur, avec le passage des données brutes (à gauche) à une classification automatique non supervisée (à droite).

3.1.2. La classification supervisée

Contrairement à la classification non supervisée, l'utilisateur définit le nombre de classes dans la classification supervisée, et réalise une analyse spécifique pour chaque classe. Des échantillons représentatifs doivent être identifiés sur l'image pour sa compréhension, échantillonnage qui peut être effectué soit sur chaque scène traitée, soit pour chaque type d'application (agriculture, forêt, sol nu, bâti,...). Des polygones sont ensuite digitalisés autour de ces exemples représentatifs et assignés à une classe spécifique (figure 2.17).

Figure 2.17 : Exemple de sélection de sites d'entraînement (Region of Interest : ROI) lors d'une phase d'analyse d'une image Landsat ETM par classification automatique supervisée.



Ensuite, on effectue l'analyse des pixels contenus au sein des échantillons géoréférencés relevés sur le terrain. Des fichiers contenant les informations statistiques sur la réflectance de ces pixels à l'intérieur des classes sont alors créés. L'analyse compare ensuite chaque pixel avec les différentes signatures, et les alloue à la classe la plus proche, selon une méthode statistique retenue (parmi la gamme très large disponible). Si cette valeur d'appartenance est trop faible, le pixel est considéré comme non-classifié ou attribué à une classe inconnue. Les décisions d'attribution des pixels à telle ou telle classe se font suivant différentes techniques. Une fois la classification aboutie, une phase d'évaluation et de validation est réalisée grâce à la réalisation d'une matrice de confusion (Richard et Jia, 2005). Il s'agit d'un tableau affichant les statistiques de la précision de classification d'une image, notamment le degré de classification erronée parmi les diverses classes. Pour évaluer la classification réalisée, il faut comparer les sites d'entraînement de départ avec de nouveaux sites de validation, dans lesquels on vérifie les statistiques de bons pixels (Ducrot, 2005).

2.3.2. L'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Dans les sciences empiriques, les mesures statistiques génèrent souvent des quantités énormes de données. La détection des principales synthèses issues de ces données devient donc une tâche très difficile car il y a trop de facteurs à prendre en considération. Une façon simple mais efficace pour résoudre en partie ce problème et appliquée dans de nombreux domaines scientifiques est l'analyse multivariée des données, notamment par l'approche factorielle, et en particulier grâce à l'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'ACP est une technique

statistique multivariée très utile dans la recherche de relations possibles dans un ensemble de variables. Une base de données initiale peut être transformée en un nouvel ensemble non corrélé, par exemple, à l'aide de la transposition et/ou la rotation des axes factoriels de l'espace original (Richard, 1986 ; Lasaponara, 2006). Ce résultat est obtenu par combinaison linéaire des variables originales telle que la plupart des informations (*i.e.* la variance) est regroupée dans les premières composantes (Miranda-Aragón *et al.*, 2012). En conséquence, l'ACP diminue le nombre de variables corrélées à un ensemble de données, et en même temps, maintient la variance totale (Gurgel et Ferreira, 2010). Les résultats issus de l'ACP sont souvent interprétés à l'aide des trois informations produites pour chaque composante : (i) un pourcentage de la variance totale expliqué, (ii) une image de la distribution spatiale des variables et (iii) une chronique des coefficients de corrélation avec les variables (Mberegó *et al.*, 2013). Son application facilite le résumé et l'identification des tendances et des possibles processus physiques attachés aux variables observées, révélant leurs relations et variabilité spatio-temporelle.

L'ACP est particulièrement efficace lorsqu'elle est appliquée à des séries d'images multi-temporelles pour identifier les principales structures et les changements de surface. Wang *et al.* (2010) ont par exemple utilisé l'ACP sur des données satellitaires pour déterminer un nouvel éclairage sur la relation entre la végétation et les précipitations dans la restauration des écosystèmes dégradés de certains bassins versants en Chine. Nyamekye *et al.* (2014) ont recours à l'ACP sur l'indice NDVI pour produire la carte d'occupation du sol du Ghana et évaluer la nature des changements de couverture des terres entre 1982 et 2002. Sur cette même période de temps, Chamaille-Jammes *et al.* (2006) ont étudié la variation intra et interannuelle du NDVI par rapport à la pluviométrie dans le parc national de Hwange (Zimbabwe). Grâce à l'ACP, ils ont montré des réponses contrastées de la végétation aux précipitations entre les échelles saisonnières et interannuelles. Regina et Rasmussen (2003) ont également utilisé cette technique dans le cadre de l'évaluation des changements à long terme de la végétation au Sénégal, concluant que la méthode est robuste finalement très sensible aux choix de la zone et de la période d'étude.

2.3.3. La Singular Value Decomposition (SVD)

Proche de l'Analyse en Composantes Principales, la Singular Value Decomposition (SVD) permet de définir les relations linéaires entre deux variables différentes et peut donc également être considérée comme un procédé de réduction de données. Cette technique est particulièrement adaptée pour identifier le degré de couplage entre deux variables géophysiques (Wallace *et al.*, 1992 ; Bretherton *et al.*, 1992). La SVD est un outil puissant pour identifier des ensembles de relations linéaires entre deux champs en décomposant la matrice de covariance pour retrouver les plus fortes liaisons statistiques entre les champs, et en même temps, créer par paires des indices spatio-temporels objectifs mesurant les liaisons régionales entre les champs et expliquant une part de la covariance totale (Bigot, 2004). Les résultats de la SVD comprennent surtout : (i) la fraction de covariance au carré, (ii) les différentes paires de modes comparés, et (iii) les coefficients temporels correspondant (Liu *et al.*, 2004). La SVD offre l'avantage de pouvoir comparer des champs (climatiques, environnementaux,...) et des réseaux en points de grille (stations, points de mesure,...), avec une grande facilité d'interprétation des résultats graphiques.

Dans les régions arides et semi-arides, Lotsch *et al.* (2003) ont utilisé des séries temporelles des précipitations mondiales et le NDVI pour analyser la variabilité spatio-temporelle commune entre les écosystèmes terrestres et les régimes de précipitations. Les résultats de la

SVD ont par exemple permis de révéler l'étendue spatiale du couplage entre climat et biosphère, et sa sensibilité aux variations climatiques. La SVD a aussi été utilisée au Sahel, comme dans les travaux de Haarsma *et al.* (2005) sur la liaison entre effet de serre et précipitations. Gong et Ho (2010) ont aussi analysé les caractéristiques spatiales de la relation entre NDVI et température sur l'Eurasie et l'Amérique du Nord au printemps pour la période 1982-2000, concluant que la SVD est une technique très appropriée pour détecter le degré de couplage entre la végétation et le climat, et que les relations végétation/température discriminées sont robustes. On citera également les travaux de Liu *et al.* (2004) ou Morishima et Akasaka (2010) menés par SVD, qui précisent que les résultats sont souvent affectés par les différences des champs étudiés et par les différences d'amplitude de la variance de chaque champ. Le choix des zones d'étude a également des conséquences analytiques sur les variations climatiques qui peuvent être définies. Les résultats issus de la SVD sont l'expression de relations entièrement statistiques, sans qu'il y ait obligatoirement de liaisons physiques associées et reconnaissables (Bigot, 2004). Ainsi, afin de compléter leur interprétation qui peut rester très subjective, d'autres résultats complémentaires, obtenus par exemple à partir de méthodes non factorielles, doivent être utilisés pour soutenir les explications et conclusions.

2.4. Conclusion de la partie 2

La télédétection est la technique la plus adaptée pour l'étude et la représentation des interactions biophysiques entre climat et végétation. De nombreuses études ont été menées pour démontrer la capacité de l'information satellitaire dans ce domaine, en particulier pour le domaine tropical africain. Les données sont par ailleurs de plus en plus nombreuses et mises à disposition, avec une profondeur temporelle de plusieurs années, voire même de plusieurs décennies, qui permet désormais des analyses de la variabilité spatio-temporelle très précises.

L'étude menée ici sur l'Ouémé supérieur repose sur la sélection de cinq bases de données satellitaires, avec une résolution spatiale de 30 m (avec LANDSAT), 1 km (SPOT/VGT et MODIS), 3 km (SEVIRI) et 5 km (ECOCLIMAP-2). Les fréquences temporelles sont soit journalières (SEVIRI) soit basées sur des synthèses à 8, 10 ou 16 jours (MODIS, SPOT et LANDSAT). L'intérêt est de pouvoir étudier en combinaison ces différentes sources de données pour extraire une meilleure qualité d'information et donc, de diagnostics. Le choix des données a d'abord été motivé par leur accessibilité, leur couverture spatio-temporelle et leur qualité déjà éprouvée dans d'autres études. La base de données pluviométriques étudiée provient de la base AMMA-Catch, construite à partir des stations hydroclimatiques en activité sur la zone d'étude, dont la grande qualité et fiabilité ont également aussi été vérifiées dans des études antérieures. Les cartes d'occupation des sols valables à l'échelle du domaine d'étude proviennent de sources multiples, et sont inter-comparées pour plusieurs années de référence, notamment 2000 et 2012. Les méthodes d'analyse retenues sont classiques, basées sur des approches statistiques de classification des images satellitaires ou des analyses factorielles permettant de résumer l'ensemble important de données multiparamétriques à traiter.

Partie 3 :

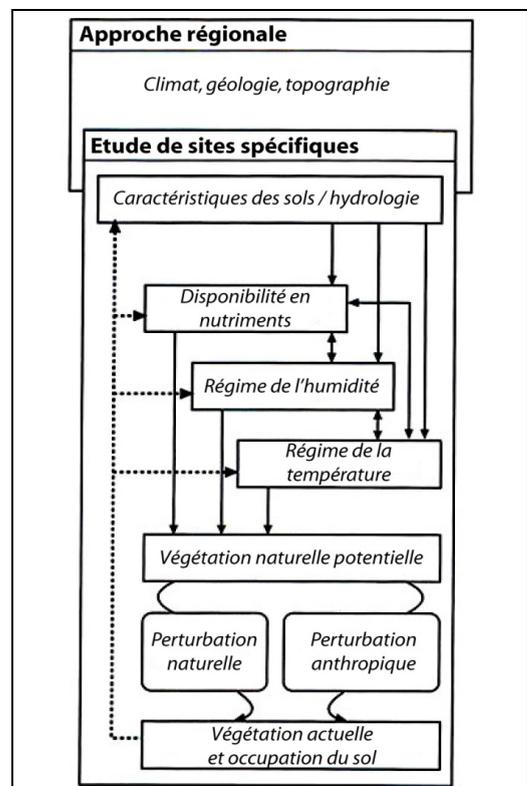
Occupation du sol et variations spatio-temporelles : principales tendances et typologie en perspective d'une analyse éco-climatique

Les formations végétales sont complexes dans leurs structures, caractéristiques et dynamiques, et elles dépendent de nombreux facteurs environnementaux. Leurs variations spatio-temporelles proviennent donc de causes multiples, qui expliquent la couverture végétale actuelle. Mais les influences anthropiques rendent encore plus complexes ces évolutions (figure 3.1). Cette gamme d'interactions potentielles explique aussi que les relations végétation/climat/société dépendent en grande partie des différents niveaux d'échelle d'observation utilisés, la télédétection permettant justement de définir les trajectoires des états de surface, afin de mieux comprendre leur fonctionnement et les influences anthropiques (Ponzoni et al., 2002 ; Chen et Stow, 2003). Le principal objectif de cette partie est donc d'établir les principales évolutions de l'occupation du sol observées dans la zone d'étude, en s'appuyant d'une part sur des résultats validés par des travaux analysant surtout les décennies 1980 et 1990 à partir de différentes sources satellitaires, mais aussi d'autre part en analysant directement les variations observées sur la période récente (2003-2012).

Figure 3.1 : Résumé conceptuel des interactions entre des gradients directs (nutriments, humidité, température), leurs déterminants environnementaux (climat, géologie, topographie) et la végétation naturelle potentielle, influencée par les pressions anthropiques (adapté d'après Peters *et al.*, 2005).

Légende :

- Les flèches indiquent des interactions ;
- Les flèches pointillées indiquent des rétroactions liées à la végétation.



3.1. L'hétérogénéité spatiale et approche multiscale

Les surfaces continentales exercent une action directe sur les bilans radiatif et hydrique, et donc, en retour, sur la dynamique atmosphérique et les précipitations (Zhang *et al.*, 2006 ; Douville, 2008 ; Kaptue 2010). La répartition géographique des différentes formations végétales ouest-africaines est aussi fortement dépendante des ressources en eau des sols et des abats pluviométriques, formant des régions de nature hétérogène, l'hétérogénéité de la surface engendrant une forte variabilité climatique locale (Brovkin, 2002 ; Philippon *et al.*, 2008). Mais, la compréhension et la représentation spatiale de ces processus dépendent en grande partie de la résolution spatiale analysée. Par conséquent, pour surveiller les impacts du changement climatique sur ces processus dynamiques, il est nécessaire d'utiliser des données possédant des fréquences élevées, de nature multi-temporelle, et avec plusieurs suivis de résolution spatiale. La prise en compte explicite de l'hétérogénéité spatiale grâce à la télédétection permet alors de révéler les relations climat/végétation et leur variations (Xie *et al.*, 2008). A présent, la surface de la terre est observée à l'échelle mondiale par toute une série de capteurs, associés à différentes résolutions spatiales allant de quelques centaines de mètres jusqu'à plusieurs kilomètres (Fensholt *et al.*, 2009 ; Lacaze, 2010). Kendi *et al.*, (2005) montrent que l'étude aux échelles supérieures est susceptible de détecter les effets des facteurs externes au site étudié, facteurs qui covarient malgré la possible diversité, tandis que Huston (1999) suggère, à partir d'études menées à échelle fine, des relations beaucoup plus complexes. L'hétérogénéité spatiale influence donc significativement les relations et dépendances d'échelle, avec une influence majeure sur l'interprétation qui peut être faite sur une région en fonction du choix de la résolution d'observation (figure 3.2). Cet impact lié aux échelles spatiales peut donc être analysé indirectement en intégrant les variables mesurées à différentes échelles, comme facteurs explicatifs supplémentaires (Judi *et al.*, 2007).

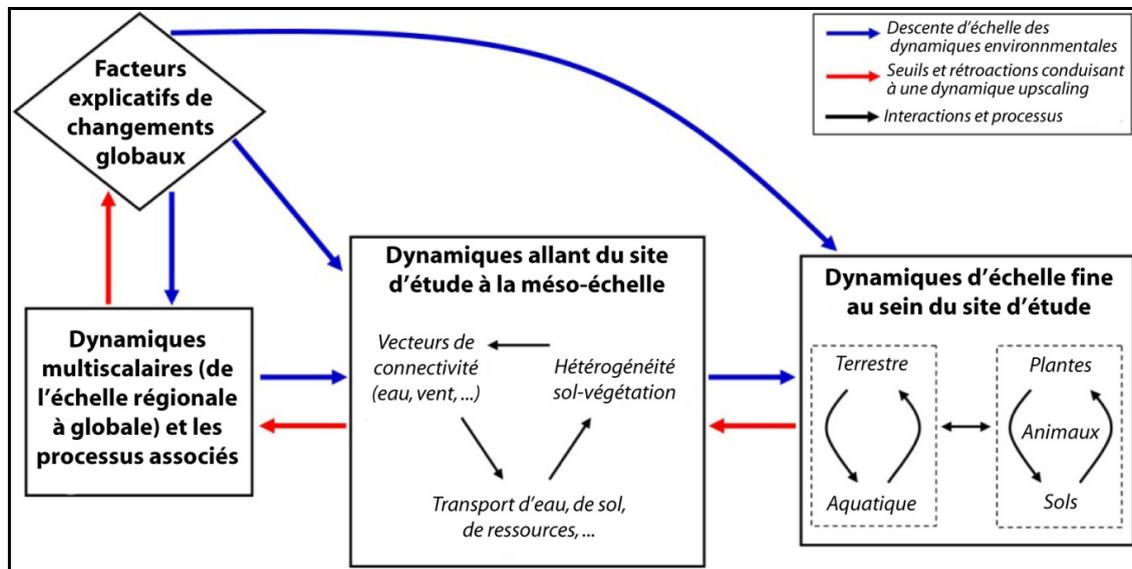


Figure 3.2 : Cadre conceptuel reliant les échelles spatiales et temporelles et définissant les principales rétroactions pour aboutir à des modèles d'échelle continentale, avec des conséquences sur la dynamique éoclimatique d'échelle plus fine. Les flèches bleues (*respectivement rouges*) traduisent des dynamiques dans le sens d'une vision downscaling (*respectivement upscaling*) ; adapté d'après Peters (2011).

Avec l'exemple du climat, sachant qu'un même type de temps peut concerner un territoire étendu, il est certain que sur une entité spatiale plus petite, des caractères communs sont également présents, mais cela n'est plus vrai appliqué à une échelle très fine, de l'ordre de

quelques dizaines de kilomètres à quelques mètres (Deleglise, 2011 ; Quénot, 2011). En conséquence, les études climatologiques sont souvent conduites à plusieurs échelles spatiales impliquant un changement de l'étendue de la zone d'étude (figure 3.3). L'échelle spatiale fait alors couramment implicitement référence à l'étendue de la zone d'investigation, sur laquelle sont effectuées les mesures et l'observation du climat aux échelles fines, avec une méthode d'acquisition des données météorologiques adaptée (Quénot, 2011). C'est aussi d'ailleurs l'un des principaux objectifs du réseau d'observations et de mesures AMMA-Catch qui a été développé au Bénin.

A cette échelle d'étude pour ce domaine béninois, une approche multi-échelle est bien adaptée, car la variabilité des échelles spatiales auxquelles le changement de la couverture végétale et des processus de surface se déroulent, en fonction des conditions éco-climatiques, pourrait être mise en évidence grâce aux diverses résolutions spatiales proposées par les capteurs qui fournissent l'imagerie environnementale (Hountondji, 2008). D'autre part, en milieu tropical où il y a une forte nébulosité (Zin *et al.*, 2009), la nécessité d'utiliser des images de natures variées permettra de limiter les acquisitions biaisées et d'améliorer les diagnostics. En passant d'un niveau d'analyse à un autre, il est alors possible de mettre en évidence les apports et/ou les pertes respectives dans l'interprétation thématique (Hountondji, 2008).

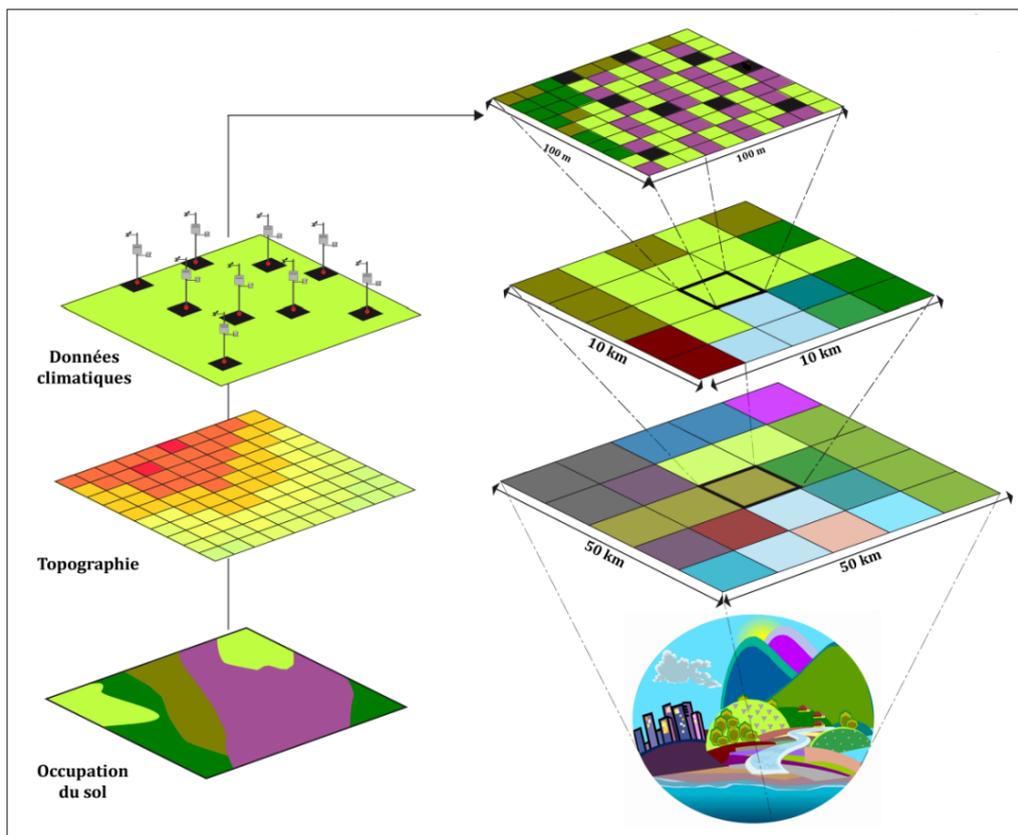


Figure 3.3 : Schéma illustrant l'étude des interactions entre climat et surface en essayant de tenir compte d'une approche multiscalaire (d'après Quénot, 2011).

A l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur, avec une superficie d'environ 15 000 km², l'échelle de premier ordre de grandeur spatiale est définie par l'utilisation d'images de basse et moyenne résolution spatiale (*i.e.* quelques dizaines de mètres) issues de LANDSAT ETM+, le deuxième ordre de grandeur est marqué par le traitement des images de haute résolution spatiale (*i.e.* d'ordre kilométrique comme SPOT-VGT et MODIS), et le troisième et

quatrième ordre de grandeur sont résumés par des images à très haute résolution spatiale (*i.e.* multi-kilométriques, comme SEVIRI ou ECOCLIMAP-2).

3.2. Échelles adaptées pour le suivi de la végétation de l'Ouémé

3.2.1. Définition de l'occupation du sol sur la période 2002-2012

La cartographie de l'occupation du sol est l'un des éléments importants à toute planification des ressources et compréhension des dynamiques, à la fois liées aux variations saisonnières et interannuelles (Diwakar *et al.*, 2013). Les analyses réalisées jusqu'à présent à partir d'images satellitaires à haute résolution spatiale (de 1 à 30 mètres, essentiellement des images TM de LANDSAT ou HRV de SPOT) ont permis de mettre en évidence la diminution importante des zones boisées et de la végétation arborée en général, avec l'augmentation remarquable des zones cultivées et urbanisées (Bigot *et al.*, 2005 ; Mihai *et al.*, 2006 ; Koné *et al.*, 2007 ; Leroux, 2012).

A l'échelle du Bénin, une synthèse des évolutions diachroniques entre 1975 et 2000 conclue que l'évolution la plus notable est l'augmentation importante des terres agricoles dans la plupart des régions du pays (figure 3.4). Plus précisément, les zones agricoles sont passées de 15 000 à 27000 km², soit une augmentation de plus de 77 %. L'expansion de l'agriculture a 'envahi' de vastes zones naturelles et/ou protégées du Bénin, avec le rétrécissement de la zone de savanes et de forêts. Les savanes demeurent cependant le type de couverture dominant, occupant 80 % du territoire en 1975 et 69,6 % en 2000, alors même que le Bénin a quasiment perdu la totalité de sa forêt dense (moins de 800 km² en 1975, soit environ 0,7 % de la superficie nationale des terres, contre environ 580 km² en 2000, soit environ 0,5 % ; soit une baisse de 27,1 % sur les 25 ans d'étude).

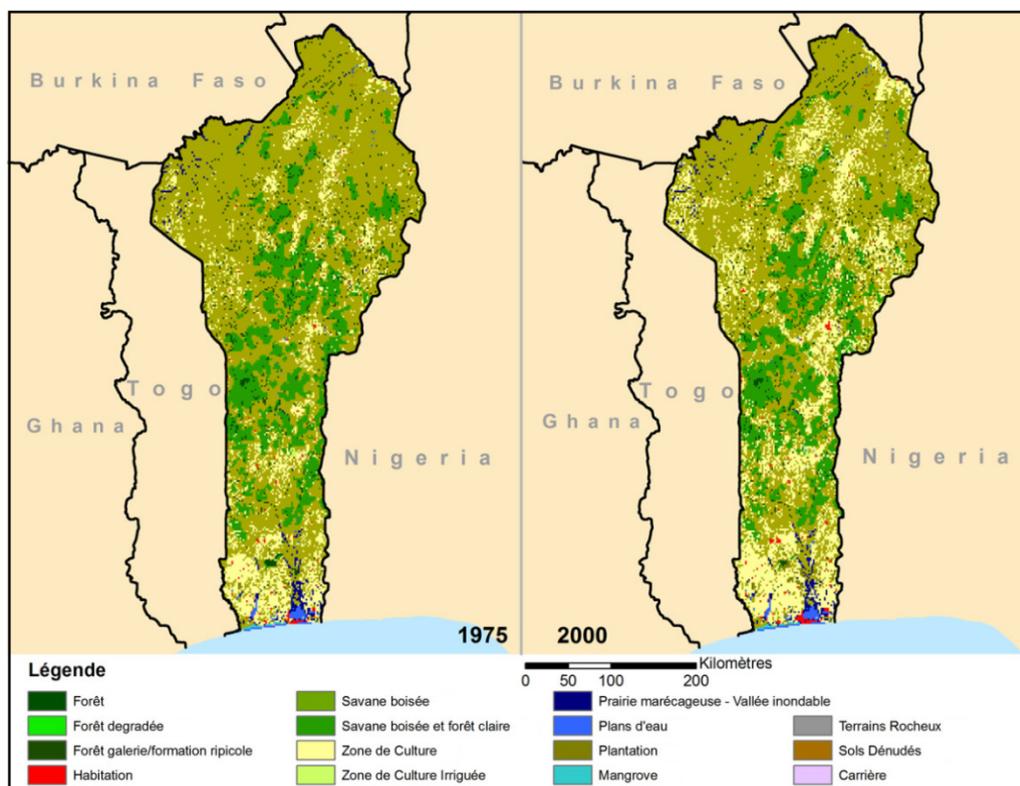


Figure 3.4 : Comparaison entre les cartes d'occupation des sols au Bénin en 1975 et 2000 (source : <http://lca.usgs.gov/>).

Lors de l'étude des espaces forestiers, le choix de la résolution spatiale va influencer la vision et les détails géographiques (figure 3.5), les estimations des superficies forestières n'étant pas affectées de façon significative par ces changements de résolution spatiale jusqu'à 3 km (figure 3.6). Certaines formations sont en effet mieux classées à des résolutions spatiales plus fines tandis que d'autres exigent des résolutions plus grossières, en fonction des différentes applications utiles pour leur surveillance (Marceau *et al.*, 1994 ; Chen et Stow, 2003). Par exemple, pour suivre les différentes phases de la végétation en relation avec le climat sur le bassin versant de l'Ouémé, il n'existe pas de description exhaustive du climat, de la végétation, du sol et du cycle de l'eau qui permettent de décrire de façon satisfaisante à une échelle particulière, l'ensemble des transferts et des rétroactions. Alors même que les variations d'échelles jouent un rôle important dans l'étude des liaisons entre climat et végétation (Dessay, 2006).

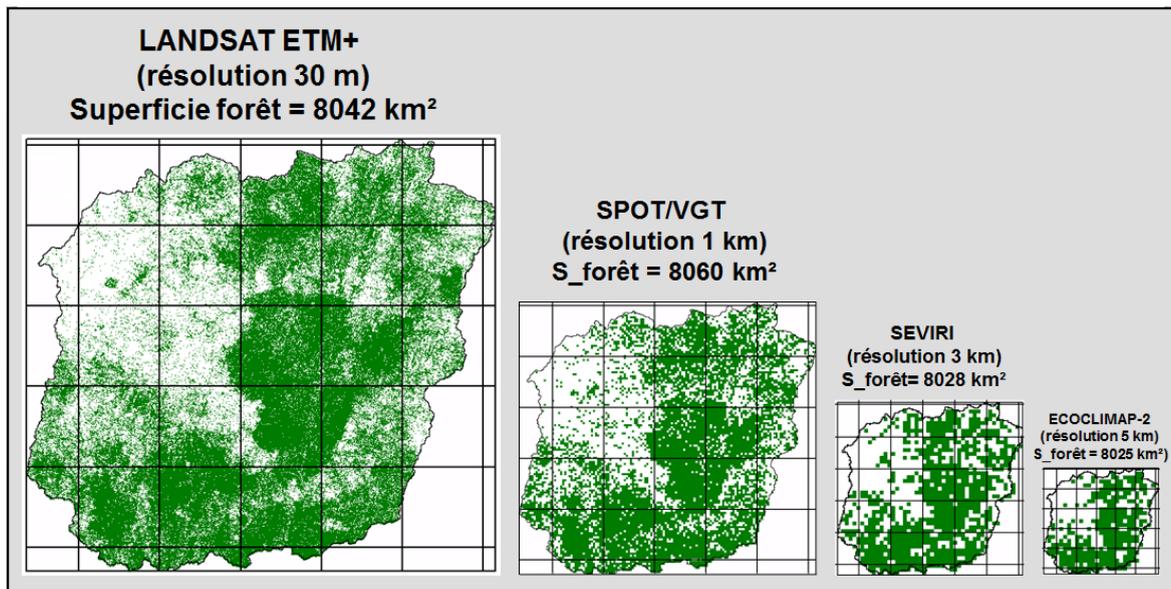


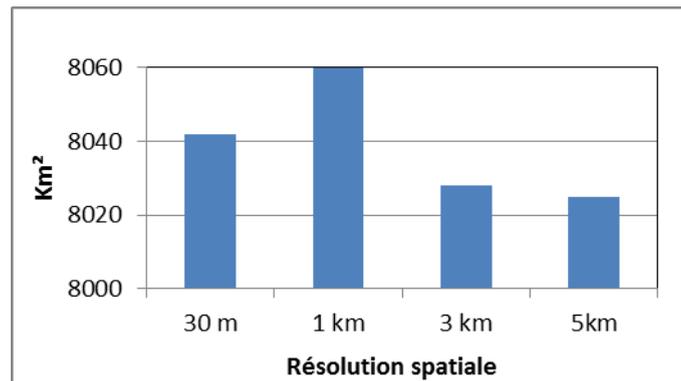
Figure 3.5 : Cartographie des espaces forestiers à l'échelle de la zone d'étude de l'Ouémé supérieur selon différentes résolutions spatiales propres à quatre types de produits issus de la télédétection satellitaire : 30 m, 1 km, 3 km et 5 km (le carroyage représente une grille de 25 km de résolution) ; sur la carte, la couleur verte représente "la forêt".

Mais avec le choix d'une résolution de 1 km, on observe une augmentation importante de la superficie classée comme forestière, à cause du mélange des pixels qui associent, à cette échelle et pour cette région, forêt et savanes. A cette résolution, avec l'augmentation résultante de la quantité de pixels, chaque pixel couvre différents types de couvert, et va donc souvent nécessiter des processus de ré-échantillonnage lors du protocole de classification. Avec le passage de la résolution de 1 km à celle de 30 m, on observe une perte des espaces classés comme forestiers, car l'identification devient meilleure, diminuant les 'mixels' et donnant des pixels plus homogènes et une meilleure identification. Cette transition dépend au cas par cas du type de couvertures au sol, et des mélanges associatifs (végétation, espaces urbanisés, espaces agricoles, espaces en eau, etc.). Et il faut donc garder à l'esprit qu'une meilleure résolution spatiale n'implique pas obligatoirement voir "mieux" (Lu *et al.*, 2005). Ainsi, le choix de l'échelle d'observation doit se faire en tenant compte du réel besoin de l'application.

Les classifications d'occupation du sol déjà menées sur le bassin versant de l'Ouémé supérieur ont plutôt utilisé des résolutions spatiales élevées, avec souvent 7 à 10 classes qui sont distinguées pour comprendre la mosaïque paysagère régionale. Ainsi Bel (2010) a utilisé des images SPOT/HRV (20 m de résolution) et a défini six types d'occupation du sol. Thamm *et*

al. (2008) ou Leroux (2012) ont plutôt utilisé des données Landsat (résolution de 30 m), avec également une dizaine de classes discriminées, mais surtout la distinction entre forêt, savane, jachère et champs. Avec plusieurs exemples tropicaux, Oszwald *et al.* (2010) concluent que les données Landsat ETM+ bénéficient d'une bonne résolution radiométrique très appropriée aux classifications, et permettant le calcul de différents indices de végétation comme le NDVI afin d'améliorer l'identification spectrale de la couverture. Sgarrigues (2004) déclare que la résolution spatiale optimale qui permet de capturer le maximum de variabilité de la couverture végétale du paysage pour minimiser l'erreur d'estimation est estimée à 30 m. Liu et Weng (2009) confirment que 30 m est la meilleure résolution pour l'étude de la couverture du sol et l'analyse des relations avec la température de la surface.

Figure 3.6 : Estimations des superficies forestières du bassin de l'Ouémé supérieur en fonction de quatre résolutions spatiales choisies pour le pixel élémentaire.



Toutefois, un des inconvénients de ces données à haute résolution spatiale est leur faible résolution temporelle, difficile pour l'étude des zones tropicales où la nébulosité parasite une large partie des images. Ainsi, Leroux (2012) a testé l'utilisation du capteur MODIS à 500 m de résolution spatiale sur la région de l'Ouémé. Elle a déclaré que cette résolution se justifie lors d'une cartographie suffisamment large (au-delà de l'espace d'étude stricto sensu), mais avec précaution, parce que cette résolution spatiale rend plus complexe l'intégration de données d'occupation du sol hétérogène, aboutit à seulement 3 classes correctement identifiées mais fortement hétérogènes en termes de couverture (forêt-ripisylve, espace savanicole, culture-jachère-sols urbains-sols nus). De nombreuses études (Ponzoni *et al.*, 2002 ; Liu et Weng, 2009 ; Oszwald *et al.*, 2010) conviennent qu'à cette résolution, il est seulement possible d'analyser les plus grandes différences spectrales, et donc des éléments paysagers, notamment l'opposition entre les systèmes de végétation 'naturelle' dont la réponse radiométrique se distinguera nettement des systèmes 'anthropiques'. Ils concluent qu'un capteur avec une résolution de 500 mètres sera recommandé pour fournir le meilleur compromis dans l'étude des changements de caractérisation de la couverture terrestre, mais en perdant la précision de l'identification des formations végétales. Hansen *et al.* (2000) ont aussi jugé que la valeur optimale pour une simple discrimination entre zones forestières et non forestières était 1 km. Une résolution 1, 3 ou 5 km pourrait être suffisante à l'échelle d'un bassin comme l'Ouémé qui a une superficie de 15 000 km². Cependant, Liu et Weng (2009) montrent qu'à cette échelle, les statistiques obtenues sur les principaux types de couverture responsables des fortes évolutions observées en milieux tropicaux (forêts, savanes, espaces urbanisés) deviennent moins pertinentes, surtout si l'objectif principal est d'aboutir à des bilans régionalisés.

Dans le contexte des données d'observation encore limitées en Afrique de l'Ouest (Taylor *et al.*, 2009), l'étude à différentes échelles spatiales demeure un défi. Le ré-échantillonnage à différentes résolutions reste une des solutions pour minimiser les risques d'estimation des

évolutions surfaciques et accroître l'efficacité des classifications thématiques (Ponzoni *et al.*, 2002 ; Dessay, 2006).

3.2.1.1. Sélection des données analysées

A partir du site internet <http://earthexplorer.usgs.gov/> qui met à disposition les images LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM7+), l'ensemble des images susceptibles d'être disponibles à l'échelle du domaine d'étude et sur la période 2002-2012 est examiné. Il faut en fait deux scènes Landsat de 180 x 180 km (avec une résolution de 30 m) pour couvrir l'ensemble de l'Ouémé supérieur, soit les scènes numérotées dans la base de données satellitaire par les 'paths/rows' 192/53 et 192/54 (figure 3.7).

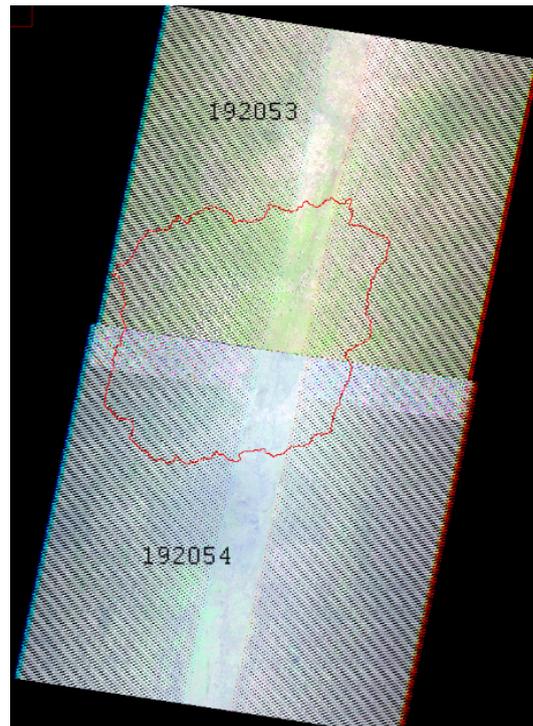


Figure 3.7 : Localisation des deux scènes LANDSAT 7 ETM+ pour couvrir le bassin supérieur de l'Ouémé.

Après examen et élimination de toutes les images inutilisables à cause de la trop grande couverture nuageuse, l'ensemble des données retenues dans cette étude comprend finalement seulement quatre images LANDSAT 7 ETM+ acquises : l'image du 05 février 2003, deux images du 13 et 29 janvier 2012 et celle du 17 février 2012, toutes étant donc comprises en saison sèche.

En raison d'une erreur de capteur et d'acquisition (échec de la procédure de type « *Scan Line Corrector* » - SLC), un artefact est visible sur toutes les scènes ETM+ acquises après le 31 mai 2003. Les images contiennent donc une perte inévitable de données (*i.e.* de couverture), mais sans avoir d'impact sur la performance radiométrique des pixels valides (Chander *et al.*, 2009). Il est donc nécessaire d'engager des procédures de correction pour aboutir à une image complète pour 2012. Par conséquent, les images du 13/01/12 et du 17/02/12 ont servi aux traitements et aux phases de corrections des erreurs de capteur pour filtrer certains biais et parasites (figure 3.8) pour obtenir d'une image homogène et complète pour le 29/01/2012. Ce protocole technique a eu recours aux outils et à la procédure préconisée par LANDSAT (voir par exemple http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php).

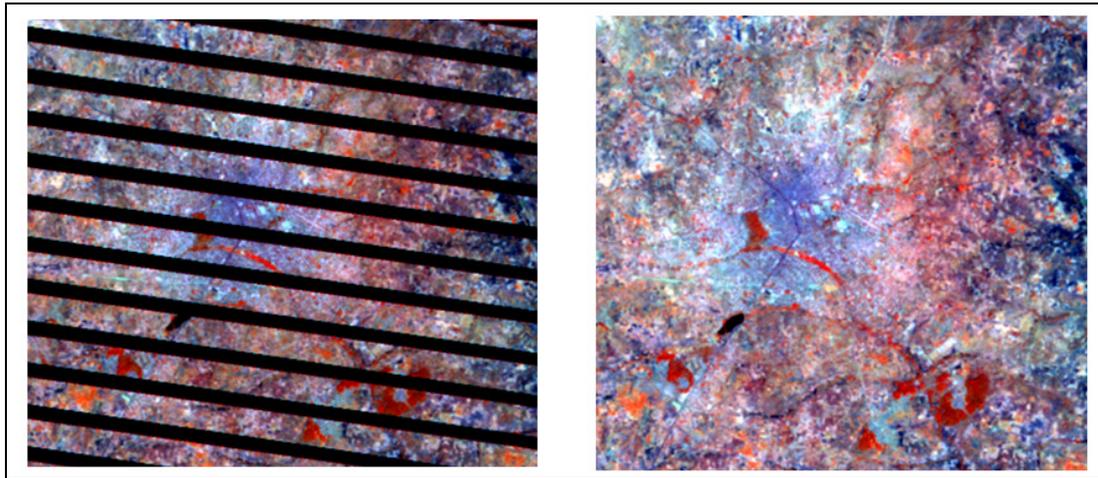


Figure 3.8 : Image LANDSAT 7 ETM+ du 29/01/2012 avant (à gauche) et après (à droite) correction.

3.2.1.2. Mise en œuvre des analyses radiométriques

L'objectif premier est de comprendre les principales caractéristiques de la couverture de surface à partir d'une analyse par classification des images, et sans pouvoir s'appuyer directement sur des phases de travail de terrain, qui n'ont pas été possibles. Selon les méthodes présentées dans la partie 2, la méthode de classification non-supervisées est retenue, son principal avantage étant d'être facilement opérationnelle, puisqu'elle ne requiert pratiquement pas d'interventions initiales de l'utilisateur, l'algorithme regroupant les pixels sur la base des signatures spectrales similaires, et même si l'utilisateur peut imposer le nombre de classes qu'il souhaite obtenir.

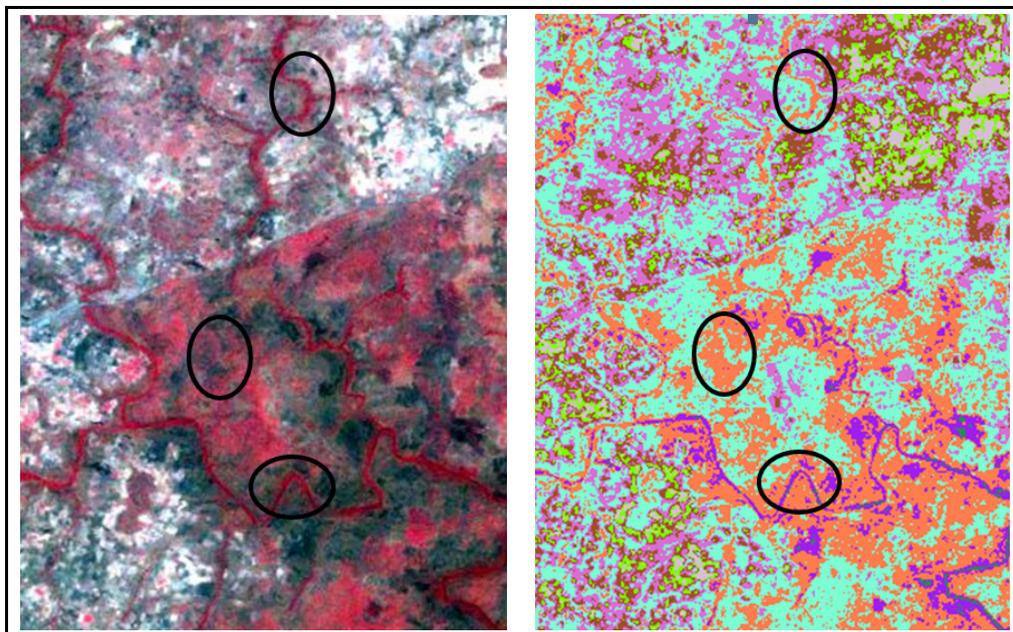


Figure 3.9 : Exemple d'un extrait issu d'une image LANDSAT 7 ETM+ du 29/01/2012 sur le bassin de l'Ouémé supérieur (à gauche) et de sa classification non supervisée en 8 classes (à droite) : les trois occupations du sol différentes (espaces encadrés) apparaissent cependant en grande partie dans les différentes classes.

Basé sur les différentes informations provenant des différentes cartes d'occupation du sol déjà établies et publiées sur la zone d'étude, une première classification s'oriente déjà sur une

division en 8 classes. Cependant, une analyse a posteriori montre certaines limites à ce découpage. Son principal défaut est en effet de se baser exclusivement sur les différences spectrales, qui ne correspondent pas toujours à de véritables catégories naturelles distinctes d'occupations du sol. Par exemple, en saison sèche, les 8 classes ne font pas de distinctions entre les forêts de feuillus et les champs en jachère ; les classes correspondant aux 'bas-fonds' et aux 'zones en surfaces incendiées' sont également très proches, amenant à des confusions. A l'inverse, une même classe d'occupation du sol se voit quelquefois scindée en plusieurs groupes, comme pour les espaces herbacés exposés directement au soleil et ceux situés en zone ombragée (figure 3.9).

Une autre phase d'analyse est également menée, pour définir certains indicateurs de l'occupation du sol, comme le NDVI, l'émissivité ou la température de surface. Ces indicateurs sont adaptés pour estimer la couverture de la végétation de surface et également, améliorer la reconnaissance de seuils adaptés ensuite pour une classification.

- Le NDVI est l'indice le plus utilisé à cause de la facilité de calcul et surtout, de sa corrélation avec la densité du couvert végétal. Dès lors, cet indice est reconnu comme étant un indicateur fiable de l'état de la végétation (Abedini *et al.*, 2012).
- Avoir recours à un indice d'émissivité est également une méthode très efficace pour vérifier la relation avec le type de surface, et pour décrire les différences d'occupation du sol, et améliorer la précision de la reconnaissance des distinctions (Stathopoulou *et al.*, 2007).
- La température de surface T_s (ou 'temperature brightness'), associée au NDVI, sont des paramètres très utiles pour étudier le degré de discrimination à l'utilisation des terres et de la couverture du sol (Yue *et al.*, 2007). Ruelland *et al.* (2008) ont par exemple fait une analyse croisée du NDVI et de la température de surface pour justifier certains seuils de classification à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest.

La figure 3.10 résume les grandes étapes de la mise en œuvre de la classification supervisée, réalisée finalement sur des images de février 2003 et janvier 2012, afin d'aboutir à une vision diachronique, et pour définir les grandes évolutions. La phase de prétraitements est donc particulièrement essentielle, pour que la précision finale soit la meilleure possible.

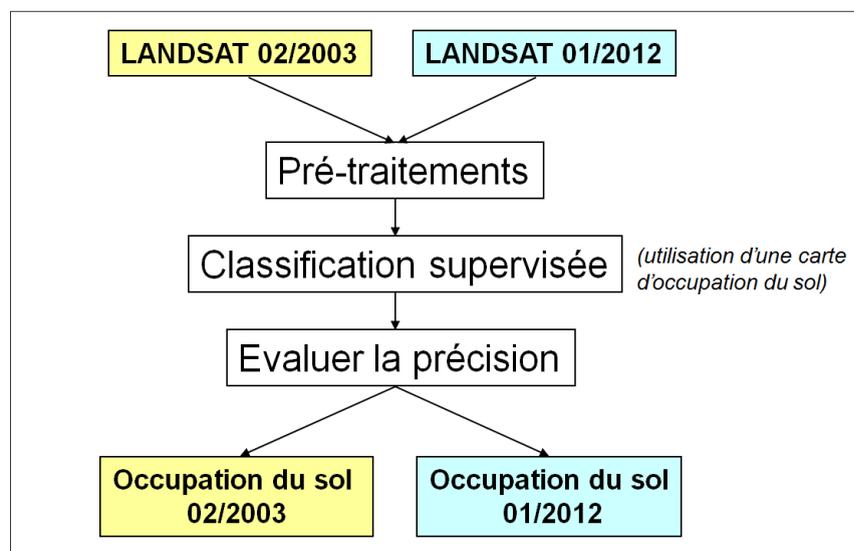


Figure 3.10 : Schéma résumant les grandes étapes analytiques pour la mise en œuvre de la classification supervisée sur la zone d'étude à partir de deux images LANDSAT ETM+.

3.2.1.2.1. Le prétraitement des données

Chaque image est calibrée radiométriquement au moyen de deux transformations successives faisant appel aux algorithmes classiques utilisées en télédétection spatiale et traitement du signal radiométrique (Chander *et al.*, 2009) :

(1) la conversion en radiance spectrale pour le transfert des données issues de plusieurs capteurs et plates-formes en une échelle significative physiquement et radiométrique commune ; les valeurs numériques du rayonnement de l'image (appelées DN dans la nomenclature Landsat) sont donc converties en fonction de paramètres d'étalonnage pour les différents capteurs LANDSAT ETM+.

(2) la conversion en réflectance afin de réduire la variabilité de scène à scène ; le rayonnement est converti en réflectance en normalisant l'angle d'élévation solaire (NASA, 2002). Deux étalonnages sont représentés par l'équation :

$$\rho\lambda = \frac{\pi (\text{Grescale} * \text{Qcal} + \text{Brescale}) d^2}{(\text{ESUN}\lambda\cos\theta)}$$

Où $\rho\lambda$ = réflectance TOA planétaire ; *Grescale* = gain pour la bande utilisé [$W / (m^2.sr.\mu m) / DN$] ; *Brescale* = biais pour la bande utilisée [$W / (m^2.sr.\mu m)$] ; *Qcal* = valeur de pixel calibré quantifiée [DN] ; π = constante mathématique approximativement égale à 3,14159 ; *d* = distance Terre-Soleil [unités astronomiques] ; $\text{ESUN}\lambda$ = moyenne de l'irradiance solaire exo-atmosphérique [$W / (m^2 \text{ microns})$] ; θ = angle zénithal solaire [degrés].

Le rayonnement terrestre est une fonction de deux paramètres : la température et l'émissivité. La bande thermique (*i.e.* la bande 6 pour ETM+, comprise entre 10,04 et 12,05 μm) est convertie en température de brillance, avec T_B qui signifie 'Temperature brightness' (NASA, 2002 ; Ruelland *et al.*, 2008).

$$T_B = K2 / (\ln(K1 / L\lambda + 1))$$

Où T_B = temperature brightness (en Kelvin) ; *K1* et *K2* sont des constantes appliquées pour Landsat7 ETM+ ; $L\lambda$ (radiance spectrale à l'ouverture du capteur) = *Grescale* * *Qcal* + *Brescale* [$W/(m^2.sr.\mu m)$].

Selon les lois de Planck et de Stefan Boltzmann, les estimations de la température de surface (T_s) peuvent alors se calculer ainsi :

$$T_s = T_B / (1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \varepsilon)$$

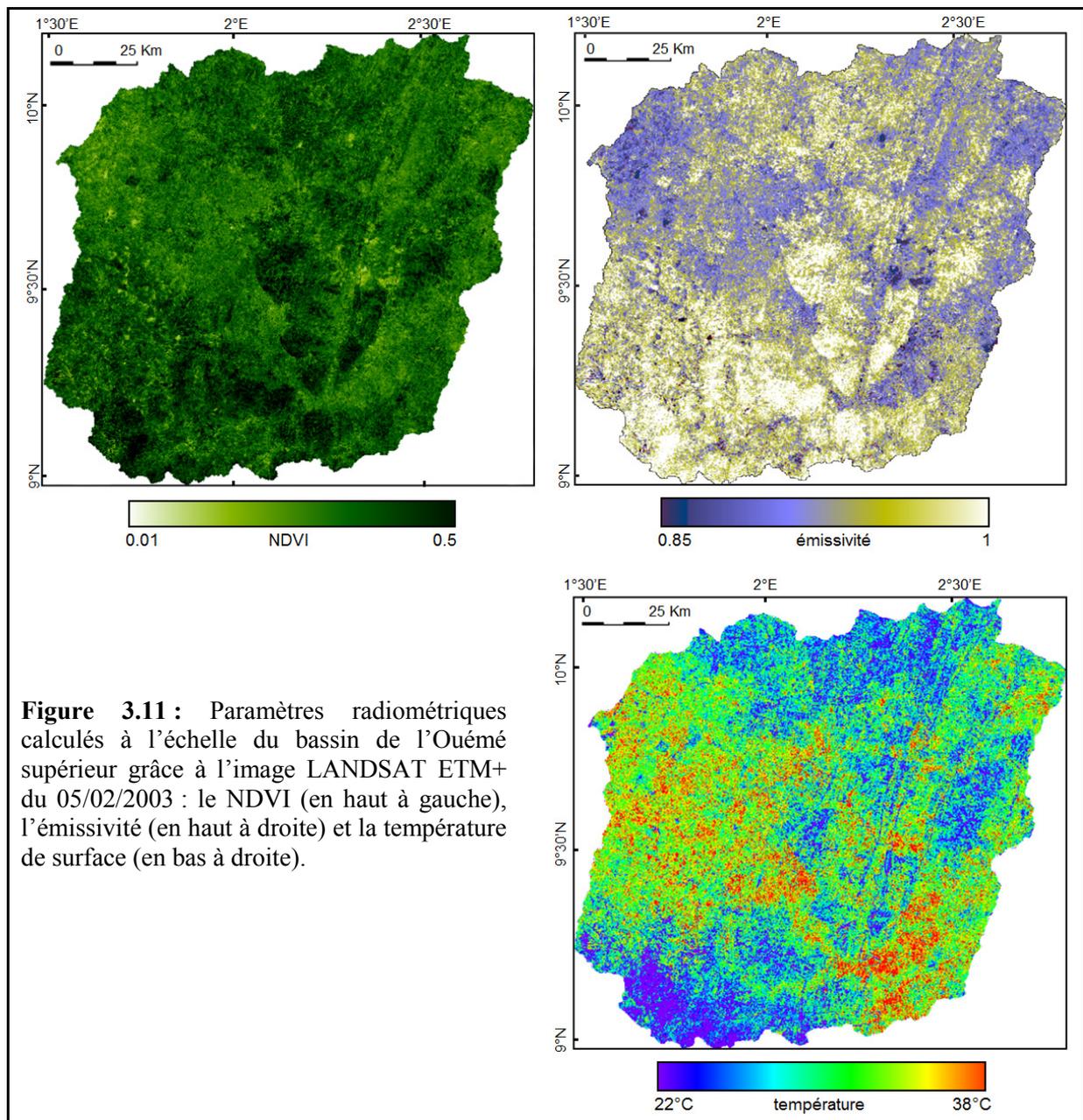
Où $T(s)$ = la température de surface (en Kelvin) ; λ = la longueur d'onde du rayonnement émis (11,5 μm) ; $\rho = h \times c / \sigma (1.438 \times 10^{-2} \text{ m K})$; *h* = la constante de Planck ($6,26 \times 10^{-34} \text{ J s}$), *c* = la vitesse de la lumière ($2,998 \times 10^8 \text{ m / s}$) ; σ est constante de Stefan Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) et ε l'émissivité.

Finalement, T_s est convertie en degrés Celsius. L'émissivité de la surface subit moins de changements dans le temps et dans l'espace que la température, elle est donc utilisée avant de calculer la température de surface. Il existe de nombreuses méthodes pour la calculer, mais celle utilisant la fraction du couvert végétal (appelé P_v) est la plus simple (Valor *et al.*, 1996) :

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon$$

Où P_v = la fraction du couvert végétal ; ε_v = l'émissivité du végétal ; ε_s = l'émissivité du sol nu ; $d\varepsilon$ = la fraction de l'émissivité causée par des réflexions internes ; $P_v = (NDVI - NDVI_{min})^2 / (NDVI_{max} - NDVI_{min})^2$; *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) calculé en utilisant les valeurs de réflectance des canaux du rouge (*pred*) et du proche infrarouge (*pnir*) ; $NDVI = (pnir - pred) / (pnir + pred)$.

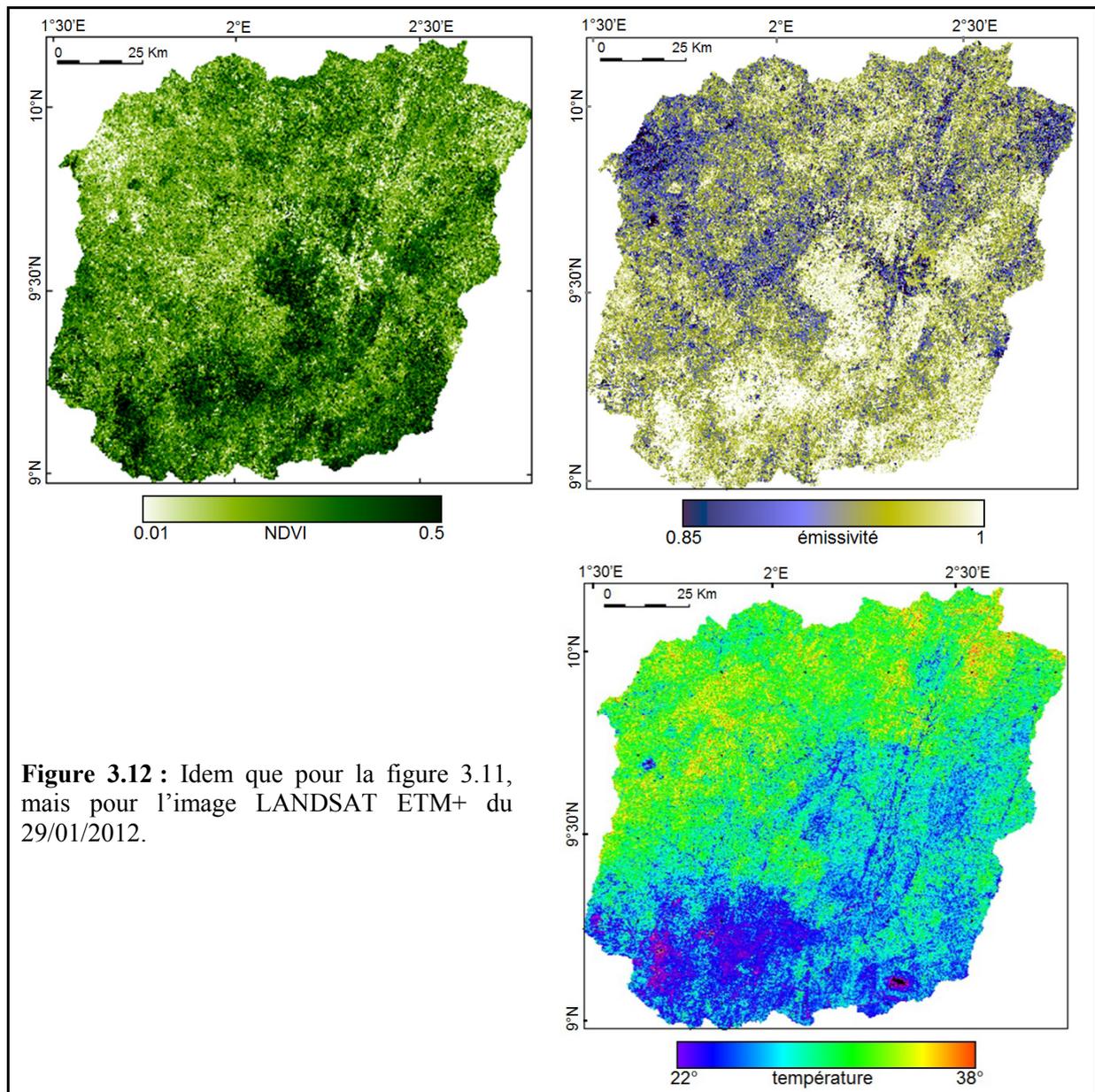
Finalement, la mosaïque des deux scènes permettant d'aboutir à une image couvrant l'ensemble de la zone d'étude est réalisée aux deux dates, et permettent de cartographier les différents paramètres (figures 3.11 et 3.12).



3.2.1.2.2. L'échantillonnage et la reconnaissance des qualités radiométriques de surface

Parce que les formations végétales de l'Ouémé supérieur sont souvent très mélangées et associées (notamment dans les mélanges forêt/savanes ou entre espaces naturels et espaces anthropisés), elles sont caractérisées notamment par leur densité de couvert et par la taille des individus. L'occupation du sol est finalement définie selon différentes nomenclatures en fonction de différents découpages ; on retrouve notamment ceux établis ou adaptés sur cette région par le projet IMPETUS (Thamm *et al.*, 2008), par Roehrig *et al.*, (2005), Orekan (2007), Bel (2010), Leroux (2012) ou Igué *et al.* (2012). Une synthèse en est faite afin de

permettre une utilisation la plus pratique possible dans un objectif de classification automatique, et surtout, d'interprétation des résultats (tableau 3.1).



L'échantillonnage de surface est identifié à partir de certains supports cartographiques ou photographiques. L'analyse repose dans un premier temps sur des cartes d'occupation du sol établies pour 2000, 2005 et 2007 et issues de la bibliographie (cf. section 2.2.3). Il s'appuie aussi sur des descriptions de la végétation sur la zone étude réunies au cours de campagnes de terrain réalisées dans le cadre du programme AMMA (données consultées grâce à des communications personnelles de chercheurs impliqués dans AMMA, ou bien la consultation de rapports et documents de terrain). L'échantillonnage repose aussi par ailleurs sur des vérifications visuelles réalisées directement à partir des images de 2012 proposées sur Google Maps (figure 3.13), approche certes empirique mais souvent utilisée dans ce protocole de vérification de l'occupation du sol grâce aux hautes résolutions décimétriques des images (Van den Steen *et al.*, 2001).

Tableau 3.1 : Les dix principaux types d'occupation du sol observés à l'échelle de l'Ouémé supérieur et établis à partir de toutes les nomenclatures et classifications préétablies sur la région.

	Types	Description
1	Forêt dense et ripisylve	Forêt très dense, avec indice de végétation élevé pendant toute l'année, notamment les forêts galeries le long des rivières.
2	Forêt décidue	Composée principalement d'arbres à feuillage caduque, ayant un indice de végétation faible en saison sèche, généralement dans des zones protégées.
3	Forêt claire	Composée principalement d'arbres (taille ~ 10 m), avec un sous-bois peu développé en saison sèche.
4	Savane boisée	Composée d'arbres moins denses que dans les forêts claires, avec également l'intercalage de cultures pluriannuelles.
5	Savane arbustive	Composée principalement d'arbustes et d'arbres de taille inférieure à 6 m.
6	Jachère	Composée surtout de graminées annuelles qui poussent en limite des villages, avec une composante arborée variable ; plantes vertes en saison des pluies et sénescentes en saison sèche.
7	Champs	Surfaces cultivées d'étendue variable se trouvant à proximité des centres habités.
8	Surface en eau	Lacs, réservoirs et tout le réseau hydrographique.
9	Inselberg	Affleurements granitiques.
10	Urbanisé	Composé des centres habités, des bâtiments ou des zones goudronnées remarquables.

La reconnaissance de l'occupation du sol, des grandes formations végétales et des seuils qui les séparent provient aussi de l'examen des cartographies géophysiques réalisées auparavant, en cherchant à distinguer les principaux comportements en terme d'activité végétale, d'émissivité ou de température de surface. En partant des cartes numériques d'occupation du sol déjà réalisées auparavant, et en examinant le comportement radiométrique de chaque pixel en fonction des 10 principaux types prédéterminés (tableau 3.1), il est possible de dégager plusieurs comportements, en fonction des deux dates étudiées (figure 3.14).

Les résultats indiquent que les valeurs élevées de NDVI (>0,2) ou d'émissivité (>0,95) ou les plus basses températures de surface (<30°C) indiquent la présence de végétation verte, et correspondent aux savanes boisées, aux forêts claires et denses. Ces espaces se concentrent plutôt dans les parties centrales et sud-ouest de la zone d'étude. Les sols urbains, sol nu et les inselbergs sont plutôt caractérisés par de faibles valeurs de NDVI (ou faible émissivité et températures les plus élevées), avec une distinction très nette de la végétation. De faibles valeurs de NDVI sont également observées le long du fleuve Ouémé, qui s'étend du nord au sud à travers la zone d'étude, et dans les forêts décidues, autour du fleuve ou bien alternant avec les forêts claires et les savanes boisées (figures 3.11 et 3.12).

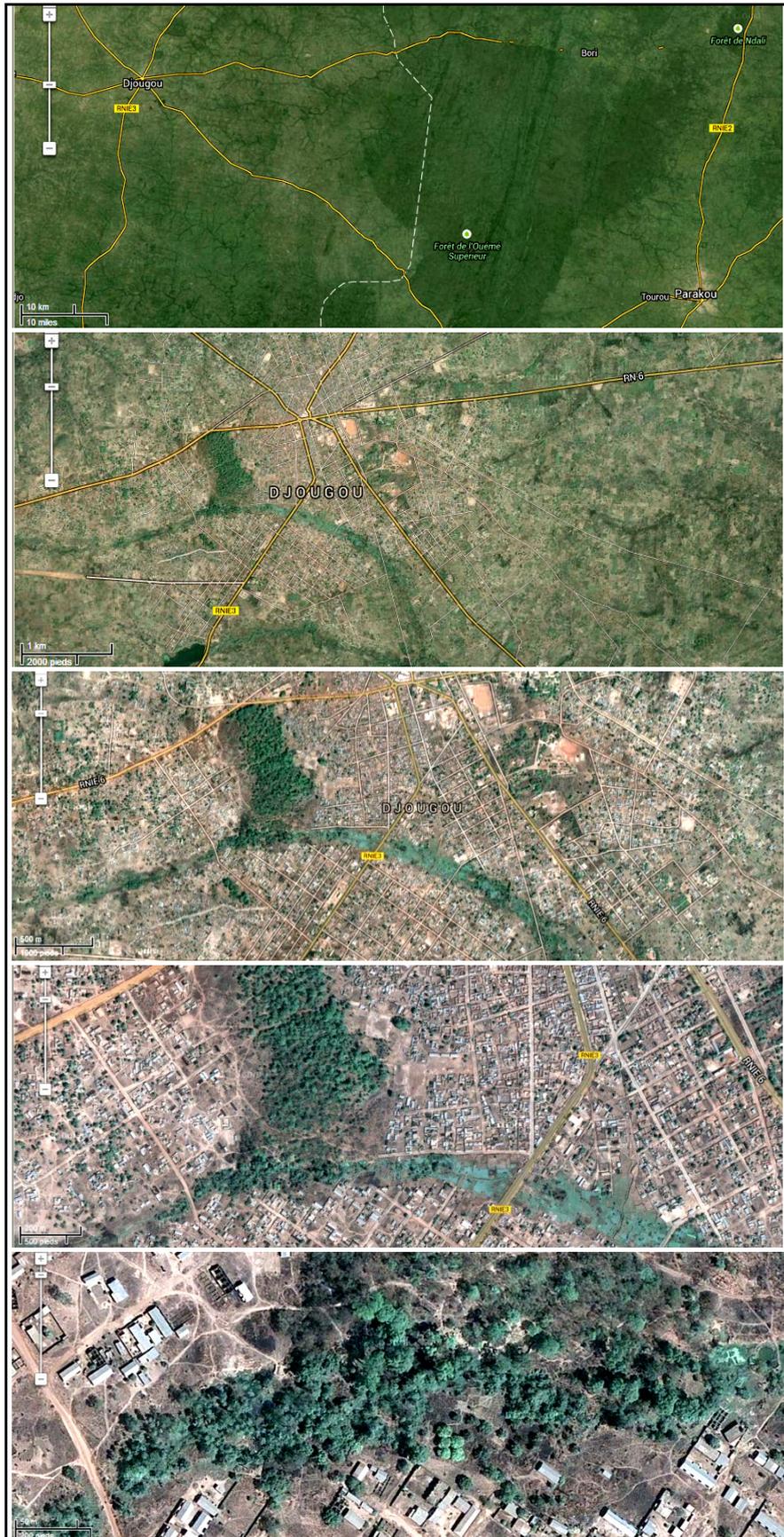


Figure 3.13 : Exemple de cinq zooms successifs à différentes échelles et à proximité de la ville de Djougou, extraits à partir de Google Map, et permettant une reconnaissance visuelle des principaux états de surface, dans un objectif de classification supervisée.

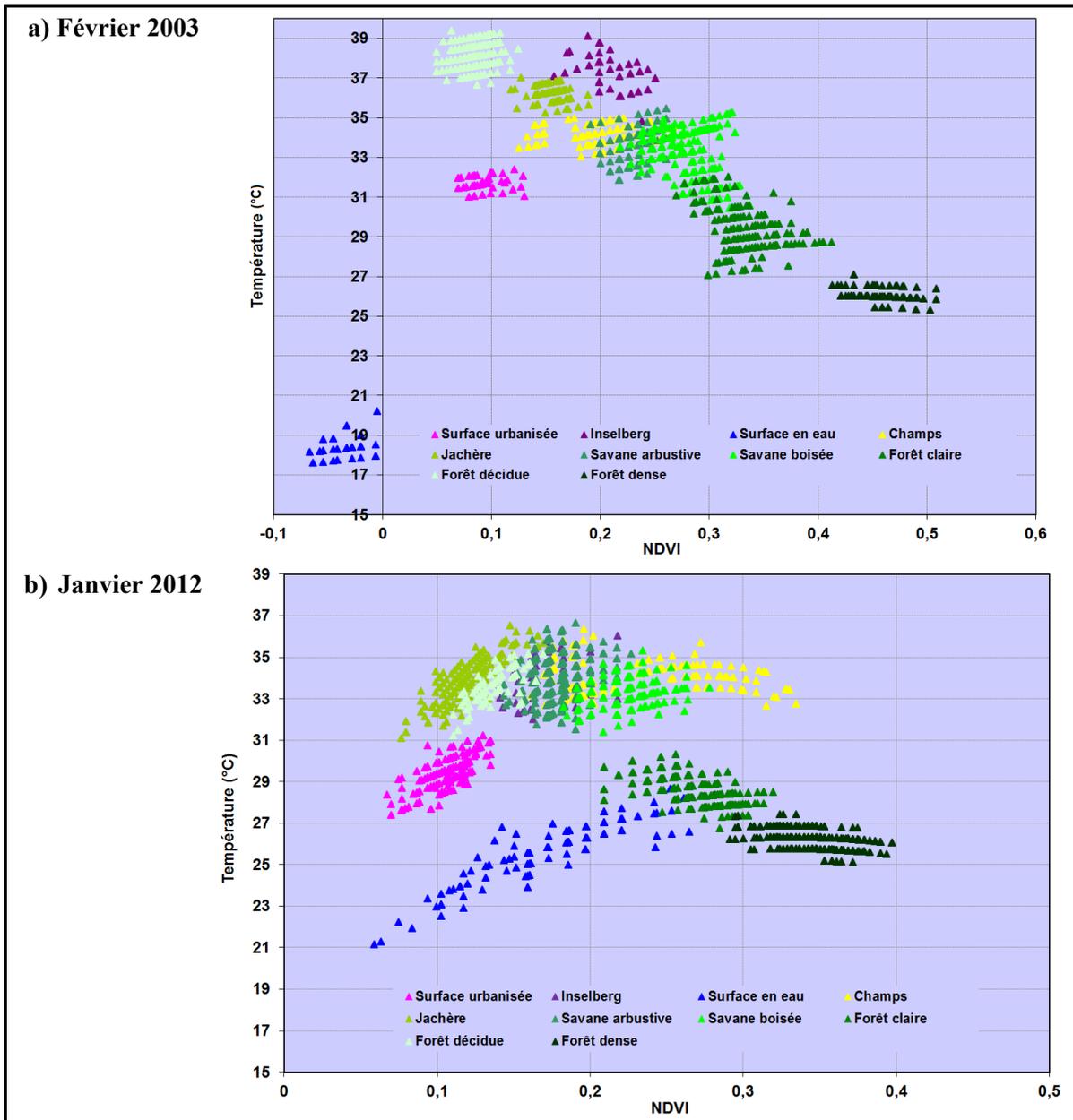


Figure 3.14 : Relation bivariée entre le NDVI et la température de surface calculés à partir d’image Landsat ETM+ selon les 10 principaux types d’occupations du sol préétablis sur l’Ouémé supérieur en février 2003 (a) et janvier 2012 (b).

Les états de surface enregistrant les températures les plus élevées ($> 30^{\circ}\text{C}$) correspondent aux espaces les moins forestiers, soit plutôt la partie septentrionale de la zone d’étude. Les plus basses températures de surface ($< 30^{\circ}\text{C}$) sont observées principalement dans les régions correspondant aux types ‘forêt’ et ‘surface en eau’. De telles températures sont également détectées pour des pixels associés aux espaces urbains, cela pouvant s’expliquer en partie par le mélange entre couvert urbain et végétation, et révélant par ailleurs la complexité d’analyse des propriétés de surface de ces ‘mixels’ (pixels mélangés) propres aux états de surface très anthropisés.

L’analyse est ensuite menée plus spécifiquement pour la date analysée la plus récente (janvier 2012, soit en saison sèche), et pour les trois classes d’occupation du sol pouvant potentiellement évoluer rapidement au cours des prochaines années, aussi bien pour des

raisons climatiques (évolutions des contraintes bioclimatiques, notamment thermo-hygrométriques) qu'en fonction de choix anthropiques (parcellaire agricole, déboisement) : les espaces de jachère, les forêts claires et les forêts denses (figure 3.15).

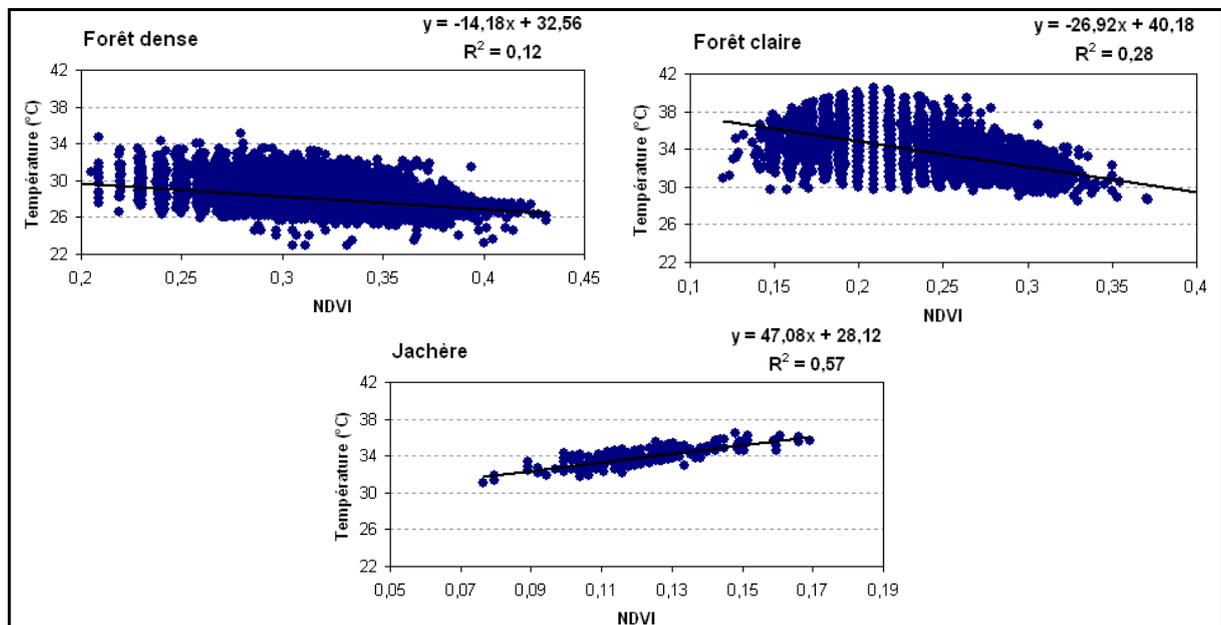


Figure 3.15 : Relation bivariable entre température de surface et activité végétale (NDVI) selon trois types d'état de surface de l'Ouémé supérieur (identifiés à partir de l'image LANDSAT ETM+ de janvier 2012) : forêt dense, forêt claire et jachère.

En zone boisée, la relation générale indique que les plus faibles valeurs de NDVI correspondent aux valeurs de T_s les plus élevées. Les valeurs de NDVI indiquent également que durant la saison sèche, leur amplitude est très grande (comprises entre 0,2 et 0,43), en fonction de l'activité végétale des différentes formes de densité et d'associations végétales. L'amplitude thermique est plus faible en forêt dense (entre 25 et 34°C environ) qu'en forêt claire (29 à 41°C), caractéristique qui peut s'expliquer par la plus faible densité d'arbre au sol, et donc le rôle plus important du sol dans les échanges thermiques, surtout pendant cette période sèche durant laquelle la perte foliaire est très élevée.

Le cas des espaces de jachère est particulier, puisque la liaison linéaire entre NDVI et T_s est positive et significative ($R^2 = 0,57$), mais les valeurs de NDVI sont très faibles ($< 0,17$), révélant la présence du sol nu durant la saison sèche.

Finalement, en plus des analyses thématiques directement basées sur les propriétés physiques calculées et attribuées à chaque type d'occupation du sol, un examen est aussi mené parallèlement grâce à l'étude des variations radiométriques dans les 6 canaux disponibles dans Landsat ETM+ et selon les 10 types d'occupation du sol. Les résultats montrent que c'est la combinaison des canaux 4, 5 et 7 qui discrimine le mieux les différents types de couverture (figure 3.16), et qui formera donc la meilleure base pour calculer la classification automatique des deux images.

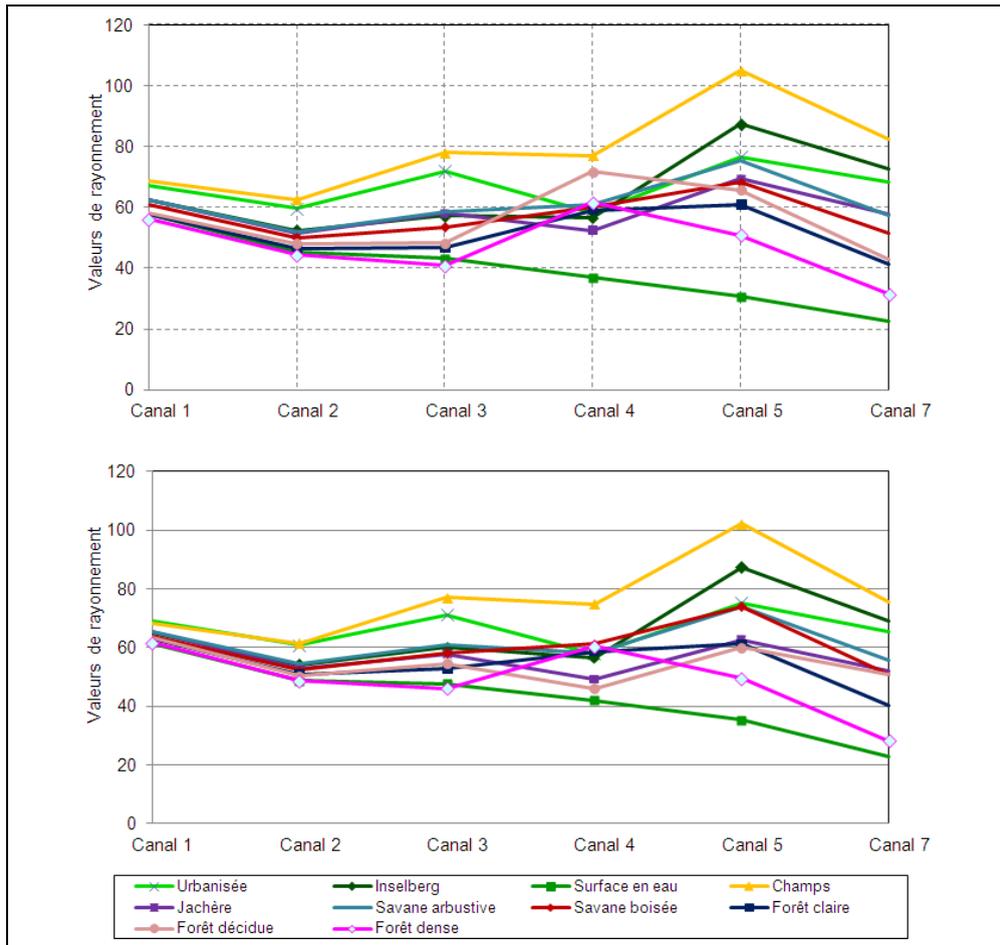


Figure 3.16 : Réflectance spectrale selon les 10 types d’occupation du sol préétablis dans l’Ouémé supérieur : pour février 2003 (en haut) et janvier 2012 (en bas).

3.2.1.2.3. L’établissement de la classification et l’examen des variations diachroniques

L’ensemble des prétraitements décrits avant permettent alors, dans un second temps d’analyse, de sélectionner plus objectivement et d’examiner plus attentivement des échantillons d’entraînement, ou ROI (pour ‘Regions Of Interest’) qui sont donc des portions d’images a priori mieux caractérisées avant classification. Chaque ROI caractérisant les 10 grands types d’occupation du sol sont donc identifiés sur le domaine étudié et à partir des deux images (figure 3.17).

Il faut ensuite évaluer la qualité de ces zones d’entraînement. D’après Richards et Jia (2005), la meilleure méthode est d’utiliser un algorithme de divergence qui analyse la séparabilité entre les classes spectrales. Il existe notamment celui de la divergence transformée et celui dit de la distance de Jeffries-Matusita (1999 Robin ; Girard et Girard, 1995). Si les valeurs de ces deux indices sont asymptotiques, et proche de 2 selon les classes spectrales, on peut en déduire des échantillons de classification qui possèdent une très bonne séparabilité. Les valeurs calculées selon ces deux approches et pour les deux images sont résumées dans les tableaux suivants 3.2 et 3.3, et montrent des valeurs très correctes pour chacun des échantillons d’entraînement, malgré quelques différences.

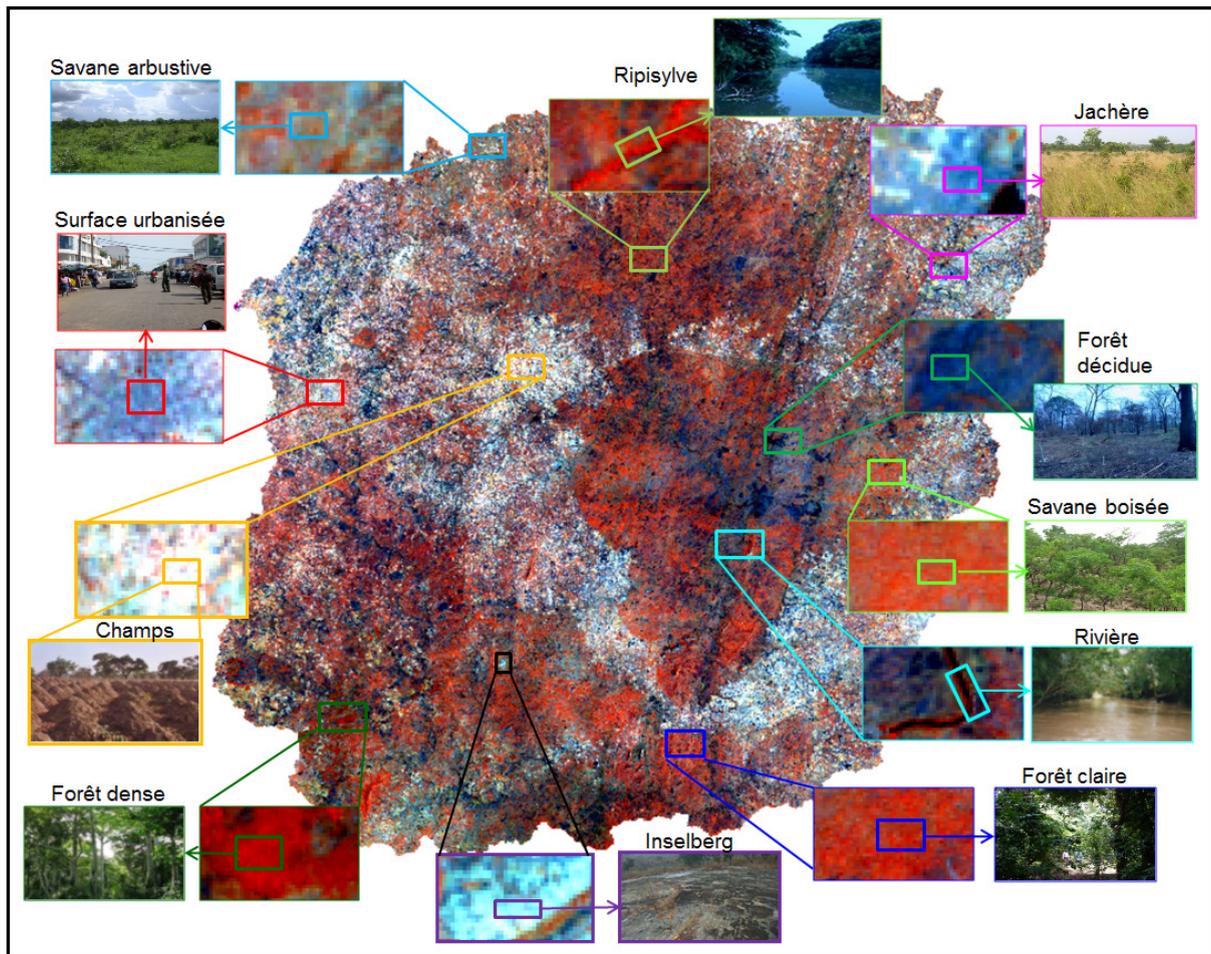


Figure 3.17 : Exemple de la localisation des ROI (*‘Region of Interest’*) sélectionnés sur l’image Landsat ETM+ de février 2003 pour représenter les 10 principaux types d’occupation du sol observés sur l’Ouémé supérieur (les encarts correspondent à un zoom de l’image Landsat associé à chaque fois à une illustration photographique du type de couverture rencontrée).

Les valeurs les plus faibles, de 1,5 à 1,7 (signalées en gris dans les tableaux) montrent qu’il existe des confusions possibles entre plusieurs couples de classes correspondant aux jachères, forêts décidues, ainsi qu’aux savanes boisées et espaces forestiers ou arborés. Pour pallier cet inconvénient, on peut alors procéder à certains regroupements de classes après classification. Plusieurs algorithmes de classification sont systématiquement testés, en cherchant à déterminer les raffinements et améliorations des typologies obtenues, en fonction notamment de seuils de précision statistiques (tableau 3.4). Par ailleurs, comme les deux images sélectionnées pour 2003 et 2012 sont issues du même capteur, l’algorithme de classification de l’année 2003 pourra être a priori identique à celui utilisé pour 2012.

Après différents tests, une classification automatique supervisée utilisant un algorithme de type Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood) est retenue, car fournissant la meilleure précision (tableau 3.4). Cet algorithme est également utilisé dans beaucoup d’études sur la discrimination des couvertures de végétation, notamment en milieu tropical (Subhash *et al.*, 2012).

Tableau 3.2 : Matrice résumant le calcul des coefficients de Jeffries-Matusita (JM) et de Divergence Transformée à partir des échantillons d'entraînement sélectionnés sur l'image LANDSAT ETM+ de février 2003, afin de définir la qualité de la séparabilité des différentes classes (les plus faibles valeurs sont repérées en grisé).

Categories	Ville		Inselberg		Eau		Champs		Jachère		Savane arbustive		Savane boisée		Forêt claire		Forêt décidue		Forêt dense		
	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	
Ville	-	-																			
Inselberg	1,999	2,000																			
Eau	2,000	2,000	2,000	2,000																	
Champs	1,999	2,000	1,998	1,999	2,000	2,000															
Jachère	1,999	1,999	1,958	1,997	1,999	2,000	1,999	1,999													
Savane arbustive	1,999	1,999	1,990	1,997	2,000	2,000	1,999	1,999	1,963	1,976											
Savane boisée	1,999	2,000	1,997	1,999	1,996	1,999	1,999	2,000	1,959	1,995											
Forêt claire	1,999	2,000	1,999	2,000	1,999	2,000	1,999	1,999	1,999	1,999	1,943	1,993									
Forêt décidue	2,000	2,000	2,000	2,000	1,999	2,000	1,999	1,999	2,000	2,000	1,999	1,999	1,981	1,995	1,978	1,988					
Forêt dense	2,000	2,000	2,000	2,000	1,999	2,000	2,000	2,000	1,999	2,000	1,999	2,000	1,999	1,999							

Tableau 3.3 : Idem que le tableau 3.2, mais pour l'image LANDSAT ETM+ de janvier 2012.

Categories	Ville		Inselberg		Eau		Champs		Jachère		Savane arbustive		Savane boisée		Forêt claire		Forêt décidue		Forêt dense		
	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	JM	DT	
Ville	-	-																			
Inselberg	1,999	1,999																			
Eau	2,000	2,000	2,000	2,000																	
Champs	1,999	1,999	1,999	2,000	2,000	2,000															
Jachère	1,999	1,999	1,937	1,978	1,999	1,999	1,999	1,999													
Savane arbustive	1,998	1,999	1,980	1,998	2,000	2,000	2,000	2,000													
Savane boisée	1,999	1,999	1,997	1,999	1,999	1,999	1,999	1,999	1,993	1,996	1,812	1,873									
Forêt claire	1,999	2,000	1,999	1,999	1,999	2,000	1,999	2,000	1,993	1,999	1,974	1,996									
Forêt décidue	1,999	2,000	1,881	1,988	1,996	1,999	1,999	2,000													
Forêt dense	2,000	2,000	2,000	2,000	1,989	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,999	1,999	1,976	1,997	2,000	2,000			

Tableau 3.4 : Comparaison de la précision (précision globale et indice de Kappa) de la classification supervisée en fonction des différents algorithmes testés.

		PRECISION	
		Précision globale (%)	Kappa
ALGORITHMES	Parallépipède	66,97	0,633
	Distance Minimum	75,87	0,736
	Angle Spectral	73,88	0,714
	Réseau de Neurones Artificiel	42,19	0,374
	Distance de Mahalanobis	75,01	0,727
	Maximum de Vraisemblance	93,29	0,926

Dix principaux types d'occupation du sol sont donc classés à la fois pour l'image de 2003 et de 2012 (figures 3.18 et 3.19). Une validation de ces classifications est ensuite réalisée à partir des observations de terrain géoréférencées réalisées les années précédentes dans le cadre de AMMA, ainsi qu'à partir d'une validation empirique basée sur la comparaison avec des supports cartographiques d'occupation du sol, et sur les précédents résultats qui ont permis de discriminer des différences de comportements radiométriques. Les résultats statistiques des classifications (matrices de confusion) sont relativement satisfaisants, avec en moyenne plus de 87 % de pixels bien classés en 2003 et plus de 89 % en 2012. Les détails classe par classe des matrices de confusion peuvent être consultés dans l'annexe A.

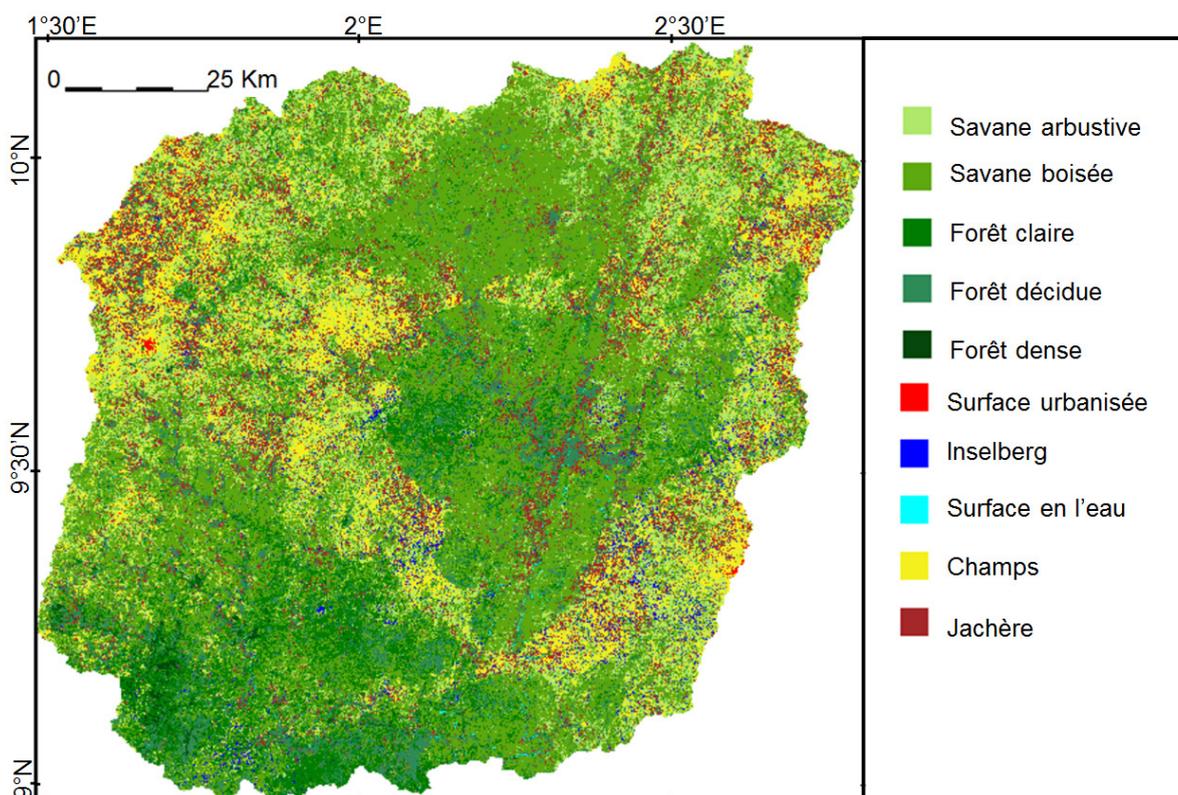


Figure 3.18 : Résultat de la classification automatique en 10 principaux types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur calculée à partir de l'image LANDSAT ETM+ du 05/02/2003.

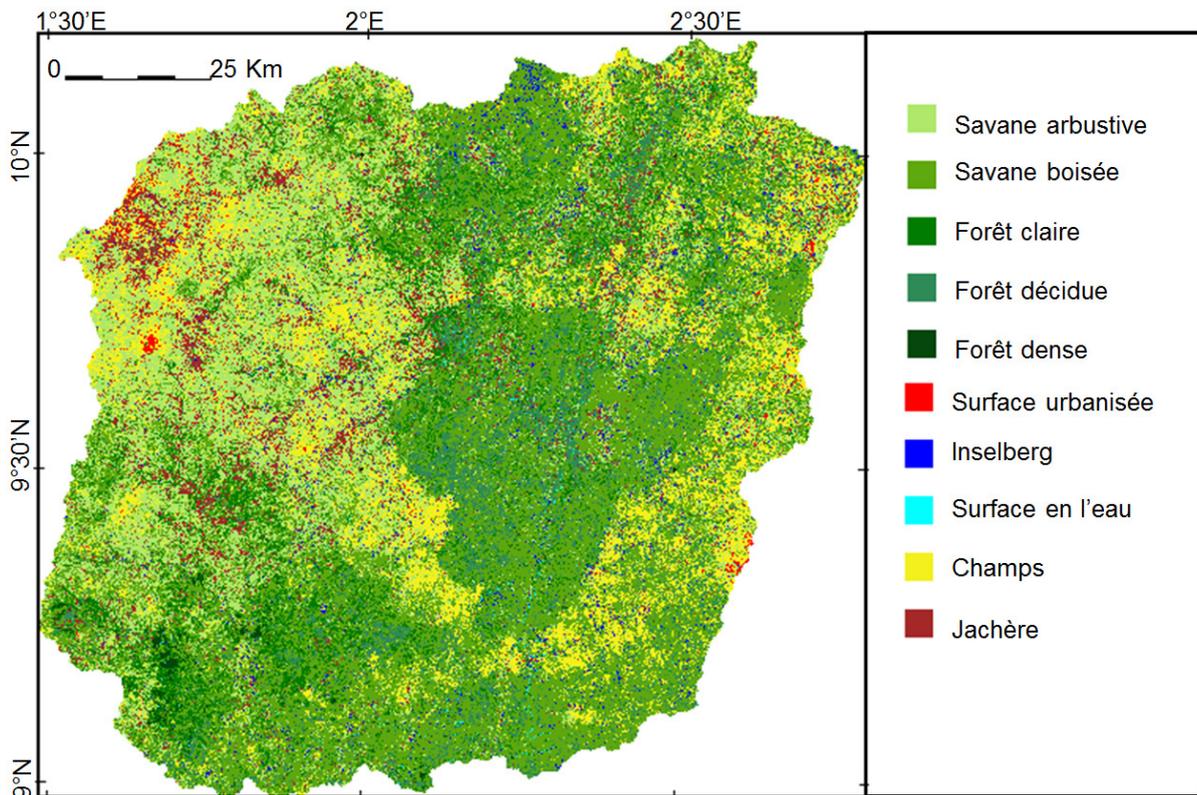


Figure 3.19 : Idem que pour la figure 3.18, mais pour l'image LANDSAT ETM+ du 29/01/2012.

3.2.1.3. Estimation de l'évolution la couverture végétale entre 2003 et 2012

L'analyse de la dynamique de la végétation sur l'Ouémé supérieur est essentielle pour mettre en relief la variabilité spatio-temporelle du couvert végétal, et potentiellement, les conséquences éco-hydro-climatiques associées. La comparaison diachronique des classifications (tableau 3.5 ; figure 3.20) fait ressortir des évolutions significatives de l'occupation du sol entre 2003 et 2012. En règle générale, ces changements correspondent à la dynamique observée en Afrique de l'Ouest, notamment une progression des espaces de cultures et des tissus urbains.

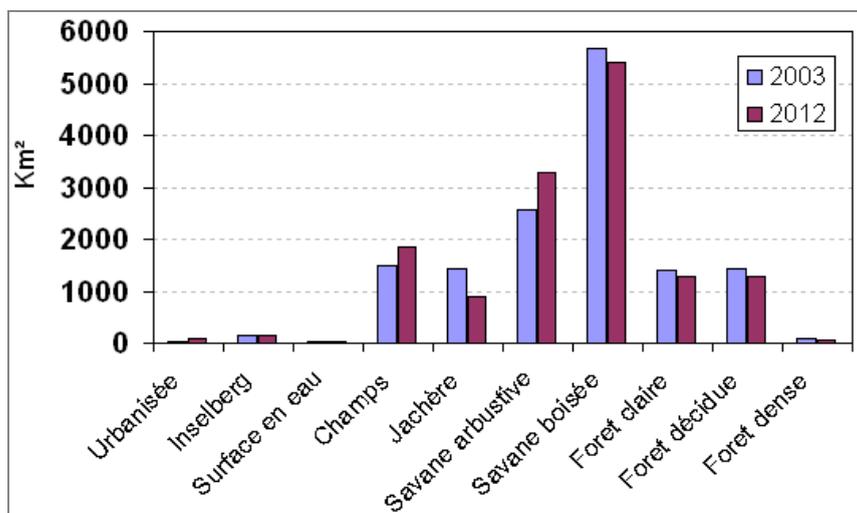


Figure 3.20 : Résumé des superficies correspondant aux 10 principales classes d'occupation du sol du bassin versant de l'Ouémé supérieur en février 2003 et janvier 2012.

Tableau 3.5 : Les principaux changements de l'occupation du sol calculés (en km²) entre février 2003 et janvier 2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur en comparant les 2 classifications réalisées à partir des images LANDSAT ETM+.

Classes	Image du 05/02/2003	Image du 29/01/2012	Variations spatiales (en km ²)	Variations en %
Surface urbanisée	39,4	80,7	+41,3	+104,8
Inselberg	163,8	148,5	-15,3	-9,3
Surface en eau	24,1	18,1	-6,0	-24,8
Champs	1484,7	1857,4	+372,7	+25,1
Jachère	1435,7	882,3	-553,4	-38,5
Savane arbustive	2576,3	3286,0	+709,6	+27,5
Savane boisée	5660,6	5389,6	-271,0	-4,7
Forêt claire	1412,3	1295,8	-116,5	-8,2
Forêt décidue	1428,6	1282,0	-146,6	-10,2
Forêt dense	89,3	74,4	-14,9	-16,6

Les résultats observés régionalement à l'échelle de cette partie du Centre-Nord Bénin (9-10°N) confirment également que la très forte dynamique des changements observés spécifiquement vers 9°N en Afrique de l'Ouest est en fait engagée depuis les années 80 et 90 (Vittek *et al.*, 2014 ; figure 3.21). Les résultats obtenus ici sur la période 2003-2012 indiquent que ces changements se sont même accélérés régionalement au Bénin, et qu'ils contribuent fortement au taux de changement enregistré en Afrique de l'Ouest.

Les statistiques régionales plus précises établies sur l'Ouémé supérieur sur la période 2003-2012 permettent de détailler plusieurs éléments :

- Les zones habitées doublent de superficie sur la période d'étude. Les surfaces en eau varient de 6 km² (soit 25 % entre les deux dates), mais cela est uniquement dû à la variabilité des espaces inondés et surtout de la taille des tronçons en eau du réseau hydrographique, superficie totale qui varie annuellement en fonction des débits.
- Les espaces cultivés enregistrent une augmentation de 25 %, logiquement en phase avec la croissance démographique et urbaine régionale.
- Tous les espaces forestiers perdent en superficie sur la décennie observée, en particulier les forêts denses (a priori protégées dans cette région) avec une baisse supérieure à 16 %.
- Le changement des forêts naturelles est particulièrement élevé dans le sud de l'Ouémé supérieur (figure 3.22), avec des effets visibles de 'mitage' (au sein des espaces forestiers) ou de 'grignotage' (en périphérie des massifs protégés). Les petits espaces forestiers isolés disparaissent au profit de zones agricoles à long terme, observation valable pour une bonne partie du centre et nord du Bénin (Oloukoi *et al.*, 2006). Les plus forts déboisements autour de la forêt classée de l'Ouémé supérieur semblent donc se poursuivre, même si l'aire protégée semble globalement respectée, à l'exception de l'axe des principales rivières et d'un emplacement au centre-est. Judex et Thamm

(2008) avaient déjà observé des atteintes sur la lisière ouest dans les années 1990 et 2000.

- Les superficies de jachère diminuent, alors que les savanes arbustives augmentent, ces deux types de formations pouvant facilement être confondus à cause de leur difficulté de discrimination, notamment en fonction de l'âge des jachères qui module fortement le taux de boisement ; mais la baisse des jachères peut aussi être due à une reprise de ces terres agricoles du fait de la croissance périurbaine agricole.

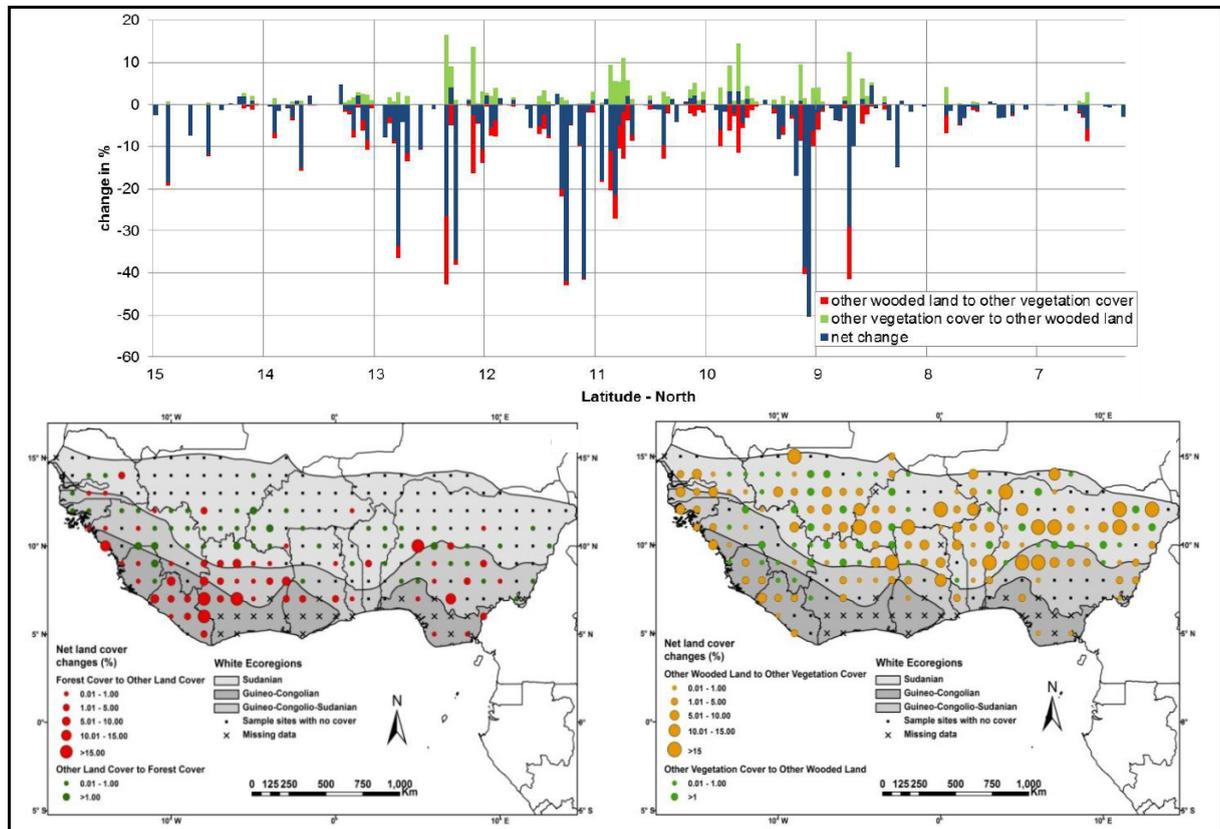


Figure 3.21: Changement (en %) de l'occupation du sol en Afrique de l'Ouest établis à partir de l'imagerie Landsat sur la période 1975-1990 : évolutions selon la latitude (graphique du haut) ; évolution de la déforestation (carte de gauche) ou du déboisement (carte de droite). Adapté d'après des documents de Vittek *et al.* (2014).

La dynamique spatiale apparaît bien autour des principaux espaces forestiers lorsqu'on regarde ceux qui ont été remplacés par des espaces cultivés (figure 3.23). Dans la partie nord du bassin versant (commune de Djougou et N'dali), la proportion de superficie agricole est déjà élevée (Giertz *et al.*, 2006), les changements de couverture apparaissant donc plus élevés dans la partie sud. Ces auteurs l'expliquent en partie par la forte immigration paysanne régionale : en raison de la rareté des terres et de la diminution de la fertilité des sols au sud, les migrations se font dans d'autres régions du Bénin (principalement au nord-ouest et dans les régions limitrophes au Togo) où la disponibilité des terres est élevée. Selon Judex *et al.* (2006), la destruction des espaces forestiers est environ inverse à l'augmentation de la superficie agricole, une grande partie devant potentiellement disparaître d'ici 2025 si la tendance ne change pas ; sachant par ailleurs que ces évolutions ont été modélisées à partir des données définies pour les années 1990, et que finalement, les mutations d'occupations se sont encore accélérées depuis, rendant donc peut-être caduques ces prévisions.

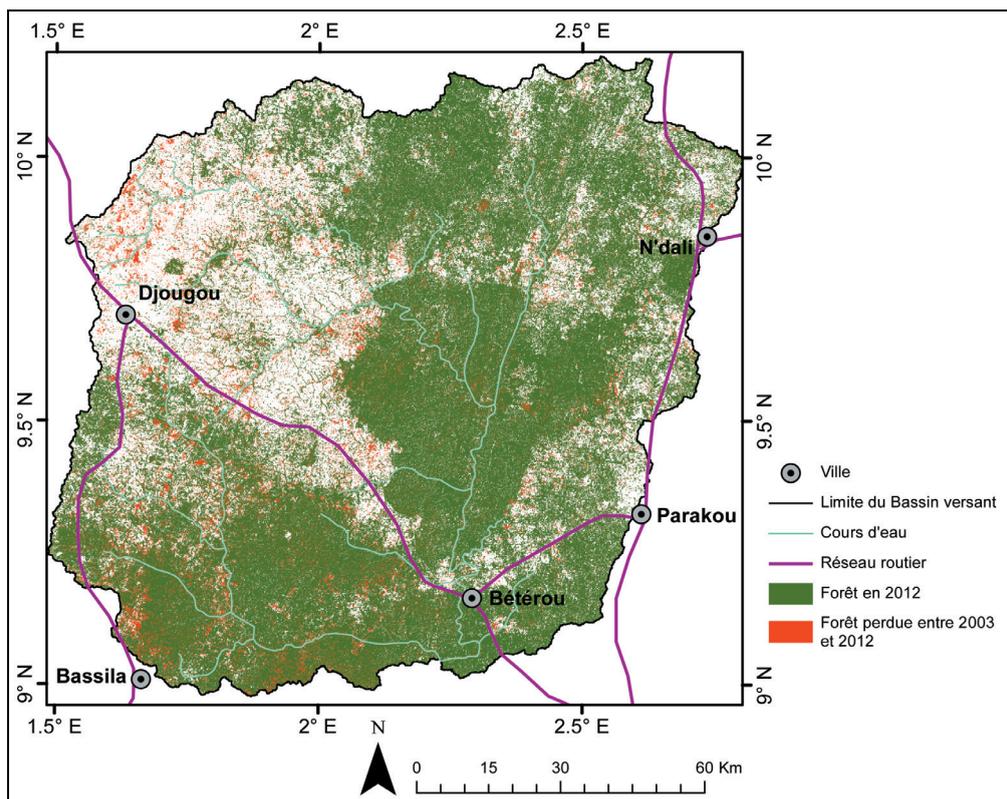


Figure 3.22 : Evolutions des espaces forestiers entre 2003 et 2012 dans l’Ouémé supérieur établies à partir de l’analyse diachronique d’images LANDSAT ETM+.

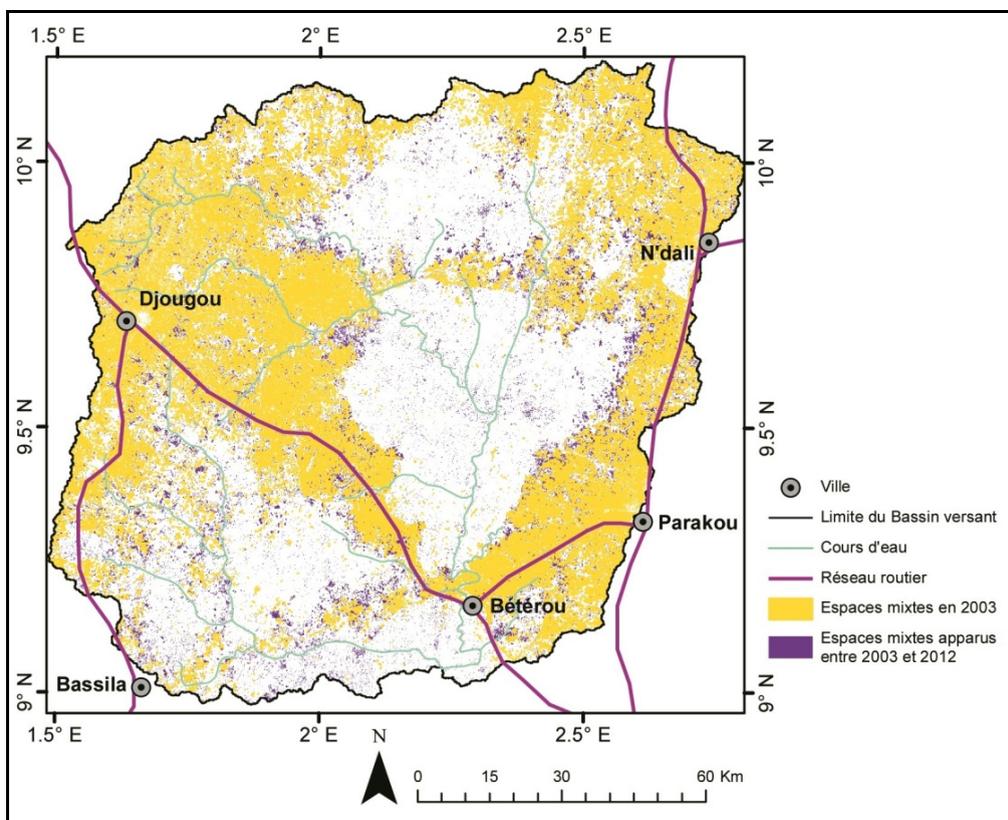


Figure 3.23 : Idem que figure 3.22, mais pour l’évolution des espaces mixtes (savane, jachère, champs) entre 2003 et 2012.

Bouko *et al.* (2007) constatent que les mutations démographiques engendrent de fortes pressions sur les formations naturelles du Bénin, qui se dégradent profondément. Le Centre et Nord du Bénin ayant un fort potentiel attractif, car conservant encore de faibles densités de population (avec environ 28 habitants/km² contre 59 en moyenne pour le Bénin) et donc, des taux de croissance annuelle nette très élevés, de l'ordre de 3,8 % (calculés sur la période 1992-2002). Par exemple, dans la commune de Bassila, via l'aménagement de la route, les extensions agricoles ont augmenté de façon spectaculaire en accélérant la dynamique d'occupation du sol de la région. Les espaces forestiers sont finalement les principales réserves de pâturage, avec une faible possibilité de régénération étant donné la pression actuelle (Bouko *et al.*, 2007 ; Speth *et al.*, 2010). Ces transformations d'occupations du sol intenses et rapides dans l'Ouémé supérieur auront sûrement d'autres implications à court et moyen termes, à la fois socio-environnementales, écologiques et biogéophysiques.

3.2.2. Mise en perspective des évolutions d'occupation du sol

Nos résultats actualisent ceux déterminés à des échelles générales (administratives ou par unités territoriales) et fournissent aussi des données d'entrée potentiellement utilisables dans le cadre d'études et de modélisation environnementales. Ils confirment et précisent par exemple ceux obtenus dans le cadre du programme IMPETUS (Judex et Thamm, 2008 ; figure 3.24), ou encore ceux plus généraux établis à l'échelle du pays par la FAO ou dans l'atlas de la biodiversité du Bénin (Sinsin et Kampmann, 2010 ; tableau 3.6).

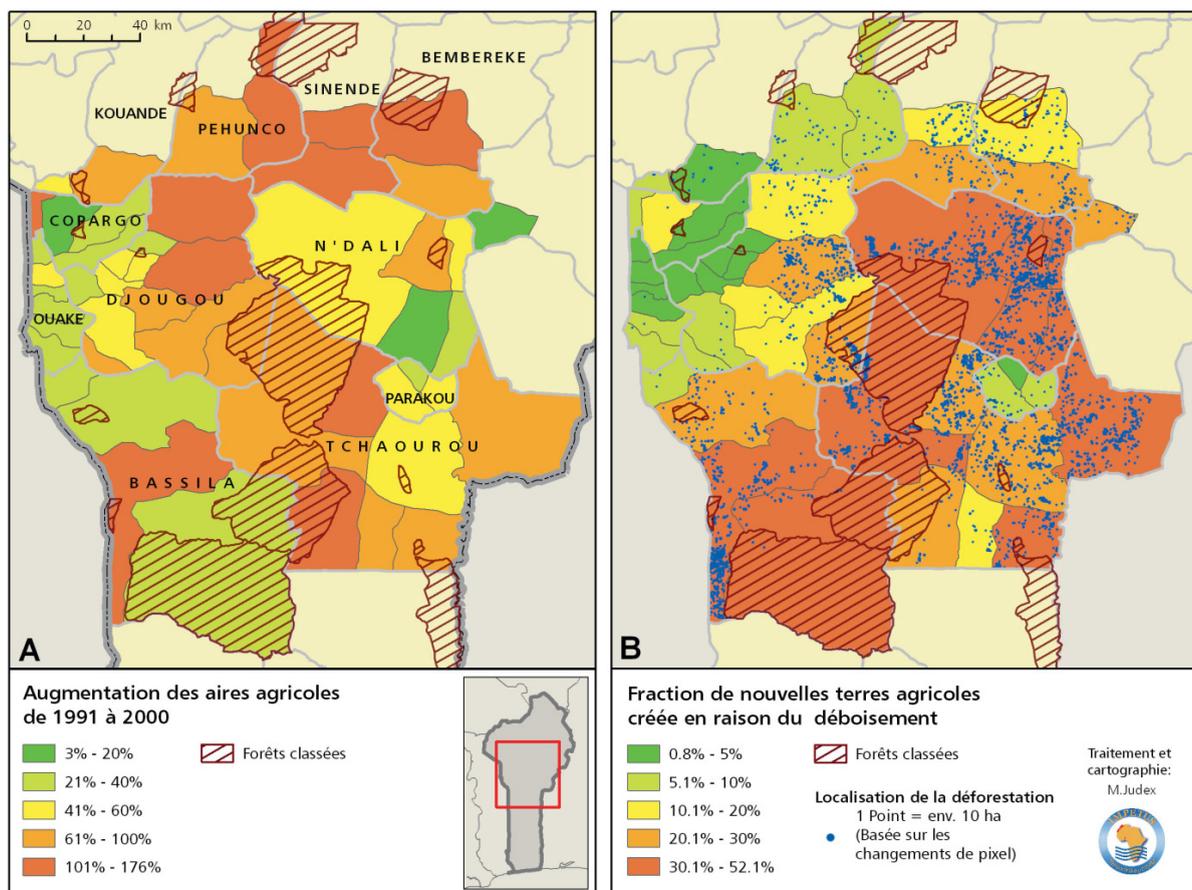


Figure 3.24 : Résumé cartographique des principales dynamiques de l'utilisation des terres exercées par l'extension des régions agricoles dans le centre du Bénin entre 1991 et 2000 (établi à partir d'une étude diachronique utilisant des images LANDSAT ; les régions de la forêt protégée sont incluses dans les statistiques traitées). Extrait issu de l'Atlas IMPETUS du Bénin (2010).

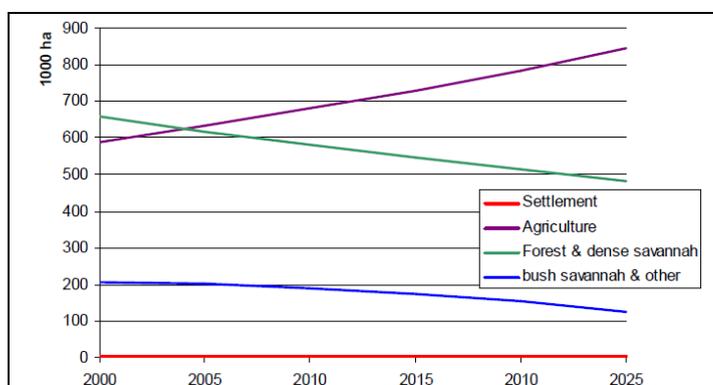
Tableau 3.6 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1995 et 2006 par district phytogéographique au Bénin (les signes + et – traduisent les évolutions en ha). Document extrait de l'Atlas de biodiversité du Bénin (2010).

District	Etat State 1995				Etat State 2006				Evolution globale Overall development		
	FN NF	FA AF	AG AG	ETN WBT	FN NF	FA AF	AG AG	ETN WBT	ha/an	%	Code Tab. 5.1
Borgou North	2 118 555	374 970	8 627	2 348	2 389 188	993 366	8 904	2 438	80 854	+7,77	6
Borgou South	1 763 850	222 648	11 664	17 664	1 841 034	748 397	13 461	3 823	53 717	+5,21	6
Bassila	945 651	150 762	4 559	311	764 690	262 251	3 212	312	-6 438	-0,59	3
Chaine	1 283 250	108 830	4 175	14 619	664 497	49 227	1 447	5 605	-62 736	-6,02	1
Côtier	47 028	54 952	13 102	33 332	29 460	19 194	15 932	12 633	-6 472	-0,59	3
Mekrou-Pendjari	576 526	156 559	2 778	6 084	1 392 340	148 590	3 785	9 894	73 878	+6,99	6
Plateau	371 646	994 329	14 662	75 030	139 410	432 957	17 333	14 114	-77 441	-7,36	1
Pobe	80 228	294 619	8 106	7 184	23 631	139 811	9 740	1 345	-19 601	-1,80	2
Vallee	441 346	389 061	6 301	36 566	49 206	155 035	5 479	12 140	-59 219	-5,71	1
Zou	822 003	40 813	8 836	18 718	563 999	576 698	5 626	2 086	23 458	+2,27	6

Légende : FN Formations naturelles, FA Formations anthropisées, AG Agglomérations, ETN Eau et Terrains Nus / NF: Natural formation, AF formation, AG Agglomerations, WBT water and bare terrain.

Sans que cela soit l'objectif principal du travail abordé ici, la précision des résultats apportés peut aider la gestion prévisionnelle rationnelle des ressources du Bénin, et leur utilisation durable, alors même que les mutations en cours sont difficiles à contrôler (Orékan *et al.*, 2008 ; Orékan *et al.*, 2013). Ils devront aussi permettre de repréciser les évolutions et modélisations des états de surface de l'Ouémé, pour l'instant seulement estimées de manière générale à partir des états de surface, des évolutions ou bien de tendances démographiques qui datent des dernières décennies de la fin du 20^{ème} siècle (figures 3.25 et 3.26).

Figure 3.25 : Estimations des évolutions de l'occupation du sol dans l'Ouémé supérieur à partir de l'observation (2000) et de modélisations géostatistiques (2005 à 2025) ; d'après Judex *et al.* (2006).

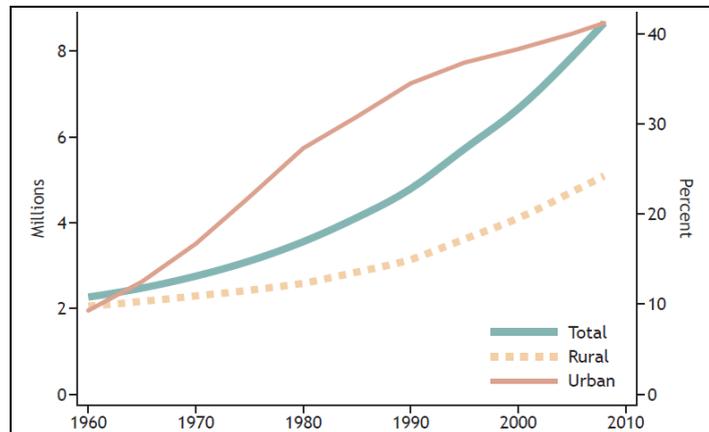


Cependant, ces évolutions environnementales tiennent uniquement compte des pressions agricoles, certes rapides et souvent difficilement contrôlables. Mais des études ajoutent que l'évolution des formations végétales et des pressions agro-pastorales dépendent aussi largement de la variabilité climatique régionale, essentiellement les précipitations (Klein et Roehrig, 2006). Des conditions éco-climatiques plus favorables peuvent en effet théoriquement favoriser les rendements agricoles, et ralentir alors les pressions sur les milieux forestiers.

Dans un même temps, l'évolution de la couverture végétale influence celle des bilans sol-air-température, donc aussi celle des signatures radiométriques que l'on mesure par satellite, surtout si on en reste à des résolutions spatio-temporelles faibles (par exemple de l'ordre du kilomètre et du mois). Il y a une littérature importante sur les possibles rétroactions entre végétation, sol, humidité et climat en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, mais sans que

les mécanismes soient encore précisément définis ou modélisés (Zeng *et al.*, 1999 ; Los *et al.*, 2006 ; Douville *et al.*, 2007). Pourtant, l'occupation du sol détermine la phénologie végétale, qui elle-même conditionne les bilans thermiques et hydriques au sol, tout changement pouvant donc altérer rapidement le climat local et régional. Ces interactions sont donc essentielles à caractériser finement pour améliorer la modélisation régionale ainsi que les capacités de prévisions intégrant les modifications de la couverture de surface (Dirmeyer *et al.*, 2010).

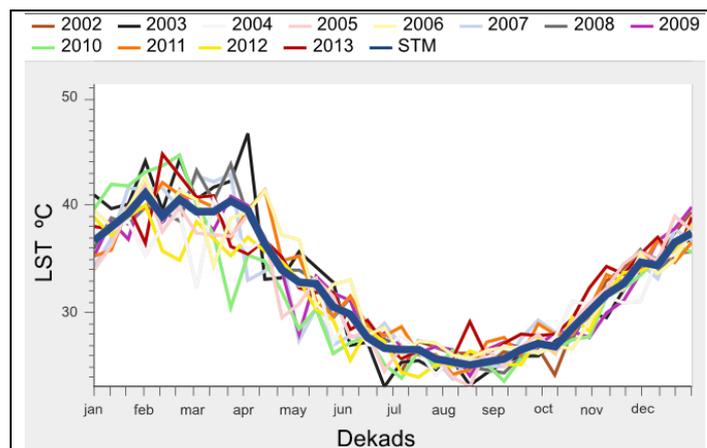
Figure 3.26 : Tendances démographiques au Bénin entre 1960 et 2008 : population totale (en millions), population rurale (en millions) et % de population urbaine (d'après les indicateurs de développement produits par la Banque Mondiale, 2009).



En fonction des résultats obtenus sur l'Ouémé supérieur (avec de nets changements d'utilisation des sols) et les tendances climatiques observées régionalement, particulièrement la hausse des températures, il demeure donc difficile de déterminer et d'isoler la part de la 'variabilité naturelle' de celle plus directement influencée par les changements d'utilisation du sol d'origine anthropique. Hulme *et al.* (2001) fait d'ailleurs le constat à l'échelle de l'Afrique où ces mécanismes sont très largement incompris dans les modèles qui omettent souvent en partie la représentation dynamique de la végétation interagissant avec l'atmosphère. Ces précisions sont pourtant déterminantes pour préciser la variabilité climatique africaine. Les mêmes auteurs suggèrent donc qu'il faut obligatoirement intégrer dans ces études de sensibilité des variables qui décrivent les socio-environnementaux qui contraignent la couverture végétale.

Les températures en Afrique sont directement liées à l'évolution des états de surface (Collins, 2011). Lorsqu'on regarde spécifiquement la variabilité des températures régionales, on observe que c'est surtout dans la période de février-mars-avril que les amplitudes sont très fortes, alors que la saison des pluies n'a pas encore débuté (figure 3.27). Cela correspond aussi à une période charnière durant laquelle les travaux culturels sont importants, notamment par le biais d'incendies. On voit une fois de plus que les contraintes climatiques et agricoles sont étroitement liées, car alors même que la région est affectée par le réchauffement global, le changement d'utilisation des sols peut aussi engendrer une hausse des températures par diminution du couvert arboré et/ou forestier, hausse qui va augmenter la sensibilité aux incendies de végétation, eux-mêmes fournisseurs de carbone et d'aérosols impactant le changement climatique.

Figure 3.27 : Evolutions des températures décadaires au sol (LST, *Land Surface Temperature*) au cours des années 2002 à 2012 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga (les températures sont estimées par satellite et mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal ; la courbe bleue en gras représente la moyenne des 11 années).



3.3. Conclusion de la partie 3

La télédétection facilite donc indiscutablement l'étude des variations régionales de l'occupation du sol et l'interprétation des changements d'utilisation des espaces forestiers et agricoles. Les résultats apportent ici des éléments descriptifs et statistiques pour analyser la place occupée par les agrosystèmes ainsi que la part des formations végétales essentiellement naturelles ou au contraire, subissant une forte pression anthropique. Mais les diagnostics spatiaux obtenus demeurent aussi très sensibles aux niveaux d'observation et de comparaison des échelles de paysages, l'homogénéité spatiale évoluant avec la résolution des données satellitaires analysées. Par ailleurs, l'application des procédures de classification d'image, même si elle entre désormais dans des protocoles bien maîtrisés et facilités par les outils divers de prétraitements, traitements et validation, il demeure encore un certain taux d'incertitude lors de l'étude de paysages tropicaux associant des territoires mixtes très évolutifs (savane, forêt, jachère). L'exigence d'un suivi et d'une validation sur le terrain permettrait de lever plusieurs de ces incertitudes, en apportant une connaissance plus précise de certains attributs spatiaux. Mais ces campagnes spécifiques de mesures ne sont pas toujours possibles aux bonnes dates ou même réalisables. Cependant, sur la base des résultats déterminés sur la période 2003-2012 grâce à l'imagerie LANDSAT ETM+, l'analyse diachronique montre qu'une augmentation progressive de la population s'accompagne d'une extension des zones de cultures, avec une dégradation de la végétation naturelle qui était certes engagée dès les années 1980-90, mais qui semble depuis accélérer. Les cartes de suivi permettent de localiser plusieurs zones sensibles, surtout en périphérie des espaces forestiers.

Malgré la qualité intrinsèque de ces bilans spatialisés, il faudra compléter cette première approche afin d'aboutir à une méthodologie plus robuste, puisque les analyses devront être répétées régulièrement, les conditions climatiques (pluvio-thermiques notamment) et environnementales semblant évoluer très significativement avant (*i.e.* les études sur les années 1950-2000) et après (*i.e.* à partir des simulations numériques) notre période d'étude 2002-2012, qui enregistre elle-même des variations importantes.

Partie 4 :

Etude de la variabilité spatio-temporelle de l'activité végétale aux échelles saisonnière et interannuelle

Cette quatrième partie se décompose en deux temps :

*1) la **présentation d'analyses**, qui demeurent ici plutôt préliminaires, pour tester les complémentarités ou différences significatives entre plusieurs produits satellitaires permettant l'étude de la variabilité temporelle de l'activité végétale, si possible à des définitions spatio-temporelles compatibles avec l'étude régionale ;*

*2) l'**insertion d'un article sous presse** dans la revue International Journal of Remote Sensing Applications (IJRSA) et dans lequel différents détails analytiques sur la variabilité spatio-temporelle du NDVI et de l'activité végétale sont exposés à l'échelle de l'Ouémé supérieur.*

L'évolution de la végétation est une des principales sources de changements environnementaux à l'échelle locale (et bien sûr, à la fois au niveau régional et mondial) car, comme évoqué dans la partie précédente, elle entre en interaction directe avec tous les processus bio-géophysiques, y compris l'équilibre et les bilans de l'eau (Lasaponara, 2006). De même, la question de l'adaptation de la végétation aux changements climatiques suppose une capacité de suivi et de prédiction en fonction de nombreux facteurs différents décrivant les dynamiques végétales (Sultan *et al.*, 2012). Mais dans bien des cas, ce qui est typiquement le cas dans l'Ouémé supérieur, la végétation naturelle est perturbée par des mécanismes et variations anthropiques qui modifient les écosystèmes locaux (Hector, 2014), donc également leurs réponses et trajectoires interannuelles et/ou intra-saisonnières. De plus, comme Philippon *et al.* (2006) le rappellent, si la végétation est un bon marqueur des perturbations climatiques, rétroactivement, elle affecte également le climat en retour sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles. Pour ces raisons, l'étude des dynamiques phénologiques (que l'on peut interpréter *lato sensu* comme une vision simplifiée de l'activité et de la production de biomasse des couverts végétaux) est essentielle, en particulier dans les zones de mosaïques de forêts, de savanes et d'espaces anthropisés comme on l'observe dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur.

La troisième partie a permis avant de diagnostiquer les principales variations d'occupation du sol sur la période récente, essentiellement au détriment des milieux forestiers et à la faveur des zones cultivées. Mais il n'est évidemment pas envisageables d'utiliser les produits satellitaires traités dans cette partie pour suivre et caractériser les changements temporels rapides en cours de saison de végétation, la haute résolution spatiale de LANDSAT ETM+ et SPOT-HRV étant contrebalancée par la faible fréquence temporelle inadéquate ici, respectivement de 16 et 20 jours théoriquement, mais souvent pratiquement beaucoup plus à cause des images inutilisables du fait de la nébulosité. Il faut donc se tourner vers l'utilisation de séries chronologiques fournies par des capteurs possédant une meilleure répétitivité temporelle et qui ont déjà démontré leur bon potentiel pour obtenir des informations sur l'activité photosynthétique de la végétation. Comme évoqué en partie 2, les analyses et comparaisons menées ci-après s'appuient donc sur quatre produits sélectionnés, à savoir SPOT-VGT, MSG/SEVIRI, MODIS et ECOCLIMAP. Les périodes étudiées ne sont pas obligatoirement actualisées jusqu'aux années les plus récentes, car l'objectif est surtout de déterminer des différences fondamentales, et pas d'analyser les années au cas par cas à ce stade (ce qui sera fait ensuite en fin de partie, ou dans la partie 5). Ces périodes dépendent aussi plus pratiquement des bases de données validées par les organismes et laboratoires diffuseurs qu'il nous a été possible d'obtenir au fur et à mesure des analyses, sans toujours avoir la dernière version actualisées des différents produits.

Afin d'améliorer la compréhension des réponses de la végétation aux contraintes et variations climatiques, il faut pouvoir déterminer, de la manière la plus précise et à partir de différentes sources d'informations, la variabilité spatio-temporelle de son activité photosynthétique (et donc plus uniquement définir une vision statique ou diachronique, mais bien dynamique). Cette quatrième partie est donc motivée par l'objectif principal d'identifier et d'estimer la variabilité spatio-temporelle aux échelles saisonnière et interannuelles, mais aussi en montrant les différences entre indices et/ou entre les différentes sources de produits actuellement traités par la communauté scientifique, puisque les indicateurs sont nombreux à ce sujet (cf. Partie 2 ; figure 4.1).

L'objectif n'est évidemment pas ici de revenir sur les détails techniques et la présentation exhaustive de tous les indices radiométriques actuellement utilisés par la communauté scientifique pour étudier les dynamiques de la végétation ou des états de surface au sol, mais

bien de regarder plus spécifiquement les éléments d'analyse à l'échelle de la zone d'étude du Bénin. La littérature est par ailleurs extrêmement prolifique, notamment pour le domaine tropical, pour pouvoir y retrouver facilement l'ensemble de ces précisions techniques, radiométriques ou algorithmiques, aussi bien sur le plan théorique que grâce à des cas d'étude (voir par exemple des synthèses faites par Huete *et al.*, 2002 ; Xie *et al.*, 2008 ; Bannaria *et al.*, 2009).

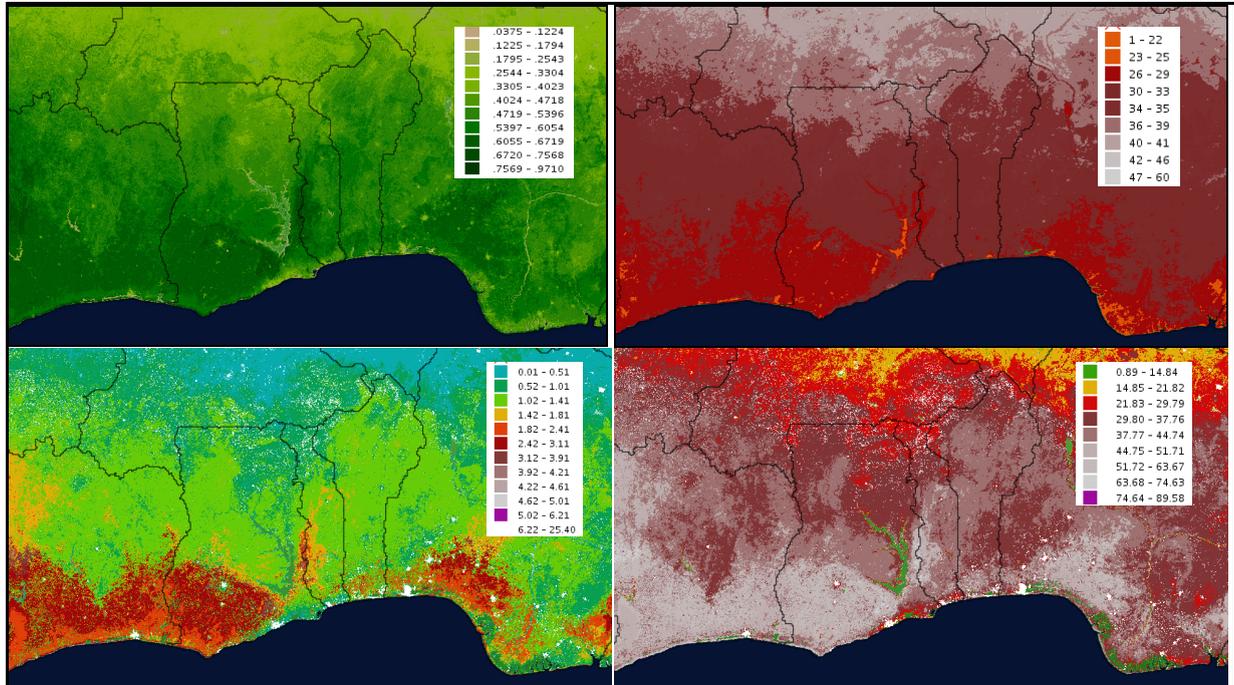


Figure 4.1 : Cartographie des quatre principales variables suivies par satellite et décrivant la dynamique géophysique des états de surface à l'échelle d'une partie de l'Afrique de l'Ouest allant de la Côte d'Ivoire au Nigéria : a) le NDVI, b) la température de surface moyenne diurne (en °C), c) le LAI, d) le FPAR (en %) ; moyennes calculées sur la période 2000-2012 à partir des données MODIS (données mises à disposition par le ASIS – *Africa Soil Information Service*).

4.1. Comparaison des produits satellitaires et caractérisation des variabilités phénologiques

4.1.1. Les principales différenciations saisonnières

Le NDVI et le LAI moyen sont généralement utilisés conjointement pour représenter et suivre les variations des valeurs moyennes de l'activité de la végétation (Wang *et al.*, 2005 ; Xiao *et al.*, 2006 ; Fan *et al.*, 2009). Une première comparaison, même sur une période courte de quelques années, peut déjà nous révéler quelques différences majeures à l'échelle de la zone d'étude, et aussi peut-être aider à la sélection et utilisation d'un seul indice, s'il résume les principales variations avec un minimum d'artefacts. On rappelle que l'étude du LAI repose ici sur les données MODIS, ECOCLIMAP-2 et MSG-SEVIRI (figure 4.2). Dans le cadre du projet international AMMA, la base de données AMMASAT qui a été constituée comprend une archive NDVI-LAI issue de MSG-SEVIRI, pour l'Afrique de l'Ouest à partir de septembre 2005 (Fensholt *et al.*, 2006 ; Lacaze, 2010 ; Fensholt *et al.*, 2011). Mais elle n'a pas été retenue pour notre étude qui portait en parallèle sur les changements (climatiques et d'états de surface) entre 2002 et 2012. Et nous avons donc préféré analyser des bases de données spécifiques par produits.

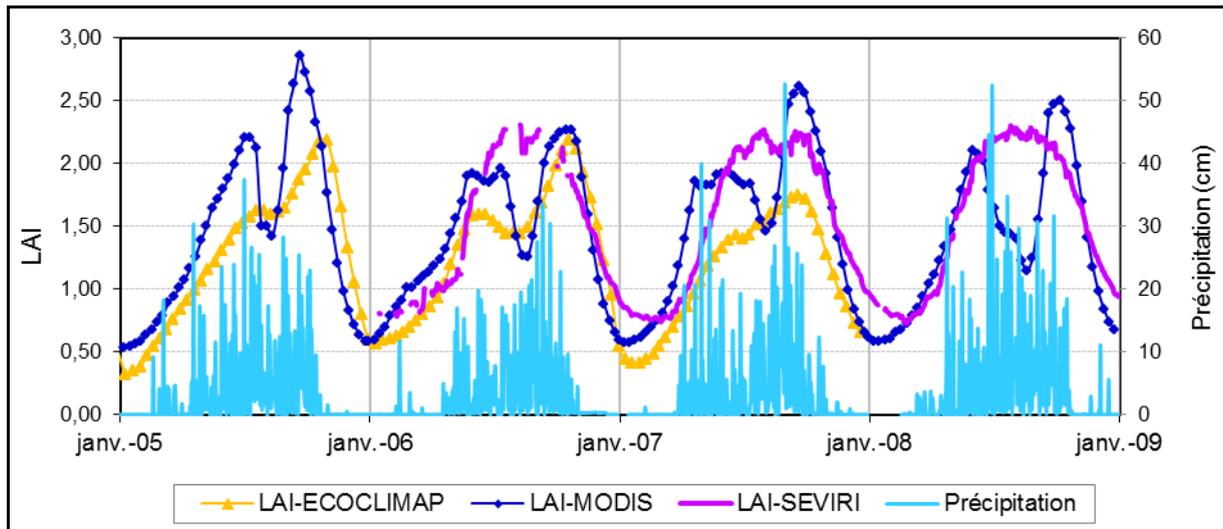
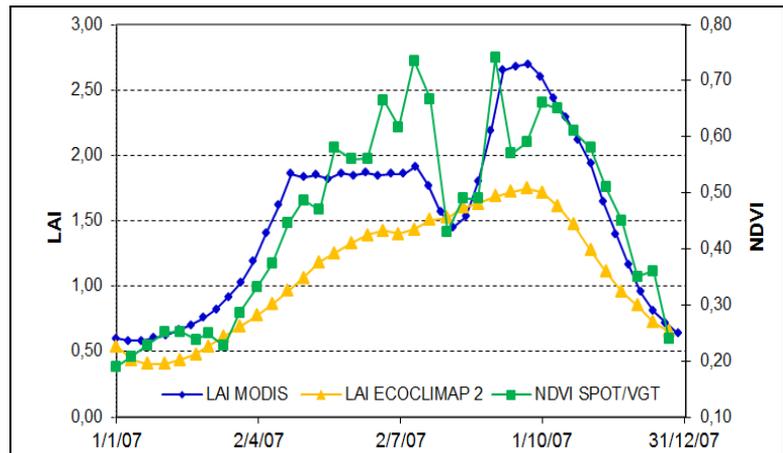


Figure 4.2 : Comparaison des signatures saisonnières moyennes du LAI pour le bassin versant de l'Ouémé supérieur sur la période 2005-2008 définies à partir des produits MODIS, ECOCLIMAP-2 et MSG-SEVIRI (les précipitations journalières moyennes sont indiquées par les valeurs en histogramme).

Ces comparaisons montrent des relations très instables d'une année à l'autre et différentes pour une même année, notamment durant la saison des pluies. Les singularités reposent en particulier sur la cyclicité, l'étendue des valeurs et les occurrences de valeurs extrêmes (figure 4.3) :

- Le cycle phénologique établi à partir du LAI-MODIS enregistre deux pics : un en juin et un autre en septembre. En août, on observe une diminution rapide des valeurs, liée au cœur de la saison des pluies, donc la présence nuageuse qui entraîne un signal bimodal artificiel. Plusieurs études indiquent qu'il y a au moins deux problèmes liés aux produits LAI-MODIS : 1) tout d'abord, il n'est pas continu d'un point de vue spatio-temporel, en raison de problèmes spécifiques du capteur et de la couverture nuageuse dans certaines zones, particulièrement tropicales ; 2) il est incorrect pour un certain nombre de types de végétation dans diverses régions, facteur en partie lié à des problèmes d'instruments (Xiao *et al.*, 2009).
- Avec les données LAI-ECOCLIMAP-2, on observe une diminution plus faible des valeurs en août, spécialement durant l'année 2007 durant laquelle il n'y a plus la présence de deux pics (figure 4.3). Pourtant, cet indice calculé dans ECOCLIMAP-2 a la même base originale issue des données MODIS, mais cependant, son maximum est plus faible (1,75) que celui provenant directement de MODIS (2,8). Cela peut s'expliquer essentiellement par les biais liés aux données et aux deux résolutions spatiales utilisées : MODIS avec 1 km et ECOCLIMAP avec 5 km, cette dernière résolution aboutissant finalement à des mixels (*i.e.* pixels mélangés) entre forêt et d'autres types couverts. Le LAI-ECOCLIMAP-2 est donc finalement lissé dans les interpolations des données MODIS, filtrage qui se retrouve dans la signature saisonnière, avec des valeurs plus faibles et un biais lié à la nébulosité moins lisible.

Figure 4.3 : Détails pour l'année 2007 pour la comparaison entre LAI selon MODIS, LAI selon ECOCLIMAP-2 et NDVI selon SPOT-VGT calculé à l'échelle de l'Ouémé supérieur.



- Les données MSG-SEVIRI révèle un LAI avec une signature annuelle très régulière (figure 4.2). Mais on constate également un léger bruit des données en août. Néanmoins, le signal est tout à fait différent de celui établi avec les autres données (MODIS, ECOCLIMAP, SPOT/VGT) car vraiment unimodal. L'utilisation des données MSG-SEVIRI (du moins sur la période 2006-2008) permettrait donc a priori de déterminer une relation plus fiable entre les variations des précipitations saisonnières et celles de la productivité végétale, car moins touchée par les biais atmosphériques intra-saisonniers durant la saison des pluies.
- L'observation plus précise selon les différences à l'échelle saisonnière du signal moyen (2005-2008) du LAI-ECOCLIMAP2 et du NDVI-SPOT/VGT (même résolution temporelle décadaire) révèle différents types de cycle phénologique (figure 4.4). La signature du LAI-MODIS indique une forte baisse en août, qui complique l'interprétation des relations climat/végétation ainsi que celles en fonction des différentes couvertures végétales (donc, contraintes par les variations des précipitations). Les données MSG-SEVIRI apparaissent en fait comme une source très fiable pour obtenir des résultats éco-climatiques en Afrique de l'Ouest, même en zone de nébulosité persistante, notamment en période de mousson (Lacaze, 2010). Mais cet auteur ajoute que des variations journalières importantes du NDVI issu de SEVIRI sont cependant observées dans les séries pour des espaces *a priori* photosynthétiquement peu variables, comme les forêts denses sempervirentes.

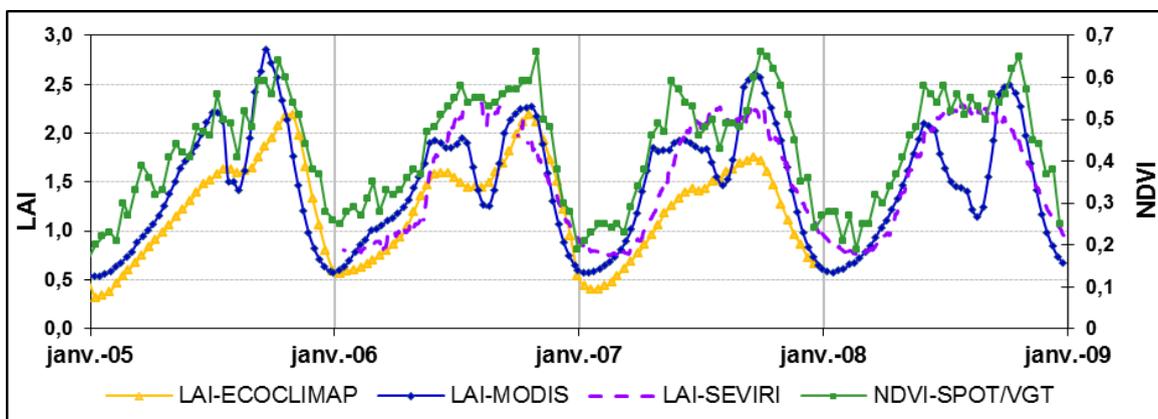


Figure 4.4 : Comparaison des signatures phénologiques saisonnières moyennes (2005-2008) calculées à l'échelle de l'Ouémé supérieur à partir de quatre types de données et indicateurs satellitaires : le LAI selon MODIS, le LAI selon MSG-SEVIRI, le LAI selon ECOCLIMAP-2 et le NDVI selon SPOT-VGT.

La comparaison visuelle est ensuite réalisée entre indices LAI et le NDVI calculé à partir de SPOT-VGT (figure 4.4). L'analyse reste ici empirique, car l'analyse statistique (par exemple par le biais de corrélations linéaires) n'apporte pas plus de robustesse, les échantillons temporels analysés étant différents et comportant quelquefois des valeurs manquantes ou éliminées. Les séries du NDVI montrent d'une part beaucoup moins d'uniformité, en révélant même une variabilité des valeurs pendant la saison sèche (DJF) ou en tout début de saison des pluies (MA), les séries du LAI étant beaucoup plus lisses. Elles enregistrent d'autre part également des diminutions de valeur très sensibles au cœur de la période estivale pluvieuse, par exemple en 2007, comme cela a été montré avant pour le LAI-MODIS (figure 4.3).

Mais lorsqu'on regarde la signature saisonnière moyenne établie sur les différentes périodes disponibles, ce n'est pas le NDVI-SPOT qui semble le plus sensible à ces baisses intra-saisonnières artificielles des valeurs, mais bien les séries LAI-MODIS (figure 4.5).

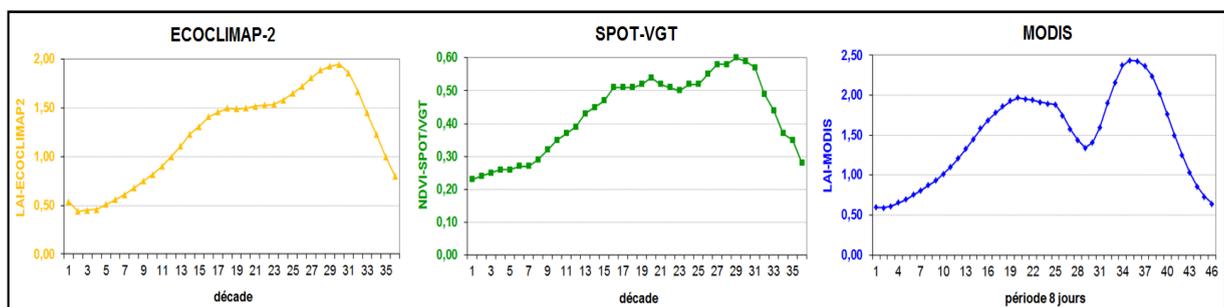


Figure 4.5 : Comparaison entre les trois signatures saisonnières moyennes obtenues à l'échelle de l'Ouémé à partir de trois types de données satellitaires : le LAI ECOCLIMAP-2 (2005-2007), le NDVI SPOT/VGT (2002-2009) et le LAI MODIS (2002-2009).

Tous les résultats obtenus à partir d'intercomparaisons de produits et d'indicateurs sur les espaces tropicaux montrent ce type de différences significatives. Ainsi, Lacaze (2010) indique que les valeurs moyennes du NDVI calculées à l'échelle tropicale africaine peuvent différer de 10 % entre MODIS, SPOT et MSG, les données issues de MODIS comportant les plus hautes valeurs moyennes, alors que SPOT enregistrent les moins élevées (avec MSG qui comporte des valeurs intermédiaires). Lacaze et Bergès (2005) concluent à la meilleure qualité des images MSG-SEVIRI pour les zones tropicales à forte nébulosité durant la saison des pluies. Leurs résultats confirment qu'une combinaison de résolutions spectrales avec également une approche part synthèse temporelle permet une bonne surveillance aux échelles supérieures des zones sujettes à nébulosité (Fensholt *et al.*, 2011). Cependant, la faible résolution spatiale (*i.e.* 3 kilomètres) reste un facteur limitant pour l'utilisation de MSG-SEVIRI pour des diagnostics uniquement régionaux et en deçà (Lacaze et Bergès, 2005). L'instabilité de l'algorithme utilisé et la difficulté d'utiliser ces données sur une base journalière n'est pas adaptée pour des études locales.

Ainsi, les séries temporelles de NDVI suggèrent que les données satellitaires SPOT/VGT sont appropriées pour détecter les principaux événements phénologiques qui sont influencés par tous les changements climatiques.

Malgré la faible résolution kilométrique des images, les données SPOT-VGT et la signature bioclimatique résultante restent finalement très proches de produits plus élaborés comme ECOCLIMAP (figure 4.5). A partir de leur travaux sur l'intercomparaison des capteurs (MODIS, SPOT-VGT, AVHRR) et des résolutions spatiales (250 m, 500 m, 1 km, 8 km), Tarnavsky *et al.* (2008) montrent que des composites de NDVI calculées sur plusieurs jours

restent très efficaces et pertinentes dans la surveillance biophysique et la modélisation du changement climatique. En fait, les données issues de MODIS semblent pouvoir être utilisées de façon interchangeable avec celle de SPOT-VGT ou AVHRR. Mais il faut évidemment conserver les étapes de prétraitements initiaux et/ou de validation/corrections pour que ces produits soient réellement complémentaires, donc reconnaître et éliminer l'artefact dû à la nébulosité. Ainsi, SPOT-VGT utilise classiquement la technique MVC (*Maximum Value Composite*), associée à des algorithmes de détection de la présence de nuages qui sont maintenant considérés comme relativement bons, même si les biais demeurent (Maisongrande *et al.*, 2004 ; Jarlan *et al.*, 2008 ; Lacaze, 2010 ; Poças *et al.*, 2012).

4.1.2. La prise en compte de la nébulosité dans l'analyse des phénophases saisonnières

La couverture nuageuse reste donc le problème fondamental dans les études du milieu tropical humide grâce à la télédétection satellitaire optique. Il faut pouvoir l'évaluer, pour au mieux, pouvoir l'éliminer, ou au minimum, en tenir compte dans les analyses et diagnostics associés. A partir de l'étude du NDVI sur le bassin de l'Ouémé, on observe que les valeurs augmentent rapidement dès fin mars, atteignent un premier maximum vers mai-juin, mais culminent vraiment en octobre (figures 4.5 et 4.6). Puis, le NDVI baisse très vite, correspondant à la fin du cycle phénologique régional (ou saison de végétation active, encore appelé 'saison végétative', période que la littérature anglo-saxonne appelle aussi « *greenness vegetation period* »). Les valeurs maximales atteintes ($NDVI > 0,8$) sont assez semblables d'une année à l'autre, alors que la variabilité interannuelle des valeurs minimales est beaucoup plus forte, notamment sur les périodes considérées comme bruitées par la nébulosité (et selon les algorithmes de détection de SPOT, ces indications étant signalées pour chaque pixel et pour chaque décade dans les métadonnées des produits VGT).

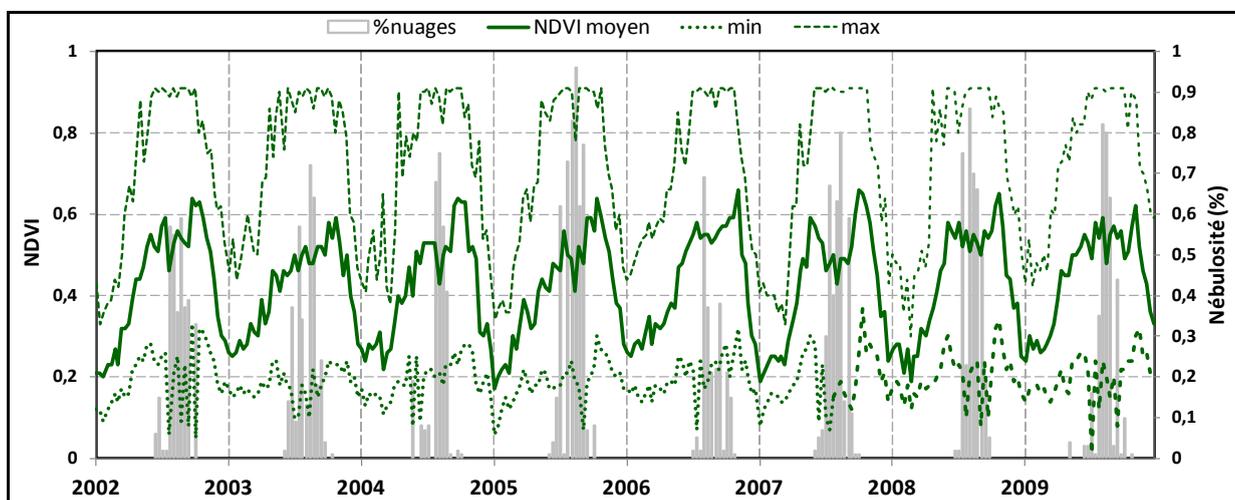
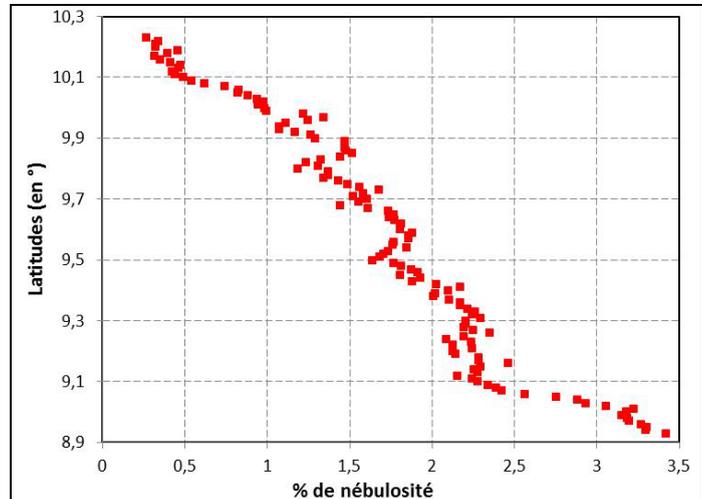


Figure 4.6 : Variabilité décadaire du NDVI issu de SPOT-VGT et calculée sur l'ensemble du bassin versant de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2009 : le NDVI régional minimum et maximum est représenté en pointillés, la courbe en gras représente la moyenne et les valeurs en histogramme indiquent le pourcentage de pixels bruités par la nébulosité pour chaque décade.

Pour plusieurs années étudiées (2002, 2004, 2007, 2008), le signal phénologique montre deux pics très significatifs, peut-être en partie dus à la variabilité photosynthétique de la végétation, mais aussi largement expliqués par la présence de nuages (cf. figure 4.2, avec les deux phases de la saison pluviométrique 2007 particulièrement évidente). A l'échelle régionale de la zone d'étude, on voit certains contrastes latitudinaux dans le biais apporté par la nébulosité dans les

données radiométriques et le calcul corolaire des indices de végétation. Ainsi, le bruit le plus important est surtout observé au sud du bassin de l’Ouémé supérieur, vers 9°N, où en moyenne plus de 2 % de tous les pixels NDVI SPOT-VGT étudiés sur la période 2002-2012 sont parasités (figure 4.7). Le nombre de pixels biaisés diminue ensuite régulièrement vers le Nord, pour atteindre moins de 1 % vers 10°N.

Figure 4.7 : Relation entre le pourcentage de pixels du NDVI SPOT-VGT biaisés par la nébulosité et la latitude calculée à l’échelle du bassin versant de l’Ouémé supérieur (calculé à partir des données décennales de la période 2002-2012 ; les pixels bruités par la nébulosité sont définis par les métadonnées de SPOT).



Des approches techniques complémentaires au NDVI existent en télédétection optique pour détecter et/ou diminuer le biais inhérent à la nébulosité, et plus généralement, aux biais provenant de l’atmosphère. Un moyen simple est par exemple le recours à un autre indice de végétation tel que l’EVI (*Enhanced Vegetation Index*), souvent utilisé comme un complément analytique du NDVI. Il se définit comme un indice radiométrique optimisé pour l’étude de la végétation, car plus sensible pour les espaces de forte productivité de biomasse (Jiang *et al.*, 2008). Pour rappel, son calcul repose sur la formulation suivante :

$$EVI = G \cdot [(PIR - R) / (PIR + C1 \cdot R - C2 \cdot B + L)]$$

où *G* est un facteur (*‘Gain factor’*) variant selon les produits satellitaire (il vaut par exemple 2,5 pour MODIS), *PIR* (*Proche-Infrarouge*), *R* (*Rouge*) et *B* (*Bleu*) correspondent à la réflectance de surface partiellement ou totalement corrigée des effets atmosphériques (par exemple de type Rayleigh ou absorption par l’ozone), *L* est un facteur d’ajustement de la canopée, *C1* et *C2* des coefficients décrivant la résistance due aux aérosols (et qui utilise la bande du bleu pour corriger les influences sur la bande du rouge ; ils valent par exemple respectivement 6 et 7,5 pour MODIS).

L’EVI améliore le suivi de la végétation en identifiant mieux la signature liée à la canopée (et donc la structure spatiale des formations) et permet souvent significativement de réduire les influences atmosphériques, alors que le NDVI est plus sensible aux variations chlorophylliennes. Cet indice est donc très lié au LAI, mais aussi à la physionomie, l’architecture et l’organisation de la végétation. Mais sa principale limitation est qu’il nécessite une bande dans le bleu pour son calcul, ce qui n’est actuellement pas le cas de tous les capteurs satellitaires pouvant être dédiés à l’analyse des formations végétales.

Le calcul de l’EVI-MODIS et sa comparaison avec le NDVI révèle plusieurs éléments à l’échelle d’une zone test définie dans l’Ouémé supérieur (figure 4.8) :

- les deux indices sont très corrélés ($R^2 = 0,76$), mais les valeurs de l’EVI sont plus basses que celles du NDVI, plutôt comprises entre 0,2 et 0,5 contre 0,3 à 0,7 pour le NDVI, ce qui est le résultat de la formulation analytique utilisée ;

- les variations importantes du NDVI observées en saison des pluies sont considérablement diminuées avec l'EVI, indiquant surement un filtrage très significatif des biais d'origine atmosphérique (figure 4.9) ; en fait, une large partie des valeurs de NDVI enregistrées durant le cœur de la saison des pluies (JJA) semble artificiellement sous-estimée, avec des valeurs proches de 0,5, alors qu'elles sont plutôt habituellement comprises entre 0,6 et plus de 0,7 (figure 4.8).
- la hiérarchie des années n'est pas exactement comparable, les années atteignant les plus fortes valeurs d'indice en fin de saison de végétation n'étant pas les mêmes (voir par exemple le cas de 2010).

Figure 4.8 : Relation bivariée entre les valeurs du NDVI et de l'EVI définis à l'échelle d'un indice régional de 50 x 50 km centré sur Djougou (les valeurs en rouge sont celles calculées sur les mois de JJA ; calculé à partir des données MODIS mises à disposition par l'IRI – *International Research Institute for Climate and Society*).

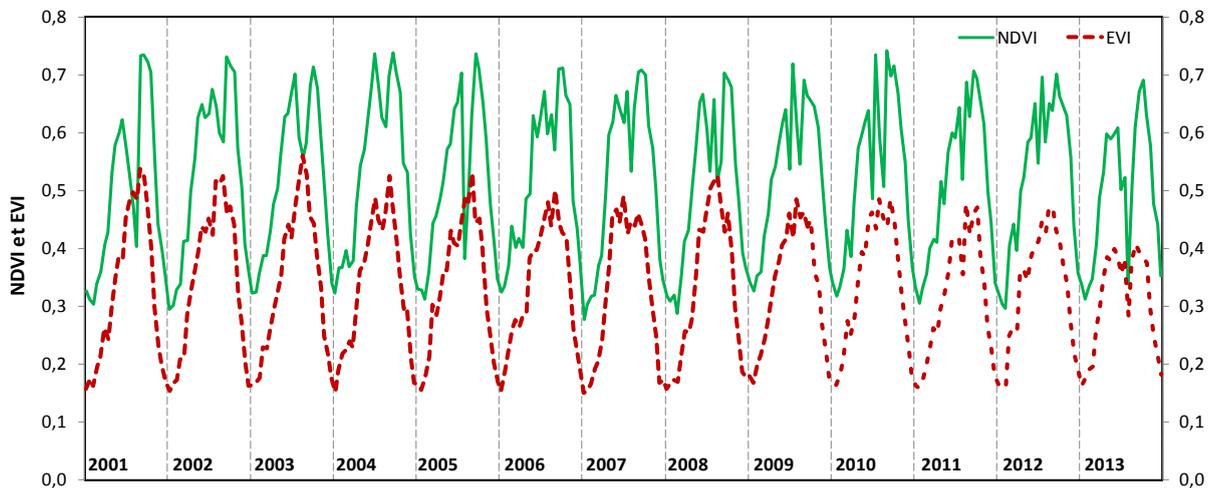
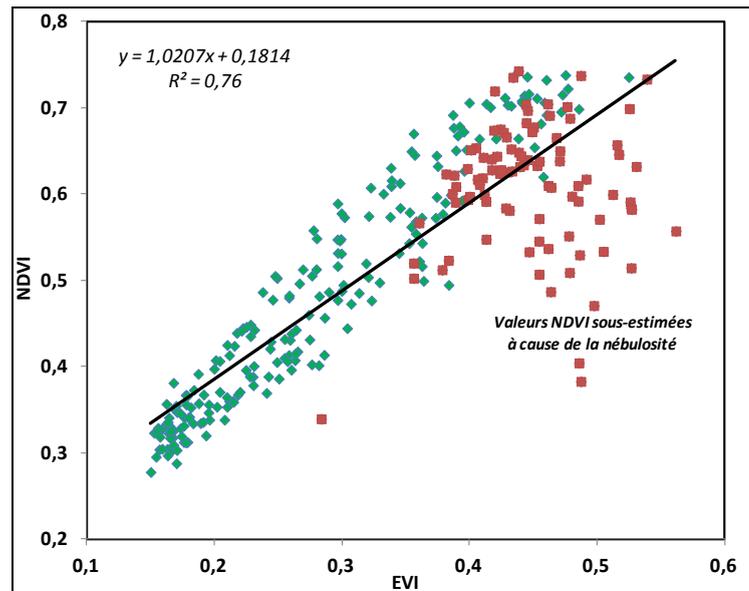


Figure 4.9 : Comparaison entre les indices de végétation NDVI et EVI sur la période 2001-2013 définis à l'échelle d'un indice régional de 50 x 50 km centré sur Djougou (calculé à partir des synthèses à 15 jours définies avec les données MODIS mises à disposition par l'IRI – *International Research Institute for Climate and Society*).

On peut illustrer le poids de la nébulosité avec l'exemple de l'année 2005, qui possède une signature NDVI assez caractéristique aussi bien avec les séries SPOT-VGT (figure 4.6) que MODIS (figure 4.9). La comparaison des champs du NDVI et de l'EVI en pleine saison des pluies, avec la synthèse calculée pour tout le Bénin sur la période allant du 28 juillet au 12

août, montre des différences notables, notamment dans le centre du pays où se situe le domaine étudié de l’Ouémé supérieur (figure 4.10).

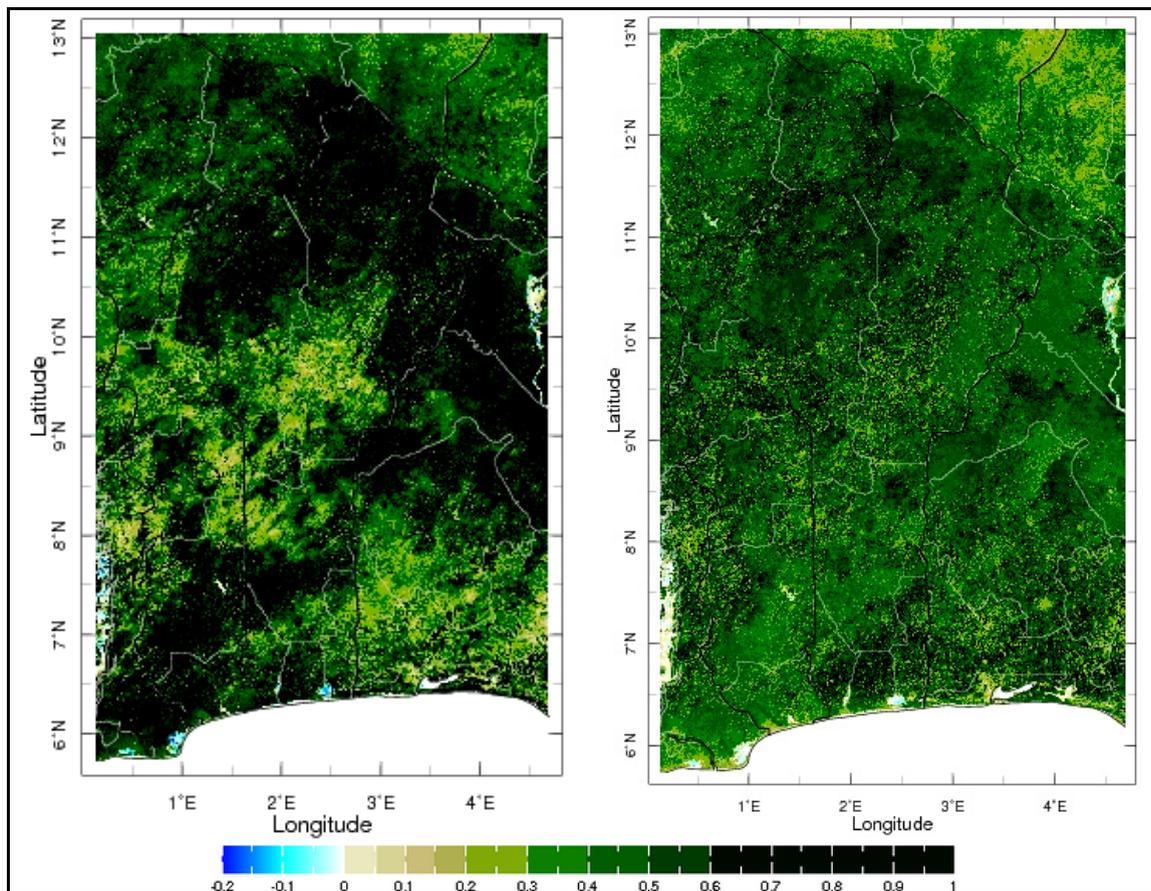


Figure 4.10 : Exemple de la comparaison entre NDVI (à gauche) et EVI (à droite) cartographiés à l’échelle de l’ensemble du Bénin pour la synthèse sur 15 jours allant du 28 juillet au 12 août 2005 (calculé à partir des données MODIS mises à disposition par l’IRI – *International Research Institute for Climate and Society*).

Le champ EVI est bien plus cohérent spatialement, même si on distingue encore un parasitage régional dû à la nébulosité. Le champ NDVI est fortement impacté par la présence nuageuse, qui diminue les valeurs pour une grande partie de la fenêtre géographique, à tel point qu’on aboutit à l’échelle de l’Ouémé supérieur plutôt à une carte de valeurs de NDVI qu’on observe plutôt en février ou mars, lorsque le signal correspond alors généralement à une véritable signature photosynthétique de début de saison de végétation (figures 4.11 et 4.12).

La conclusion intermédiaire à l’issue de ces tests et comparaisons entre indices et produits satellitaires est donc qu’il faut absolument évaluer le poids de la nébulosité dans tous les bilans spatio-temporels, même à partir des produits a priori filtrés par les algorithmes des différents organismes, et certifiés comme quasiment exempt de biais. L’analyse des métadonnées doit aussi être systématique, pour déterminer la qualité hétérogène des pixels. Cela justifie donc à ce jour plutôt les séries SPOT-VGT et MODIS, qui bénéficient d’une bonne expertise de ces biais, d’une mise à disposition des contrôles de qualité réalisés sur les pixels, et aussi d’une profondeur temporelle des séries plus que décennale qui autorise désormais l’analyse d’une large gamme de variations interannuelles.

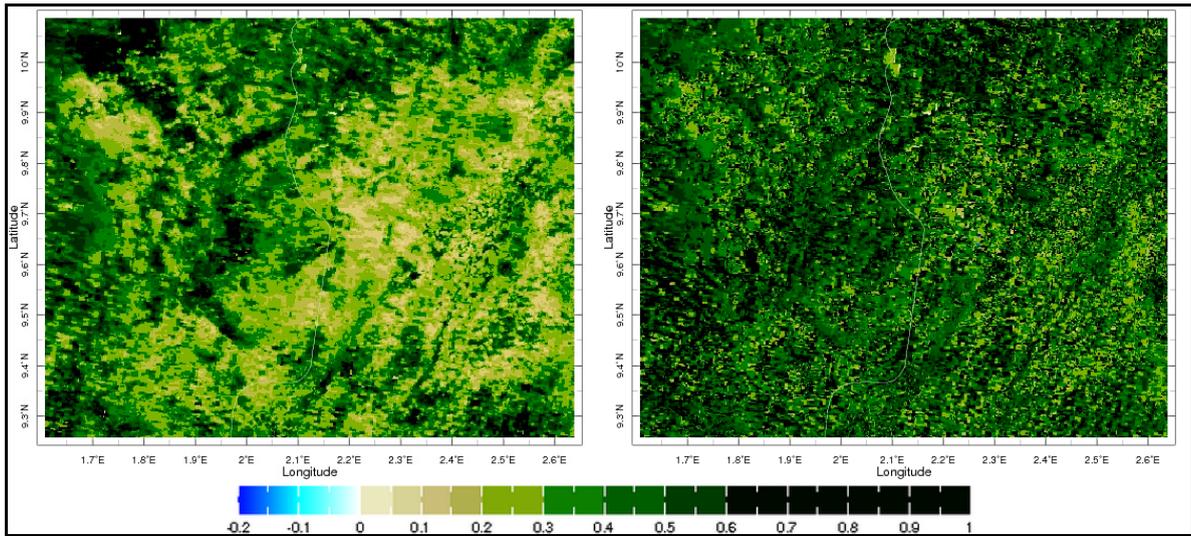
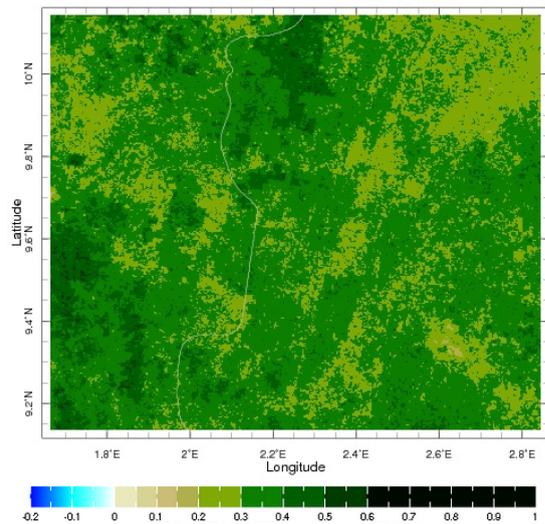


Figure 4.11 : Zoom issu de la figure 4.10 et détaillant la comparaison entre NDVI (à gauche) et EVI (à droite) à l'échelle de l'Ouémé supérieur (le fleuve Ouémé coupe la carte du Nord au Sud) pour la synthèse sur 15 jours allant du 28 juillet au 12 août 2005.

Figure 4.12 : Idem que la figure 4.11, mais pour un zoom à l'échelle de l'Ouémé supérieur pour la synthèse du 18 février au 5 mars 2013.



4.1.3. Synthèse sur l'utilisation des données SPOT-VGT et MODIS pour l'estimation de la dynamique interannuelle

Cette étude préliminaire permet de mener un premier diagnostic des variations interannuelles et intra-saisonnières de l'activité végétale, au travers du NDVI et à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de l'Ouémé supérieur, sans tenir compte des distinctions entre les principales occupations du sol (forêt, savane, espace agricole,...). Ce volet spécifique sera présenté ensuite au travers l'article publié dans la revue *International Journal of Remote Sensing Applications*.

L'analyse descriptive des différents cycles saisonniers du NDVI vus au travers des séries MODIS à résolution pentadaire montre plusieurs singularités pour la région d'étude (figure 4.13) :

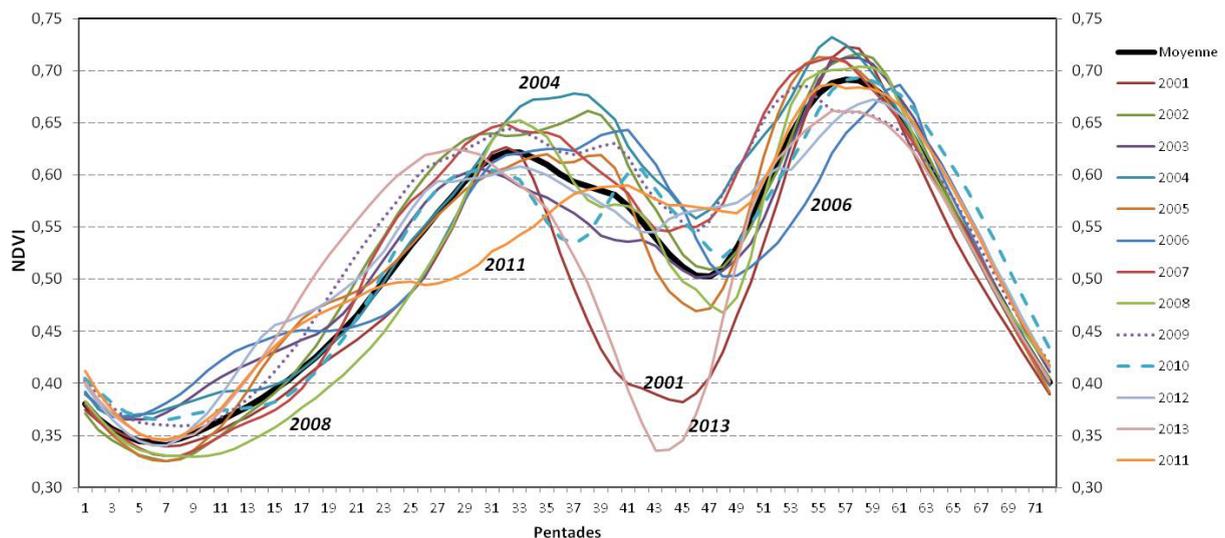
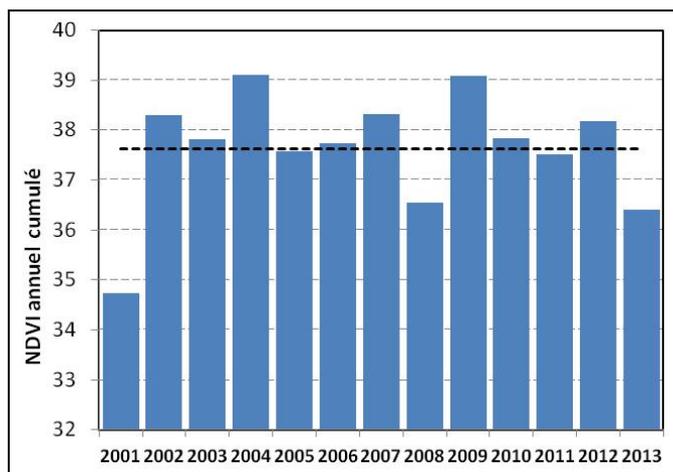


Figure 4.13 : Variations du NDVI pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga calculé grâce aux données satellitaires pentadaires eMODIS (*EROS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal.

- **2008 est une année atypique**, durant laquelle l'activité végétale commence tardivement, et avec des valeurs de NDVI très inférieures à la moyenne ; le calcul de la somme annuelle du NDVI (souvent nommé dans la littérature Σ_{NDVI}) le montre très clairement sur la période 2001-2013, avec un Σ_{NDVI} proche de 35 avec les valeurs pentadaires, alors que cet indicateur est plutôt supérieur à 37 ou même 38 les autres années (figure 4.14).
- **2001 et 2013 se singularisent fortement** par une diminution anormale du NDVI durant les pentades 35 à 50 environ (juillet-août), ce qui aboutit à des Σ_{NDVI} très faible, l'année 2001 enregistrant d'ailleurs le minimum (34,7) sur la période d'étude (figure 4.14). La base de données étudiée du NDVI SPOT-VGT comportant uniquement la période 2002-2012, il n'est pas possible de faire une comparaison exacte pour ces années. Le caractère très spécifique de ces 2 années nous amène donc plutôt à les écarter des prochaines conclusions, ou du moins, à être très prudent dans les éventuelles interprétations.
- **2004 enregistre les deux pics maximums** vers fin juin/début juillet, puis début octobre ; c'est également cette année qui produit le Σ_{NDVI} maximum (avec l'année 2009), révélant donc une production végétale importante puisque cette somme est souvent assimilé à la production de biomasse.
- **Plusieurs saisons sèches sont plus apparentes que les autres en début d'année** en enregistrant des valeurs de NDVI anormalement basses (<0,35), comme par exemple 2002, 2005, 2007, 2008 et 2012 (figure 4.13), alors que plusieurs de ces années (2005, 2007 et 2008) atteignent finalement des valeurs très élevées durant la fin de la saison des pluies (octobre). Cette simple observation indique qu'une fin de saison de végétation très active (NDVI > 0,65) peut parfaitement être précédée la même année d'une activité végétale anormalement faible en saison sèche.

Figure 4.14 : Valeurs du NDVI cumulées sur l'année à partir des données pendataires eMODIS (*EROS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) sur la période 2001-2013, pour la région Ouémé-Donga (données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal); la moyenne est indiquée en pointillés.



En étudiant conjointement le NDVI cumulé sur l'année (qui nous renseigne sur l'activité photosynthétique et indirectement sur les artefacts inhérents à la nébulosité) et l'amplitude des valeurs pentadaires, on complète l'analyse en discriminant particulièrement deux éléments (figure 4.15) :

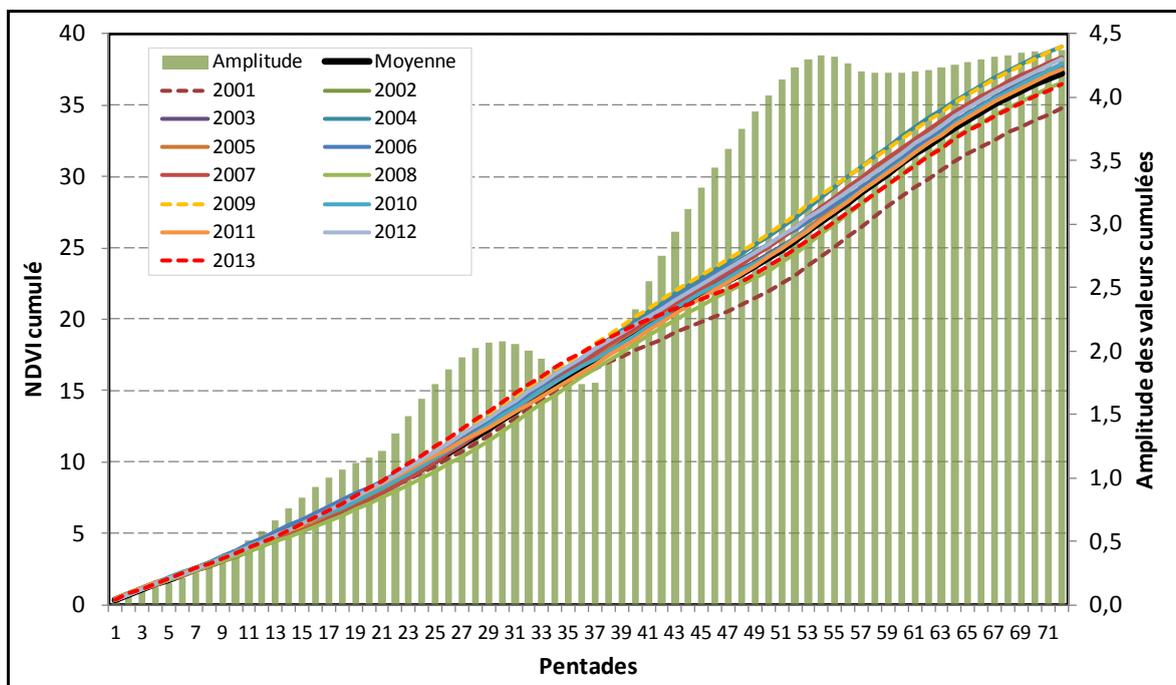


Figure 4.15 : Comparaison du NDVI cumulé sur les années 2001 à 2013 pour la région Ouémé-Donga à partir des données pendataires eMODIS (la moyenne des 13 années est indiquée en gras ; l'histogramme représente l'amplitude des valeurs pour chaque pentade sur toute la période (données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal).

- 1) le NDVI des années 2001 et 2013 est complètement anormal dès les 40^{ème} pentades environ (courant juillet) et jusqu'à la fin de l'année ;
- 2) l'évolution intra-saisonnière du NDVI semble en fait fonctionner avec 2 seuils importants au cours de l'année, qui enregistrent les pics d'amplitude du NVDI durant l'année : le premier au cours des pentades 29-30 (fin mai) et le second durant les pentades 53-54 (fin septembre). Ce sont particulièrement ces périodes charnières dans l'activité photosynthétique et très variable d'une année à l'autre qu'il faut donc surveiller et

étudier, car relevant potentiellement de variations naturelles (donc végétales) et/ou artificielles (donc issues de biais atmosphériques).

En guise de synthèse sur la variabilité interannuelle du NDVI défini à partir des données MODIS, le calcul des écarts à la moyenne confirme les éléments observés auparavant (figure 4.16). Ces anomalies indiquent en effet déjà très explicitement le caractère anormal de la première (2001) et dernière (2013) année de la période étudiée, que l'on explique par un artefact des données, et non des variations photosynthétiques naturelles. On n'observe aucune tendance significative du NDVI, même si une hausse continue des valeurs se dessine depuis 2008-2009 (outre l'artefact de 2013). Mais en revanche, plusieurs combinaisons intéressantes apparaissent. Ainsi, les séquences d'anomalies du NDVI pour 2003-2004 et 2008-2009 indiquent une succession d'une saison avec une activité photosynthétique particulièrement basse à une année suivante dont l'activité est particulièrement élevée. Sans aller jusqu'à parler de résilience des systèmes (car il faudrait un bilan plus complet ici), ce sont donc des périodes intéressantes sur le plan environnemental et éco-climatique pour essayer de décrire les variations et réponses régionales.

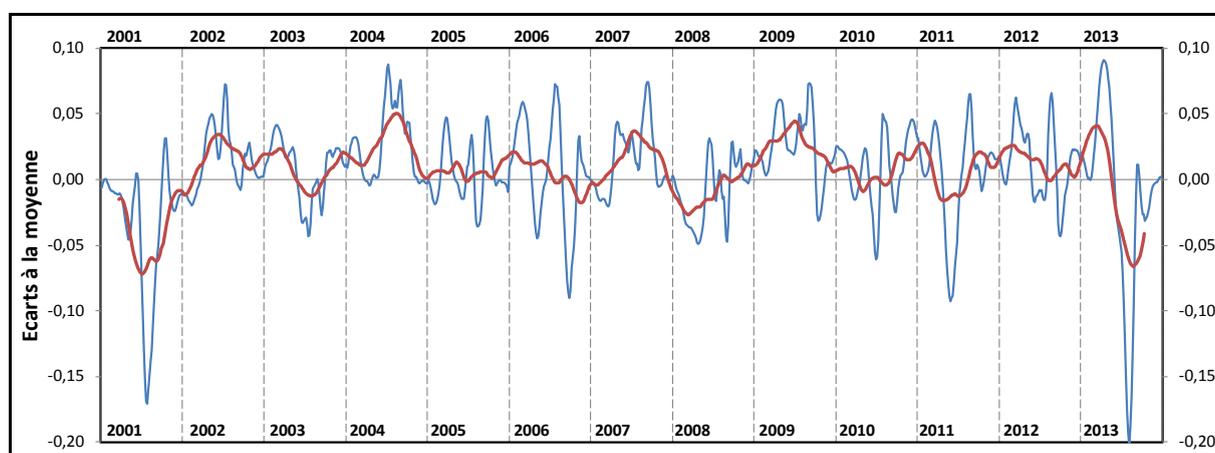


Figure 4.16 : Ecart à la moyenne 2001-2013 du NDVI pour la région Ouémé-Donga calculés à partir des données pendataires eMODIS (la courbe en bleu correspond aux écarts pentadaires, la courbe en rouge à la moyenne mobile définie sur une fenêtre de 31 pentades) ; élaboré avec les données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal.

Sur le plan géographique régional, et pour établir certains bilans spatialisés, le calcul des anomalies du NDVI (à partir des données SPOT-VGT, en ayant éliminé les valeurs recensées comme contaminées par la nébulosité dans les contrôles de qualité fournis en métadonnées) donne une première vision des variations d'ensemble d'une année à l'autre (figure 4.17). Parmi les nombreuses utilisations de ce type pour repérer les anomalies interannuelles du NDVI en Afrique, Lacaze (2010) analyse l'imagerie SPOT-VEGETATION qu'il associe à la cartographie de type Global Land Cover (GLC2000) établie à une résolution spatiale de 1 km pour analyser les évolutions selon les grands types d'occupation du sol. Huang et Siegert (2006) indiquent aussi que SPOT-VGT est très utile pour détecter la dynamique des changements environnementaux aux échelles supérieures, voir éventuellement régionale. L'utilisation de ces données est finalement particulièrement intéressante pour déduire dans les deux dimensions (spatiale et temporelle) les dynamiques intra-annuelles et interannuelles de l'activité végétale (Poças *et al.*, 2012).

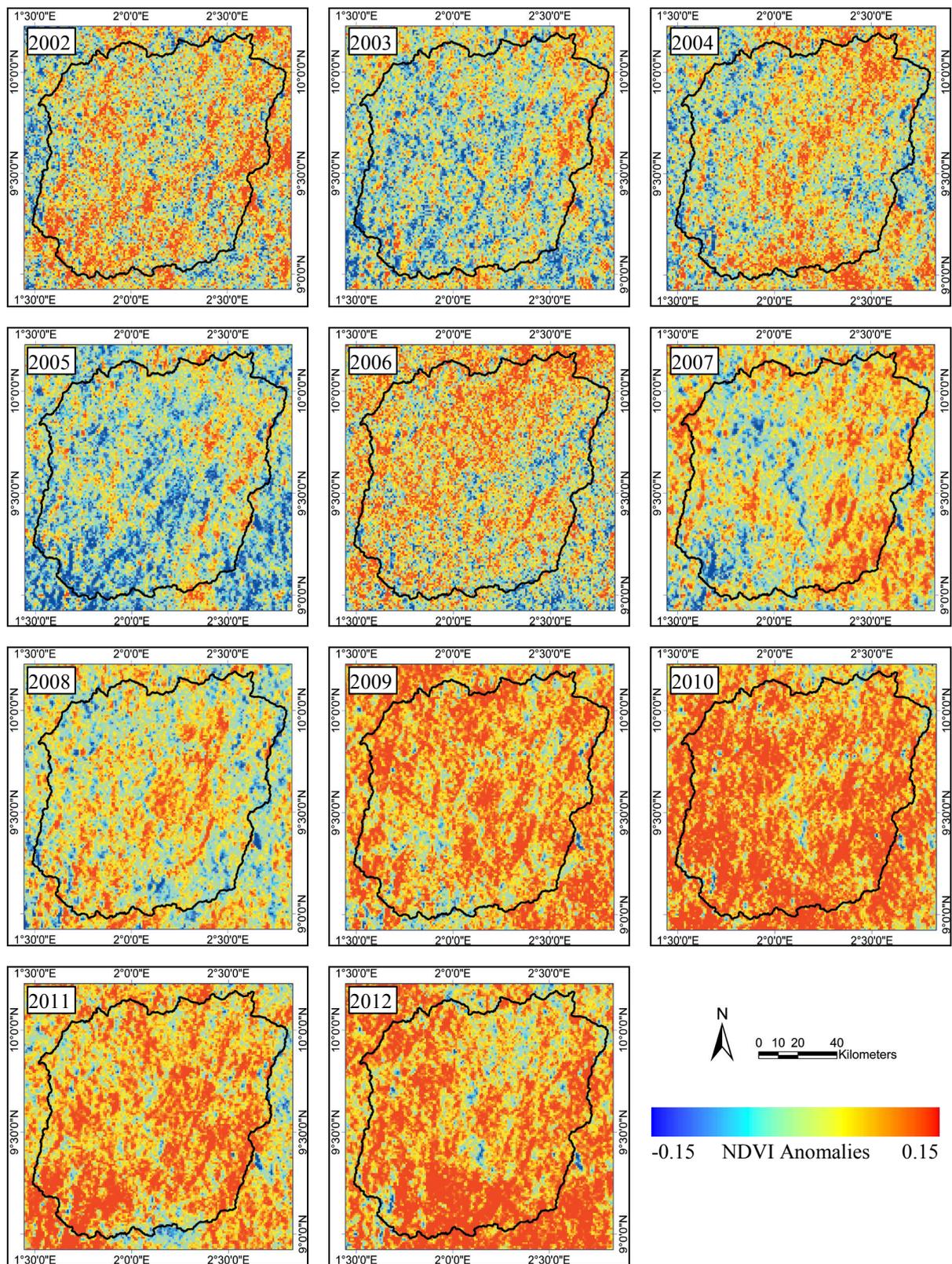


Figure 4.17 : Ecarts à la moyenne annuelle du NDVI SPOT-VGT calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur.

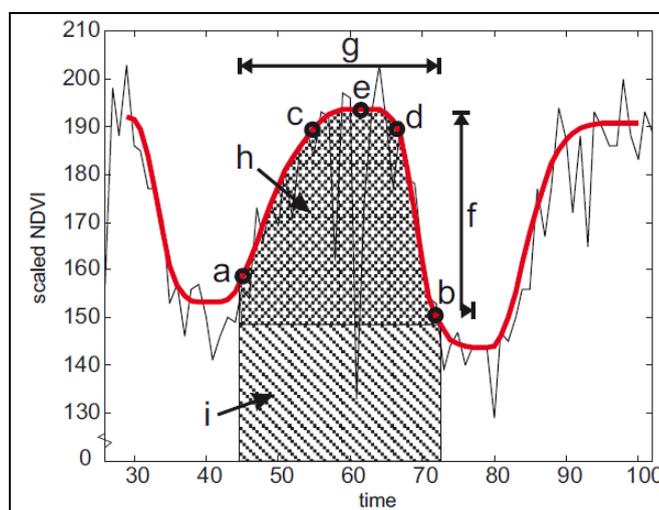
En généralisant l'examen des cartes d'anomalies du NDVI, trois grands types de comportement ressortent à l'échelle de la région d'étude (figure 4.17) :

- 1) les années avec des anomalies positives élevées (de +0,1 à +0,15) marquées dans l'ensemble du domaine : de 2009 à 2012 (confirmant la même observation avec les données MODIS) ;
- 2) les années avec des anomalies plutôt négatives, sauf dans le domaine oriental de l'Ouémé supérieur : 2003 et 2005 ;
- 3) les années révélant de forts contrastes des anomalies régionales, sans pouvoir établir une variation d'ensemble : 2002, 2004, 2006, 2007 et 2008.

Ces premières généralisations des variations spatio-temporelles doivent maintenant être complétées par la recherche de liaisons entre les variations du NDVI, donc de l'activité végétale durant la saison de végétation et d'une année à l'autre, en fonction des grands types d'occupation du sol. Cette analyse peut permettre d'expliquer en particulier les variations très différenciées du NDVI observées juste avant pour un certain nombre d'années. Elle doit aussi venir en préliminaire à la confrontation ensuite avec la variabilité pluviométrique.

Un paramètre important sensible à la variabilité interannuelle et excellent descripteur de l'activité végétale au cours de l'année est la durée de la saison végétative, avec la détermination du début (phénophasse aussi appelé *onset*) et de la fin de cette période phénologique. De nombreuses méthodes mathématiques existent pour cela, résumées pour les plus efficaces dans les travaux de Jönsson et Eklundh (2004) et Eklundh et Jönsson (2011). Ces auteurs ont ainsi construit et mis à disposition un outil numérique, Timesat, qui permet l'analyse des séries radiométriques pour la détermination des phénophases végétales. La version utilisée ici à l'échelle de l'Ouémé est *Timesat Version 3.1*, qui propose en particulier des filtres et fonctions très efficace pour tenir compte des artefacts dus à la nébulosité pour retrouver et dater les phases d'*onset* et de fin de saison, en particulier les filtres de Savitzky-Golay ou les fonctions de type double logistique (figure 4.18). Cette approche méthodologique a été utilisée pour de nombreuses applications pour caractériser la variabilité phénologique et la cartographier à l'échelle de l'Afrique (voir par exemple : Eklundh et Olsson, 2003 ; Olsson *et al.*, 2005 ; Seaquist *et al.*, 2006, Heumann *et al.*, 2007 ; Hickler *et al.*, 2005 ; Seaquist *et al.*, 2009). Récemment, cet outil a aussi permis d'améliorer les classifications écosystémiques (Tottrup *et al.*, 2007), la caractérisation des données MSG SEVIRI (Stisen *et al.*, 2007) ou encore le suivi des pressions anthropiques opérées par le biais des saisons d'incendies de végétation (Le Page *et al.*, 2010).

Figure 4.18 : Schéma illustrant les principaux éléments phénologiques analysés grâce au logiciel TIMESAT pour définir la saison végétative sur une série temporelle d'un indice de végétation : le début (a) et la fin (b) de la saison, le niveau de 80 % (c et d), la plus grande valeur (e), l'amplitude (f) et la longueur (g) de la saison ; (h) et (i) représentent l'intégrale indiquant l'effet cumulatif de la végétation durant la saison (document issu de Eklundh et Jönsson, 2011).



Appliqué à un indice pentadaire calculé avec le NDVI-MODIS sur la période 2001-2013, les trois paramètres phénologiques sont discriminés pour chacune des années et indiquent plusieurs caractéristiques principales (figures 4.19 et 4.20) :

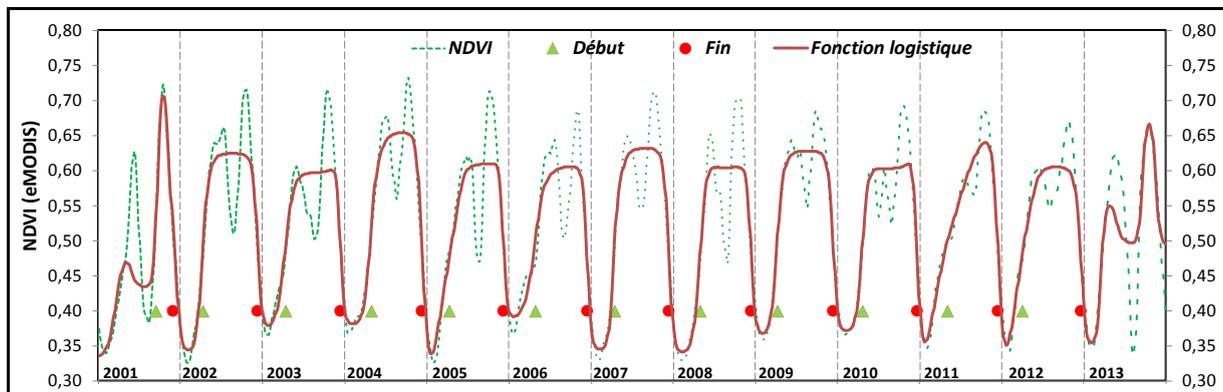


Figure 4.19 : Estimation de la phénologie saisonnière moyenne du NDVI-eMODIS pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga grâce à une fonction double logistique définie grâce à l'outil TIMESAT (les données NDVI sont pentadaires ; les débuts et fins de saison de végétation sont respectivement indiqués pour chaque année par des triangles verts et des ronds rouges, sauf en 2013 où les biais du NDVI sont trop importants).

- Il n'est pas possible de retenir les paramètres calculés (et invalidés) pour 2001 et 2013, ces années enregistrant des biais sur les séries NDVI MODIS, comme cela a déjà évoqué auparavant.
- Les saisons végétatives de 2004, 2006, 2008 et 2011 sont relativement courtes, d'une durée proche de 44 à 45 pentades, soit environ 220-225 jours (figure 4.20). Elles sont en revanche plus longues en 2002, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010 et surtout 2012, avec généralement une durée de 48 pentades (240 jours), et même presque 52 pentades en 2012 (260 jours).
- Les débuts de la saison sont relativement stables sur la période d'étude, et variables d'une année à l'autre, compris entre la 20^{ème} et 25^{ème} pentade (courant avril), sauf en 2012 où il intervient vers la 18^{ème} pentade (fin mars). A l'inverse, les dates de fin de saison végétative montrent clairement une tendance à la hausse (*i.e.* un recul), passant de la 68^{ème} pentade (début décembre) en 2002 à la 70^{ème} en 2010, soit un décalage de 10 jours en une décennie, ce qui est très important sur le plan du fonctionnement végétal. Cet élément spécifique pourrait indiquer que les conditions bioclimatiques sont plus favorables et favorisent une durée plus longue de l'activité photosynthétique.

Cette tendance peut aussi traduire (en partie ou totalement) une présence plus longue en fin d'année de superficies recouvertes de végétation encore verte, surfaces qui peuvent être d'origine essentiellement agricoles, en lien avec les changements d'utilisation du sol observés dans la partie précédente. Ces points doivent donc être recoupés dans la partie suivante pour établir les relations avec la variabilité pluviométrique.

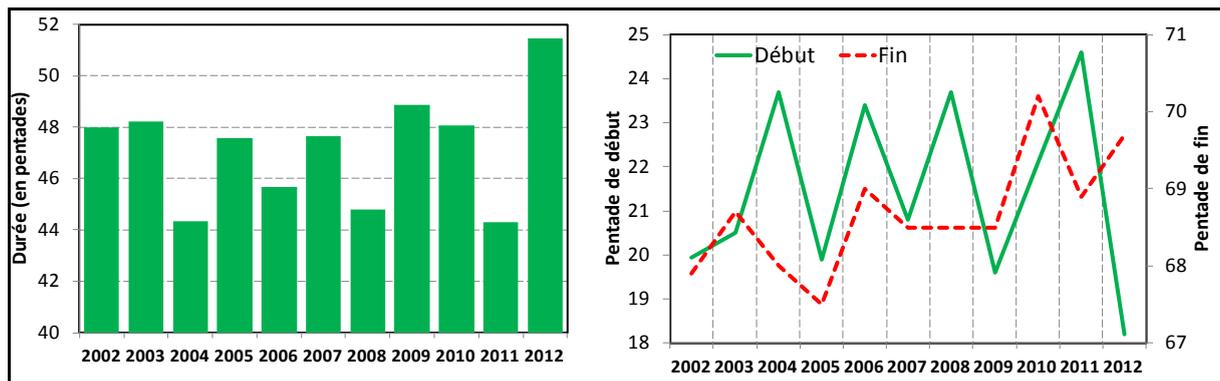


Figure 4.20 : *Graphique de gauche*) la durée (en pentades) de la saison de végétation estimée pour les années 2002 à 2012 à partir des séries pentadaires du NDVI-eMODIS à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga ; *graphique de droite*) la pentade de début et de fin de saison végétative. Calculé à partir des données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal, et à partir d'une fonction double logistique appliquée grâce à l'outil TIMESAT.

4.2. L'activité végétale dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur selon l'occupation du sol (2002-2012)

Synthèse introductive reprenant les principaux résultats présents dans l'article proposé ensuite : "Vegetation activity in the Upper Oueme Basin (Benin, Africa) studied from SPOT-VGT (2002-2012) according to land cover" (par Thao DO, Sylvain BIGOT and Sylvie GALLE) en cours de publication dans le volume de septembre 2014 de la revue International Journal of Remote Sensing Applications (IJRSA) :

L'étude proposée ici analyse l'activité végétale au travers du NDVI défini à partir des données décennales SPOT-VGT (résolution de 1 km – période 2002-2012) à l'échelle du site d'observation du haut bassin du fleuve Ouémé. L'analyse statistique repose sur une approche multifactorielle qui permet de résumer environ 54 % de la variance interannuelle du NDVI, indiquant qu'une partie importante de la variabilité n'est pas décrite, car absorbée par des modes diffus dans le temps et dans l'espace. Dans cette zone d'étude, la végétation est regroupée en trois catégories : 1) les zones de végétation naturelle (forêts dense, ripisylve, forêt claire), 2) les zones mixtes (savane, jachère) et 3) les zones agricoles.

De manière générale, les résultats obtenus indiquent que la variabilité spatio-temporelle du NDVI dans ce bassin versant est significativement dépendante de ces 3 modes d'occupation du sol, avec des réponses différentes entre espaces forestiers, savanes boisées et espaces agricoles (ou en cours de conversion). C'est lors de la saison sèche (à partir de novembre) et jusqu'au début de la saison des pluies (mai-juin) que l'on distingue le mieux les différences de NDVI selon l'occupation du sol. Les valeurs les plus faibles correspondent aux espaces cultivés (environ 0,25 en janvier) alors que ce sont les espaces forestiers qui enregistrent les NDVI les plus élevés. La distinction entre les trois signatures radiométriques étudiées est surtout très explicite dès le démarrage de la saison des pluies (mars-avril) ou bien à l'inverse, dès la fin de la saison des pluies (novembre).

C'est la carte du mois d'avril qui est la plus contrastée, avec les distinctions explicites entre les espaces forestiers, savaniques et agricoles ; les valeurs de NDVI les plus élevées (>0,5) correspondent aux espaces forestiers du sud-ouest, alors que le massif forestier central enregistre des valeurs inférieures (0,35-0,45), de même intensité que les savanes boisées situées au nord du bassin. Plus généralement, on repère très bien les zones anthropisées (péri-

urbaines et/ou agricoles, comme par exemple celles situées au sud de la forêt classée au centre du bassin) qui possèdent des valeurs de NDVI proches de 0,35-0,40.

Si on examine la relation entre la variabilité interannuelle du NDVI et les trois principaux types d'occupation du sol, on observe que ce sont en moyenne les espaces cultivés qui enregistrent les coefficients de variation relatifs les plus élevés, supérieurs à 31 %, alors que ceux des espaces savaniques sont inférieurs, et qu'ils ne dépassent pas 28 % en espaces forestiers. Cette plus grande instabilité interannuelle du NDVI caractérise en fait l'évolution des surfaces agricoles (qui peuvent évoluer entre sol nu, jachères à différents stades, mélange de différentes cultures), alors que le NDVI du domaine forestier subit de moins grandes amplitudes interannuelles et possède une plus grande cohérence spécifique et phénologique. En dehors de cette explication, la nébulosité, supérieure au-dessus des zones forestières et agissantes alors comme un artefact, explique aussi en partie la moins grande variabilité locale du NDVI.

L'analyse factorielle calculée à partir des valeurs brutes permet d'analyser essentiellement les quatre premières composantes, les suivantes étant jugées peu pertinentes ou ensuite dégénérantes sur le plan statistique.

Le premier mode (PC1) résume 39,4 % de la variance totale, et laisse apparaître une forte signature saisonnière, où la concordance avec les principales classes d'occupation du sol est excellente. Cette première composante oppose surtout la variabilité des espaces forestiers (au sud et centre-est) à celle des espaces anthropisés, cultivés ou en cours de conversion. La série temporelle correspondante permet de se rendre compte de la grande instabilité d'une année à l'autre des phases intra-saisonnières, aussi bien en période sèche qu'en période humide. L'étude de composites mensuelles calculés à partir des valeurs extrêmes positives et négatives observées sur ce premier facteur montre la sensibilité, lors de ces phases interannuelles extrêmes du NDVI, de la partie nord du bassin (au nord de 9,7°N), toutes formations confondues (savanes boisées et espaces agricoles), et en ne touchant pas le massif le plus forestier de la Forêt Classée. Cette variabilité spatialement cohérente semble donc être typiquement liée à une contrainte d'origine bioclimatique affectant les formations savaniques ou dégradées.

Le second mode (PC2) explique 6,4 % de la variance totale. Il oppose surtout l'ouest et le nord-est de la zone d'étude, et correspond essentiellement à une signature de la variabilité des espaces forestiers. Plus précisément, on observe que ce sont même les formations forestières de type ripicole de la partie nord-est du bassin versant qui sont discriminées. La chronique associée caractérise bien les variations en saison sèche et permet d'opposer les périodes 2002-2004 et 2005-2012 (l'année 2011 étant plutôt rattachée au comportement de la première période). L'analyse composite indique la forte variabilité d'activité photosynthétique des espaces forestiers de la partie occidentale du bassin supérieur de l'Ouémé, avec des amplitudes de NDVI supérieures à 0,36 entre les phases extrêmes d'activité. Cet élément suggère donc la grande sensibilité des espaces forestiers les plus denses, périphériques aux principaux cours d'eau, avec des phases interannuelles bien marquées sur la période d'étude.

Le troisième mode (CP3) ne synthétise plus que 5 % de la variance interannuelle du NDVI. Cette composante montre plutôt une organisation nord-sud, et oppose donc les variations du NDVI associées aux formations forestières en forte évolution du nord du bassin ; auxquelles on peut aussi associer certains espaces de savanes boisées à l'ouest à celles des espaces déjà très anthropisés situés au sud-est. Cette composante montre d'une part que les années 2002, 2009 et 2010 sont relativement différentes et d'autre part, qu'il y a une légère tendance à la

baisse depuis 2005, synonyme ici d'une baisse du NDVI et donc de l'activité végétale associée. L'analyse composite suggère bien que l'évolution et les épisodes extrêmes affectent surtout la partie nord de la zone d'étude.

Le quatrième mode considéré comme significatif (2,8 % de la variance totale) correspond surtout à des espaces situés au centre du bassin versant et affecte indifféremment les trois types de formations étudiées. Il montre de fortes variations interannuelles et intrasaisonnières, le signal saisonnier n'étant plus explicite comme pour les trois précédents modes. Ce mode semble résumer les artefacts liés à la nébulosité traduite en partie par le NDVI.

L'analyse statistique multivariée du NDVI met donc bien en évidence différents contrastes régionaux et des réponses spécifiques à certains espaces ou formations végétales dans le bassin du Haut Ouémé. Les contrastes entre le domaine de forêt naturelle encore préservée (la forêt classée) et les espaces en mutation agricole (cultures et jachères) sont particulièrement visibles. Une évolution particulièrement sensible de l'activité photosynthétique traduite au travers des données SPOT-VGT est détectée après 2005. Dans plusieurs cas, les formations ripicoles forestières établies à proximité des principaux cours d'eau (l'Ouémé et ses affluents) enregistrent aussi des signatures interannuelles et intrasaisonnières particulières.

Vegetation Activity in the Upper Oueme Basin (Benin, Africa) Studied from SPOT-VGT (2002-2012) According to Land Cover

Thao Do^{1,2}, Sylvain Bigot^{*1}, Sylvie Galle³

¹Grenoble Alpes University, LTHE UMR 5564, Grenoble, F-38041, France

²Hanoi University of Mining and Geology, Faculty of Surveying, Department of Cartography, Dong Ngac, Tu Liem, Hanoi, Vietnam

³IRD, LTHE UMR 5564, Grenoble, F-38041, France

¹thao.do@ujf-grenoble.fr; ^{*}sylvain.bigot@ujf-grenoble; ³sylvie.galle@ird.fr

© 2014 Science and Engineering Publishing Company

Abstract

Signs of climate change in West Africa over the last few decades are among the significant observed in the tropics, in particular the decrease in mean annual precipitation. Although such change has brought about new eco-climatic constraints on vegetation forms, it has not proven easy to determine interannual and intra-seasonal variations on a regional scale for major vegetation forms, whether natural or highly artificial as a result of human activities. The present study analyzes vegetation activity via a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) defined from ten-day SPOT-VGT data (one-km resolution, covering the period from 2002 to 2012) in the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) Program observation zone, located in the Upper Oueme River Basin in Benin. The statistical analysis is mainly based on a multifactor approach allowing approximately 54% of interannual NDVI variations to be accounted for. Results show that spatio-temporal NDVI variability in the River Basin is highly dependent on land use, be it forest, wooded savanna, farmland or areas undergoing conversion.

Keywords

Oueme Basin (Benin); Land Cover; NDVI from SPOT-VGT; Principal Component Analysis; Seasonal and Interannual Variability

Introduction

In the late 1960s West Africa experienced persistent drought characterized by both duration and irregularity (Lebel et al., 2010). The rainfall deficit in the 1970s (Lebel and Ali, 2009), when the whole water cycle was greatly affected, seriously impacted agriculture, food security (Redelsperger et al., 2006)

and vegetation (Philippon et al., 2007). For natural reasons such as climate change, or through anthropogenic change such as agricultural activity, the seasonal dynamics of vegetation cover have been considerably affected in recent decades in West Africa. However, the lack of long-term data has hitherto prevented detailed investigation of climate-vegetation and spatio-temporal relationships at regional scales (Chamaille-Jammes et al., 2006), although such knowledge could help understand climate variability and lead to improved seasonal forecasting ability and predictions of ecosystem responses to climate change (Philippon et al., 2007; Mberego et al., 2013). In this context, the AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis) Program was tasked with long-term observation of the West African monsoon and its features with the aim of assessing hydrological impacts of climatic or anthropogenic changes (Redelsperger et al., 2006; Lebel et al., 2010). AMMA has monitored a wide range of factors, carrying out ocean, land and atmospheric measurements over time scales ranging from daily variability up to changes in seasonal activity over several years, in areas covering the scale of West Africa, the meso-scale of Mali, Niger and Benin to that of super-sites such as Agoufou, Nalohou or Wankama (Zin et al., 2009).

In this tropical African region, satellite observation is a reliable, efficient tool for multi-temporal monitoring of land surface, and for obtaining information about long-term changes in land characteristics and processes (Reed et al., 1994; Chamaille-Jammes et al., 2006; Redelsperger et al., 2006). Remote sensing data is

also efficient for monitoring seasonal and interannual vegetation response at a regional scale (Fensholt et al., 2011), while seasonal characteristics of vegetation activity, such as emergence and senescence, are closely related to annual temperature, precipitation and humidity cycles (Reed et al., 1994). Changes in phenological events can be identified and classified year-to-year for different land-cover types (Roehrig et al., 2005). The most common and reliable index for studying vegetation activity is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which has been shown to be associated with biomass and photosynthetic activity (Gurgel et al., 2003; Rigina and Rasmussen, 2003; Lasaponara, 2006; Fensholt et al., 2011; Miranda-Aragón et al., 2012; Mberego et al., 2013).

The present study in the Upper Oueme Basin (Benin) will allow us to determine specific phenological variations in wooded savanna typical of Sudano-Guinean formations, in a region covered by a very dense observational network. These environmental regional diagnostics will facilitate the different requirements in hydrological and climate modeling using regional model calibration. So incorporating vegetation dynamics into a regional climate model used for future prediction is potentially critical to realistic simulation of future climate changes in West Africa. The problem is to be able to extract seasonal and interannual phenological signals from remote sensing (especially at low spatial resolution, e.g. 1 km) in the Upper Oueme Basin according to the main vegetation formations, to discriminate natural forest areas and agro-forest mosaics. However, assessing land-cover maps is known to be difficult, and assessing land-cover-change maps is even more challenging, mainly due to the difficulty in obtaining accurate land-cover-change reference datasets (Grinand et al., 2013). The main research question thus is to estimate if the spatio-temporal vegetation dynamics are relatively similar on interannual scale, with maybe notable differences in intraseasonal variations.

The principal goal of this study was to better understand seasonal and interannual variations of vegetation activity from NDVI analysis for the main land cover classes in the Upper Oueme Basin from 2002 to 2012. This first step was to establish the major regional differences according to land cover, while the long-term objective is to understand variability according to climatic constraints.

Data and Method

Study Area and Recent Land Cover Changes (1973-2012)

The Upper Oueme Basin is located in central Benin (8.5°-10.5°N/1.5°-3.0°W) and covers an area of 14,366 km² (Figure 1). The study area has a small altitude range going from an average of 200 to 600 meters asl, with the Atacora Mountains in the western part being the highest (between 500 and 800 m). The terrain gradually slopes down to the south in the river's confluence zone (Figure 1).

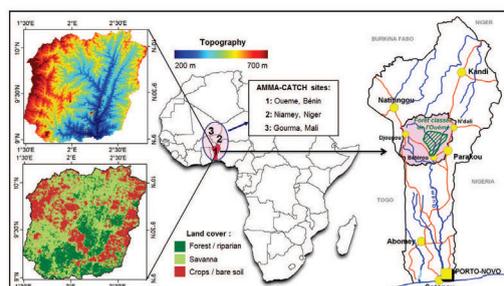


FIG. 1 LOCATION OF THREE MAIN AMMA-CATCH SITES, INSTRUMENTED TO STUDY THE SURFACE-CLIMATE PROCESSES IN WEST AFRICA, ONE LOCATED IN THE UPPER OUEME BASIN (BENIN); TOPOGRAPHY (TOP LEFT; FROM ASTER GDEM AT 30M SPATIAL RESOLUTION), THE THREE MAIN LAND COVER CLASSES (BOTTOM LEFT; ADAPTED FROM LEROUX, 2012) AND LOCATION OF THE BASIN IN BENIN (WITH LOCATIONS OF THE MAIN CITIES, ROADS AND RIVERS).

The whole area has a Sudanese climate with a unimodal rainy season. Annual average rainfall is 900-1200 mm; the rainy season normally starts in April and ends in October (Figure 2; Roehrig et al., 2005; Zin et al., 2009). The natural vegetation consists of forest, wooded savanna, and a patchwork of woodlands and grassy savannah (Hahn-Hadjali et al., 2010). Due to small scale farming with fallow and fire, natural forest is now observed only as relic or protected areas like the Forêt classée de l'Ouémé Supérieure (Upper Oueme Forest Reserve; Speth et al., 2004; Klein and Roehrig, 2006). Agriculture is small-scale with periodic fallow and fire, the main crops being yams, manioc, maize, millet and peanuts (Klein and Roehrig, 2006; Judex et al., 2006). Seasonal temperature variations range between a maximum of about 30°C in March and a minimum of about 24°C in August, with a significant upward trend since the 1980's (Do et al., 2013). Recent climate change in the study area has caused variations in regional water resources, coupled with vegetation change in land use and land cover

(Zannou, 2011; Igué et al., 2012).

Following the work of Leroux (2012) covering the Upper Oueme area and thanks to Landsat and MODIS data, land cover can be classified in three major classes of vegetation types (Figure 1 and Table 1): clear forest and riparian forest (21.7% of the study area), savannas (48.5%), and crops and bare soil (29.8%).

TABLE 1 DESCRIPTION OF THE THREE MAIN LAND COVER CLASSES IN THE UPPER OUEME BASIN AND THEIR EVOLUTION 1973-2012 (ADAPTED FROM LEROUX, 2012).

Land cover classes	Characterization	Area (2012)	Evolution from 1973 to 2012	
Clear forest / riparian forest	Deciduous clear forests (more than 75% tree canopy cover) and dense forests along rivers	3080 km ²	-87%	+48% for savannas
				+39% for crops, bare soil
Savannas	Grasses forming a continuous layer, 30-60% tree or shrub canopy cover	6876 km ²	+71%	+2% for forest, riparian
				+69% for crops, bare soil
Crops / bare soil	Including cropland (e.g. cotton, corn), fallow and villages	4231 km ²	+77%	+27% for forest, riparian
				+50% for savannas

Cartographic simplification into three classes enables the Upper Oueme Forest Reserve to be distinguished, as it is almost entirely surrounded by farmland except to the north. The diachronic analyses from automatic classifications show significant modification of land-use patterns between the two study dates, 1973 and 2012 (Table 1). Over the forty-year study period, regional forested zones lost 87% of their area, mainly to savanna (48%), cropland or bare ground (39%). Farmland stretches all the way along the Djougou-Ouberou-Parakou road and sometimes encroaches on supposedly protected forest reserves (Judex and Thamm, 2008). Savannas are also spreading considerably (71%), mainly through being converted into cropland. Land areas already classified as cultivated in 1973 had evolved significantly (77%) by 2012, into either forest (27%) or farmland (50%). Leroux (2012) notes here the complexity and possible confusion between the evolution of former fallow and wooded savanna, with very similar spectral and phenological signatures. Each type is affected by anthropogenic constraints obviously influencing the corresponding NDVI values (whether by seasonal bush-clearing fires, deforestation, crop sowing, fallow

land at different stages of grow-back, etc.). Associating the appearance of forest cover with that of dense riparian crop-growing is clearly a simplistic shortcut which interpretations should take into account. In the same way, areas classified as agricultural show the greatest radiometric variations, due to contrasts in land use (cultivated fields or fallow) and vegetation activity during different stages of cultivation, at both seasonal and interannual scales.

The NDVI Data Set

The choice of SPOT-4 VEGETATION data (rather than MODIS data for example) depends greatly on the huge experience from these long-term satellite NDVI data within the AMMA program. This experience can thus facilitate comparisons which can so allow to validate results obtained in this study. SPOT-4 VEGETATION data have been available since 1998 from the Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) based in Belgium, freely distributed at <http://free.vgt.vito.be/> (Lasaponara, 2006; Jarlan et al., 2008). The VEGETATION (VGT) sensor has four spectral bands: blue (0.43-0.47 μm), red (0.61-0.68 μm), Near InfraRed (NIR, 0.78-0.89 μm) and Short Wave InfraRed (SWIR, 1.58-1.74 μm). The spatial resolution is approximately 1 km with a daily repeat cycle at an altitude of about 820 km (Baret et al., 2006; Jarlan et al., 2008). Products were pre-processed using a consistent algorithm including radiometric calibration, precise geo-location and correction of atmospheric effects. The VEGETATION instrument covers almost all the Earth's land every day. Changes in vegetation cover are inferred using the NDVI index. In this study, we used S10 VEGETATION products, a 10-day synthesis elaborated with the Maximum Value Composite (MVC) of NDVI. The descriptive analyses presented in the beginning of the study are based on the 10-day NDVI composite data, while multivariate analyses are calculated from monthly average NDVI. Cloud-cover influences are therefore favorably reduced in each image (Roehrig et al., 2005; Baret et al., 2006; Jarlan et al., 2008). The 2002-2012 time-series was finally chosen to show recent variations, and used to calculate the NDVI average regimes.

In order to enhance the NDVI analyses, the metadata provided by SPOT-VGT enable the mean seasonal signature of regional cloud cover to be determined from the start, as it is a factor potentially engendering considerable interpretation bias. Calculating the number of pixels which are disturbed by cloud throughout the study area by ten-day periods showed

that it was mainly the 18th to the 26th periods which were affected, i.e. from late June to mid September (Figure 2). The maximum level of interference by cloud, affecting 65% of pixels, was reached in early August, corresponding to the middle of the rainy season when temperatures are coolest. Consequently, cloudy pixels flagged in the SPOT-VGT metadata should not be used to calculate the monthly average values analyzed hereafter.

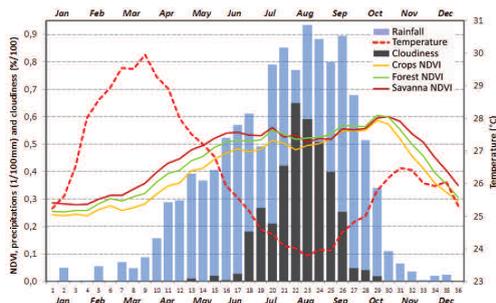


FIG. 2 THE SEASONAL CLIMATE REGIMES OF THE UPPER OUEME BASIN (BASED ON 10-DAY MEANS): PRECIPITATION AMOUNT (IN 1/100 OF MM; FROM A 2002-2009 FIELD-BASED RAIN-GAUGE INDEX), AIR TEMPERATURE AT 1.5 M ABOVE GROUND LEVEL (IN °C; DJOUGOU STATION, 2002-2012), CLOUDINESS (IN % / 100; FROM SPOT-VGT ESTIMATIONS) AND NDVI FOR THE THREE MAIN LAND COVER CLASSES (SPOT-VGT DECADAL COMPOSITES 2002-2012) REGIMES.

Based on the three main land-use classes, (forest, savanna and cropland; Figure 1), the three mean NDVI regimes were calculated by integrating all pixels corresponding to each category. It was apparent from this that from August until the end of the rainy season, the different NDVI signatures were hard to distinguish, firstly because the NDVI values became saturated on reaching their maximum (about 0.55-0.60) and secondly because of atmospheric bias. This bias due to cloudiness explains partially that the highest values (corresponding to the saturation of NDVI) are here lower than those usually observed in dense forest (0.7 to 0.8). The difference also results from the dense river system on the forest parts of the Oueme basin which participate in the reduction in the maximal values of NDVI detected on the scale of a 1 km pixel. If the pixels most contaminated by cloud are eliminated (as no longer representing vegetation cover in any way but merely the weather), it can be seen that they are located mainly in the south-east of the study area, with over 4% of pixels eliminated in the 2002-2012 time period (Figure 3). In the Upper Oueme, the most affected areas correspond mostly to the peripheries of the main water courses in the east and south-west.

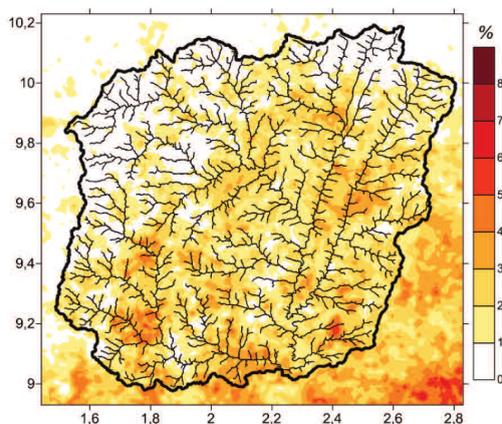


FIG. 3 MAP OF CLOUDY SPOT-VGT NDVI PIXELS (IN %) ELIMINATED FROM MONTHLY TIME SERIES (2002-2012).

Principal Component Analysis

Principal component analysis (PCA) is now a normal multivariate statistical technique for revealing hidden structures in a data set, and for extracting spatio-temporal modes (or patterns). PCA (also known as empirical orthogonal functions – EOF) is appropriate for analyzing samples in environmental space and has become a widely used technique in remote sensing (e.g. Eklundh and Singh 1993; Gurgel et al., 2003; Chamaille-Jammes et al., 2006; Lasaponara, 2006; Miranda-Aragón et al., 2012). The technique enables areas of localized change in multi-temporal data sets to be enhanced. With the PCA methodological approach, most of the total variance is contained in the first component, while only a little is found in the following components. In the present study, PCA was calculated from raw NDVI values (2002-2012), with no attempt to normalize series. It was a methodological approach that enabled the main coherent seasonal signatures to be shown and identified as a priority. Thus, in order for the results obtained from PCA (which could be interpreted as phenological processes) to be interpreted correctly, additional information was needed, such as biogeographical or environmental maps. All these validation data were collected during the AMMA Program and are now available from the AMMA database: <http://database.amma-international.org/>.

Results and Discussion

Seasonal Phenological Variations According to the Three Land Cover Categories

Differences in NDVI in accordance with land use are

best distinguished from the dry season, beginning in November, until the middle of the rainy season in May-June (Figure 2). The lowest values correspond to cropland (around 0.25 in January), while forested areas have the highest NDVI. The distinction between the three radiometric signatures is visible mostly from the onset of the rainy season (March-April) or, on the other hand, when the rainy seasons ends (November). These periods correspond to the most distinctive phenophases in terms of plant productivity (growing and withering), while in the middle of the rainy season savannas often show short periods of NDVI values equal or even superior to those observed in areas of forest. NDVI mapping reveals all the important seasonal differences at the scale of the Upper Oueme (Figure 4). The most contrasted map is for April, with sharp differences between forest, savanna and farmland; the highest NDVI values (>0.5) are for forest areas in the south-west, while the central forest highland has lower values (0.35-0.45), about the same as those of the wooded savanna in the north of the Basin.

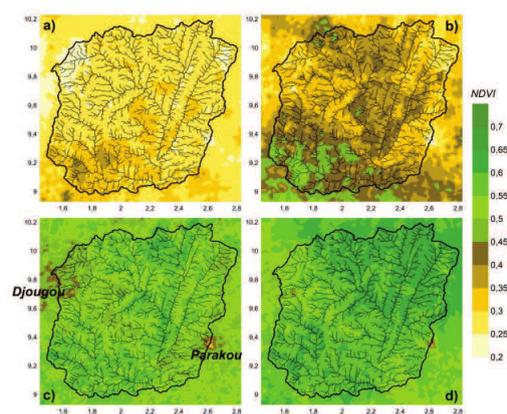


FIG. 4 SPOT-VGT MONTHLY NDVI MEANS (2002-2012) IN THE UPPER OUEME BASIN IN JANUARY (A), APRIL (B), JULY (C) AND OCTOBER (D).

In the rainy season (e.g. July), when NDVI values are fairly similar everywhere (0.50 to 0.60), only the two urban areas of Djougou (in the north-west) and Parakou (in the south-east) are clearly different, with values below 0.40. Generally, the zones influenced by human activity (urban hinterlands and/or farmland, such as the areas located to the south of the forest reserve in the center of the Basin) stand out clearly, with NDVI values close to 0.35-0.40. The distinction can no longer be made in September and October when NDVI reaches saturation point independently of

vegetation patterns. Klein and Roehrig (2006) observe that high rainfall leads to dense vegetation in Benin and hence to a saturation of NDVI values minimizing differences between land-cover types.

What Was the Interannual Variability Over the 2002-2012 Period?

The first analysis of interannual NDVI variations was made on the basis of indices calculated from the three types of land use over the period from 2002 to 2012 (each index being obtained from the sample mean of all the pixels connected to a specific type of land use). The indices showed that there were several dry seasons (especially in January and February) where abnormally low NDVI values were recorded (<0.25), e.g. 2002, 2005, 2007, 2008 and 2012 (Figure 5). Peak values reached at the end of the rainy season (October) were observed in 2004, 2005, 2007 and 2008. Given the concordance of several of these dates, this simple observation confirms that the end of an extremely active vegetation period (NDVI > 0.60) can perfectly well be preceded by unusually low vegetation activity during the dry season.

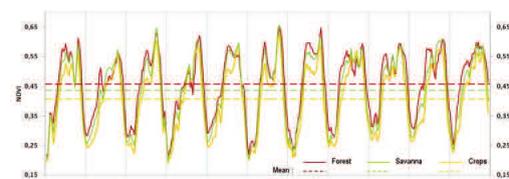


FIG. 5 INTERANNUAL SPOT-VGT NDVI (2002-2012) FOR THE THREE MAIN LAND COVER CLASSES IN THE UPPER OUEME BASIN (CALCULATED FROM 10-DAY COMPOSITE NDVI TIME-SERIES).

Intra-seasonal NDVI variations during the rainy season, as well as the contrasts between the three mean signatures studied here, can vary greatly from one year to the next. For example, years during which the NDVI signature corresponding to cultivated land is very low have been observed (2002, 2006, 2008). It can also be seen that the bimodal nature of NDVI variations during the growing season is more or less marked (and can even disappear certain years, as in 2006 and 2012). Such interannual variations can originate, not only from bioclimatic conditions resulting in productivity and phenology varying from one year to another, but also from the varying effects of regional cloud cover disturbing the NDVI signature in the middle of the rainy season. Indeed, in spite of the elimination of cloudy pixels flagged in metadata, it

remains certainly another persistent atmospheric biases and cloud contamination which the SPOT algorithm did not totally filter (Camberlin et al., 2007). Based on coefficients of variation (CV being the ratio of standard deviation to the mean; in %) of mean monthly NDVI calculated for each pixel throughout the study period (N=132), the map of this statistical indicator shows a clear contrast between the south-west (CV<28%) and north-east (CV>35%) parts of the Basin (Figure 6).

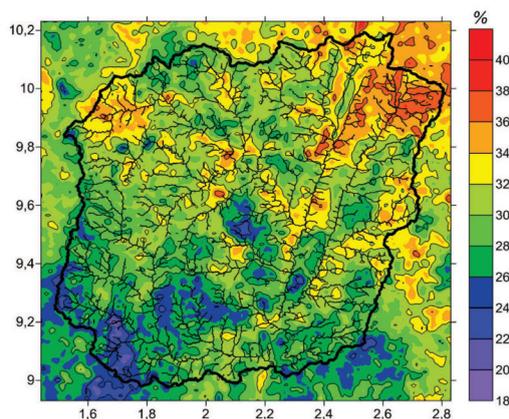


FIG. 6 INTERANNUAL RELATIVE COEFFICIENTS OF VARIATION (IN %) FROM SPOT-VGT MONTHLY VALUES (2002-2012).

The areas with the highest coefficients, in the north-west and especially the north-east, correspond to the areas subject to the greatest human influence during the study period, with forest areas being converted to cropland or urbanized. Examining the relationship between interannual NDVI variability and the three main types of land use shows that it is cultivated land that on average records the highest coefficients of variation at over 31%, while those for savanna are lower, and those for forest areas do not exceed 28% (Figure 7).

Greater interannual NDVI instability is characteristic of the evolution of farmland (which can evolve from bare earth, different stages of fallow, mixed crops, etc.), whereas NDVI of forests is subject to lower interannual amplitudes due their greater specific and phenological coherence. Apart from this, greater cloudiness over forests acts as an artifact and partly explains the lower local variability of NDVI (Figure 7).

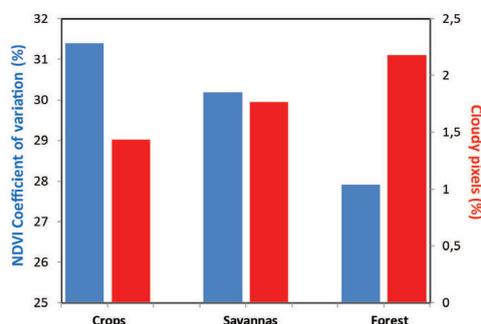


FIG. 7 AVERAGE VALUES FROM NDVI MONTHLY COEFFICIENT OF VARIATION (IN %; BLUE) AND CLOUDY PIXELS (IN %; RED), 2002-2012, ACCORDING TO THE THREE MAIN LAND-COVER CLASSES.

Definition of the Main Spatio-temporal Patterns from PCA

In order to determine the main modes of NDVI spatio-temporal variability and their links to land use, a PCA was calculated from a series of monthly means over the period from 2002 to 2012. At the same time ten-day values were also analyzed, but did not make any significant change in the results. Factor analysis was calculated from raw values, without seeking to normalize the series (thus ensuring that each variable had the same weight in the process of obtaining the new components; Richman, 1986) and with no resort to statistical refinement such as rotating the axes, with the aim of extracting modes emanating directly from the initial NDVI data. According to the scree-test of the PCA, enabling component significance to be assessed graphically, only the first four components were pertinent (eigenvalues > 3) and accounted for 53.6% of total variance, while the following ones were deemed statistically degenerate. The remaining 46% of the information contained in the initial table of raw NDVI series will therefore not be described here, as it corresponds to extremely limited spatio-temporal variability modes or to statistical noise (which may in particular be linked to the contamination of pixels by cloudiness).

The first mode (PC1) accounts for 39.4% of total variance, and naturally displays a strong seasonal signature with excellent concordance with the major land-use classes (Figure 8). The first component mainly contrasts the variability of forest areas (in the south and east-center) with that of human-influenced areas, either cultivated or in the process of conversion

(Figure 9). The two main urban areas stand out in particular, with the most negative factor scores. The corresponding temporal series shows the extent to which intra-seasonal phases are unstable from one year to the next, whether it be in the dry or the wet season.

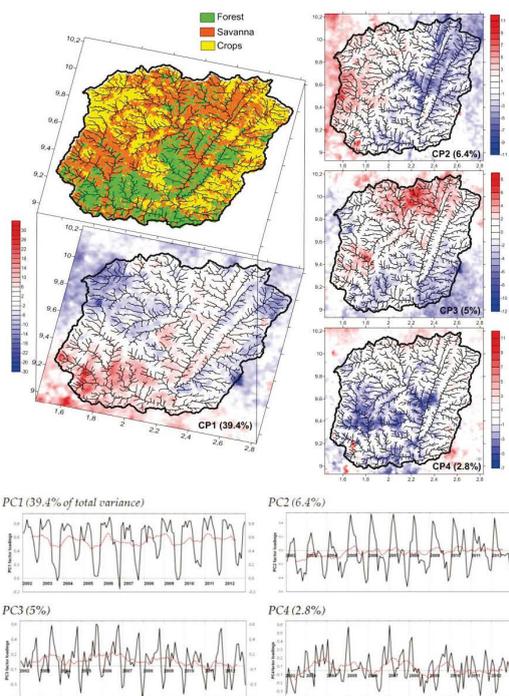


FIG. 8 SPATIO-TEMPORAL PATTERNS FROM A PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS (PCA) PERFORMED ON NDVI MONTHLY TIME SERIES (2002-2012) OF THE UPPER OUEME BASIN (THE FOUR MAIN FACTORS EXPLAIN 53.6% OF THE TOTAL VARIANCE): A-TOP) MAPS OF THE SPATIAL FACTOR SCORES (THE MAP OF THE FIRST COMPONENT IS COMPARED WITH ONE OF THE THREE LAND-COVER CLASSES); B-BOTTOM) PLOTS OF THE TEMPORAL FACTOR LOADINGS.

Two composite months calculated from extreme positive and negative values observed in the first factor were studied and enabled the spatial response during anomalies distinguished by the PCA to be compared, and the regional NDVI response to be clearly discerned. The composites were calculated respectively from the five months recording extreme factor scores, with the difference between them allowing the areas with the highest variation to be localized (Figure 10a). On the scale of the first component, sensitivity during extreme interannual NDVI phases mainly affects the northern part of the

Basin (north of 9.7°N), all vegetation forms included (wooded savanna and farmland), but does not affect the most densely forested hills of the Forest Reserve. Such spatially coherent variability thus seems to be typically linked to a constraint of bioclimatic origin affecting savanna and degraded areas.

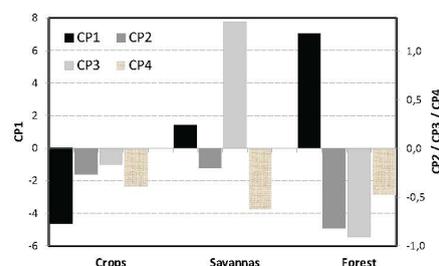


FIG. 9 AVERAGE VALUES CALCULATED FROM THE FOUR SPATIAL-FACTOR SCORES ACCORDING TO THE THREE MAIN LAND-COVER CLASSES.

The second mode (PC2) explains 6.4% of total variance (Figure 8). It particularly contrasts the west and north-east of the study area, and basically corresponds to a variability signature of forest areas, detected by the negative scores of the factorial component (Figure 9). More specifically, it was in fact riparian forest forms in the north-east of the Basin which stood out. The timeline associated with PC2 is characteristic of dry-season variations (positive peaks; Figure 8) and allows the periods from 2002 to 2004 and from 2005 to 2012 to be contrasted (with 2011 being more closely related to the first period, however). Composite analysis showed high variability in the photosynthetic activity of forest areas in the western part of the Upper Oueme Basin, with NDVI amplitudes above 0.36 between activity-phase extremes (Figure 10b). The latter element thus suggests a high sensitivity of the densest forest areas along the major water courses, with distinct interannual phases over the study period.

The third mode (PC3) synthesizes 5% of interannual NDVI variance. As would be expected in the case of a factorial approach by principal components, PC3 is indicative of a more north-south organization, i.e. a spatial representation at right angles to the previous one (this being one of the intrinsic principles of a factorial approach). This mode thus contrasts NDVI variations associated with rapidly-changing forest areas in the north of the Basin (positive values also associated with some wooded savanna in the west) with areas under strong human influence located in the south-east (negative values – Figure 9). The

component shows, firstly that 2002, 2009 and 2010 were quite different, and secondly that there has been a slight downward tendency since 2005, meaning that NDVI and thus the associated vegetation activity have fallen (Figure 8). Composite analysis suggests that change and extreme events mainly affect the northern part of the study area (Figure 10c).

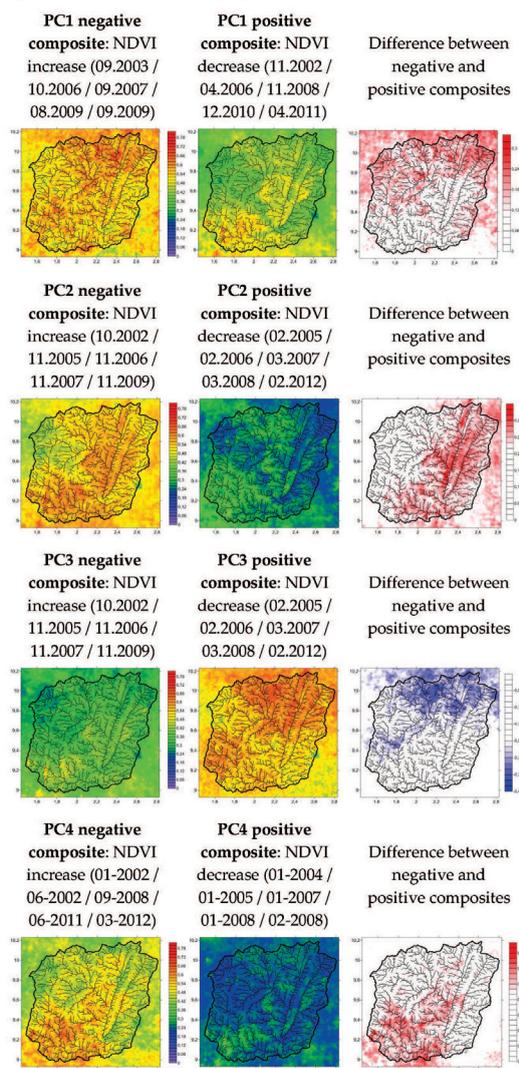


FIG. 10 NDVI SPATIAL COMPOSITES (NEGATIVE, POSITIVE, AND DIFFERENCE BETWEEN THEM) CALCULATED FROM EXTREME MONTHLY VALUES OF THE FOUR FACTORS FROM PCA (EACH COMPOSITE IS CALCULATED FROM 5 EXTREME MONTHLY VALUES).

PC4 is the last mode considered significant, despite accounting for a very low proportion of interannual variance (2.8%). It mainly corresponds to areas in the center of the Basin (Figure 8), and equally affects all three types of vegetation forms studied (Figure 9). It displays sharp interannual and intraseasonal variations, with the seasonal signal no longer being as explicit as for the three previous modes. With their plant activities not easy to analyze, extreme events mainly correspond to contrasts affecting the southern part of the Basin (Figure 10d). Although this mode could not be determined on the basis of this analysis alone, it is undoubtedly an artifact linked to cloud cover and partly expressed by NDVI.

A multivariate statistical analysis of NDVI thus clearly shows distinct regional contrasts and responses specific to certain areas and vegetation forms in the Upper Oueme Basin. The contrast between areas of protected native forest (forest reserves) and areas undergoing transformation into farmland (crop-growing and fallow) is especially clear. An especially noticeable change in photosynthetic activity as expressed in SPOT-VGT data can be detected from 2005 onwards. In several cases, riparian forest forms established along the major water courses (the Oueme and its tributaries) also display specific interannual and intraseasonal signatures. In a context of significant regional hydroclimatic change being experienced by Sudanian and Guinean areas since the 1970s, with growing rainfall shortages and falling water tables, river flow has decreased by 40 to 60 % (Mahé and Paturel, 2009; Descroix et al., 2009). Vegetation activity in outlying forest areas of the Oueme hydrographic network may thus be reliable short- and medium-term indicators of the repercussions of such climatic variations, as a number of studies have shown the close interactions between hydroclimatic change and land-surface state in West Africa (Philippon et al., 2007; Camberlin et al., 2007).

On the other hand, it also seems clear that landscape change of agricultural and anthropogenic origin is impacting the signatures of regional photosynthetic activity, even if the regional study described here was carried out over a short lapse of time and with the low spatio-temporal resolution (at kilometeric and ten-day scales) specific to SPOT-VGT imaging, and did not allow the change to be quantified.

Conclusions

The present study was a preliminary one, based solely on NDVI, with a descriptive statistical and factorial approach analyzing the variability of seasonal and interannual signatures. The results obtained in this study indicate that the first mode of interannual vegetation variability opposes the forest areas (here patches of natural protected forest) to highly anthropized landscapes (here agricultural mosaics, including fallows and woody areas). The hypothesis according to which the interannual trend (and consequently, the interannual sensibility) of these different landscapes would be globally identical is so not verified. In the same way, composite analyses on intraseasonal timescale reveal significant regional contrasts of NDVI variations, mainly due to land cover. This result explains it's important to take certain precautions to interpret environmental diagnostics or to elaborate models using the vegetation answers at very low spatial resolution (e.g. continental-scale) because dynamic patterns seems to vary strongly in space.

One of the main implications of this work on the NDVI variability is that it is necessary to be able to now absolutely confront it with hydroclimate analyses. Results need to be completed by a further study involving the cross-impact analysis of regional climate (especially rainfall) series available through the network of measurements compiled over the course of the last twenty years by the AMMA Program. In particular, both dry- and wet-season extreme climate events need to be detailed on a daily scale, as do the discrepancies associated with vegetation dynamics of natural formations and forest/savanna/farmland patchworks. More precise analysis of the links between vegetation and rainfall should also enable the influence of cloudiness on radiometric signatures of vegetation indices to be better distinguished and thus eliminated. By relying on other eco-climatic data, whether from satellites or from on-site validation series, the work carried out over the Upper Oueme River Basin should enable researchers to apprehend and model the environmental trajectories favored by climatic vagaries together with anthropogenic influences. A forthcoming major objective is therefore to perform a Dynamic Factor Analysis (DFA). This is a powerful multivariate times-series dimension-reduction technique enabling the spatio-temporal dynamics of vegetation coverage to be analyzed, as well as the main physical and bioclimatic drivers of

vegetation cover in the region (Campo-Bescós et al., 2013) and regional anthropogenic land-use evolution to be identified.

But before these eco-hydro-climate studies, the main recommendation for the next stages is to merge various satellite data (e.g. fusion techniques adapted for different spatial resolutions) to improve spatiotemporal diagnostics of the vegetation dynamics according to land cover but also land uses. These analyses correspond moreover to the expectations of the ALMIP2 Project (second phase of the AMMA Land Surface models Intercomparison Project) which compares model, satellite and ground-based estimates of evapotranspiration and processes. For example, it would be necessary at first to be able to estimate the advantage of satellite products such as ECOCLIMAP-II (developed in the framework of AMMA Program) compared with those such as SPOT-VGT or MODIS.

ACKNOWLEDGMENT

This research was carried out within the framework of the AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis) Program. In particular, the authors would like to thank Sandra Luque (IRSTEA) and Luc Descroix (IRD) for their advice and expertise. We are also grateful to LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) and IRD (Institut de Recherche pour le Développement) for help and support, and to Louise Leroux for classification data.

REFERENCES

- Baret, F., Bartholomé, E., Bicheron, P., Borstlap, G., Bydekerke, L., Combal, B., Derwae, J., Geiger, B., Gontier, E., Grégoire, J.-M., Hagolle, J.T., Leroy, M., Piccard, L., Samain, O., and Van Roey, T., (2006). VGT4 Africa user manual. European Commission, TP 440 Joint Research Centre, 21020 Ispra (VA) – Italy.
- Camberlin P., Martiny N., Philippon N. and Richard Y., (2007). Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment* 106, doi:10.1016/j.rse.2006.08.009, 199–216.
- Campo-Bescós, M.A., Muñoz-Carpena, R., Southworth, J., Zhu, L., Waylen, P.R., and Bunting, E., (2013). Combined spatial and temporal effects of environmental controls on

- long-term monthly NDVI in the Southern Africa savanna. *Remote Sensing* 5: 6513–6538.
- Chamaille-Jammes, S., Fritz, H., and Murindagomo, F., (2006). Spatial patterns of the NDVI–rainfall relationship at the seasonal and interannual time scales in an African savanna. *International Journal of Remote Sensing* 27(23): 5185–5200.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., and Sighomnou, D., (2009). Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *J. Hydrol.* 375, 90–102.
- Do, T.P.T., Bigot, S., Zin, I., and Galle, S., (2013). Etude des relations entre la couverture végétale et la température de surface calculées à partir des données Landsat ETM+ à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin). *Proceedings of the XXVth Conference of International Climatology Association* 26: 206–211.
- Eklundh, L., and Singh, A., (1993). A comparative analysis of standardized and unstandardized Principal Components Analysis in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 14: 1359–1370.
- Fensholt, R., Anyamba, A., Huber, S., Proud, S.R., Tucker, C.J., Small, J., Pak, E., Rasmussen, M.O., Sandholt, I., and Shisanya, C., (2011). Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 721–729, doi:10.1016/j.jag.2011.05.009
- Grégoire, J.-M., (1990). Effects of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. *Hydrological Sciences Journal* 35(3): 323–338.
- Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., and Vieilledent, G., (2013). Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment* 139: 68–80.
- Gurgel, H.C., and Ferreira, N.J., (2003). Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. *International Journal of Remote Sensing* 24(18): 3595–3609.
- Hahn-Hadjali, K., Wittig, R., Schmidt, M., Zizka, G., Thiombiano, A., and Sinsin, B., (2010). Vegetation of West Africa. In *Biodiversity Atlas of West Africa, volume 1: Benin*. Sinsin B. & Kampmann D. (eds), Cotonou & Frankfurt/Main, 78–85.
- Igué, A.M., Houndagba, C.J., Gaiser, T., and Stahr, K., (2012). Accuracy of the Land Use / Cover classification in the Oueme Basin of Benin (West Africa). *International Journal of AgriScience* 2(2): 174–184.
- Jarlan, L., Mangiarotti, S., Mougou, E., Mazzega, P., Hiernaux, P., and Le Dantec, V., (2008). Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment* 112, doi:10.1016/j.rse.1381–1394.
- Jarlan, L., Driouech, F., Tourre, Y., Duchemin, B., Bouyssié, M., Abaoui, J., Ouldabba, A., Mokssit, A., and Chehbounia, G., (2013). Spatio-temporal variability of vegetation cover over Morocco (1982–2008): linkages with large scale climate and predictability. *International Journal Climatology*, doi:10.1002/joc.3762.
- Judex, M., Thamm, H.-P., and Menz, G., (2006). Modelling of land-use changes in a West African catchment. *ISPRS Archives – Volume XXXVI Part 7*.
- Judex, M., and Thamm, H.-P. (eds.), (2008): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany, 81–82.
- Klein, D. and Roehrig, J., (2006). How does vegetation respond to rainfall variability in a semi-humid West African in comparison to a semi-arid East African environment? *Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSel SIG on Land Use and Land Cover, Center for Remote Sensing of Land Surfaces, Bonn*, 149–156.
- Lasaponara, R., (2006). On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological modeling* 194: 429–434.

- Lebel, T., and Ali, A., (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology* 375(1–2): 52–64, doi:10.1016.
- Lebel, T., Parker, D.J., Flamant, C., Bourles, B., Marticorena, B., Mougin, E., Peugeot, C., Diedhiou, A., Haywood, J.-M., Ngamini, J.-B., Polcher, J., Redelsperger, J.-L., and Thornicroft, C.D., (2010). The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 136(s1): 8–33.
- Leroux, L. (2012). Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS – Cas d'étude du communal de Djougou. ANR ESCAPE, Hydrosociences Montpellier, report 62 pages.
- Mahé, G., and Paturel, J.-E., (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *C. R. Geoscience* 341 (538–546), doi:10.1016/j.crte.2009.05.002.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A., González-Tagle, M.A., Pompa-García, M., and Aguirre-Salado, C.A., (2012). NDVI-rainfall relationship using hyper-temporal satellite data in a portion of North Central Mexico (2000-2010). *African Journal of Agricultural Research* 7(6): 1023–1033.
- Mberego, S., Sanga-Ngoie, K., and Kobayashi, S. (2013). Vegetation dynamics of Zimbabwe investigated using NOAA-AVHRR NDVI from 1982 to 2006: a principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, doi:10.1080/01431161.2013.806833.
- Philippon, N., Jarlan, L., Martiny, N., Camberlin, P., and Mougin, E., (2007). Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982 and 2002 by means of NOAA AVHRR NDVI data. *Journal of Climate* 20: 1202–1218, DOI: 10.1175/JCLI4067.1.
- Redelsperger, J.-L., Diedhiou, A., Flamant, F., Janicot, S., Lafore, J.-R., Lebel, T., Polcher, J., Caniaux, G., De Rosnay, P., Desbois, M., Eymard, L., Fontaine, B., Geneau, I., Ginoux, K., Hoepffner, M., Kane, C., Law, K., Mari, C., Marticorena, B., Mougin, E., Pelon, J., Peugeot, C., Protat, A., Roux, F., Sultan, B., and Van Den Akker, E., (2006). AMMA une d'étude multidisciplinaire de la mousson Ouest Africaine. *La Météorologie* 54: 22–32.
- Reed, B.C., Brown, J.F., Vanderzee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W., and Ohlen, D.O., (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5: 703–714.
- Richman, M. B., (1986). Rotation of principal components. *Journal of Climatology* 6: 293–335.
- Rigina, O., and Rasmussen, M. S., (2003). Using trend line and principal component analysis to study vegetation changes in Senegal 1986–1999 from AVHRR NDVI 8 km data. *Danish Journal of Geography* 103(1): 31–42.
- Roehrig, J., Thamm, H.-P., Menz, G., Porembski, S., and Orthmann, B., (2005). A phenological classification approach for the upper Oueme in Benin, West Africa using SPOT VEGETATION. Proceedings of the Second International VEGETATION User Conference.
- Speth, P. & Christoph, M., (2004). IMPETUS – a research project by GLOWA. Cologne, <http://www.impetus-uni-koeln.de>.
- Zannou, A.B.Y., (2011). Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin. Cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou. CIPMA-Chaire UNESCO and Université d'Abomey-Calavi, Thesis, 354 pages.
- Zin, I., Zribi, M., Otlé, C., Hiernaux, P., Lacaze, R., Le Hénarat-Masclé, S., Sanou, B., André, C., Guibert, S., Saux-Picart, S., Dessay, N., Boulain, H., Cappelaere, B., Decroix, L., Séghieri, J. et Séguis, L., (2009). Land covers assessment on the three AMMA experimental sites from SPOT HRVIR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Special issue "Remote sensing for Africa", JAG-D-08-00159.

4.3. Conclusion de la partie 4

Les comparaisons entre produits et indicateurs issus de la télédétection pour qualifier l'activité de végétation suggèrent des différences souvent sensibles de l'un à l'autre, indiquant des singularités, notamment durant la saison des pluies, et aussi aux phases intermédiaires (début, coeur et fin de saison de végétation). Le cycle phénologique annuel établi grâce aux séries du LAI ou NDVI issus de MODIS enregistre deux pics (juin et septembre), avec une baisse des valeurs en août durant la saison des pluies, caractère bimodal qu'on peut associer à un artefact dû en large partie à la présence nuageuse. Le recours aux séries provenant de MSG-SEVIRI ou de la base de données ECOCLIMAP-2 corrige en partie ce problème, en établissant un cycle saisonnier plus réaliste. Mais c'est alors sans pouvoir définir à ce jour des séries suffisamment longues permettant de travailler sur des liaisons évolutives à moyen terme (10 à 15 ans par exemple) avec le climat (notamment avec la variabilité pluviométrique). Les comparaisons effectuées entre NDVI et LAI indique surtout que le NDVI fournit une signature moins uniforme, avec même une variabilité possible pendant la saison sèche (DJF) ou en tout début de saison des pluies (MA), alors que les séries du LAI demeurent plus stables. L'utilisation d'un indice comme l'EVI défini avec les données MODIS peut très sensiblement améliorer le filtrage du biais observé avec le NDVI, et il est donc un complément utile dans la définition des variations intrasaisonnières de l'activité végétale. Même si les bases de données mises à disposition sont de qualité, on observe que certaines séries demeurent sujettes à critiques. C'est en particulier le cas des données MODIS (donc des produits NDVI et EVI qui en découlent) pour les années 2001 et 2013 qui enregistrent a priori un biais importants (minoration des valeurs), à l'échelle de la zone d'étude du moins.

Malgré ces défauts inhérents à la présence d'artefacts provenant de la nébulosité, les séries SPOT-VGT et MODIS conservent un intérêt important du fait de la longueur de leur série et des possibles diagnostics comparatifs ailleurs en Afrique et en zone tropicale. Dans tous les cas, l'intégration du biais issu de la nébulosité doit intervenir dans les prétraitements et aussi dans les phases d'interprétation. A l'échelle de la zone d'étude béninoise, c'est surtout l'espace situé vers 9°N qui semble subir les biais les plus importants sur les images, le biais étant divisé par 3 dès qu'on atteint 10°N, ce qui montre que l'approche régionale est essentielle pour comprendre et interpréter correctement certains mécanismes bioclimatiques souvent moyennés dans des approches continentales ou trop générales. L'analyse de la saisonnalité montre deux moments importants qui peuvent enregistrer de fortes variations d'une année à l'autre : fin mai et fin septembre. Ces périodes charnières dans l'activité photosynthétique, de même que les phénophases importantes (début, durée et fin de saison végétative) doivent donc être plus spécifiquement étudiées, car elles se situent aussi dans des séquences durant lesquelles le biais atmosphérique des données radiométriques est élevé. Les résultats obtenus par analyse factorielle du NDVI SPOT-VGT sur la période 2002-2012 indiquent que l'activité photosynthétique est significativement dépendante des trois principaux modes d'occupation du sol retenus pour étude, avec des réponses différentes entre les espaces forestiers, les savanes boisées et les espaces agricoles (ou assimilés, *i.e.* en cours de conversion). Sur le plan interannuel, ce sont les espaces cultivés qui montrent les variations interannuelles relatives les plus élevées. L'analyse statistique révèle aussi des contrastes régionaux dans l'activité végétale, suggérant par exemple une plus grande sensibilité des espaces forestiers de type ripicole, avec des variations interannuelles marquées sur la période d'étude.

Partie 5 :

La variabilité pluviométrique et les relations spatio-temporelles avec l'activité végétale à l'échelle de l'Ouémé supérieur

De nombreux travaux portant sur le milieu tropical ont abordé la question des corrélations spatio-temporelles aux échelles saisonnières et interannuelles entre précipitations et végétation en ayant recours à la télédétection, et essentiellement via le NDVI (voir par exemple Fuller et Prince, 1996 ; Schmidt et Karnieli, 2000 ; Bigot et al., 2005b). D'autres ont aussi ajouté comme déterminant importants l'humidité des sols (Srivastava et al., 1997) ou bien le cumul pluviométrique annuel (Tucker et Nicholson, 1999). Plus récemment, les études portent aussi surtout sur les liaisons et évolutions des différents régimes, pour déterminer les sensibilités et décalages temporels des écosystèmes au forçage pluviométrique (Lotsch et al., 2003 ; Zhang et al., 2005). Mais la plupart de ces travaux portent encore sur des espaces très vastes, souvent d'échelle quasi continentale, et les conclusions peuvent difficilement être attribuées à tous les sous-espaces tropicaux ouest-africains, en fonction de leurs spécificités.

Cette partie se décompose donc en deux ensembles : l'analyse préliminaire de la variabilité pluviométrique à l'échelle de l'Ouémé supérieur, pour déterminer les principales variations récentes ; puis, dans un second temps, l'examen des corrélations entre précipitations et NDVI est réalisé, en recherchant les principales variations phénologiques et liaisons spatio-temporelles.

5.1. Analyses des données pluviométriques

5.1.1. La variabilité pluviométrique ouest-africaine au cours des dernières décennies

De nombreuses publications traitent de ce sujet au cours des trois dernières décennies, une description ayant déjà été abordée dans la partie 2 de la thèse. Une synthèse assez complète des mécanismes, variations et théories peut par exemple être consultée dans les articles de Hulme *et al.* (2001) ou Nicholson (2013). Lorsqu'on regarde plus en détail les variations des précipitations ouest-africaines en s'appuyant sur un indice représentatif actualisé, on observe que certaines années récentes enregistrent des pluies supérieures à la normale, 'cassant' la tendance négative observée depuis la fin des années 1960 (figure 5.1).

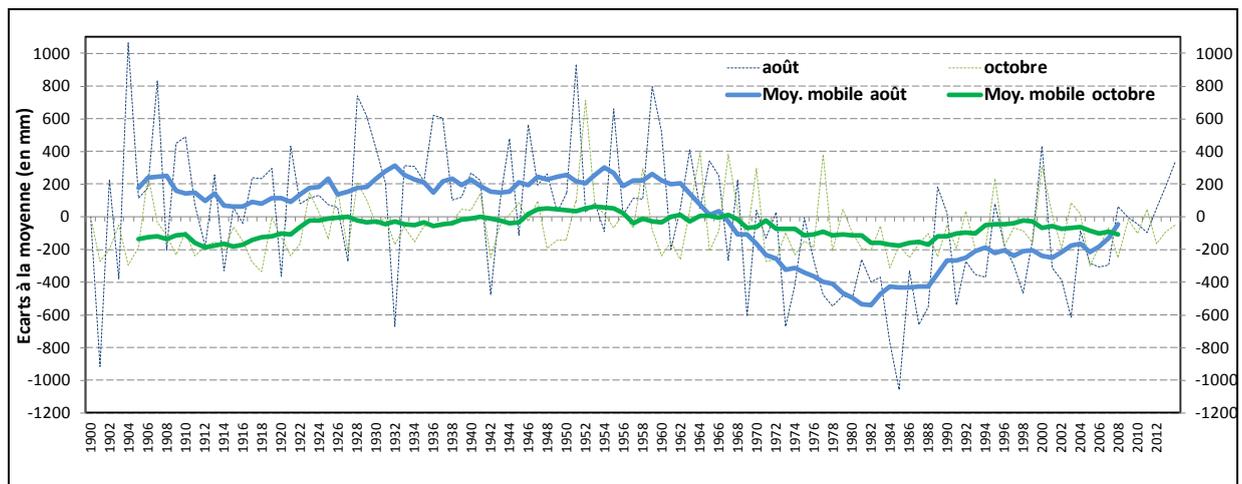
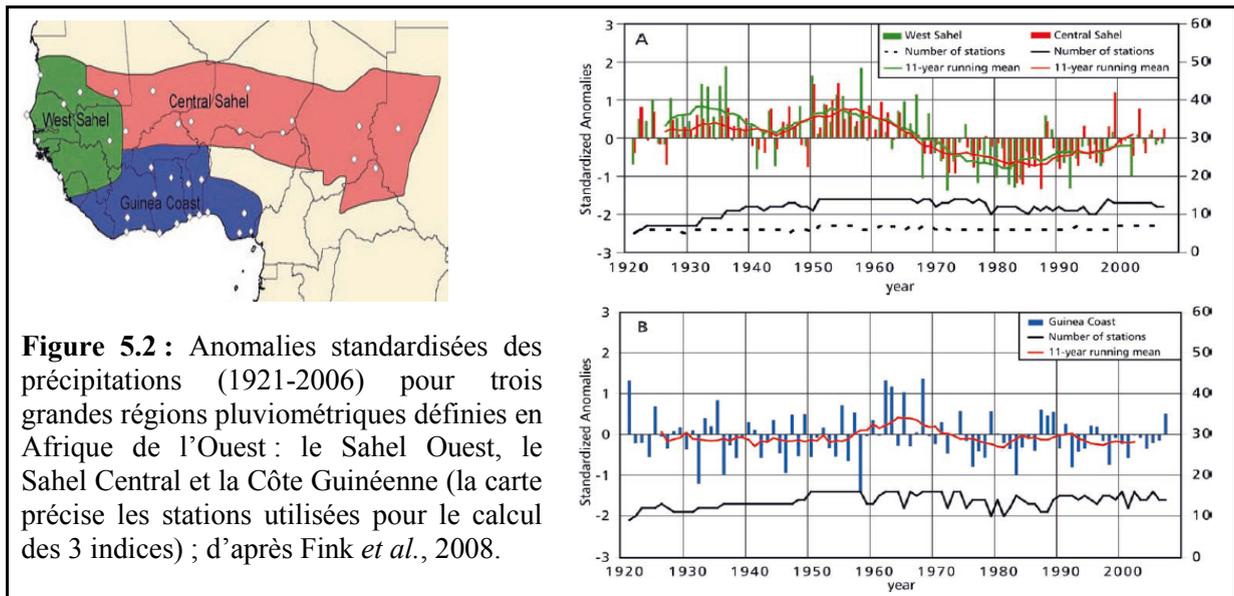


Figure 5.1 : Evolution des anomalies pluviométriques en août et octobre (en mm) à l'échelle d'un indice ouest-africain sahélien (10-20°N / 20°W-10°E) sur la période 1900-2013 (écarts calculés par rapport à la moyenne 1950-79 ; les moyennes mobiles sont calculées sur une fenêtre de 11 ans et indiquées en gras ; d'après les données fournies par le NOAA NCDC Global Historical Climatology Network Data – University of Washington – JISAO).

Ainsi, les années 1994, 1999, 2003, 2010 et 2012 enregistrent des écarts positifs, sans pour autant que la situation revienne à l'état observé dans la décennie 1950. Mais ces années relativement humides peuvent cependant, peut-être démontrer d'un nouvel état du climat de la sous-région, sachant par ailleurs que les précipitations demeurent le facteur prédominant dans la variabilité de la végétation et dans ses forts gradients en Afrique de l'Ouest (Hall et Swaine, 1976 ; Van Rompaey, 1993 ; Tchouto, 2004). Mais la situation varie a priori très sensiblement entre les sous-espaces de l'Afrique de l'Ouest, et la variabilité pluviométrique d'ensemble cache des contrastes par exemple entre les régions sahélienne et guinéenne (figure 5.2). Ali et Lebel (2009) montrent ainsi que sur la période 1994-2006, les conditions restent plutôt anormalement sèches dans le Sahel Ouest, alors que la partie orientale sahélienne bénéficie de conditions beaucoup plus humides (Ali et Lebel, 2009).



En zone guinéenne, les dernières années ne semblent pas enregistrer un retour d’années (ou de périodes) à la pluviométrie excédentaire par rapport à la moyenne à long terme, même si quelques années montrent des écarts positifs. La zone d’étude du Bénin central se situant à l’interface de ces deux domaines sahélien et guinéen, il faut donc regarder plus attentivement les évolutions des séries pluviométriques à long terme, ces deux influences pouvant interférer ou se compléter pour comprendre la variabilité et la phénologie de l’activité végétale.

Par ailleurs, si les études sur les liaisons entre pluviométrie et végétation en Afrique de l’Ouest montre la prédominance de ce forçage, il semble que ce ne soit pas le facteur unique permettant de comprendre l’intégralité des modèles spatiaux de l’activité végétale (Nicholson, 2013). La disponibilité en eau (qui est une fonction des précipitations, de la longueur et de l’intensité de la saison sèche, ainsi que de l’humidité atmosphérique) est aussi une variable essentielle. Elle peut par exemple expliquer quelquefois régionalement jusqu’à 80 % de la composition des espèces végétales à l’échelle du Bénin (Adomou, 2005). Plusieurs études montrent aussi que même si le suivi des précipitations est essentiel pour comprendre la variabilité de la végétation, il faut aussi pouvoir déterminer les variations propres aux saisons sèches et à leur intensité, qui peuvent moduler le déficit des sols, et donc la croissance et l’activité végétale (Brown, 1994 ; Swaine, 1996 ; Fairbanks, 2000 ; Bongers *et al.*, 2004 ; Gautier et Spichiger, 2004). Une étude plus spécifique menée sur les forêts riveraines (*i.e.* en périphérie des cours d’eau) indiquent aussi leur grande sensibilité au climat (Natta, 2003). Les résultats précédents obtenus grâce à l’analyse multivariée des données NDVI ont d’ailleurs montré que ces espaces ripicoles étaient particulièrement discriminés lors de l’étude de la variabilité interannuelle de l’activité végétale.

5.1.2. Quelle variabilité observée à l’échelle du Bénin et de l’Ouémé supérieur ?

5.1.2.1. Les tendances à long terme (1921-2012)

Il existe plusieurs stations béninoises possédant de longues séries pluviométriques débutant souvent dans les années 1910 ou 1920, comme par exemple Cotonou, Save ou Kandi. On retient plutôt ici celle de Natitingou, proche de l’Ouémé supérieur, pour caractériser la pluviométrie régionale à long terme, la série possédant des mesures depuis 1921. Cette série, fournie par le GHCN (Global Historical Climatology Network) a été testée statistiquement, et

aucune donnée aberrante n'a pu être repérée. L'analyse spécifique de deux mois de la saison des pluies (juin et août) fournit un résumé intéressant des grandes variations régionales : après une longue tendance à la baisse depuis les années 1960, notamment du mois de juin, on observe plutôt une tendance à la hausse des précipitations depuis le début des années 1990, avec une augmentation générale d'environ 100 mm (figure 5.3). Cette observation tendrait donc plutôt à ranger cette évolution dans les tendances de type sahélien plutôt que guinéen (figure 5.2). L'analyse de l'activité végétale faite sur la période récente (*i.e.* postérieure à 2000) grâce à la télédétection semble donc bien correspondre à une période avec des conditions pluviométriques a priori plus favorables que celles antérieures.

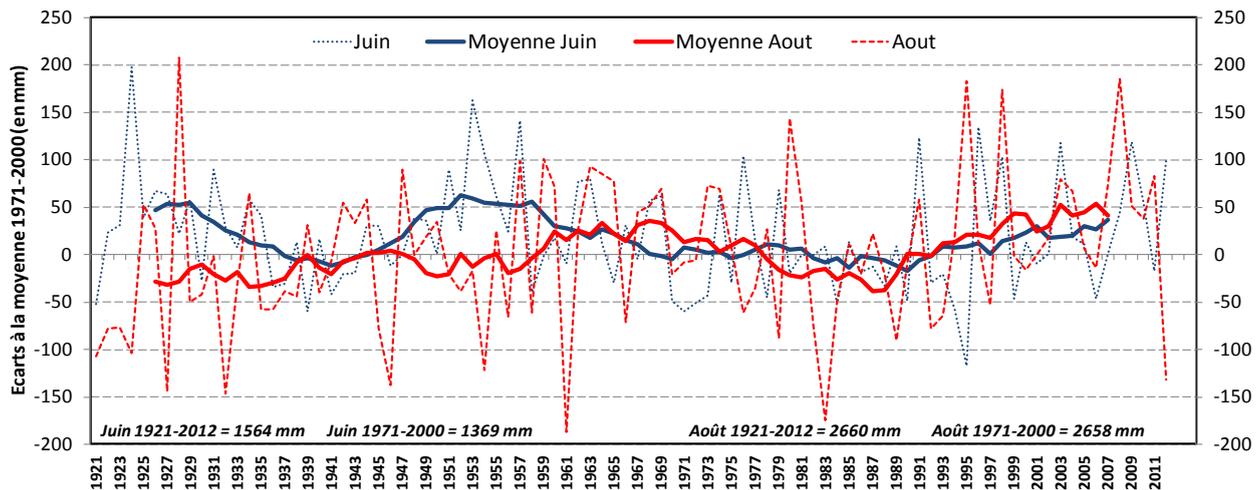


Figure 5.3 : Variation des écarts pluviométriques des mois de juin et août à la station de Natitingou sur la période 1921-2012 (calculés par rapport à la moyenne trentenaire 1971-2000, à partir des données disponibles dans la base de données internationales du GHCN Version 2 ; les courbes en gras correspondent aux moyennes mobiles respectives, définies sur une fenêtre de 10 ans).

Cet élément doit être intégré dans les interprétations en cas de comparaison avec des séries et analyses portant sur des périodes antérieures, par exemple issues de diagnostics sur l'Afrique de l'Ouest provenant de NOAA-AVHRR (dont les données sont disponibles depuis la fin des années 1980). Car les statistiques qui en découlent (par exemple les corrélations et les décalages temporels entre pluies et végétation) ne seront pas directement comparables. Cela permet de prendre aussi beaucoup de recul et de précaution sur les 'anciens' travaux menés dans les années 1980 qui annonçaient « *a widespread and irreversible desertification occurring in the Sahel of Africa* » (Lamprey, 1988). Les travaux plus récents (Eklundh et Olsson, 2003 ; Anyamba et Tucker, 2005 ; Olsson *et al.*, 2005 ; Herrmann *et al.*, 2005) montrent plutôt que sur la période d'étude 1982-2003, il y a une tendance générale à la hausse du NDVI dans l'espace sahélien (Mali, Mauritanie, Tchad), cette dynamique étant principalement déterminée par les précipitations, même si d'autres facteurs secondaires semblent aussi co-exister.

Il faut ainsi intégrer le poids des évolutions thermiques régionales dans les contraintes éco-climatiques qui influencent et conditionnent les réponses phénologiques. Car, comme évoqué dans les parties précédentes, le Bénin, comme toute l'Afrique de l'Ouest, enregistre une hausse particulièrement sensible des températures au cours des dernières décennies. L'exemple de la station de Parakou est particulièrement illustratif, avec une augmentation de l'ordre de 2,5°C sur la période d'enregistrement, et à partir d'une série contrôlée et corrigée (figure 5.4). Les autres stations étudiées pour la sous-région montrent toutes la même tendance, mais plutôt proche de 1,8°C ($\pm 0,5$). L'analyse statistique révèle aussi une rupture

significative au début des années 2000, suivie de fortes variations interannuelles des anomalies thermiques, alors même que la tendance à la hausse observée sur le long terme marque plutôt un pallier depuis cette date. L'étude envisagée ensuite des liens entre climat et végétation sur la période 2002-2012 semble donc correspondre à une sous-période thermique particulière, ce dont il faudra aussi tenir compte dans les interprétations.

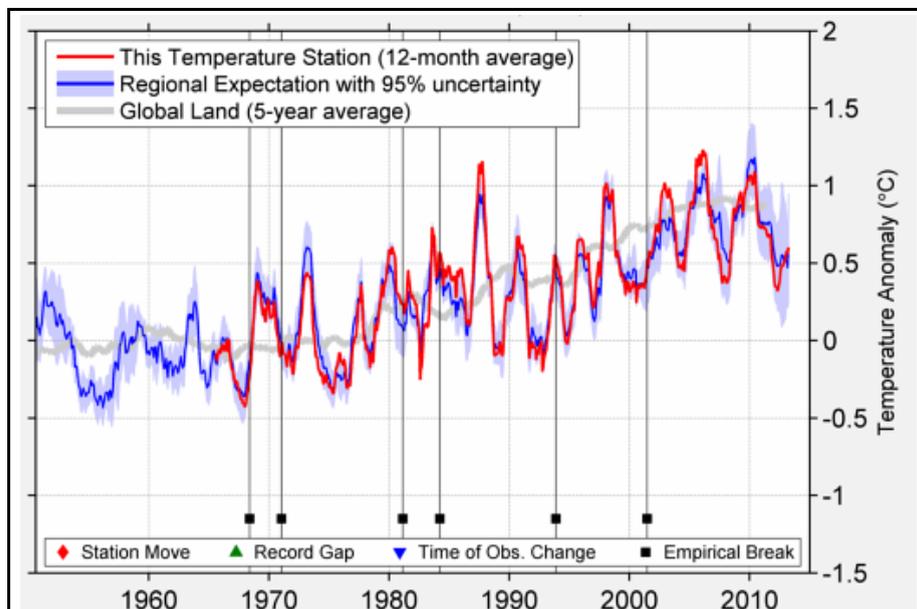


Figure 5.4 : Evolution des anomalies des températures atmosphériques (en °C) à la station de Parakou entre 1950 et 2012, la série thermique ayant été soumise à un ensemble de tests statistiques pour juger de son homogénéité sérielle (document issu du *Berkeley Earth*).

Au-delà de l'absence de tendance sur la période 2002-2012, l'analyse des variations thermiques enregistrées récemment au Bénin indique principalement trois éléments (figure 5.5) :

- 1) Il y a deux phases de fort réchauffement, avec des écarts de l'ordre de 1 à 1,5°C par rapport à la moyenne 1950-80 : 2005-2006 et 2009-2011 ;
- 2) Les températures maximales (diurnes) enregistrent une plus forte hausse dans les années 2008-2011 ;
- 3) Le début des années 2004 et 2008 enregistre les écarts thermiques les plus faibles, particulièrement les températures minimales (T_n) en 2008.

Ces variations devront être intégrées aux expertises suivantes qui ne doivent pas reposer uniquement sur l'analyse de la variabilité pluviométrique pour déterminer les phases bioclimatiques de l'activité végétale. Plusieurs travaux récents menés sur les espaces forestiers déterminent ainsi que l'augmentation et les phases extrêmes des températures atmosphériques conditionnent à la fois la durée des saisons végétatives et les tendances de la végétation (Allen *et al.*, 2010). L'augmentation des températures peut aussi déterminer les taux d'évaporation et les facteurs de compétition durant la saison sèche, en avantageant les espèces possédant le système racinaire le plus profond (Tietjen *et al.*, 2010).

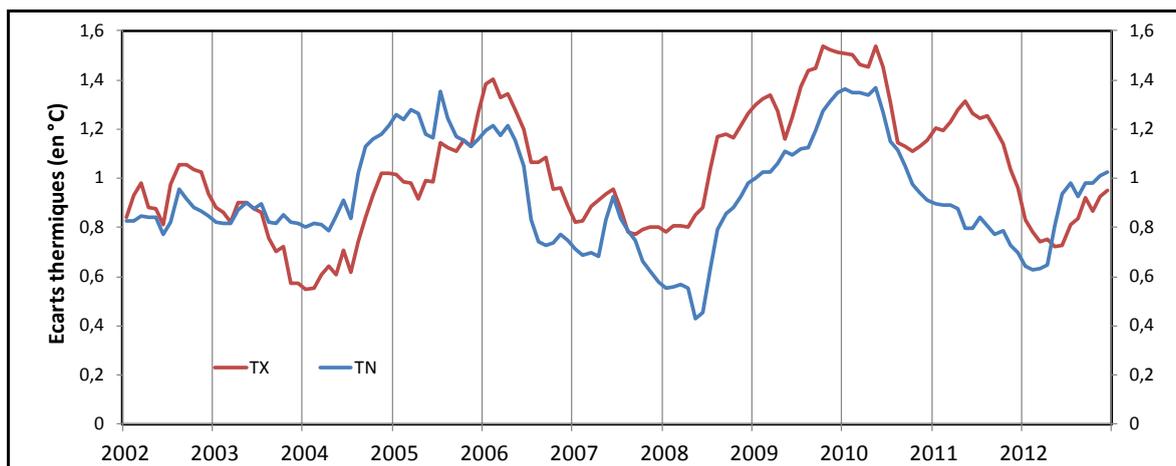


Figure 5.5 : Ecarts à la moyenne 1950-1980 des températures mensuelles moyennes minimales (TN) et maximales (TX) calculées au Bénin sur la période 2002-2012 à partir de sept stations réparties dans le pays (calculé grâce aux données mises à disposition par le *Berkeley Earth*).

5.1.2.2. Les champs pluviométriques régionaux définis grâce aux données AMMA-Catch (2002-2012)

L'analyse pluviométrique de la période récente repose donc en grande partie sur les documents et diagnostics établis grâce au suivi de l'Observatoire régional AMMA-Catch, que ce soit directement grâce aux séries collectées ou bien grâce aux rapports de terrain, bilans annuels ou analyses spécifiques réalisées. Plusieurs études ont déjà montré l'intérêt de ces données pour des approches hydroclimatiques à une définition journalière, notamment pour en déterminer les évolutions du cycle saisonnier, en utilisant des champs interpolés qui reposent sur un variogramme calé de manière précise (Le Lay et Galle, 2005). En premier lieu, afin de pouvoir établir des bilans spatialisés et des comparaisons avec les champs satellitaires, les séries pluviométriques sont donc utilisées pour définir des champs interpolés sur la région de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012.

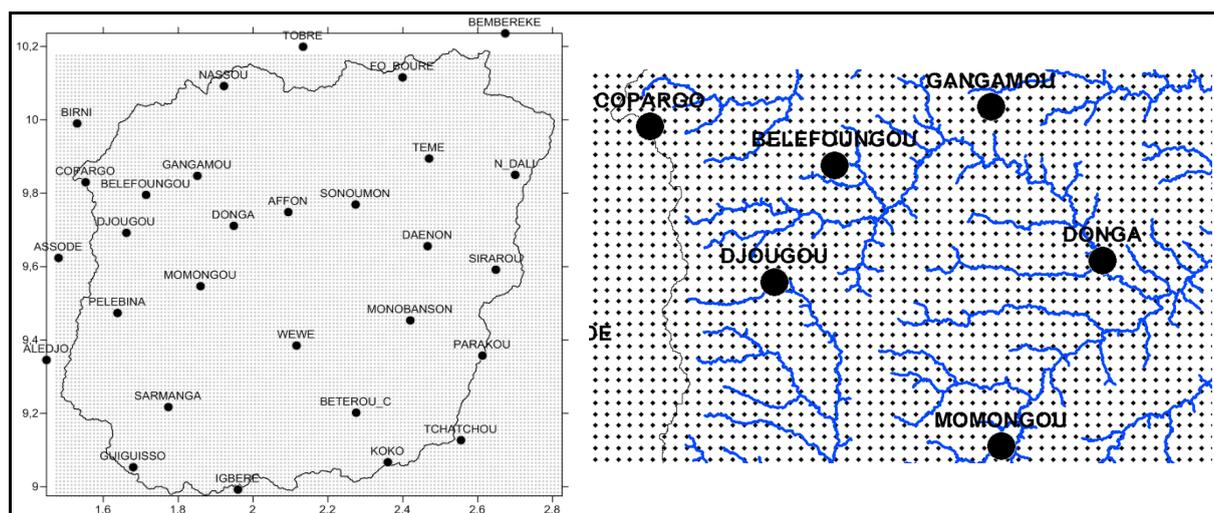


Figure 5.6 : Rappels des principales stations pluviométriques ayant servi au calcul des champs pluviométriques interpolés à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur à une résolution de $0,01^\circ$, avec sur la carte de droite, un zoom des points de grille situés vers la sous-région de Djourou et Donga (le réseau hydrographique est également indiqué).

En partant des données journalières, deux techniques sont utilisées pour générer des champs décadaires puis mensuels (comm. pers., G. Quantin, 2012) : le krigeage simple et l'interpolation lagrangienne. Le krigeage est la méthode la plus simple, qui fournit des estimations sur la base de la moyenne pondérée des observations faites autour de chaque station (Gratton, 2002). Pour précision ici à l'échelle de l'Ouémé, le krigeage a été calculé selon un variogramme utilisant une exponentielle de 23 km (ainsi que des techniques tenant compte de l'effet pépite lié aux stations isolées). L'interpolation lagrangienne (ou polynomiale) est un calcul plus lourd en nombre d'opérations, mais qui peut a priori théoriquement optimiser les calculs et apporter des résultats plus fiables et précis. Les deux types de résultat sont projetés à une résolution spatiale kilométrique (figure 5.6).

La comparaison des deux options indique que les résultats sont extrêmement proches, avec des signatures saisonnières et interannuelles presque identiques, malgré des différences légères durant le cœur de la saison des pluies, par exemple en 2002 et 2008 (figure 5.7).

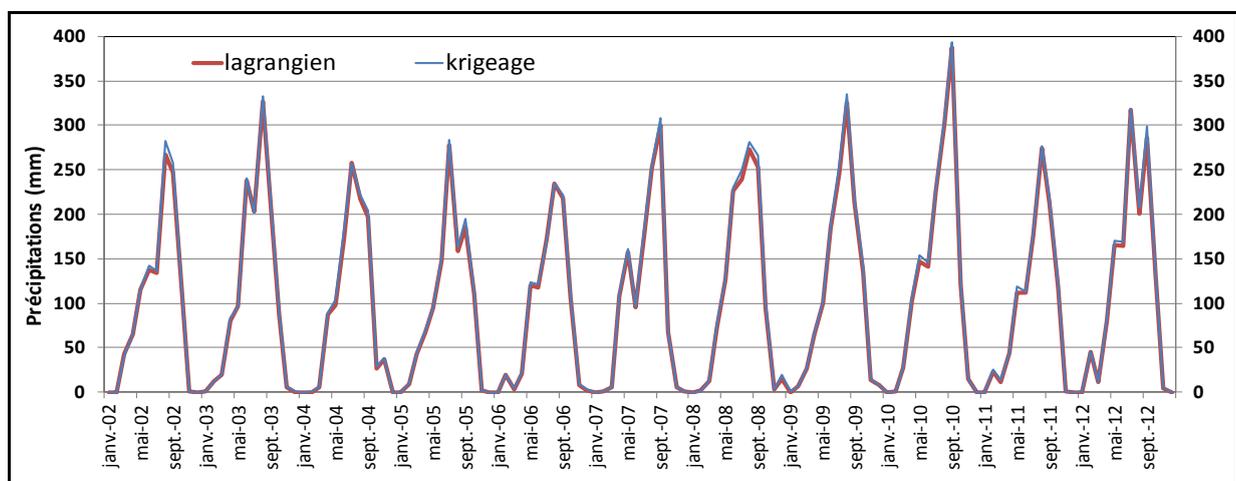


Figure 5.7 : Comparaison des totaux pluviométriques mensuels moyens calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur grâce à deux types de champs interpolés (à partir du réseau stationnel AMMA-Catch) : un champ interpolé par un krigeage simple et un autre interpolé par une méthode lagrangienne.

Lorsqu'on étudie plus spécifiquement les liaisons à l'échelle locale, en regardant l'estimation faite pour les différentes stations utilisées, seules les valeurs pluviométriques extrêmes (>400 mm) sont mal reproduites par l'interpolation, comme par exemple celles des saisons des pluies 2003, 2008 et 2009 pour la station de Djougou (figures 5.8 et 5.9).

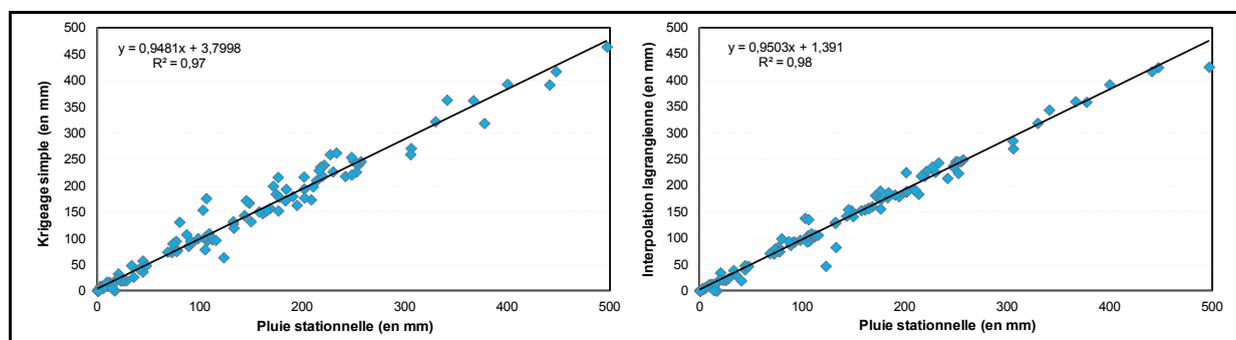


Figure 5.8 : Relation bivariée entre d'une part, la pluie mensuelle à la station de Djougou (2002-2012) et d'autre part, celle calculée localement par interpolation simple par krigeage (à gauche) ou par interpolation lagrangienne (à droite).

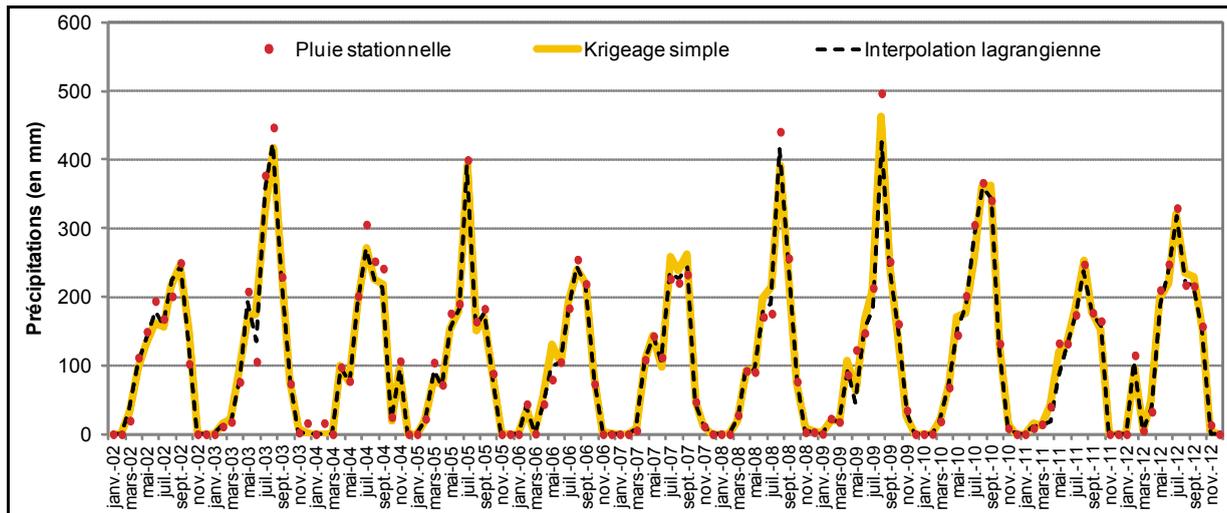


Figure 5.9 : Comparaison des variations pluviométriques mensuelles sur la période 2002-2012 entre la station de Djougou (points), le pixel le plus proche issu d'une interpolation par krigeage simple (ligne jaune) et celui issu d'une interpolation lagrangienne (pointillés).

Ces résultats indiquent que grâce à la bonne qualité du réseau pluviométrique AMMA-Catch, notamment la distribution spatiale très cohérente des stations, l'utilisation du krigeage est suffisante pour aboutir à des champs pluviométriques de qualité (alors que cette méthode peut être sujette à caution dans de nombreux autres cas d'utilisation à l'échelle tropicale, où il y a souvent peu de stations pour aboutir à des cumuls stables partout dans l'espace interpolé).

5.1.2.3. Les champs pluviométriques régionaux définis grâce aux estimations satellitaires (2002-2012)

Une dernière comparaison est finalement menée entre les séries et champs interpolés issus de l'observation *in situ* et ceux provenant d'estimations satellitaires. On utilise les deux produits reconnus pour leur capacité en zone tropicale à produire des indices pluviométriques de qualité : les estimations de type RFE déjà analysées précédemment et issues de MODIS, ainsi que celles calculées avec les données TRMM. On utilise ici plus précisément les produits 3B43 (Version 7), qui possèdent une résolution spatiale de $0,25^\circ$, et qui fournissent les cumuls pluviométriques mensuels de meilleure qualité grâce à l'intégration de nombreuses sources satellitaires intercomparées dans l'algorithme de calcul (Huffman *et al.*, 2010).

A l'échelle de la zone d'étude, on observe que les estimations RFE sous-estiment les cumuls mensuels par rapport aux champs interpolés à partir des séries stationnelles (figure 5.10). La différence peut même être très élevée certaines années (par exemple 2008 et 2009), et aboutit à une corrélation de l'ordre de 0,80 (figure 5.11).

Les différences générales sont surtout évidemment observées au cœur de la saison des pluies, en juin-juillet-août. Mais l'utilisation des estimations pluviométriques issues des produits TRMM montre que les résultats sont de très bonne qualité, même lorsqu'on cherche à obtenir un cumul à l'échelle locale. Ainsi, avec l'exemple de la station de Djougou, on voit que les cumuls sont très proches dans les deux cas, avec une corrélation allant même jusqu'à 0,98 lorsqu'on extrait le pixel correspondant à la station (figure 5.10) ou encore à 0,84 quand on utilise un indice plus régional (figure 5.11).

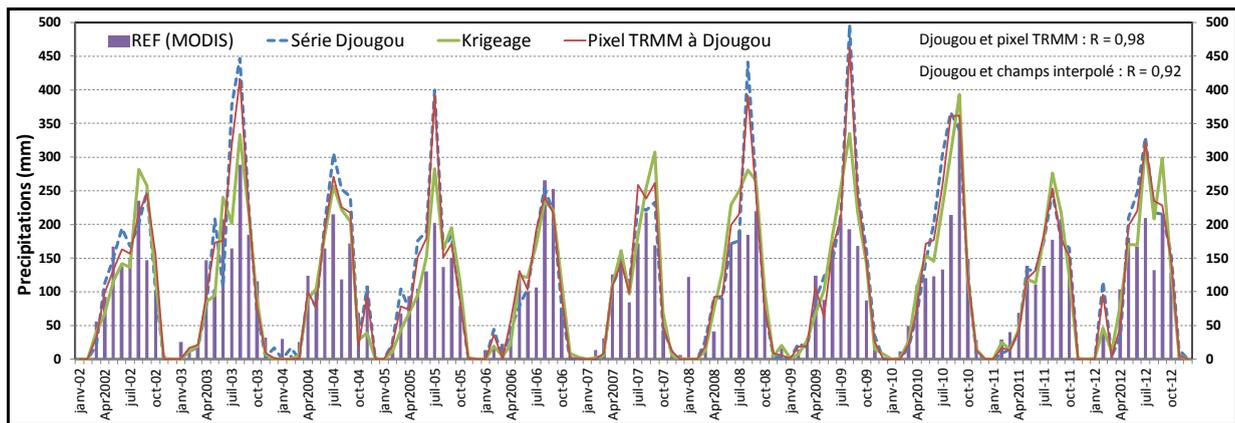
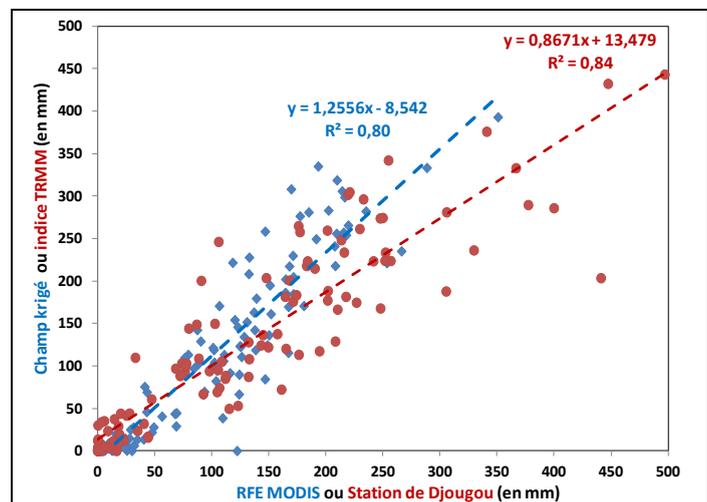


Figure 5.10 : Variations pluviométriques mensuelles sur la période allant de janvier 2002 à décembre 2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : comparaison entre la série de Djougou, la moyenne régionale calculée à partir du champ pluviométrique interpolé et les estimations par satellite (produit TRMM, version 7) du pixel le plus proche de la station de Djougou (les corrélations linéaires entre d'une part Djougou et le pixel TRMM, et d'autre part, Djougou et le champ interpolé, sont signalées en haut à droite).

Figure 5.11 : Graphique présentant deux relations bivariées des cumuls pluviométriques mensuels (en mm) à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012 : en bleu) entre les estimations pluviométriques de type RFE (issues de MODIS) et la moyenne du champ interpolé par krigeage ; en rouge) entre la station de Djougou et les estimations correspondant aux données TRMM (version 7, produit 3B43) ; les droites et équations de régression linéaire sont indiquées pour les deux cas.



5.1.2.4. Synthèse sur la variabilité pluviométrique de la période 2002-2012

En termes de cumuls annuels, l'examen des différentes sources de données montrent que les années 2003, 2009 et 2010 sont plus arrosées que les autres sur la période d'étude 2002-2012 (figure 5.12). Lorsqu'on étudie ces variations à l'échelle stationnelle, par exemple pour Djougou, on voit même que les écarts sont très importants par rapport aux années plus sèches comme 2006 et 2011, puisque dépassant 500 à 600 mm entre les deux situations.

Si l'on intègre cela dans le bilan des variations thermiques observées au Bénin (figure 5.5), on peut déjà avancer une typologie descriptive des principales variations pluviothermiques régionales, chaque cas pouvant apporter une contrainte différente sur l'activité végétale (figure 5.13) :

- Les années 'chaudes et pluvieuses' : cas des années 2005, 2009 et 2010 ;
- Les années 'chaudes et sèches' : cas des années 2006 et 2011 ;
- Les années 'fraîches et sèches' : cas de 2007 ;
- Les années 'fraîches et pluvieuses' : cas de 2008.

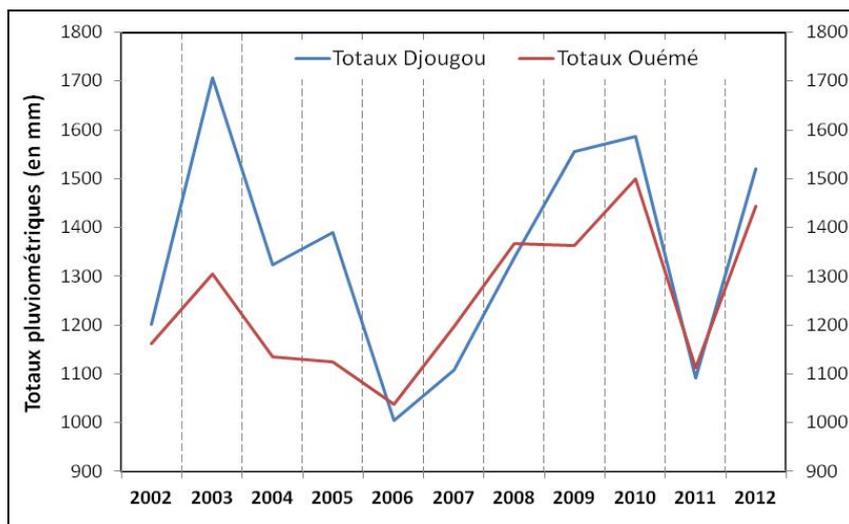


Figure 5.12 : Comparaison entre les totaux pluviométriques annuels à la station de Djougou et ceux calculés à l'échelle de tout le bassin versant de l'Ouémé supérieur (avec les champs pluviométriques interpolés par krigeage) pour les années 2002 à 2012 (source des données : AMMA-Catch).

Il faut donc bien tenir compte des possibles conditions bioclimatiques fondamentalement différentes entre les cumuls importants des années 2003 et 2012, mais avec des anomalies thermiques faibles (de l'ordre de $+0,8^{\circ}\text{C}$), et ceux des années 2009 et 2010 enregistrés durant des années qui subissent des écarts de $+1,2$ à $1,4^{\circ}\text{C}$.

Il faut aussi tenir compte de la temporalité des précipitations au cours de l'année, puisque par exemple, on voit que pour deux années globalement très pluvieuses (2003 et 2012), la répartition des pluies, et donc des seuils au cours de la saison, n'est pas du tout identique (figure 5.14).

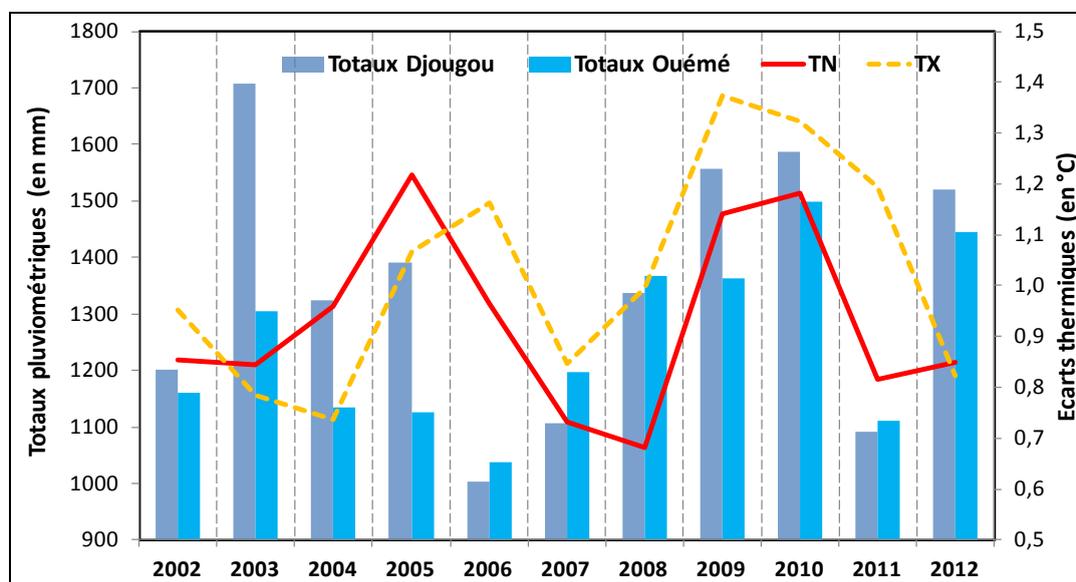


Figure 5.13 : Totaux pluviométriques annuels (en mm) à Djougou et pour l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012, comparés aux écarts thermiques (en $^{\circ}\text{C}$) des TN et TX définis à l'échelle du Bénin (par rapport à la moyenne 1950-80).

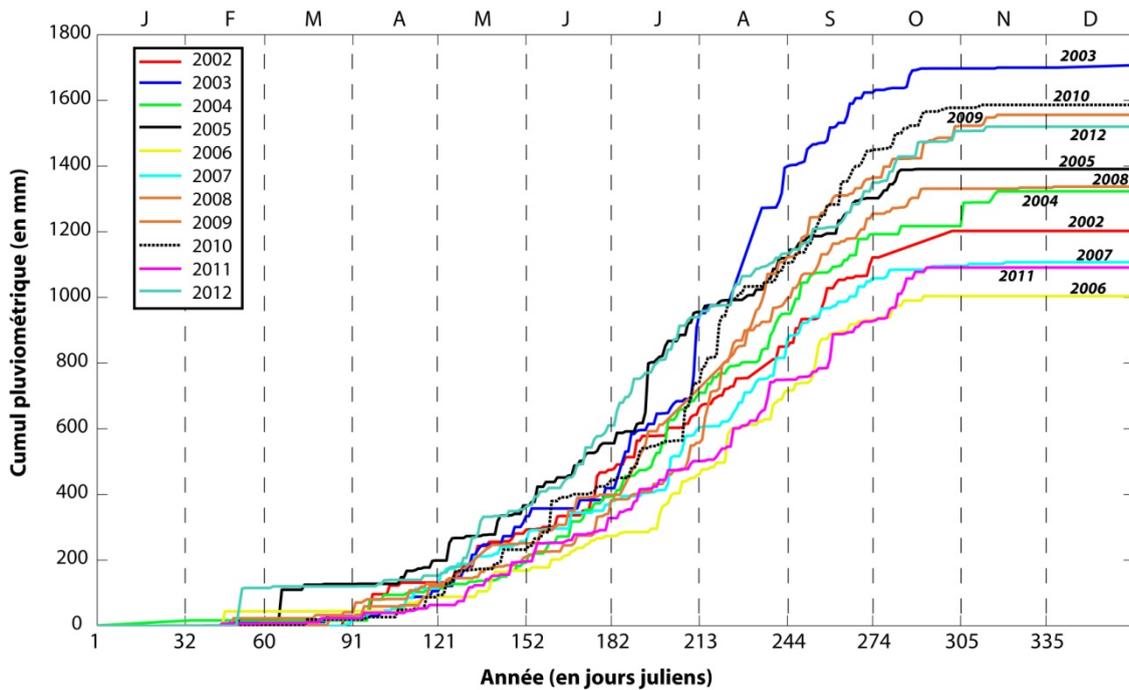


Figure 5.14 : Cumuls pluviométriques annuels à la station de Djougou pour les années 2002 à 2012 à partir des données journalières (source des données : AMMA-Catch).

En 2012, les cumuls sont déjà au dessus de la normale dès fin mai, et surtout juillet et août. En revanche, en 2003, les cumuls du début et même du coeur de la saison des pluies sont normaux ; ce n'est qu'à partir du mois d'août et aussi en septembre que plusieurs séquences pluvieuses permettent à cette année d'apparaître comme largement excédentaire sur l'échantillon étudié. Cette répartition des pluies très contrastée au cours de l'année ne favorisent donc absolument pas les mêmes conditions éco-climatiques, en particulier le stockage et la disponibilité de l'eau au sol, donc l'activité végétale. Ces éléments rappellent aussi qu'il faut systématiquement tenir compte d'une expertise régionale et temporelle poussée pour préciser les liaisons climat/bioclimat/sol/activité végétale, les diagnostics établis aux échelles supérieures étant certes pertinents, mais incapables de distinguer ces spécificités fonctionnelles (c'est d'ailleurs l'objectif du programme ALMIP-2 en cours).

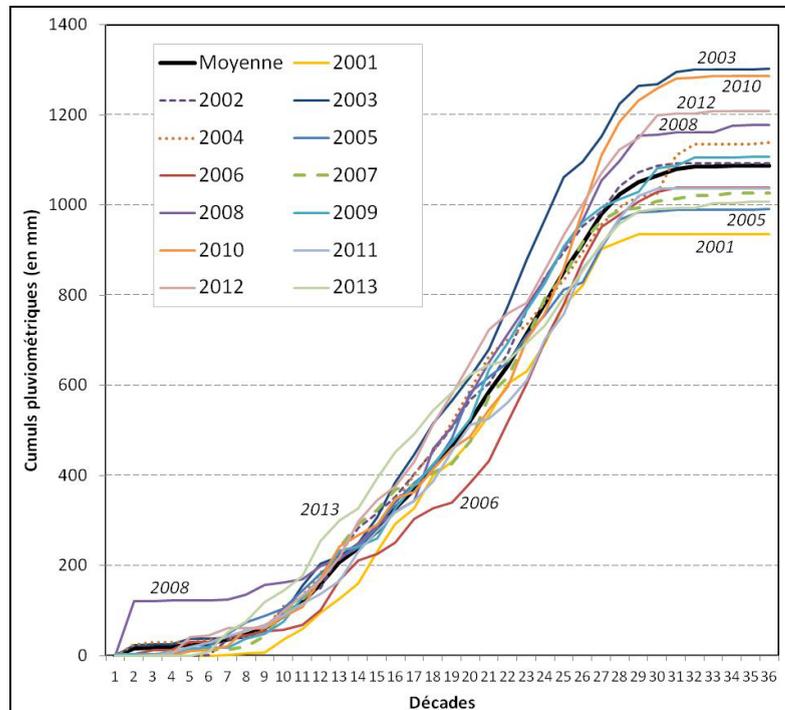
Tableau 5.1 : Comparaison entre les cumuls pluviométriques annuels calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur soit à partir des moyennes du champ stationnel interpolé, soit à partir des estimations de type RFE ; le rang des 11 années est indiqué en italique au dessous de chacun des cumuls annuels.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
AMMA-Catch	1160,9	1305,1	1134,3	1125,3	1037,5	1197,7	1366,4	1362,2	1499,0	1111,5	1444,6
Rang	7	5	8	9	<i>11</i>	6	3	4	1	10	2
RFE Ouémé	1092,0	1302,1	1139,3	990,4	1037,9	1025,9	1177,8	1106,9	1286,9	1035,8	1208,0
Rang	7	1	5	11	8	10	4	6	2	9	3

Le recours aux estimations satellitaires est donc un précieux complément pour engager un croisement entre diagnostics issus de l'observation *in situ* et ceux établis pour des espaces ne disposant peut-être pas d'un observatoire aussi complet que celui d'AMMA-Catch, même si le classement des années pluviométriques en fonction de leur cumul n'est pas strictement comparable (tableau 5.1).

La répartition relativement atypique des précipitations saisonnières de 2003 transparaît bien grâce au suivi par les estimations satellitaires (figure 5.15). On voit aussi que le comportement anormal du début de l'année 2008 est également discriminé, avec des cumuls élevés, ce qui est cohérent avec la réalité observée *in situ*, et même si les estimations satellitaires surestiment très largement ces cumuls des 10 premières décades de 2008. La forte baisse des précipitations durant la saison des pluies de 2006 est claire dans les deux cas (figures 5.14 et 5.15).

Figure 5.15 : Cumuls pluviométriques annuels calculés pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga grâce aux estimations pluviométriques satellitaires décennales définies par le USGS Fews Net Data Portal à partir du RFE (*Rainfall Estimate*) qui se base sur l'intégration de plusieurs sources satellites et sur une résolution spatiale de 8 km.



5.1.2.5. Piste de compréhension de certains forçages du climat de l'Ouémé supérieur

Sans chercher à étudier cette problématique en détail, car n'étant pas l'objectif du travail mené ici, il est cependant nécessaire d'aborder rapidement quelques éléments susceptibles d'expliquer la variabilité pluviométrique régionale du Centre et Nord Bénin, donc également par voie de conséquence, celle de l'activité végétale saisonnière ainsi que plus généralement, celle des dynamiques interannuelles des principales formations.

Le forçage le plus évident à l'échelle tropicale provient des liaisons importantes entre océan et atmosphère. De nombreux travaux ont démontré ces téléconnexions et forçages très significatifs sur les précipitations ouest-africaines (voir par exemple Fontaine et Janicot, 1996 ; Moron *et al.*, 2004 ; Paeth et Friederichs, 2004 ; Joly *et al.*, 2007). Le poids de certains forçages et oscillations externes, à la fois sur le climat et la végétation africaine, est souvent très net (Bronw *et al.*, 2010). Au travers d'indices synthétiques, ces auteurs démontrent ainsi de l'influence du phénomène ENSO (*El Nino Southern Oscillation*) ou de l'Oscillation Décennale Pacifique (ODP) sur la phénologie de l'Afrique de l'Ouest (avec une influence de l'ENSO sur le début de la saison végétative, et de l'ODP sur le NDVI cumulé en fin d'année). D'autres travaux ont également insisté sur le poids des TSO (Températures de Surface Océanique) de l'Atlantique sur le climat du domaine guinéen, et notamment sur la variabilité des pluies et de l'activité végétale (Koudio *et al.*, 2003 ; Bigot, 2004 ; Bigot *et al.*, 2005).

Un moyen simple de tester ce type de liaison est d'utiliser un indice décrivant les anomalies thermiques du bassin atlantique tropical. Le choix se porte sur l'indice AMM (*Atlantic Meridional Mode*) qui est un bon descripteur des variations saisonnières des températures de part et d'autre de l'équateur dans l'océan Atlantique, opposition qui conditionne en particulier fortement la position de la ZCIT, donc le flux de mousson ouest-africain (Chiang et Vimont, 2004).

Les résultats indiquent que les cumuls pluviométriques annuels de l'Ouémé supérieur sont surtout significativement corrélés aux variations de l'indice AMM de janvier ($R = -0,72$) et septembre ($R = 0,82$), semblant pouvoir expliquer une part intéressante de la variabilité pluviométrique interannuelle régionale (figure 5.16).

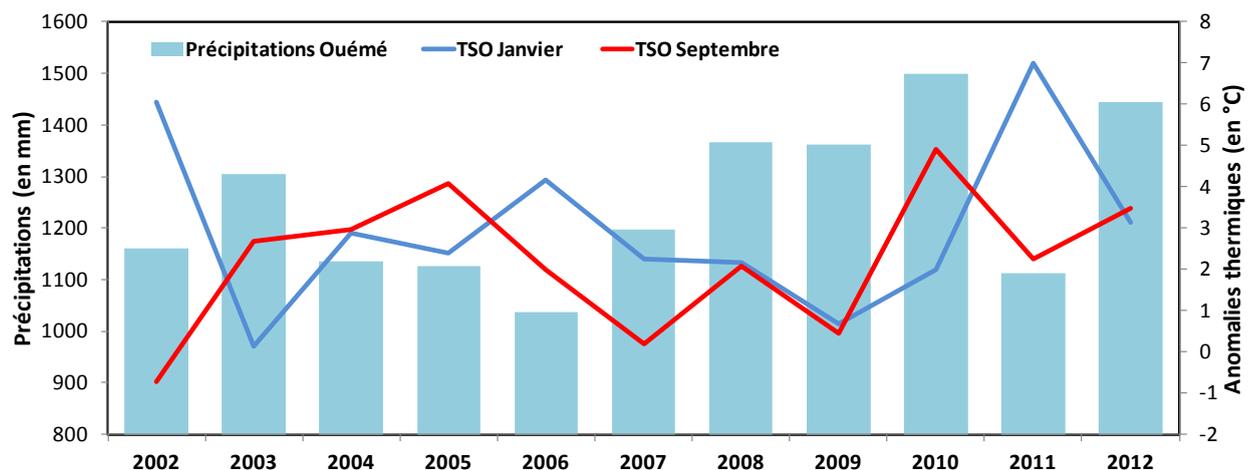


Figure 5.16: Cumuls pluviométriques annuels (en mm) dans le bassin de l'Ouémé supérieur entre 2002 et 2012, et comparaison avec les anomalies thermiques (en °C) des températures de surface de l'Atlantique (TSO) décrites par l'indice AMM (*Atlantic Meridional Mode*) en janvier et septembre.

Sur la période d'étude 2002-2012, les années anormalement sèches (2006 et 2011) correspondent à un indice très élevé en janvier de la même année : on peut l'interpréter comme lié à la présence de TSO anormalement chaudes dans l'Atlantique tropical (figure 5.17). A l'inverse, les années pluvieuses (par exemple 2003, 2010 et 2012) enregistrent un indice élevé en septembre, révélant un dipôle thermique marqué entre les TSO équatoriales anormalement chaudes, et celles de l'Atlantique sud beaucoup plus fraîches que la normale.

Ces variations océano-atmosphériques contraignent la position latitudinale de la ZCIT, sa vitesse de déplacement et son intensité, ainsi que les conditions du champ de vent de tout le domaine guinéen (Kouadio *et al.*, 2003). Elles deviennent donc potentiellement des prédicteurs très pertinents pour l'étude du climat et bioclimat béninois, puisque ces mêmes auteurs montrent pour l'exemple de la Côte d'Ivoire que la signature des anomalies océaniques précède de 3 mois celles des précipitations. L'ensemble des processus a également été établi à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et en tenant compte à la fois de téléconnexions d'échelle supérieure et de processus biogéophysiques par Philippon et Fontaine (2001), ou Jarlan *et al.* (2005).

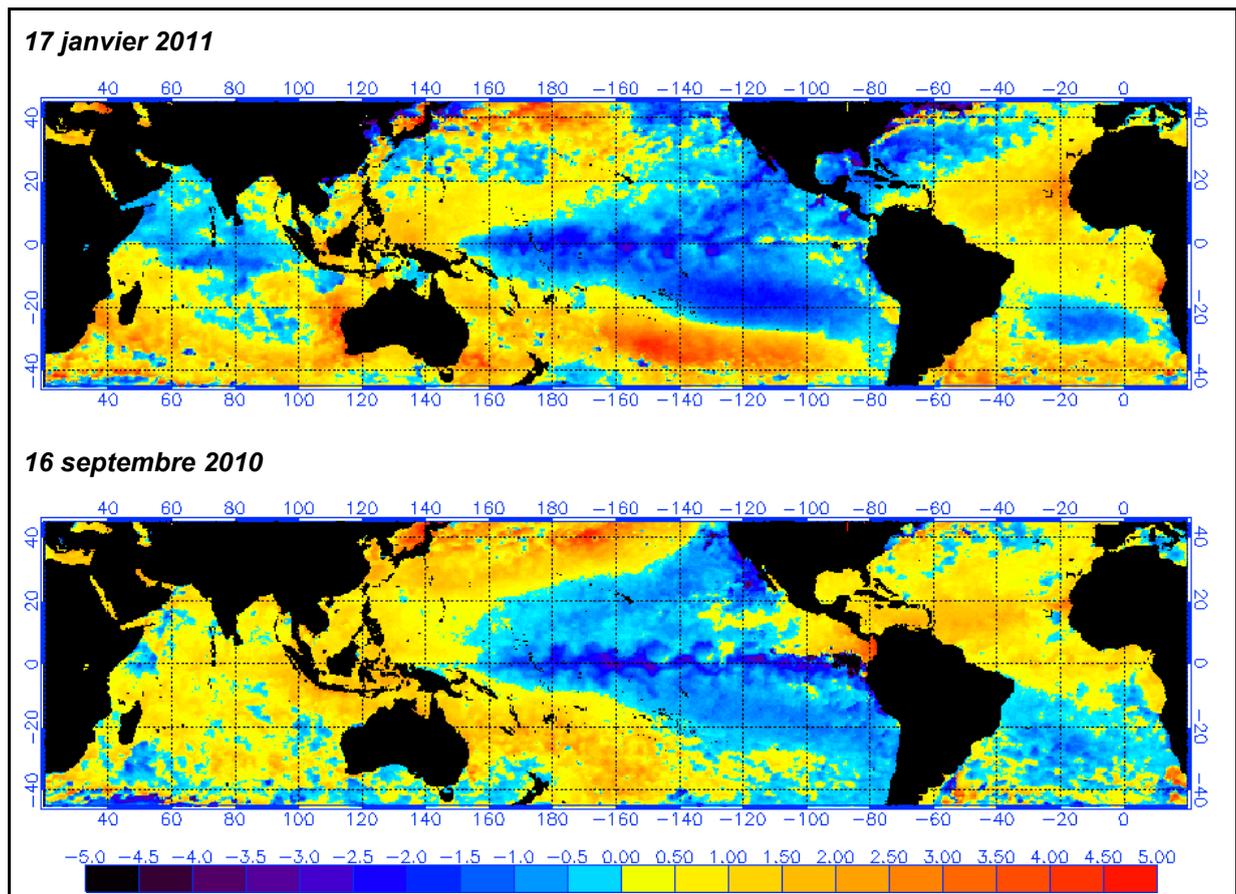


Figure 5.17: Anomalie thermique (en °C) des températures de surface de l’océan mondial pour le 17 janvier 2011 (carte du haut) et le 16 septembre 2010 (carte du bas) ; adapté d’après des documents issus de la NOAA/NESDISS.

5.2. L'activité de la végétation en réponse aux précipitations (2002-2012)

Lors de l’étude de ces liaisons, il faut notamment chercher à identifier les contrastes d’intensité (peut-être liés aux formations végétales) ainsi que les temps de réponse (déphasage, aussi appelé ‘lag’) entre précipitations et activité végétale. Une question également importante est de déterminer si la région de l’Ouémé supérieur correspond bien à ce que Boschetti *et al.* (2012) définissent comme une ‘*anomalous greening*’, c’est-à-dire une région enregistrant une tendance générale à un verdissement (calculé grâce au NDVI sur la période 1998-2010) mais avec en parallèle des précipitations stables, ce qui est le cas du nord-ouest du Bénin dans les résultats présentés par ces auteurs (figure 5.18). Ils identifient aussi des anomalies de type ‘*climatic greening*’, soit un verdissement associé à une hausse corollaire des précipitations, mais sans identifier ce type de cas au Bénin sur la période d’étude 1998-2010 (à l’inverse de certains espaces de la Côte d’Ivoire et du Togo).

Sur la période d’étude 1998-2010, Boschetti *et al.* (2012) explique que l’essentiel de l’Afrique de l’Ouest enregistre des précipitations stables, avec des dynamiques de végétation contrôlées par cette variabilité climatique, c’est-à-dire où le NDVI est directement dépendant des précipitations. Ils expliquent les tendances découplées du climat (de type ‘*anomalous greening*’) par l’amélioration de la gestion des cultures, ainsi que leur extension dans un contexte climatique régional plutôt favorable ces dernières années.

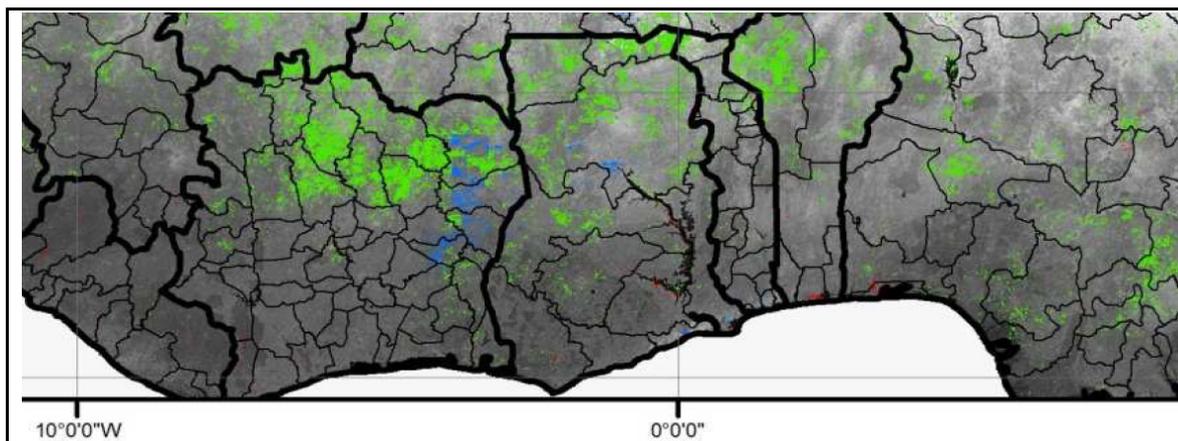


Figure 5.18 : Extrait de la carte des tendances éco-climatiques définies à l'échelle ouest-africaine grâce à une combinaison d'imageries satellitaires sur la période 1998-2010 : les zones en grisé correspondent à une stabilité observée sur la période d'étude de 13 ans, celles en vert à une tendance générale à un verdissement mais avec parallèle des précipitations stables (*'anomalous greening'*), et celles en bleu à un verdissement associé à une hausse corollaire des précipitations (*'climatic greening'*) ; les zones en rouge correspondent à des dégradations importantes de type *'hot-spot'* ; adapté d'après Boschetti *et al.* (2012).

5.2.1. La variabilité spatio-temporelle des liens climat-végétation

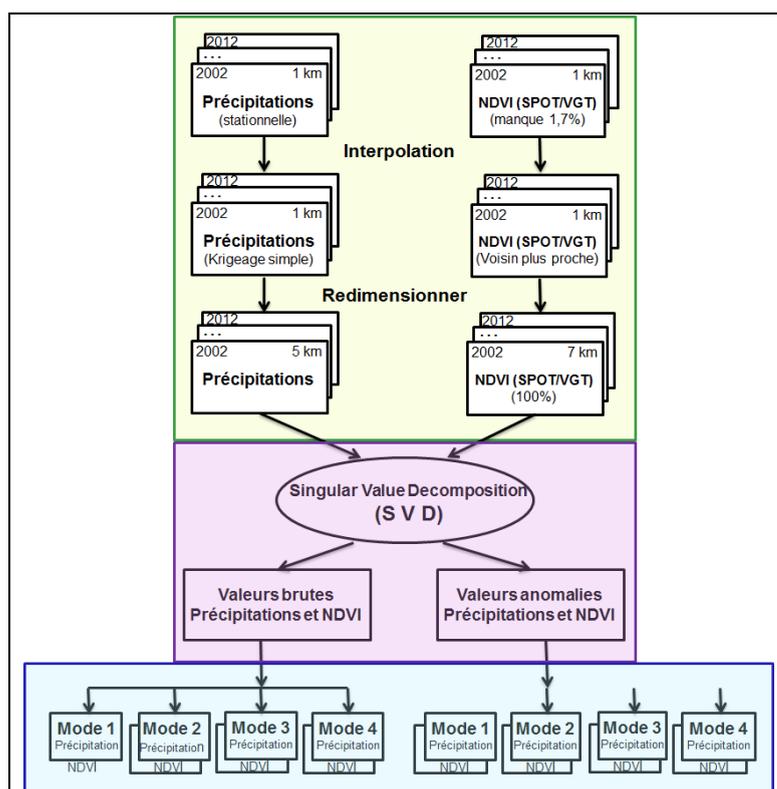
5.2.1.1. Le recours à une technique multivariée : la SVD

Comme décrit en partie 2, la Singular Value Decomposition (SVD) est une méthode statistique très efficace pour confronter deux champs géophysiques qui ne possèdent pas les mêmes qualités formelles intrinsèques (réseau de stations, champs de mesure, séries ponctuelles, surfaces géophysiques...) et pour résumer leurs covariations spatiales et temporelles (Björnsson et Venegas, 1997).

La SVD est ici appliquée pour déterminer le degré de couplage entre les champs des précipitations et ceux du NDVI sur la période 2002-2012. Pour précision méthodologique, les données retenues sont les champs pluviométriques décennaux interpolés par krigeage à une résolution de 1 km, ainsi que le NDVI SPOT-VGT à la même résolution spatiale. Après plusieurs tests et pour augmenter la capacité et vitesse de calcul, ces matrices initiales sont légèrement dégradées, sans que cela change significativement les résultats statistiques. Ainsi, la SVD est finalement calculée sur les séries mensuelles, et avec un ré-échantillonnage spatial pour obtenir une résolution de 5 km (pour les précipitations) et 7 km (pour le NDVI). L'analyse est ensuite menée sur les séries brutes, puis sur les anomalies calculées sur la période 2002-2012, les premiers modes étant systématiquement examinés (figure 5.19).

A cause de la nébulosité ou biais signalés dans les métadonnées de SPOT-VGT, 1,7 % des valeurs du NDVI sont éliminées sur la période d'étude. Ces lacunes sont ensuite remplacées par une interpolation utilisant la méthode du plus proche voisin, afin d'obtenir des champs complets nécessaires au traitement par SVD.

Figure 5.19 : Schéma résumant les principales étapes de l'analyse des liaisons entre la variabilité des précipitations traduite par le champ pluviométrique interpolé grâce au réseau stationnel et celle des champs du NDVI sur la période 2002-2012 grâce à une analyse par SVD.



5.2.1.2. Résultats de la SVD à partir des séries mensuelles brutes 2002-2012

Seul le premier mode est ici intéressant, puisqu'il résume 95,7 % de la variance totale des précipitations, et plus de 77,9 % de celle du NDVI. Comme attendu avec cette approche factorielle menée sur les valeurs brutes, ce mode est en fait une synthèse de la variabilité et covariance saisonnière des deux paramètres (figure 5.20).

Ce premier résultat permet de préciser quelques éléments descriptifs avant une analyse plus précise réalisée grâce aux anomalies :

- Le caractère saisonnier unimodal est apparent grâce à la SVD, qui permet donc de filtrer en grande partie le biais saisonnier provoqué par la nébulosité dans les séries du NDVI, comme cela a été démontré dans les parties précédentes.
- Le déphasage intrasaisonnier entre les deux paramètres apparaît sur ce premier mode factoriel, avec la corrélation linéaire la plus élevée ($R = 0,87$) observée lorsque les précipitations précèdent le NDVI de 1 mois.
- La SVD indique que malgré les variations interannuelles d'intensité des saisons sèches (*i.e.* les valeurs positives de la composante factorielle), les coefficients attachés aux précipitations sont stables (symbolisant en fait le niveau de base de la saison sèche d'une année à l'autre). En revanche, on observe bien la phase végétative correspondante qui enregistre des variations très fortes d'une année à l'autre, avec en particulier les débuts d'année 2005, 2007 et 2008 qui correspondent aux situations extrêmes de plus faibles NDVI.
- Même si les saisons des pluies les plus pluvieuses (*i.e.* celles repérées grâce aux valeurs factorielles les plus négatives en JJA) correspondent généralement au NDVI les plus élevés un mois après (exemple de 2007), ce n'est pas systématique (exemple de 2010). Certains auteurs suggèrent que les meilleures liaisons entre précipitations annuelles et

NDVI résultant à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest sont observées pour les totaux compris entre 900 et 1000 mm/an (Davendport *et al.*, 1993 ; Klein et Roehrig, 2006), soit légèrement en-dessous des totaux moyens de l'Ouémé supérieur. Au dessus de ce seuil, les très bonnes corrélations entre pluies et NDVI sont surtout dues au fait de la transition entre saison sèche et saison des pluies, qui induit un contraste élevé des valeurs annuelles du NDVI.

Sur le plan géographique, le premier mode de la SVD correspondant aux précipitations révèle une opposition entre le centre-ouest et le sud-est du bassin ; alors que le mode équivalent du NDVI montre plutôt une opposition entre nord et sud. On constate que ce mode spatial du NDVI est finalement très proche de la structure spatiale des températures au sol (qui ont été calculées précédemment grâce à l'imagerie Landsat ; cf. partie 3 ; figure 5.21). Cette différence de structuration spatiale révèle bien qu'à l'échelle régionale, lorsqu'on étudie les relations et covariations entre climat et dynamique végétale, il ne faut pas systématiquement chercher des réponses qui correspondent et s'emboîtent idéalement dans l'espace, les structures liées à la végétation demeurant avant tout tributaires des formations et associations végétales au sol, ainsi que des sols (d'où la bonne liaison avec la cartographie des températures de surface).

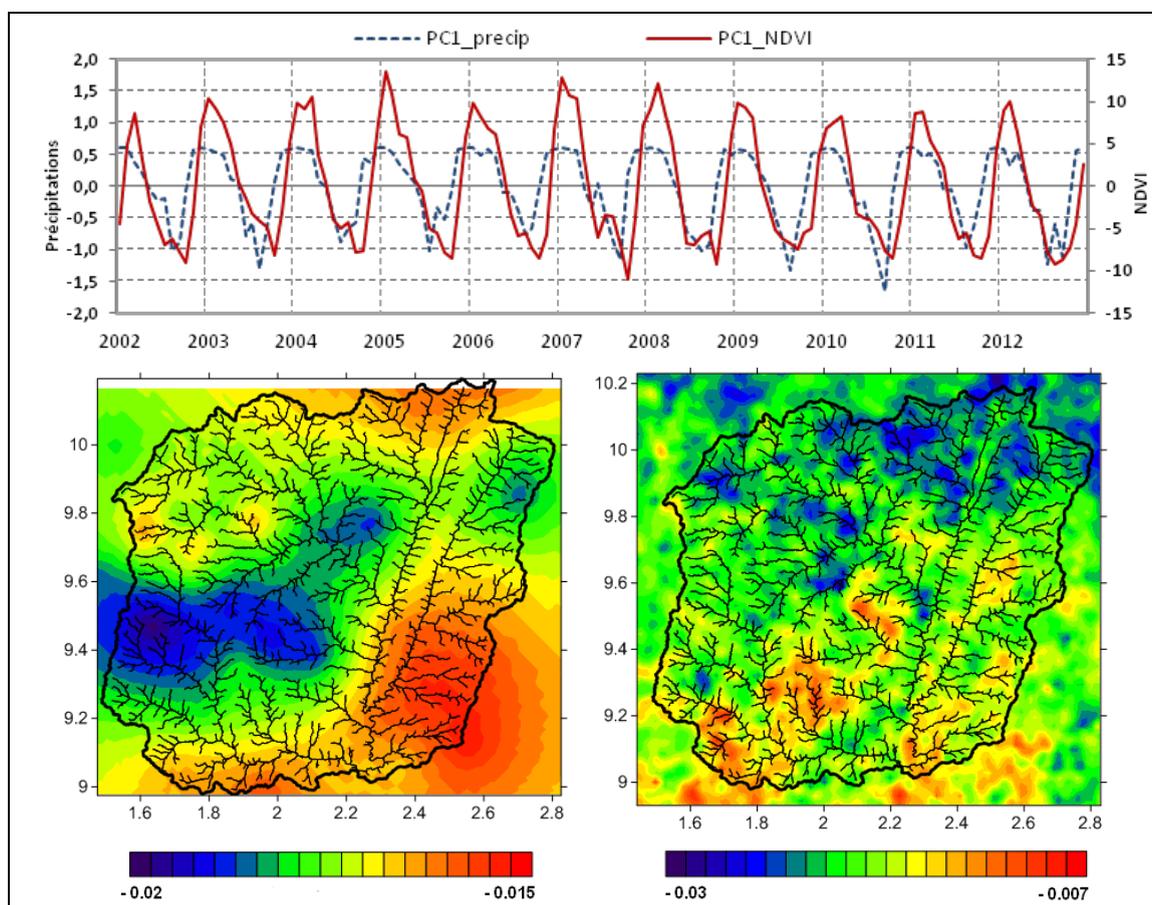


Figure 5.20 : Résultats spatio-temporels issus du premier mode factoriel obtenu par une SVD (Singular Value Decomposition) calculée entre les précipitations mensuelles (95,7 % de la variance expliquée) et le NDVI SPOT-VGT (77,9 % de la variance expliquée) sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : en haut, la comparaison des coefficients temporels des variations pluviométriques et du NDVI ; en bas, les coefficients spatiaux des précipitations (carte de gauche) et du NDVI (carte de droite).

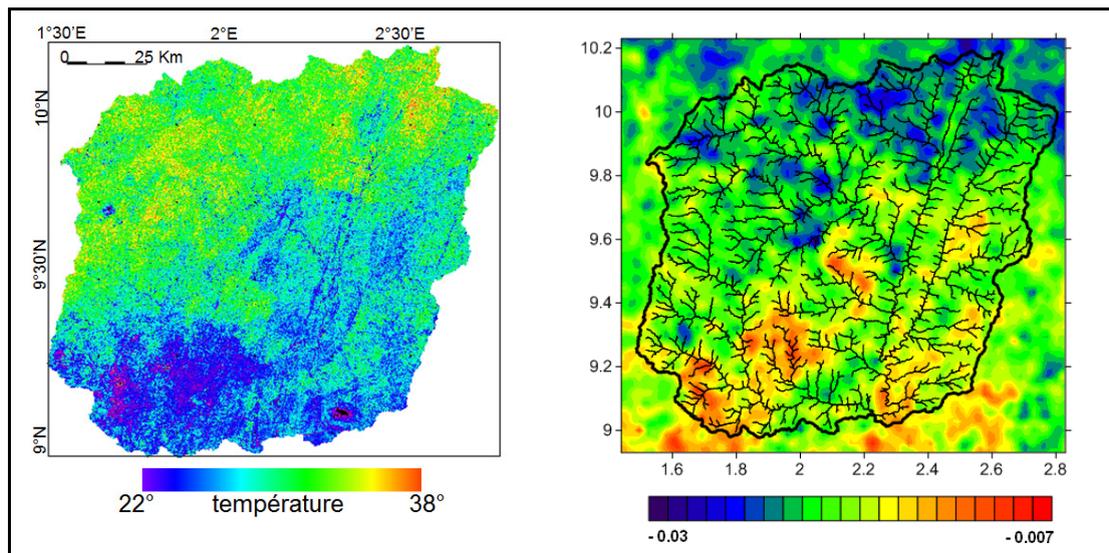


Figure 5.21 : Comparaison entre la carte des températures de surface de l’Ouémé supérieur calculée à partir de l’image LANDSAT ETM+ du 29/01/2012, et la carte correspondant au premier mode du NDVI à partir de la SVD calculée précédemment (cf. figure 5.20).

5.2.2. Le déphasage temporel régional entre précipitations et NDVI

5.2.2.1. Rappels sur les principaux acquis des études phénologiques ouest-africaines

Apparent sur les résultats de la SVD, l’étude de ce déphasage est essentiel pour de nombreuses raisons, aussi bien pour comprendre la relation fonctionnelle entre climat et végétation, pour la reproduire correctement dans des phases de modélisation ou encore, pour mieux déterminer la vulnérabilité des états de surface aux changements et extrêmes climatiques. On peut l’interpréter déjà simplement comme le fait que la végétation ne réagit pas immédiatement, sur le plan physiologique, à la précipitation, mais plutôt par le biais de l’humidité du sol (qui agit comme un réservoir intermédiaire qui régule l’eau disponible). En conséquence, à un même cumul, la réaction de la végétation n’est pas obligatoirement identique, car correspondant plutôt à la répartition et à la somme des événements pluviométriques. Ces aspects théoriques et la réponse asynchrone de la végétation aux pluies ont été largement abordés au cours des dernières années, surtout pour le domaine sahélien, du fait de l’absence de données validées utilisables en toute fiabilité dans les modèles de climat ou hydrologiques (Schultz et Halpert, 1995 ; Shinoda, 1995 ; Wagner et Scipal, 2000). Les décalages finalement mis en avant sont souvent proches de 1 à 2 mois (Malo et Nicholson, 1990), précision des résultats limitée par la résolution mensuelle des séries, comme c’est le cas pour la SVD présentée avant.

Le recours à des séries satellitaires décennales améliore ces diagnostics, en pouvant identifier par exemple des réponses de la végétation savanicole plutôt proches de 10 à 20 jours, mais qui peuvent varier au cours de la saison de croissance de la végétation (Justice *et al.*, 1991 ; Di *et al.*, 1994). Les derniers travaux menés sur la phénologie des formations végétales ouest-africaines s’appuient même sur une résolution journalière, mais en partant des principales formations végétales fortement modulées par les pluies au cours de l’année (voir par exemple Zhang *et al.* – 2005, ou encore Clinton *et al.* – 2014) : les espaces forestiers (décidus ou mixtes), les espaces arbustifs (fermés ou ouverts), les savanes (arborées ou boisées) et les savanes herbacées. Du fait de leur approche générale, ces travaux ne tiennent donc pas

compte des espaces cultivés ou en cours de conversion, ce qui demeure pourtant la question essentielle à ce jour pour améliorer la compréhension et prévision des processus.

Plusieurs points critiques sont observés à partir de ces travaux basés sur une approche synthétique :

- La phase de verdissement de la végétation se produit pour 50 % (*respectivement 90 %*) des surfaces lorsque le cumul pluviométrique de la saison des pluies a atteint 5 % (*respectivement 20 %*) ;
- En moyenne, les épisodes pluvieux nécessaires à l'émergence d'une végétation verte (au sens de sa détection via le NDVI) en milieux arbustifs et savanicoles sont compris entre 45 et 49 mm (les précédents travaux basés sur une approche mensuelle ayant plutôt estimé ce seuil à 33-36 mm) ;
- En moyenne, la phase de dessiccation (*i.e.* de forte baisse du NDVI) se produit vers 51 jours après la fin de la saison des pluies en zone sahélienne ;

Par ailleurs, afin de compléter ce qui a déjà été avancé ultérieurement, il faut rappeler qu'en zone semi-aride, la signature saisonnière très lisible des précipitations et de la phénologie n'est pas obligatoirement associée à une signature aussi claire à l'échelle interannuelle. La combinaison des deux peut donc amener à des situations très diverses, complexes à repérer, car il faut pouvoir systématiquement déterminer les conditions bioclimatiques antécédentes (d'une saison à l'autre, mais aussi d'une année à l'autre). Cela implique en effet les notions de sensibilité et de résilience de la végétation, pour savoir si la végétation peut ou non utiliser les ressources en eau mises à sa disposition (Andela *et al.*, 2013). En conséquence, toutes les variations interannuelles de la phénologie végétale ne s'expliquent pas seulement par des variations pluviométriques, en fonction des concordances ou discordances des épisodes secs et/ou pluvieux au fil des saisons (Herrmann *et al.*, 2005 ; Wessels *et al.*, 2007). Le forçage du NDVI par les pluies passe donc en grande partie par le stockage de l'humidité par les sols (Dorigo *et al.*, 2012). Le déphasage pluie/activité végétale est donc aussi en conséquence dû en partie à la température atmosphérique, qui peut imposer des réactions à court terme durant la période de croissance (Clinton *et al.*, 2014). Les résultats obtenus par Philippon et Fontaine (2001) montrent aussi qu'il existe une relation statistique très significative entre la saison des pluies de juillet-septembre en zone sahélienne et les pluies enregistrées l'année précédente en septembre-novembre en zone guinéenne, suggérant ainsi 'un effet mémoire' inter-saisonnier qui imprime un forçage sur les conditions hydrologiques et végétales.

5.2.2.2. Résultats sur le décalage temporel pluie/NDVI à l'échelle de l'Ouémé supérieur

Une première étape calcule déjà les corrélations linéaires synchrones et asynchrones, année par année, entre les séries pluviométriques et NDVI à une résolution décadaire. L'étude doit ici particulièrement tenir compte du biais intra-saisonnier des séries NDVI qui génère une baisse artificielle des valeurs (due à la nébulosité), et module donc les valeurs des corrélations (figure 5.22).

En moyenne, sur la période 2002-2012, le décalage le plus significatif est de 4 décades ($R = 0,83$), la corrélation demeurant élevée jusque 6 ou 7 décades ($R > 0,65$). Le déphasage est surtout apparent à partir de la 28^{ème} décade (début octobre), en fin de saison des pluies, alors qu'à son début (début avril), l'activité végétale semble réagir très rapidement, de manière

presque synchrone, aux précipitations. La partie précédente avait déjà démontré que les débuts de la saison végétative sont très stables sur la période étudiée, situés en moyenne courant avril, alors que la fin de la saison est plus difficile à déterminer, car a priori très changeante.

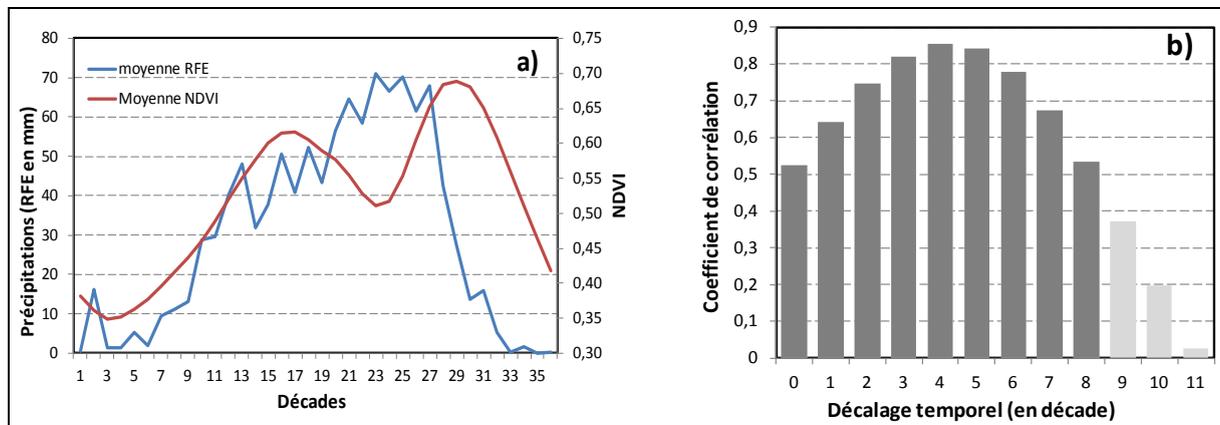
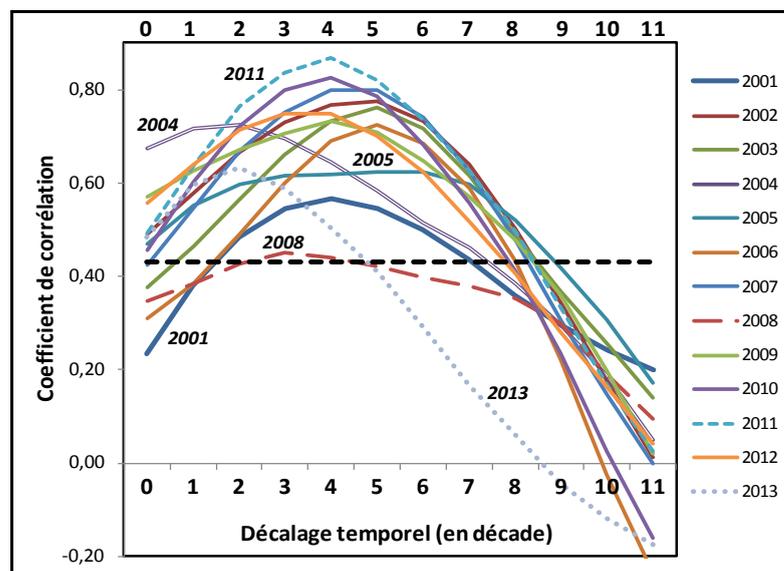


Figure 5.22 : a) Relation saisonnière moyenne entre les précipitations et le NDVI à l'échelle de l'Ouème supérieur (calculé sur la période 2001-2013 grâce aux estimations pluviométriques (RFE, *Rainfall Estimate*) et au NDVI décadaires fournis par le USGS Fews Net Data Portal) ; b) Corrélation linéaire entre les 2 variables, avec un décalage de 0 à 11 décades, où les variations des précipitations précèdent celles du NDVI (les histogrammes en gris foncé indiquent les coefficients significatifs au seuil de 0,99 %).

En Afrique de l'Ouest, l'évolution saisonnière du NDVI passe par trois stades principaux, surtout liés à la réaction des espaces arborés des espaces guinéens et soudaniens (Philippon *et al.*, 2005) : une phase enregistrant une activité photosynthétique élevée (NDVI > 0,55) entre avril et juin vers 5°N, une seconde phase centrée sur septembre et sur 10°N, et une dernière phase en octobre sur le domaine guinéen.

L'étude de chaque année révèle des situations plus particulières de la relation temporelle entre les précipitations et la dynamique végétale. Ainsi, alors que le décalage de 4 décades est bien apparent (avec les exemples de 2010 et 2011), de nombreuses années ne sont pas dans cette situation (figure 5.23) :

Figure 5.23 : Corrélations linéaires entre précipitations (RFE, *Rainfall Estimate*) et NDVI décadaires calculés pour chaque année de la période 2001-2013 (avec un décalage de 0 à 11 décades, où les variations des précipitations précèdent celles du NDVI ; la droite horizontale en pointillé indique les coefficients significatifs au seuil de 0,99 % ; calculé à partir des données fournies par le USGS Fews Net Data Portal).



- En 2004, le meilleur déphasage est de 1 à 2 décades ;
- En 2005, la corrélation reste très élevée et significative entre 2 et 6 décades, signifiant une année bioclimatique très particulière ;
- En 2002, 2006 et 2007, le meilleur décalage est de 5 décades ($0,73 < R < 0,80$) ;
- En 2008, quoique avec un décalage apparent de 3 décades, la relation est faiblement significative ($R = 0,43$) ;
- Du fait de leur biais déjà plusieurs fois évoqué auparavant, les séries NDVI-MODIS de 2001 et 2013 ne peuvent pas être interprétées ici.

Afin de pouvoir juger de la liaison d'ensemble valable pour toute la saison végétative, la corrélation est ensuite définie entre d'une part les précipitations cumulées au cours de l'année et d'autre part, les trois paramètres phénologiques établis en partie 3 (début, durée et fin de la saison de végétation active). Quoique portant sur un échantillon restreint de 11 années (ce qui peut limiter la portée des constats), trois éléments ressortent (figure 5.24) :

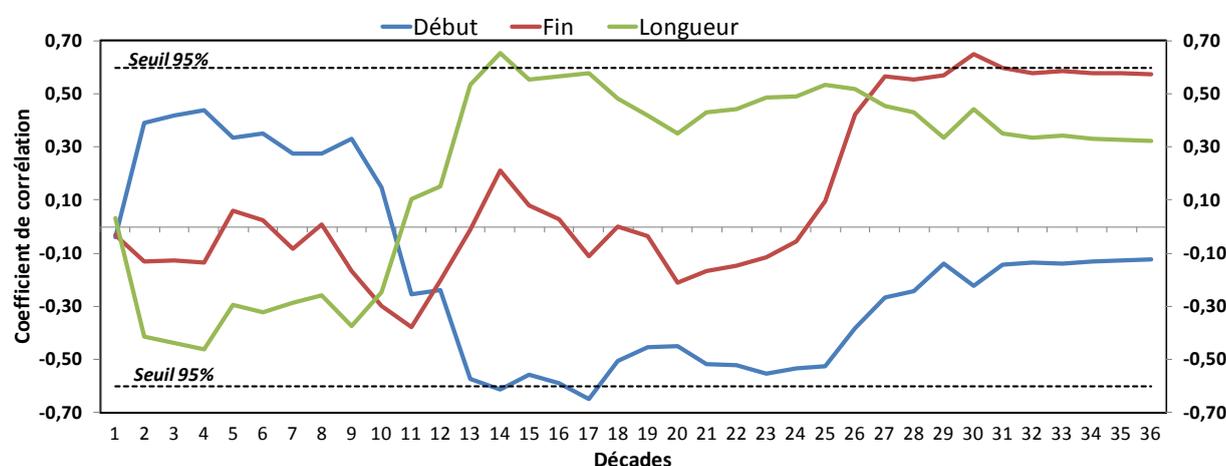


Figure 5.24 : Corrélations linéaires entre d'une part trois paramètres phénologiques (décade de début et de fin de saison végétative, ainsi que sa durée) et d'autre part les précipitations décadales cumulées pour la même année calculées à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012 (les dates phénologiques sont établies à partir du NDVI-eMODIS et calculées sous TIMESAT ; les précipitations correspondent aux estimations RFE ; les pointillées horizontales correspondent au seuil de significativité à 95 %).

- 1) Le début de la saison végétative dans l'Ouémé supérieur est inversement corrélé aux précipitations cumulées enregistrées entre les 13^{ème} et 17^{ème} décades (courant mai) ;
- 2) La durée de la saison végétative est positivement corrélée aux pluies cumulées observées à la 14^{ème} décade (mi mai), élément qui suggère que la longueur de la phase d'activité végétale est surtout sensible aux précipitations enregistrées au démarrage de la phase de croissance ;
- 3) La fin de la saison végétative peut a priori s'expliquer par les précipitations cumulées entre les 27^{ème} et 36^{ème} décades (*i.e.* de fin septembre à fin décembre), cette longue période indiquant des situations diverses sur l'échantillon temporel étudié. Elle indique aussi, en lien avec le constat fait en partie 4, que la fin de saison végétative semble être plus tardive d'au moins une décade entre 200 et 2012, ce qui pourrait donc être lié à des précipitations également plus tardives en fin de saison des pluies.

Les variations de durée de la saison des pluies peuvent impacter les biomes tropicaux, avec des contrastes selon les espèces : une saison plus courte mais plus intense implique par exemple une baisse du couvert herbacé durant la saison sèche, alors que les espèces avec une capacité racinaire supérieure souffriront moins et résisteront jusqu'au prochain épisode (ou réel démarrage de la saison), car pouvant accéder à des ressources en eau encore disponibles plus profondément (Archibald et Scholes, 2007). Les différences de réactions (notamment celle de la fraction d'évaporation) après un épisode pluvieux sont typiquement liées au fait d'interagir avec une végétation annuelle ou bien pérenne (Lohou *et al.*, 2014). Par l'observation dans le domaine d'étude de l'Ouémé, ces auteurs montrent que le contenu en eau du sol avant un épisode pluvieux détermine en grande partie la réponse immédiate en surface (plus bas est le niveau d'humidité du sol, plus haute est la réponse en surface). Ces réactions intenses sont observées au début de la mousson, quand le sol est le plus sec, et semblent relativement cohérentes spatialement, indépendamment de la latitude des sites étudiés.

5.2.3. Synthèse sur les modes de variabilité interannuelle entre NDVI et précipitations

Afin d'identifier des liaisons plus précises et peut-être localisées à l'échelle du bassin de l'Ouémé, une analyse conjointe par SVD des structures spatio-temporelles des champs d'anomalies pluviométriques et du NDVI est calculée. Les quatre premiers modes sont significatifs, et expliquent 75,9 % du total de la covariance entre précipitations et NDVI sur la période 2002-2012. Ils résument 88,4 % de la variance des précipitations et seulement 28,6 % de celle propre au NDVI (tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Synthèse de la variance expliquée (en %) par les quatre premiers modes obtenus à l'issue d'une SVD (Singular Value Decomposition) calculée entre les anomalies pluviométriques mensuelles et celles du NDVI SPOT-VGT à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012.

	Précipitations	NDVI
PC1	73,2	2,5
PC2	5,8	13,2
PC3	3,9	10,9
PC4	5,5	2,0
Total	88,4	28,6

Cette faible proportion d'information expliquée pour le NDVI peut notamment s'expliquer par deux éléments : 1) la présence de la signature du biais provenant de la nébulosité, qui diminue les modes cohérents discriminés par l'approche factorielle ; 2) l'existence de réactions et fonctionnements très localisés de la végétation, qu'il est difficile d'isoler à partir d'une résolution mensuelle et kilométrique.

5.2.3.1. Le premier mode de la SVD

Le premier mode explique 73,2 % de la variance des précipitations et seulement 2,53 % de la variabilité du NDVI (avec une corrélation linéaire de 0,76 entre les deux chroniques). Il discrimine en fait surtout les épisodes extrêmes des liaisons pluies/NDVI enregistrés sur la période 2002-2012 (figure 5.25). Sur le plan pluviométrique, il oppose le domaine ouest du bassin à celui situé au nord-est. La corrélation avec le champ du NDVI est surtout visible dans la partie centrale et sud-ouest du bassin, c'est-à-dire plutôt des espaces forestiers ou

périforestiers enregistrant un déboisement rapide (entre Bassilia et Djougou) et une conversion de l'occupation du sol pour des activités agricoles (cf partie 3). Les épisodes identifiés sur cette première composante de la SVD représentent ceux où les précipitations ont donc eu théoriquement un impact significatif sur l'activité végétale de ces sous-espaces, cette sensibilité pouvant donc être accrue du fait justement de la mixité de l'occupation du sol (forêt, savane, champs) et de la présence augmentée de plantes annuelles (au détriment d'espèces pérennes). Ce mode ne représente cependant que 2,5 % de la variance du NDVI, ce qui indique que les variations caractérisées ici sont ponctuelles et/ou épisodiques, ce premier mode statistique de variabilité des précipitations n'ayant apparemment qu'une faible liaison avec le NDVI.

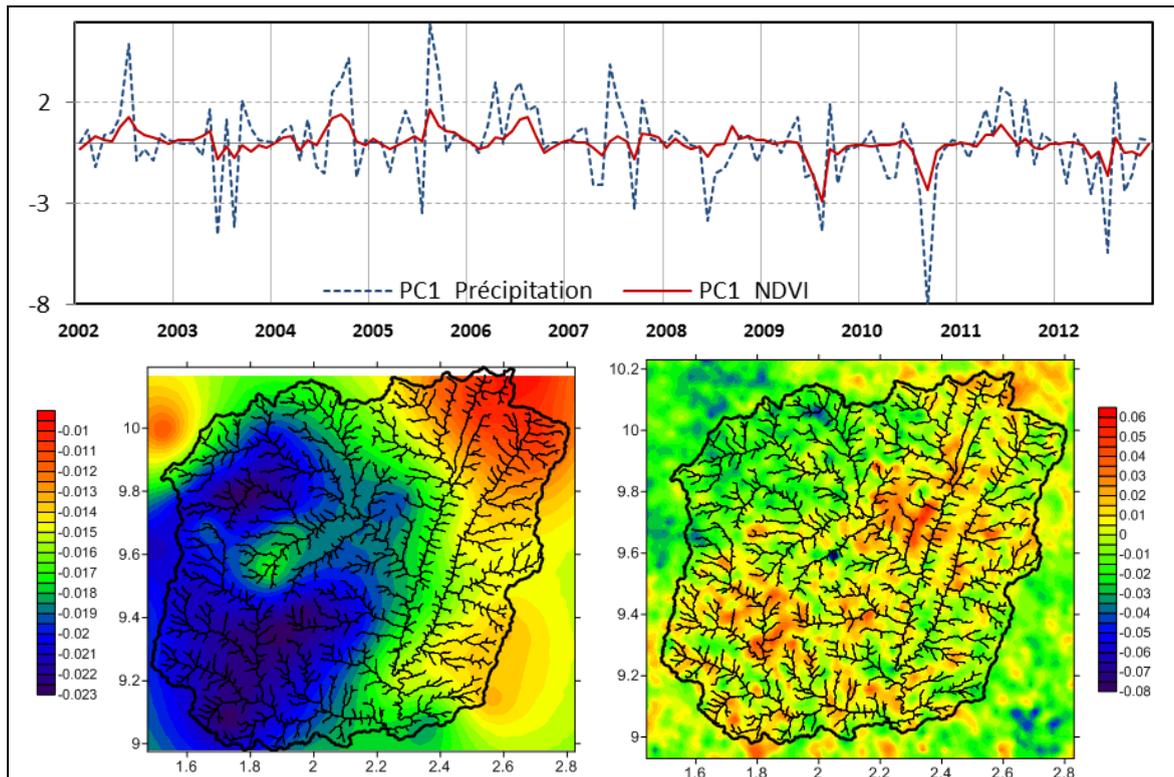


Figure 5.25 : Résultats spatio-temporels issus du premier mode factoriel (PC1) obtenu par SVD calculée entre les anomalies pluviométriques mensuelles (73,2 % de la variance expliquée) et celles du NDVI (2,5 % de la variance) calculées sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : en haut, la comparaison des coefficients temporels des variations pluviométriques et du NDVI ; en bas, les coefficients spatiaux des précipitations (carte de gauche) et du NDVI (carte de droite).

Sans calculer des composites à partir de ce mode (comme cela a été abordé précédemment pour l'analyse de la variabilité spatio-temporelle du NDVI ; cf partie 4), l'examen de deux situations opposées extrêmes (2005 et 2009) caractérisées par ce mode factoriel est éloquent : alors que le cumul régional atteint 1116 mm en 2005 (*i.e.* au dessous de la normale régionale), il dépasse 1266 mm en 2009, avec par ailleurs respectivement 80 et 100 événements pluvieux importants (données fournies par les rapports de campagne AMMA-Catch). L'observatoire régional indique également que la saison des pluies 2005 n'a cumulé que 874 mm (soit uniquement 78,3 % des pluies annuelles), contre 1182 mm en 2009 (soit 93,3 % des pluies de l'année). A la fin de la saison des pluies 2009, l'excédent pluviométrique dépasse 200 mm par rapport à la moyenne calculée sur la période de référence 'humide' 1950 - 1969, et il équivaut à un écart positif de 350 mm par rapport à la période de référence 'sèche' 1970 - 1990 (d'après le rapport de campagne 2009 de AMMA-Catch). La saison 2009 est comparable à

l'année 2003 (elle est d'ailleurs également repérée sur le premier mode de la SVD, avec deux pics de valeurs négatives), qui est l'année pluvieuse de référence à l'échelle régionale pour cette décennie, avec un cumul saisonnier de 1455 mm.

Ces deux années montrent également très nettement la structure spatiale synthétisée par le premier mode de la SVD, avec une opposition systématique entre les parties ouest et nord-est du bassin, aussi bien en année sèche qu'humide (figure 5.26).

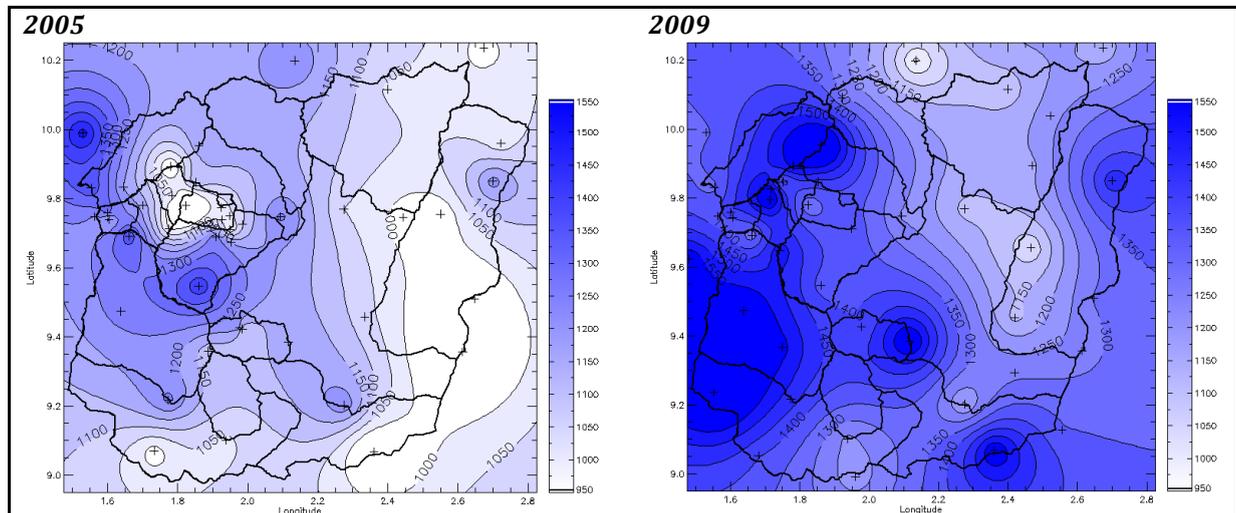


Figure 5.26 : Comparaison entre les cumuls pluviométriques interpolés pour une année plutôt en dessous de la moyenne régionale, l'année 2005 (carte de gauche) et une année au-dessus de la moyenne, l'année 2009 (carte de droite), à l'échelle du bassin de l'Ouémé supérieur (documents issus des rapports de campagne 2005 et 2009 de l'observatoire AMMA-Catch).

Cela peut être en partie dû à la répartition spatiale du réseau, qui impacte la construction et le calcul des champs interpolés. Mais c'est aussi cependant un mode pluviométrique existant lors des phases pluviométriques extrêmes, du moins sur la période étudiée, mode qui correspond à plus de 73 % de la variance des anomalies pluviométrique régionales.

5.2.3.2. Le second mode de la SVD

Ce second mode n'équivaut qu'à 8,8 % de la variance des précipitations, mais en revanche, à plus de 13,2 % de celle du NDVI (soit beaucoup plus que le précédent). Il indique une tendance significative (au seuil de 95 %) à la baisse de la chronique factorielle associée au NDVI, mais pas pour celle des précipitations (figure 5.27). Il correspond surtout à une opposition entre NW et NE sur le plan des précipitations, et à la variabilité du NDVI des périphéries ouest et est du bassin de l'Ouémé supérieur.

En interprétant cela au sens des variations observées des précipitations et du NDVI, ce mode traduit en fait une tendance à la hausse du NDVI (car les poids factoriels négatifs de ce mode correspondent à des anomalies positives du NDVI), révélant deux sous-périodes sur 2002-2012 : une baisse du NDVI entre 2002 et 2007, suivie d'une augmentation depuis.

Si l'on prend du recul temporel et que l'on met cela en perspective des travaux menés par Anyamba *et al.* (2014) sur la tendance des pluies et du NDVI (via les séries NOAA-AVHRR) à l'échelle d'un indice synthétique sahélien et sur la période 1983-2012, on s'aperçoit que la tendance observée dans l'Ouémé supérieur est globalement la même que celle identifiée pour l'ensemble du Sahel (figure 5.28).

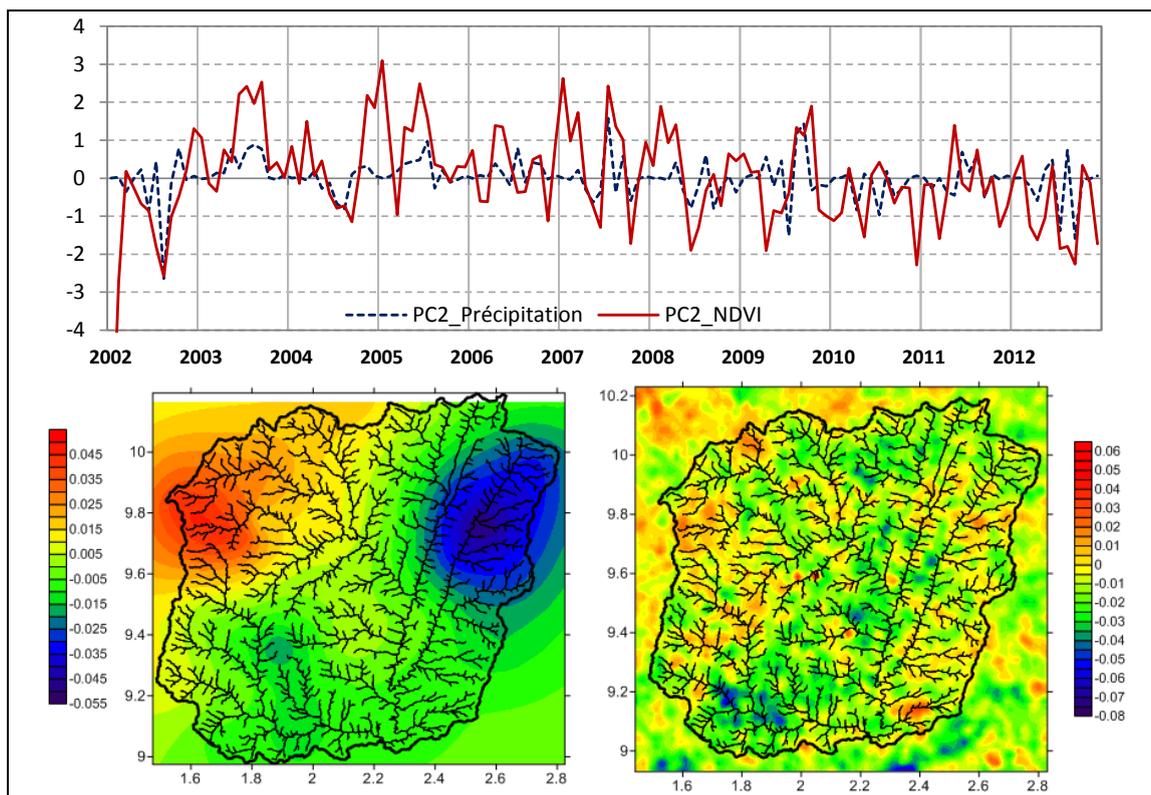


Figure 5.27: Idem que pour la figure 5.25, mais pour le deuxième mode factoriel (PC2), avec respectivement 5,8 % de la variance expliquée pour les précipitations et 13,2 % pour le NDVI.

Ces résultats indiquent que les précipitations et le NDVI du domaine sahélien ont surtout enregistré une hausse entre 1983 et la fin des années 1990, d’autres travaux suivants plus particulièrement l’impact de ces changements sur la couverture arborée sahélienne (Horion *et al.*, 2014). Depuis, c’est plutôt une phase de stabilité, même si on peut distinguer deux sous-périodes cohérentes à l’échelle de l’Ouémé.

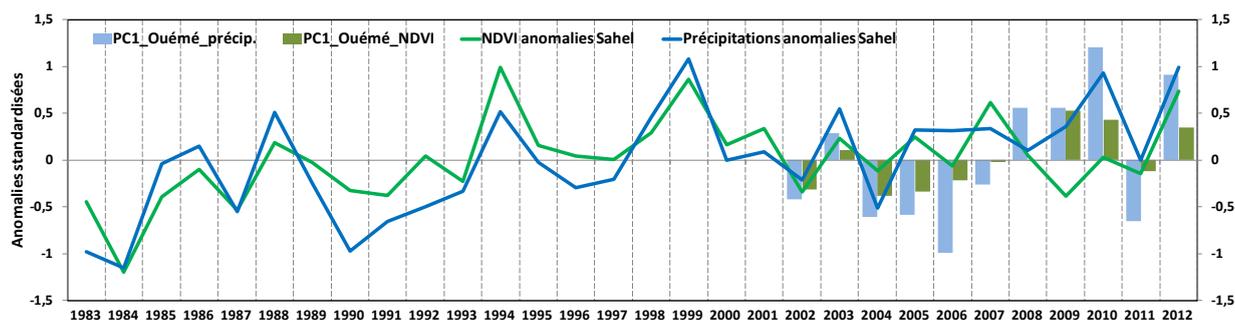


Figure 5.28 : Evolution des anomalies annuelles standardisées entre 1983 et 2012 pour deux indices définis à l’échelle du domaine sahélien (données fournies par Anyamba *et al.*, 2014) : un indice pluviométrique et un indice du NDVI ; la comparaison est établie sur la période 2002-2012 avec les résultats issus du premier mode de la SVD calculée entre précipitations et NDVI à l’échelle de l’Ouémé supérieur, les valeurs factorielles ayant été ici multipliées par (-1) pour faciliter la comparaison.

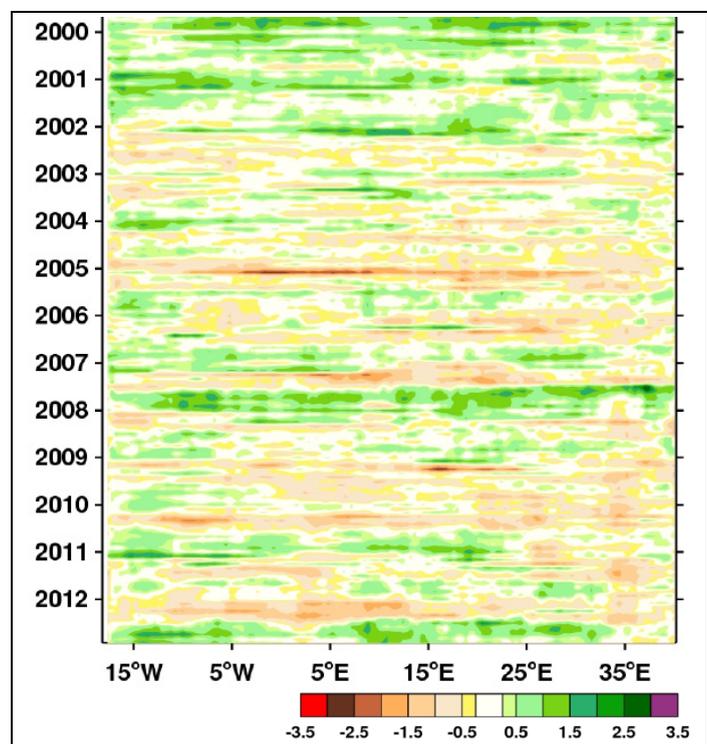
Sur le plan pluviométrique, Anyamba *et al.* (2014) constatent qu’après une période sèche dans la décennie 1980, suivie de deux décennies aux conditions beaucoup plus favorales (notamment pour l’activité végétale), la période entre 2003 et 2012 correspond à des conditions plus normales, alternant séquences sèches et humides, en particulier la séquence

sèche prononcée de 2004-2005, et les épisodes humides de 2007 et 2012. Mais les phases de baisse du NDVI sont aussi interprétées comme associées à des périodes de dégradation des états de surface, surtout forestiers, et pas obligatoirement à des séquences d'anomalies pluviométriques négatives (Wessels *et al.*, 2007).

On observe donc une bonne concordance entre Ouème supérieur et variations d'ensemble du domaine sahélien, sauf pour quelques années, par exemple 2006 et surtout 2007. Très positives cette année dans tous le domaine sahélien (entre 15°W et 35°W), les anomalies enregistrées à l'échelle de l'Ouémé témoignent plutôt d'une situation intermédiaire (figures 5.28 et 5.29). Si l'on revient à la structure pluviométrique spatiale produite par le second mode de la SVD, il semble que cette situation corresponde surtout à la partie nord du bassin, c'est-à-dire celle la plus directement au contact des influences sahéliennes. Par ailleurs, l'année 2007 marque aussi une transtion nette dans les variations thermiques régionales, avec des températures plus fraîches que les années antérieures ou postérieures (figure 5.5). Cet élément rappelle que les variations pluviométriques ne sont pas suffisantes pour comprendre toute la variabilité du NDVI, donc la variabilité de l'activité végétale.

Figure 5.29 : Diagramme temps-longitude des anomalies du NDVI mensuel entre 2000 et 2012 sur un transect sahélien moyen 10°-20°N, et compris entre 18°W et 40°E (les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1981-2012, à partir des données GIMMS version 3, appelées aussi NDVI3g, provenant de NOAA-AVHRR ; adapté d'après un document de Anyamba *et al.*, 2014).

Pour rappel, le bassin de l'Ouémé supérieur se situe vers 2°E.



5.2.3.3. Le troisième mode de la SVD

Il traduit respectivement 3,9 et 10,9 % de la variance totale des précipitations et du NDVI. Il correspond plutôt à une variation d'ensemble du NDVI à l'échelle de tout le bassin, même si les valeurs les plus élevées sont surtout celles observées à proximité du réseau hydrographique. Traduisant également la même tendance que celle observée juste avant (*i.e.* une tendance négative des valeurs factorielles du NDVI, qui correspond concrètement à une hausse des anomalies du NDVI sur la période d'étude), on peut interpréter plus spécifiquement ce troisième mode de la SVD comme la synthèse des évolutions des espaces arborés.

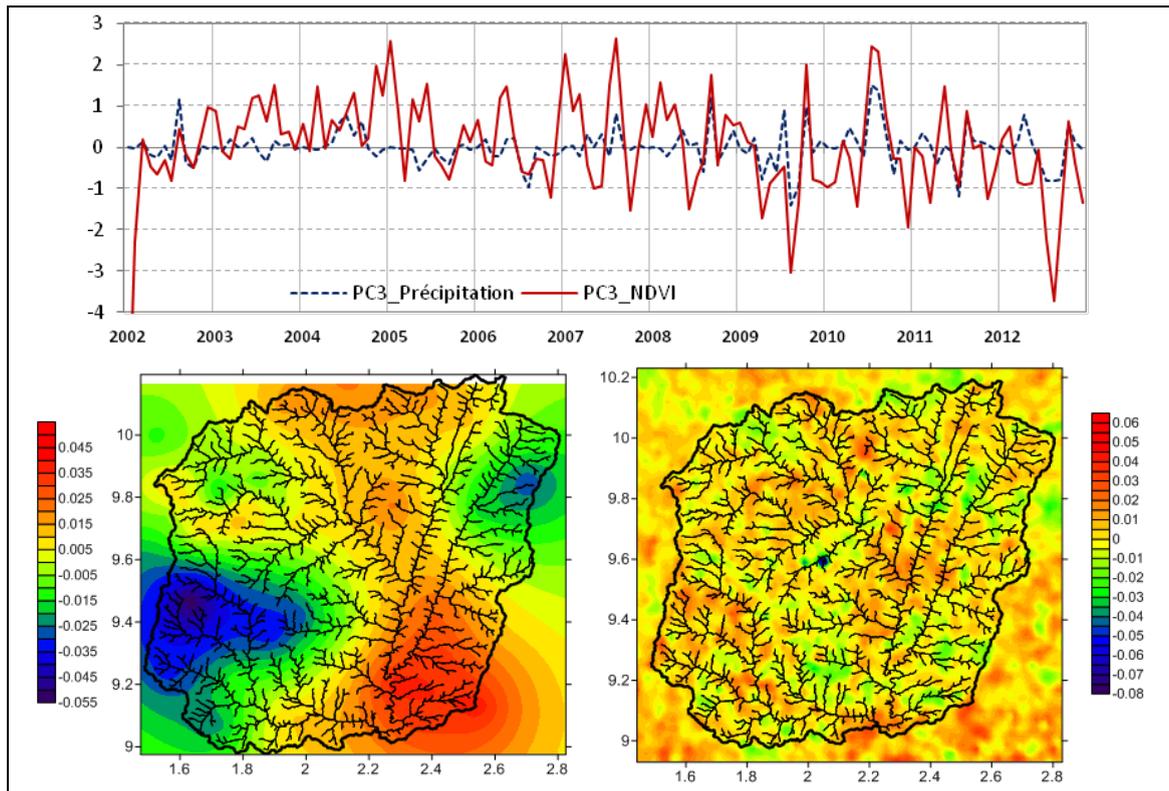


Figure 5.30 : Idem que pour la figure 5.25, mais pour le troisième mode factoriel (PC3), avec respectivement 3,9 % de la variance expliquée pour les précipitations et 10,9 % pour le NDVI.

On observe ainsi que les principales variations du NDVI sont ici corollaires de variations pluviométriques opposées entre le SW (et moins le NE) du bassin et toute la partie centrale du nord au sud. Sans pouvoir l'analyser plus en détail ici, ce mode traduit peut-être a priori d'autres types d'anomalies pluviométriques imposées sur le bassin versant par des mécanismes climatiques différents des précédents, influençant surtout la partie méridionale du bassin. Il faut aussi garder à l'esprit que l'approche factorielle de type SVD a également tendance à discriminer au fur et à mesure des modes spatiaux de nature orthogonale, ce qui aboutit souvent à des structurations spatiales qui n'ont pas obligatoirement des explications physiques ou environnementales.

5.2.3.4. Le quatrième mode de la SVD

Même s'il traduit encore 5,5 % de la variance expliquée pour les précipitations, il ne correspond plus qu'à 2 % de celle du NDVI. La structuration temporelle de ce mode est difficile à analyser, caractérisant surtout des épisodes ponctuels en 2002, 2004, 2007, 2008 et 2012 (figure 5.31).

Il correspond à une opposition méridienne très nette des variations pluviométriques, surtout associée à des variations du NDVI dans toute la partie centrale du bassin. A ce stade, il n'est pas possible de certifier que ce mode est bien associé à une représentation de processus et d'interactions environnementales, plutôt qu'à la simple représentation d'un artefact (par exemple celui imposé par la nébulosité, qui covarie systématiquement avec les précipitations).

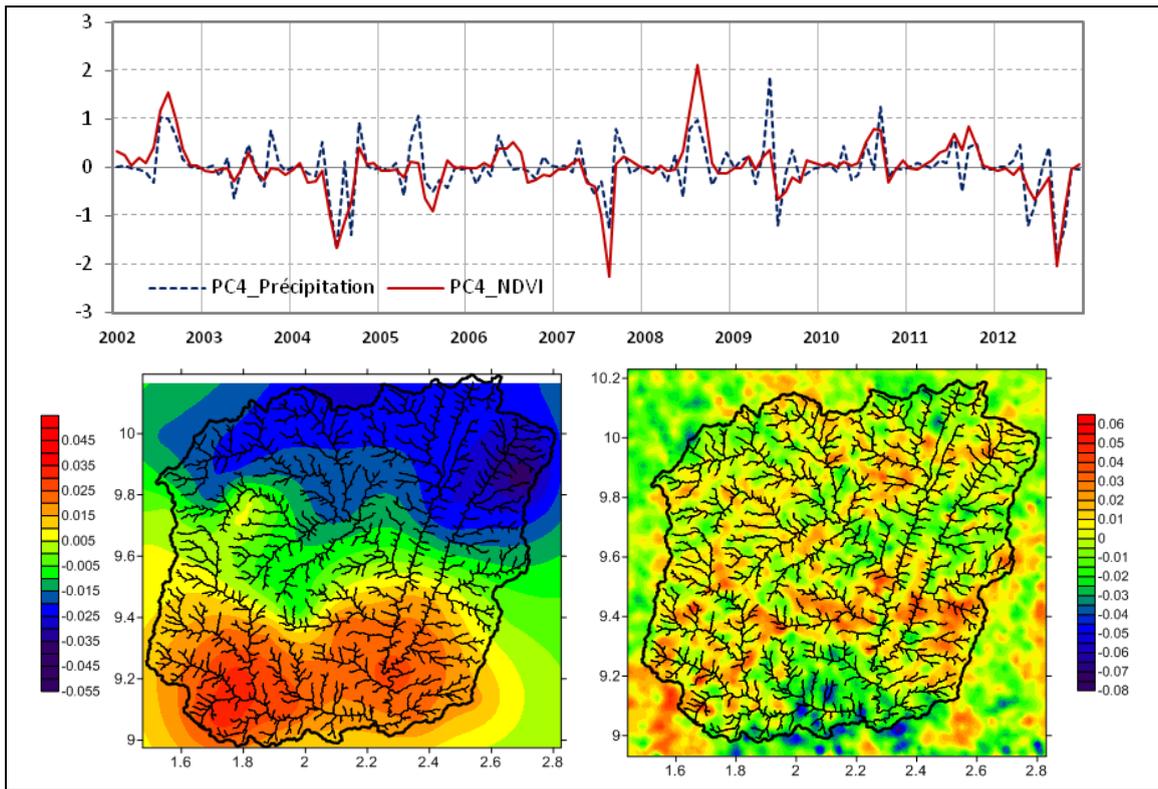


Figure 5.31 : Idem que pour la figure 5.25, mais pour le quatrième mode factoriel (PC4), avec respectivement 5,5 % de la variance expliquée pour les précipitations et 2 % pour le NDVI.

5.3. Conclusion de la partie 5

Les résultats obtenus dans cette partie grâce aux données de la télédétection et à leur croisement avec les données climatiques indiquent que la zone d'étude de l'Ouémé supérieur suit la tendance générale observée à l'échelle sahélienne sur la période 2002-2012, c'est-à-dire plutôt des conditions climatiques favorables à l'activité végétale. Mais sur cette décennie, il n'y a pas de tendance des pluies, mais plutôt une succession de phases sèches et humides, qui induisent finalement une stabilité interannuelle du NDVI (donc a priori de la productivité végétale induite), rejoignant ainsi les conclusions d'Anyamba *et al.* (2014) valables à l'échelle ouest-africaine, et malgré quelques spécificités interannuelles observées régionalement. Cela confirme également les résultats de Boschetti *et al.* (2012) qui observent plutôt une tendance générale à un verdissement sur la période 1998-2010 et des précipitations stables dans le nord-ouest du Bénin, mais pas plus au sud, à l'échelle de l'Ouémé Supérieur. Mais l'approche d'ensemble doit aussi tenir compte d'une part, de la hausse générale des températures (même si la période 2002-2012 enregistre de fortes amplitudes des anomalies thermiques régionales) et d'autre part, de toutes les conversions d'utilisation des espaces arborés qui modifient aussi radicalement les interactions biogéophysiques (et donc l'étude du NDVI comme un marqueur interannuel stable de la relation linéaire entre climat et activité végétale). Sur la période étudiée, l'année 2007 apparaît comme une année charnière, n'enregistrant pas obligatoirement des variations climatiques ou bioclimatiques de la même intensité que celles observées à l'échelle sahélienne.

L'observatoire AMMA-Catch, via les séries pluviométriques disponibles, favorise évidemment l'analyse très précise des variations pluviométriques du bassin. La confrontation avec plusieurs types d'estimations satellitaires (RFE, TRMM) montre de très bonnes performances pour établir des cumuls mensuels et saisonniers à l'échelle du bassin, et même avec une approche stationnelle, sachant qu'on peut observer des estimations imparfaites pour les mois les plus pluvieux. Le déphasage moyen de 4 décades observé entre les précipitations et la réaction du NDVI est surtout détecté à partir de début octobre, en fin de saison des pluies, alors qu'en début de saison, en avril, l'activité végétale réagit de manière quasi synchrone avec les précipitations. Le début de la saison végétative dans l'Ouémé supérieur est inversement corrélé aux précipitations cumulées courant mai, tandis que sa durée est en moyenne positivement corrélée aux pluies cumulées mi mai, et que sa fin correspond essentiellement à la période allant de fin septembre à fin décembre. Mais il faudrait idéalement pouvoir aussi intégrer la composante liée au sol pour comprendre mieux cette variabilité phénologique régionale. C'est d'ailleurs l'objectif engagé dans le programme en cours ALMIP-2, pour préciser ces relations biogéophysiques à des échelles plus fines, notamment en tenant compte des épisodes pluvieux journaliers et de la réactivité végétale selon la mosaïque fine des états de surface.

Conclusion générale et perspectives

Les principaux éléments déterminés à l'échelle de l'Ouémé supérieur ?

Plusieurs points analysés et décrits dans ce travail permettent de répondre aux principales questions initiales et aux objectifs scientifiques qui étaient visés :

Question 1 : *quelles sont les modifications des états de surface récemment observées ?*

En s'appuyant sur l'analyse diachronique d'images LANDSAT ETM+ sélectionnées en 2003 et 2012, et prétraitées pour corriger l'essentiel des biais potentiels, les techniques de classification supervisée indiquent une augmentation rapide des zones de cultures, avec une accélération de la dégradation de la végétation forestière, évolutions qui étaient déjà engagées depuis les années 1980-90 au profit d'espaces agricoles (champs et jachère). L'essentiel des espaces fortement évolutifs se situe surtout en périphérie des grands espaces forestiers (les plus petits ayant en grande partie disparu), donnant lieu à des mosaïques paysagères souvent complexes à discriminer par télédétection et à analyser en termes de composition. Les bilans spatialisés indiquent cependant que les espaces forestiers (surtout les plus denses, normalement protégées) perdent plus de 16 % sur la période 2003-2012, les espaces cultivés augmentant d'environ 25 %, alors que les superficies de jachère diminuent et que les savanes arbustives augmentent.

Sur le plan méthodologique, ces bilans proviennent d'une approche uniquement diachronique, en restant mono-capteur et à partir d'une seule résolution spatiale. En outre, même si de nombreuses vérifications analytiques ont été réalisées, aucune validation *in situ* n'est pour le moment réalisée ou disponible afin d'affiner et préciser ces conclusions.

Question 2 : *Comment valoriser les différentes données de la télédétection satellitaire pour diagnostiquer la variabilité bioclimatique de la végétation ?*

Les comparaisons entre les différents produits satellitaires retenus ici montrent des différences notables entre eux, même si les principales signatures de l'activité végétale sont discriminées. Les singularités sont surtout apparentes en saison des pluies, mais aussi lors des différentes phénophases (début, coeur et fin de saison de végétation). Le principal artefact est surtout observé durant le mois d'août, à cause de la présence nuageuse : le recours à MSG-SEVIRI ou ECOCLIMAP-2 corrige en partie ce problème, mais les séries interannuelles deviennent alors très courtes pour envisager une expertise bioclimatique robuste. A l'échelle du bassin versant, l'espace situé vers 9°N enregistre les biais les plus importants dus à la nébulosité. Le NDVI fournit une signature saisonnière plus bruitée que celle du LAI. L'utilisation d'un indice comme l'EVI à partir des données MODIS améliore le filtrage du biais observé avec le NDVI, et devient donc un complément très utile.

Cependant, les produits MODIS, même ceux a priori filtrés et corrigés, conservent encore plusieurs biais importants (du moins, à l'échelle du domaine étudié), comme c'est typiquement le cas pour les années 2001 et 2013 dont les séries ne sont pas ici exploitables. Les séries SPOT-VGT gardent donc encore un intérêt élevé pour les études bioclimatiques, à condition de tenir compte des biais des séries et d'éliminer initialement les données repérées comme totalement fausses.

Question 3 : *Comment mieux comprendre les interactions à l'interface climat/végétation, et interpréter certaines variations bioclimatiques intra- et interannuelles en fonction des principaux états de surface ?*

L'analyse de la saisonnalité montre deux moments importants qui peuvent enregistrer de fortes variations d'une année à l'autre : fin mai et fin septembre (ces périodes correspondant aussi à des présences de biais atmosphériques élevées). L'analyse statistique du NDVI SPOT-VGT sur la période 2002-2012 suggère que l'activité photosynthétique est significativement dépendante des trois principaux modes d'occupation du sol qui ont été analysés : les espaces forestiers, les savanes boisées et les espaces agricoles (ou en cours de conversion). Les espaces cultivés enregistrent les variations interannuelles de NDVI les plus élevées, mais il y a aussi des contrastes importants au sein des espaces forestiers, avec une signature interannuelle spécifique correspondant aux espaces forestiers riverains des cours d'eau. Le démarrage et la durée de la saison végétative sont corrélés aux précipitations cumulées jusqu'en mai, tandis que sa fin est tributaire des pluies cumulées entre fin septembre et fin décembre. Le retard de 4 décades observé entre les variations pluviométriques et celles du NDVI est conforme à ce qui est démontré par ailleurs dans cette sous-région ouest-africaine.

Mais l'analyse phénologique indique que sur la période d'étude 2002-2012, la fin de la saison végétative a tendance à se décaler d'environ 10 jours. Mais il n'y a pas en parallèle de tendance des pluies, plutôt une succession de phases sèches et humides. Cette période enregistre aussi de fortes amplitudes des anomalies thermiques régionales, avec l'année 2007 qui marque une coupure au cours de cette décennie, aussi bien sur le plan des anomalies thermiques que pluviométriques, en se distinguant également des variations observées plus largement à l'échelle du domaine sahélien.

Quelles sont les questions auxquelles il est encore difficile de répondre ?

L'étude menée ici reste préliminaire et partielle, car essentiellement basée sur le NDVI, avec une approche statistique descriptive et factorielle analysant la variabilité des signatures saisonnières et interannuelles. Malgré la qualité intrinsèque de ces bilans spatialisés, il faut compléter cette première approche puisque les conditions climatiques (pluvio-thermiques notamment) et environnementales semblent évoluer très significativement avant (*i.e.* durant les années 1950-2000) et après (*i.e.* sur les périodes futures simulées) notre courte période d'étude 2002-2012, qui elle-même enregistre des variations importantes. L'analyse doit aussi privilégier dans une prochaine étape l'analyse croisée avec l'ensemble des séries climatiques disponibles régionalement grâce au réseau de mesures constitué au cours des deux dernières décennies dans le cadre de l'Observatoire AMMA-Catch. Il faudra particulièrement détailler, à l'échelle journalière, le cas des épisodes climatiques extrêmes (aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies) et le déphasage associé des dynamiques végétales des formations naturelles et de la mosaïque forêt/savane/espaces agricoles. L'analyse plus précise des liens entre végétation et pluviométrie doit aussi permettre de mieux discriminer (et supprimer) le poids de la nébulosité dans les signatures radiométriques des indices de végétation.

Par ailleurs, ces travaux se situent à l'interface d'une question complexe, présente dans beaucoup de territoires tropicaux : les modifications des états de surface qui s'opèrent actuellement au Bénin, et en particulier dans l'Oumé supérieur, sont en partie des conséquences des variations et changements climatiques. En retour, les modifications d'occupations du sol sont surtout dues à court et moyen terme aux choix et pressions anthropiques, pour une conversion vers l'agriculture, modifiant ainsi le climat régional. Ainsi, dans le cadre de ces changements à la fois climatiques et environnementaux, Paeth *et al.*

(2009) pensent que finalement, il est aussi important de préserver les états de surface tropicaux en fortes mutations pour lutter contre le changement climatique que de chercher à réduire les gaz à effets de serre ... Etant donné les tendances observées pour l'Ouémé supérieur, la protection des espaces forestiers du Bénin devrait donc peut-être être renforcées. Mais il est encore difficile de déterminer dans ces variations interannuelles et intra-saisonnières au niveau régional et en fonction des principales formations végétales, celles typiquement naturelles ou bien alors, surtout dues à l'anthropisation, en particulier au travers le changement d'utilisation des sols. Et les marges d'incertitude des résultats provenant de la modélisation numérique sont encore relativement élevées à ce sujet. Ce sera le cas d'ailleurs tant que la modélisation des trajectoires environnementales et celle du climat ne seront pas menées conjointement, en tenant compte des influences anthropiques. A l'échelle régionale de l'Ouémé, c'est l'objectif du programme en cours ALMIP-2, qui intègre en particulier la qualité et fonctionnalité des sols, les flux de surface ainsi que les processus hydrologiques.

Quelles perspectives pour de prochains projets et analyses ?

Plusieurs points pourront être abordés rapidement, car les données et les techniques sont disponibles :

- **Une meilleure valorisation de données collectées dans le cadre de l'Observatoire AMMA-Catch, en particulier les séries pluviométriques quotidiennes**, pour pouvoir étudier la variabilité climatique et les liaisons pluie-végétation à court terme. L'étude des épisodes extrêmes (séquences sèches, séquences pluvieuses, cumuls anormaux) apporterait en particulier une expertise plus précise sur la temporalité de ces liaisons et leurs impacts sur la saison végétative ; cela devrait ainsi participer aux actions en cours du programme ALMIP-2 qui favorise cette approche temporelle. Ces analyses seront donc plus en lien avec la capacité de résilience des états de surface à certains seuils et anomalies pluviométriques. Elles amélioreront aussi la connaissance des couplages entre surface et atmosphère, en particulier ceux qui influencent les dynamiques hydro-écologiques régionales et locales en fonction de l'occupation du sol (forêts/savanes/mosaïques agricoles).
- **Une évaluation de la qualité et des taux d'erreur des estimations pluviométriques régionales obtenues par satellite**, aussi bien en termes de cumuls (tri-horaires, journaliers, mensuels et annuels) que pour l'étude de la structuration spatiale des précipitations. La priorité pourrait être donnée aux TRMM (qui ont montré une bonne efficacité à l'échelle de l'Ouémé) et pourra ainsi peut-être compléter les analyses réalisées dans le cadre du programme *Ground Validation* (lié à TRMM) basés sur des sites d'observation tropicaux mais souvent, non africains et sans profondeur temporelle et analyse climatologique associée (comme c'est le cas pour les séries provenant de AMMA-Catch).

D'autres points nécessiteront plus de développements méthodologiques et conceptuels :

- **Développer des techniques de fusions multi-capteurs et multi-résolutions de données issues de la télédétection**, objectif qui avait été visé dans un premier temps dans cette thèse (mais qui a dû être repoussé car nécessitant d'avoir déjà un diagnostic plus clair des relations climat/végétation à l'échelle régionale). Ces analyses favoriseront une expertise à haute résolution spatiale et temporelle des changements d'occupation du sol, en pouvant les analyser plus facilement avec les variations bioclimatiques saisonnières et interannuelles. L'analyse plus précise de sites d'étude (par exemple sujets à une forte conversion actuelle, entre forêt, jachère et agriculture) favorisera la définition d'expertises

moins générales que celles obtenues dans cette thèse, souvent valables à l'échelle de tout le bassin de l'Ouémé supérieur.

- **Si la problématique centrale des prochains travaux doit mieux intégrer la prise en compte des changements d'état de surface naturel et d'origine anthropique**, l'étude envisagée doit donc pouvoir intégrer des données provenant des modes d'utilisation du sol, et des cadastres agricoles, éléments peu évident à obtenir de manière simple et rapide à l'échelle de site d'étude tropicaux, et notamment sans passer par des reconnaissances de terrain. Les travaux associant télédétection, données socio-économiques et environnementales sont encore finalement peu nombreux à l'échelle du domaine tropical africain, surtout pour l'étude des évolutions agricoles, alors qu'ils sont beaucoup plus courant en Amérique du Sud ou en Asie.

Plus largement, sur le plan personnel, mon projet est aussi évidemment de pouvoir développer et adapter l'ensemble des méthodes et connaissances acquises durant cette thèse à des terrains d'étude au Vietnam, en lien avec mon université d'appartenance, où les problématiques d'études environnementales et tropicales comportent de nombreux points communs, et pour lesquelles la télédétection peut apporter de nombreuses solutions.

Références bibliographiques

- Abedini M., Said M. A. M. et Ahmad F., 2012** : Clustering Approach on Land Use Land Cover Classification of Landsat TM Over Ulu Kinta Catchment. *World Applied Sciences Journal*, 17 (7), 809-817.
- Adam K. S. et Boko M., 1993** : Le Bénin - Nouvelle édition mise à jour. *Les Editions du Flamboyant/EDICEF*, 95 pages.
- Adomou A. C., 2005** : Vegetation patterns and environmental gradients in Benin: Implications for biogeography and conservation. *PhD thesis*, Wageningen University, Wageningen (the Netherlands), 150 pages.
- Ali A. et Lebel T., 2009** : The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, Volume 29, Issue 12, pages 1705-1714.
- Ali A., 2010** : Variabilité et changements du climat au Sahel : ce que l'observation nous apprend sur la situation actuelle. *Grain de sel*, 49, 13-14.
- Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., Mc-Dowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J. H., Allard G., Running S. W., Semerci A. et Cobb N., 2010** : A global overview of drought and heat induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, Volume 259, Issue 4, Pages 660–684.
- Andela N., Liu Y. Y., van Dijk A. I. J. M., de Jeu R. A. M. et McVicar T. R., 2013** : Global changes in dryland vegetation dynamics (1988–2008) assessed by satellite remote sensing: comparing a new passive microwave vegetation density record with reflective greenness data. *Biogeosciences*, 10, 6657-6676,
- Anim D. O., Kabo-bah A. T., Nkrumah P. N. et Murava R. T., 2013** : Evaluation of NDVI Using SPOT-5 Satellite Data for Northern Ghana. *Environmental Management and Sustainable Development*, 2 (1), 2164-7682.
- Anyamba A. et Tucker C. J., 2005** : Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 63, 596-614.
- Anyamba A., Small J. L., Tucker C. J. et Pak E. W., 2014** : Thirty-two years of Sahelian zone growing season non-stationary NDVI3g patterns and trends. *Remote Sensing*, 6, 3101-3122.
- Archibald S. et Scholes R. J., 2007** : Leaf green-up in a semi-arid African savanna-separating tree and grass responses to environmental cues. *Journal of Vegetation Science*, 18 (4), 583-594.
- Bannari A., Morina D., Bonna F. et Huete A. R., 2009** : A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13 (1-2), 95-120.
- Barbosa H. A., 2011** : EUMETCast near real-time data and products derived from MSG and Metop for meteorological and environmental applications. *The XVth Brazilian Symposium of Remote Sensing (SBSR)*, Curitiba, Brazil.
- Bartholomé E., Baret F., Bicheron P., Borstlap G., Bydekerke L., Combal B., Derwae J., Geiger B., Gontier E., Grégoire J.-M., Hagolle O., Jacobs T., Leroy M., Piccard I., Samain O. et Roey T. V., 2006** : VGT 4 Africa user manual: First edition. © *European Communities*, EUR 22344 EN, Luxembourg, 268 pages.
- Bégué A., Vintrou E., Ruelland D., Claden M. et Dessay N., 2011** : Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global environmental change*, 21 (2), 413-420.
- Bel C., 2010** : Etablissement d'une carte d'occupation du sol et étude de la dynamique de la végétation. *Rapport de stage de master*, LTHE, 35 p.
- Bigot S., 2004** : Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales - L'exemple de la Côte d'Ivoire. *HDR*, Université Lille 1 (USTL), 399 pages.

- Bigot S., Brou T., Oszwald Y., Diedhiou A. et Houndenou C., 2005a** : Facteurs d'explication de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16, 5-13.
- Bigot S., Zin I. et Diedhiou A., 2005b** : Apport de données de HRV de Spot pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin). *Téledétection*, 4(4), 339-353.
- Björnsson H. et Venegas S. A., 1997** : A manual for EOF and SVD. Analyses of Climatic Data, *Centre for Climate and Global Change Research*, McGill University.
- Bobée C., Ottlé C., Maignan F., de Noblet-Ducoudré N., Maugis P., Lézine A.-M. et Ndiaye M., 2012** : Analysis of vegetation seasonality in Sahelian environments using MODIS LAI, in association with land cover and rainfall. *Journal of Arid Environments*, 84, 38-50.
- Bock O., Guichard F., Meynadier R., Gervois S., Agustí-Panareda A., Beljaars A., Boone A., Nuret M., Redelsperger J.-L. et Roucou P., 2011** : The large scale water cycle of the West African Monsoon. *Atmospheric Science Letters*, 12 (1), 51-57.
- Bongers F., Poorter L. et Hawthorne W. D., 2004** : The forest of Upper Guinea: gradients in large species composition. In: *Poorter L., Bongers F., Kouamé F.N. & Hawthorne W.D. (eds), Biodiversity of West African Forests: An ecological atlas of woody plants species*, chapter 4, 41-52, CABI Publishing, Oxon, UK & Cambridge, USA.
- Bonn F., Rocchon G., 1992** : Précis de télédétection, vol. 1 : Principes et méthodes. *Presses de l'Université du Québec*, ISBN 2760506134 - 9782760506138, 485 pages.
- Boone A., de Rosnay P., Balsamo G., Beljaars A., Chopin F., Decharme B., Delire C., Ducharne A., Gascoin S., Grippa M., Guichard F., Gusev Y., Harris P., Jarlan L., Kergoat L., Mougine E., Nasonova O., Norgaard A., Orgeval T., Ottlé C., Pocard-Leclercq I., Polcher J., Sandholt I., Saux-Picart S., Taylor C., and Xue Y., 2009** : The AMMA Land Surface Model intercomparison Project (ALMIP). *American Meteorological Society*, 90 (12), 1865-1880.
- Boone A., Peugeot C., Demarty J., Grippa M., Cappelaere B., Cohard J.-M., Galle S., Gosset M., Guichard F., Kaptué A., Kergoat L., Lebel T., Ottlé C., Quantin G., Séguis L., Timouk F., Vischel T., Benarrosh N., Brender P., Chaffard V., Charvet G., Chazarin J.-P., Cloché S., Ducharne A., Fleury L., Gascoin S., Getirana M., Hiernaux P., Magan C., Maignan F., Mougine E., Pierre C., Polcher J., Ramage K., Robert D., Roujean J.-L., Velluet C., Viarre J., 2012** : ALMIP2: Overview. *Document DRAFT Whitepaper*, http://www.cnr.meteo.fr/amma-moana/amma_surf/almip2/index.html.
- Boschetti M., Nutini F., Brivio P. A., Stroppiana D. et Bartholomé E., 2012** : Analysis of time series satellite imagery to monitor vegetated ecosystem dynamics in Sahel. *Workshop Sustainable agro-pastoral systems: concepts, approaches and tools*, Milano (Italy), 27 March 2012.
- Bouko B. S., Sinsin B. et Soulé B. G., 2007** : Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin. *Tropicicultura*, 25, 4, 221-227.
- Boulain N., Cappelaere B., Séguis L., Favreau G., Gignoux J., 2009** : Water balance and vegetation change in the Sahel: A case study at the watershed scale with an eco-hydrological model. *Journal of Arid Environments*, 73, 1125-1135.
- Bouraoui S., 2013** : The study of the Bay of Mount Saint-Michel by using graph theory in the analysis of satellite images. *International Journal of Computer Science*, 10(1), 3, 1694-0784.
- Bretherton C. S., Smith S. et Wallace J. M., 1992** : An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climatic data. *Journal of Climate*, 5, 541-560.
- Brovkin V., 2002** : Climate-Vegetation interaction. *Journal of Physic*, IV, France, 12, 52-68.
- Brown M. E., de Beurs K. et Vrieling A., 2010** : The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2286-2296.
- Brown N., 1994** : The implications of climate and gap microclimate for seedlings growth in a Bornean lowland rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 9 (2), 153-168.
- Caloz R. et Collet C., 2001** : Précis de télédétection : Traitements numériques d'images de télédétection. *Presses de l'Université du Québec*, Volume 3, 386 pages.

- Camberlin P., Martiny N., Philippon N. et Richard Y., 2007** : Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 106, 199-216.
- Caminade C., Terray L. et Maisonnave E., 2006** : West African monsoon response to greenhouse gas and sulphate aerosol forcing under two emission scenarios. *Climate Dynamics*, 26, 531-547.
- Cappelaere B., Descroix L., Lebel T., Boulain N., Ramier D., Laurent J.-P., Favreau G., Boubkraoui S., Boucher M., Bouzou Moussa I., Chaffard V., Hiernaux P., Issoufou H. B. A., Le Breton E., Mamadou I., Nazoumou Y., Oi M., Otlé C. et Quantin G., 2009** : The AMMA-CATCH experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger – Investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *Journal of Hydrology*, 375, 34-51.
- Casenave A. et Valentin C., 1992** : A runoff capability classification system based on surface features criteria in semiarid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130, 231-249.
- Ceccato P., 2002** : Operational early warning system using Spot-Vegetation and Terra-Modis to predict desert locust outbreaks. *Proceedings of the Second International VEGETATION User Conference*, 33-41.
- Chander G., Markham B. L. et Helder D. L., 2009** : Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of Environment*, 113, 893-903.
- Charney J. G., 1975** : Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, 101(428), 193-202.
- Chen D. et Stow D., 2003** : Strategies for integrating information from multiple spatial resolutions into land use/cover classification routines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(11), 1279-1287.
- Chen T. C., 1982** : On the kinetic energy budget of the summer-mean flow at 200mb in the tropics. *Tellus*, 34, 55-62.
- Chiang J. C. H. et Vimont D. J., 2004** : Analogous meridional modes of atmosphere-ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. *Journal of Climate*, 17(21), 4143-4158.
- Clinton N., Yu L. Fu H., He C. et Gong P., 2014** : Global-scale associations of vegetation phenology with rainfall and temperature at a high spatio-temporal resolution. *Remote Sensing*, 6, 7320-7338.
- Collins J. M., 2011** : Temperature Variability over Africa. *Journal of Climate*, 24, 3649-3666.
- Conway D., Persechino A., Ardoin-Bardin S., Hamandawana H., Dieulin C. et Mahe G., 2009** : Rainfall and Water Resources Variability in Sub-Saharan Africa during the Twentieth Century. *American Meteorological Society*, 10, 41-59.
- Cook K. H., 1999** : Generation of the African Easterly Jet and Its Role in Determining West African Precipitation. *Journal of Climate*, 12, 1165-1184.
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougou E., Grippa M. et Tucker C. J., 2014** : Re-greening Sahel : 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140, 350-364.
- Davenport M. L. et Nicholson S. E., 1993** : On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 2369-2389.
- de Rosnay P., Drusch M., Boone A., Balsamo G., Decharme B., Harris P., Kerr Y., Pellarin T., Polcher J. et Wigneron J.-P., 2009** : AMMA Land Surface Model Intercomparison Experiment coupled to the Community Microwave Emission Model: ALMIP-MEM. *Journal Geophysical Research*, 114, D05, 108-126.
- Deleglise C., 2011** : Hétérogénéité spatiale des composantes spécifiques et fonctionnelles des communautés prairiales subalpines dans un contexte de déprise pastorale. *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble, 290 pages.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.-C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I. et Sighomnou D.,**

- 2009** : Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *Journal of Hydrology*, 375, 90-102.
- Despaigne W., 2006** : Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. *Rapport de stage*, Université de Bretagne Sud, 68 pages.
- Dessay N., 2006** : Dynamique de la végétation et du climat : étude par télédétection de cinq biomes brésiliens, forêt ombrophile dense et ouverte, cerrados, caatinga et campanha gaúcha. Thèse de doctorat, Université Paris X Nanterre, 364 pages.
- Di L., Rundquist D. C. et Ham L., 1994** : Modeling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2121-2136.
- Dirmeyer P. A., Niyogi D., De Noblet-Ducoudre N., Dickinson R. E. et Snyder P. K., 2010** : Editorial: Impacts of land use change on climate. *International Journal of Climatology*, 30, 1905-1907.
- Diwakar P. G., Raghavaswamy V., Saha S. K., Kiran Kumar A. S., Dadhwal V.K. et Shivakumar S. K., 2013** : Indian Remote Sensing Satellite Series and Applications: A Saga of 25 years. *Bulletin of the national natural resources management system*, NNRMS (B) - 37, 164 pages.
- Dixon P. M., 2001** : Nearest Neighbor Methods. *Department of Statistics*, Iowa State University, 26 pages.
- Djoufack-Manetsa V., 2011** : Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. *Thèse de Doctorat*, Cotutelle entre Université Yaoundé 1 et Université de Bourgogne, 321 pages.
- Do T. P. T., Bigot S. et Zin I., 2011** : Variabilité bioclimatique de la végétation des montagnes Ouest – Africaines : suivi par imagerie SPOT-VGT (2002-2009). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 24, 195-200.
- Do T. P. T., Bigot S., Zin I. et Galle S., 2013** : Etude des relations entre la couverture végétation et la température de surface calculées à partir des données Landsat ETM+ à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 26, 206-211.
- Dorigo W., de Jeu R. A. M., Chung D., Parinussa R. M., Liu Y. Y., Wagner W. et Fernández-Prieto D., 2012** : Evaluating global trends (1988–2010) in harmonized multi-satellite surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 39, L18405.
- Douville H., 2008** : Influence des surfaces continentales sur la variabilité du cycle hydrologique des échelles interannuelle à multi-décennale. *HDR*, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 132 pages.
- Douville H., Conil S., Tyteca S., Voldoire A., 2007** : Soil moisture memory and West African monsoon predictability: artefact or reality?, *Climate Dynamics*, 28, 723-742.
- Druyan L. M., 2010** : Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, 31 (10), 1415-1424.
- Dubreuil V., 2010** : Geographical Information, Remote Sensing, and Climatology. In "Geographical Information and Climatology" Dir. P.Carrega, WILEY-ISTE Ltd ed., London, 73-102.
- Ducrot D., 2005** : Méthode d'analyse et d'interprétation d'images télédétection de multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage. *HDR*, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 240 pages.
- Eklundh L. et Jönsson P., 2011** : Timesat 3.1 Software Manual, Lund University, Sweden.
- Eklundh L. et Olsson L., 2003** : Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 1430-1433.
- Fairbanks D. H. K. 2000** : Physio-climatic classification of South Africa's woodland biome. *Plant Ecology*, 149, 71-89.

- Fan L., Gao Y., Brück H. et Bernhofer C., 2009** : Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 151-156.
- FAO, 2008** : Climate and Climate Change in West Africa. *ECOWAS-SWAC/OECD@2008*, (www.atlas-westafrica.org).
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray M., Taupin J.D., Massault M., Le Gal-La Salle C. et Babic M., 2002** : Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from 3H and 14C modelling. *Ground Water*, 40 (2), 144-151.
- Fensholt R., Anyamba A., Huber S., Proud S. R., Tucker C.J., Small J., Pak E., Rasmussen M.O., Sandholt I. et Shisanya C., 2011** : Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 721-729.
- Fensholt R., Langanke T., Rasmussen K., Reenberg A., Prince S. D., Tucker C., Scholes R. J., Le Q. B., Bondeau A., Eastman R., Epstein H., , Gaughan A. E., Hellden U., Mbow C., Olsson L., Paruelo J., Schweitzer C., Seaquist J. et Wessels K., 2012** : Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007: an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 121, 144-158.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T. T. et Mbow C., 2009** : Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1886-1898.
- Fensholt R., Sandholt I., Stisen S. et Tucker C. J., 2006** : Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, 101, 212-229.
- Fink A. H., Kotthaus S. et Pohle S., 2008** : Rainfall Variability in West Africa. *IMPETUS Atlas Benin*, 11-12.
- Fontaine B. et Janicot S., 1996** : Sea surface temperature fields associated with West African rainfall anomaly types. *Journal of Climate*, 9, 2935-2940.
- Fontaine B., Garcia-Serrano J., Roucou P., Rodriguez-Fonseca B., Losada T., Chauvin F., Gervois S., Sivarajan S., Ruti P., Janicot S., 2009** : Impacts of Warm and Cold situations in the Mediterranean Basins on the West African monsoon: observed connection patterns (1979-2006) and climate simulations. *Climate Dynamics*, 35 (1), 95-114.
- Fontaine B., Roucou P., Gaetani M. et Marteau R., 2011** : Recent changes in precipitation, ITCZ convection and northern tropical circulation over North Africa (1979–2007). *International Journal of Climatology*, 31 (5), 633-648.
- Frappart F., Hiernaux P., Guichard F., Mougou E., Kergoat L., Arjounin M., Lavenu F., Koité M., Patuere J-E., Lebel T., 2009** : Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375, 128-142.
- Fuller D. O. et S. D. Prince, 1996** : Rainfall and foliar dynamics in tropical southern Africa: Potential impacts of global climatic change on savanna vegetation. *Climatic Change*, 33, 69-96.
- Gao Z., Gao W. et Chang N-B., 2010** : Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13 (3), 495-503.
- García-Haro J., Camacho-de Coca F. et Meliá Miralles J., 2008** : Inter-comparison of SEVIRI/MSG and MERIS/ENVISAT biophysical products over Europe and Africa. *Proceeding of the 2nd MERIS / (A)ATSR User Workshop*, Frascati, Italy.
- Garrigues S., 2004** : Hétérogénéité spatiale des surfaces terrestres en télédétection : caractérisation et influence sur l'estimation des variables biophysiques. *Thèse de doctorat*, INRA, Avignon, 380 pages.
- Garrigues S., Lacaze R., Baret F., Morissette J. T., Weiss M., Nickeson J. E., Fernandes R., Plummer S., Shabanov N. V., Myneni R. B., Knyazikhin Y. et Yang W., 2008** : Validation and

- intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 113, G02028.
- Gautier F., Lubes-Niel H., Sabatier R., Masson J.-M., Paturel J.-E. et Servat E., 1998** : Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 43(6), 921-935.
- Gautier L. et Spichiger R., 2004** : The forest-savanna transition in West-Africa. In: *Poorter L., Bongers F., Kouamé F.N. & Hawthorne W.D. (eds) ; Biodiversity of West African Forests: An ecological atlas of woody plants species*, Chapter 3, 33-40, CABI Publishing, Oxon, UK & Cambridge, USA.
- Gessner U., Niklaus M., Kuenzer C. et Dech S., 2013** : Intercomparison of Leaf Area Index Products for a Gradient of Sub-Humid to Arid Environments in West Africa. *Remote Sensing*, 5, 1235-1257.
- Ghassan J. A. Jr., 2010** : Intraseasonal variability of the West African monsoon and African Easterly waves during boreal. *Rapport de stage de master*, Université de Colorado State, 133 pages.
- Giec, 2007** : Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse. ©GIEC, ISBN 92-9169-222-0
- Giec, 2013** : Changements climatiques 2013 : Rapport de synthèse. ©GIEC, www.climatechange2013.org.
- Giec, 2014** : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. ©GIEC, ipcc-GT2.gov/RE5.
- Giertz S., Diekkruger B., Jaeger A. et Schopp M., 2006** : An interdisciplinary scenario analysis to assess the water availability and water consumption in the Upper Ouémé catchment in Benin. *Advances in Geosciences*, 9, 3-13.
- Girard M.-C. et Girard C.-M., 1995** : Traitement des données de télédétection. *Dunod Edition*, Paris, 529 pages.
- Girard M.-C. et Girard C.-M. (et coll.), 2010** : Traitement des données de télédétection : Environnement et ressources naturelles. 2^{ème} édition, *Dunod*, 576 pages.
- Gong D.-Y. et Ho C.-H., 2003** : Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index(NDVI) over the northern hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, 108(D16), 4498.
- Gratton Y., 2002** : Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, juin 2002, www.iag.asso.fr.
- Grippa M., Kergoat L., Frappart F., Araud Q., Boone A., de Rosnay P. et Lemoine J.-M., 2009** : The ALMIP working group, 2009: Land water storage changes over West Africa estimated by GRACE and land surface models. *Water Resource Research*, 47, W05549, doi:10.1029/2009WR008856.
- Guyot A., 2010** : Estimation de l'évapotranspiration sur un couvert complexe par utilisation de la scintillométrie infrarouge. Application à un bassin versant de zone soudano-sahélienne (Bénin). *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier, 243 pages.
- Haarsma R. J., Kliphuis M., Selten F. M. et Weber S. L., 2005** : Sahel rainfall variability and response to greenhouse warming. *Geophysical Research Letters*, Volume 32, L17702.
- Hall J. B. et Swaine M. D., 1976** : Classification and Ecology of closed canopy forest in Ghana. *Journal of Ecology*, 64, 913-951.
- Hansen M. C., Defries R. S., Townshend J. R. G. et Sohlberg R., 2000** : Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (6 & 7), 1331-1364.
- Hanson C. et Mueller J., 2004** : Status of the SEVIRI level 1.5 data. *Proceeding second MSG RAO workshop*, Salzburg, Austria, ESA SP 582.
- Hector B., 2014** : Dynamique des stocks d'eau souterrains en zone soudanienne (Bénin) - Apport des mesures gravimétriques sol et satellite. *Thèse de doctorat*, Université de Strasbourg.
- Herrmann S. M., Anyamba A. et Tucker C. J., 2005** : Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15, 394-404.

- Heumann B. W., Seaquist J. W., Eklundh L. et Jönsson P., 2007** : AVHRR Derived Phenological Change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sensing of Environment*, 108, 385-392.
- Hickler T., Eklundh L., Seaquist J., Smith B., Ardö J., Olsson L., Sykes M. et Sjöström M., 2005** : Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, 32, L21415.
- Hiepe C., 2008** : Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment: a modelling approach considering land use and climate change in Benin. *Thèse de doctorat*, Université de Bonn, Allemagne, 174 pages.
- Hiernaux P., Biédiers C.L., Valentin C., Bationo A. et Fernandez-Rivera S., 1999** : Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soil in Sahelian rangelands. *Journal Arid Environnement*, 41, 231-245.
- Hiernaux P., Ayantunde A., Gérard B., Grippa M. et Mougin E., 2009a** : Resilience and productivity trends of crops, fallows and rangelands in Southwest Niger: impact of land use, management and climate changes. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 65-77.
- Hiernaux P., Diarra L., Trichon V., Baup F., Soumaguel N et, Mougin E., 2009b** : Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 103-113.
- Hiernaux P., Mougin E., Diarra L., Soumaguel N., Lavenu F. et Tracol Y., 2009c** : Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 114-127.
- Hong S., Lakshmi V. et Small E., 2007** : Relationship between Vegetation Biophysical Properties and Surface Temperature Using Multisensor Satellite Data. *American Meteorological Society*, 20, 5593-5606.
- Horion S., Fensholt R. Tagesson T. et Ehammer A., 2014** : Using earth observation-based dry season NDVI trends for assessment of changes in tree cover in the Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, 35 (7), 2493-2515.
- Hountondji Y.-C. H., 2008** : Dynamique environnementale en zones sahéenne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. *Thèse de Doctorat*, Université de Liège, 153 pages.
- Huang S. et Siegert F., 2006** : Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. *Journal of Arid Environments*, 67, 308-327.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X. et Ferreira L. G., 2002** : Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Nelkin E. J., 2010** : The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Chapter 1 in Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, F. Hossain and M. Gebremichael, Eds. *Springer Verlag*, ISBN: 978-90-481-2914-0, 3-22.
- Hulme M., Doherty R., Ngara T., New M. et Lister D., 2001** : African climate change: 1900–2100. *Climate Research*, 17, 145-168.
- Huston M. A., 1999** : Local processes and regional patterns: appropriate scales for understanding variation in the diversity of plants and animals. *Oikos*, 86, 393-401.
- Janicot S., Redelsperger J.-L. et Lebel T., 2012** : La mousson ouest-africaine : introduction à quelques contributions du programme d'étude multidisciplinaire AMMA. *La Météorologie - N° Spécial AMMA*, octobre 2012.
- Jarlan L., Mangiarotti S., Mougin E., Mazzega P., Hiernaux P. et Le Dantec V., 2008** : Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1381-1394.
- Jarlan L., Tourre Y. M., Mougin E., Philippon N. et Mazzega P., 2005** : Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982-2003). *Geophysical Research Letters*, 32, L04701.

- Jiang G-M., Li Z-L. et Nerry F., 2006** : Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI. *Remote Sensing of Environment*, 105, 326-340.
- Jiang Z., Huete A. R., Didan K. et Miura T., 2008** : Development of a two-band Enhanced Vegetation Index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112 (10), 3833-3845.
- Joly M., Voldoire A., Douville H., Terray P., Royer J.-F., 2007** : African monsoon teleconnections with tropical SSTs: validation and evolution in a set of IPCC4 simulations. *Climate Dynamics*, 29, 1-20.
- Jönsson P. et Eklundh L., 2004** : Timesat - a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30, 833-845.
- Judex M. et Thamm H.-P., 2008** : IMPETUS Atlas Bénin: research Results 2000-2007. *GLOWA*, 3^{ème} Edition, 144 pages.
- Judex M., Thamm H.-P. et Menz G., 2006** : Modelling of land-use changes in a West African catchment. *ISPRS Archives – Volume XXXVI*, Part 7.
- Judi E. H., Simon F. T., Paul K. D. et Erik B., 2007** : The Effect of Spatial and Temporal Heterogeneity on the Design and Analysis of Empirical Studies of Scale-Dependent Systems. *The American Naturalist*, 169 (3), 398-408.
- Justice C. O., Dugdale G., Townshend J. R., Narracott A. S. et Kumar M., 1991** : Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semi-arid West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1349-1368.
- Justice C. O., Townshend J. R. G., Holben B. N. et Tucker C. J., 1985** : Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6 (8), 1271-1318.
- Kamagaté B., 2006** : Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga. *Thèse de Doctorat*, Université Montpellier II, 320 pages.
- Kaptue A., 2010** : Cartographie des écosystèmes et paramètres biophysiques pour l'étude des flux hydriques sur le continent africain. *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse, 202 pages.
- Kaptue A., Roujean J.-L. et Faroux S., 2010** : ECOCLIMAP-II: An ecosystem classification and land surface parameters database of Western Africa at 1km resolution for the African monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project. *Remote Sensing of Environment*, 114, 961-976.
- Kassim A. H. M. et Kottegodan N. T., 1991** : Rainfall network design through comparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal*, 36 (3), 223-240.
- Kendi F. D., Peter C., Susan H., Brian D. I., Brett A. M. et Kevin J. R., 2005** : Spatial heterogeneity explains the scale dependence of the native-exotic diversity relationship. *Ecological Society of America*, 86(6), 1602-1610.
- Ker A., 1995** : Farming systems of the African savanna: A continent in crisis. *IDRC 1995*, ISBN Out of print e-ISBN 1-55250-280-5, 176 p.
- Klein D. et Roehrig J., 2006** : How does vegetation respond to rainfall variability in a semi-humid West African in comparison to a semi-arid East African environment? *Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover*, Center for Remote Sensing of Land Surfaces, Bonn, 28-30 September 2006.
- Koné M., Aman A., Adou Y. C. Y., Coulibaly L. et N'guessan K. E., 2007** : Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Télédétection*, 7 (1-2-3-4), 433-446.
- Kouadio Y. K., Ochou D. A. et Servain S., 2003** : Tropical Atlantic and rainfall variability in Côte d'Ivoire. *Geophysical Research Letters*, 30 (5), 8005.
- Lacaze B. et Bergés J.-C., 2005** : Contribution of Meteosat Second Generation (MSG) imagery to Drought Early Warning Systems. *In: 3rd EARSeL Workshop on Image Spectroscopy*, Herrsching, Germany.

- Lacaze B., 2010** : Comparaison des données des satellites grand champ pour le suivi des variations saisonnières de l'état de la végétation en Afrique de l'Ouest. *Colloque "Satellites grand champ"*, Clermont-Ferrand, 21-22 janvier 2010.
- Lafore J.-P., Asencio N., Bouniol D., Couvreur F., Flamant C., Guichard F., Hall N., Janicot S., Kocho C., Lavaysse C., Leroux S., Poan E., Peyrillé P., Roca R., Roehrig R., Roux F. et Saïd F., 2012** : Évolution de notre compréhension du système de mousson ouest-africain. *La Météorologie – N° Spécial AMMA*, octobre 2012.
- Lambert S., 2008** : Travaux dirigés de télédétection. Rapport de stage de master, *Université d'Orléans*, 38 pages.
- Lamprey H. F., 1988** : Report on desert encroachment reconnaissance in Northern Sudan: 21 October to 10 November 1975. *Desertification Control Bulletin*, 17, 1-7.
- Lasaporana R., 2006** : On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling*, 194, 429-434.
- Lawin A. E., 2007** : Analyses climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin. *Thèse de Doctorat*, INP Grenoble et Université d'Abomey-Calavi, 231 pages.
- Le Barbé L. et Lebel T., 1997** : Rainfall climatology of the HAPEx-Sahel region during the years 1950–1990. *Journal of Hydrology*, 188-189, 43-73.
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borelt Y. et Gualde R., 1993** : Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. *ORSTOM/DH, ORSTOM edition*, Collection Monographies Hydrologiques N°11, Paris (France), ISBN : 2-7099-1168X, 540 pages.
- Le Barbé L., Lebel T. et Tapsoba D., 2002** : Rainfall variability in West Africa during the years 1950–1990. *Journal of Climate*, 15 (2), 187-202.
- Le Lay M. et Galle S., 2005** : Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 50(3), 509-524.
- Le Lay M., 2006** : Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 264 pages.
- Le Page Y., Oom D., Silva J. M. N., Jönsson P. et Pereira J. M. C., 2010** : Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 575-588.
- Lebel T. et Le Barbé L., 1997** : Rainfall monitoring during Hapex–Sahel: 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales. *Journal of Hydrology*, 188-189, 97-122.
- Lebel T., Taupin J.-D. et D'Amato N., 1997** : Rainfall monitoring during Hapex–Sahel: 1 General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology*, 188-189, 74-96.
- Lebel T. et Ali A., 2009** : Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, 375, 52-64.
- Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C. et Seguis L., 2009** : AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview. *Journal of Hydrology*, 375, 3-13.
- Lebel T., Parker D. J., Flamant C., Boulès B., Marticorena B., Mougin E., Peugeot C., Diedhiou A., Haywood J. M., Ngamini J. B., Polcher J., Redelsperger J.-L. et Thorncroft C. D., 2010** : The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Royal Meteorological Society*, 136(s1), 8-33.
- Leblanc M. J., Favreau G., Massuel S., Tweed S. O., Loireau M. et Cappelaere B., 2008** : Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61, 135-150.
- Leduc C., Favreau G. et Schroeter P., 2001** : Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology*, 243, 43-54.

- Leduc-Leballeur M., 2012** : Influence océanique du golfe de Guinée sur la mousson en Afrique de l'Ouest. *Thèse de Doctorat*, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, France.
- L'Hôte Y., Dubreuil P. et Lerique J., 1996** : Carte des types de climats en Afrique Noire à l'ouest du Congo. Rappels et extension aux régimes hydrologiques, l'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement, *Actes de la conférence de Paris*, mai 1995, IAHS Publi. N° 238, 55-66.
- L'Hôte Y., Mahé G., Some B. et Triboulet J.-P., 2002** : Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 563-572.
- Liu H. et Weng Q., 2009** : Scaling Effect on the Relationship between Landscape Pattern and Land Surface Temperature: A Case Study of Indianapolis, United States. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75 (3), 291-304.
- Liu X., Yin Z-Y., Zhang X. et Yang X., 2004** : Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research*, 109, D16210.
- Lohou F., Kergoat L., Guichard F., Boone A. Cappelaere B., Cohard J.-M., Demarty J., Galle S., Grippa M., Peugeot C., Ramier D., Taylor C. M. et Timouk F., 2014** : Surface response to rain events throughout the West African monsoon. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3883-3898.
- Los S. O., Weedon G. P., North P. R. J., Kaduk J. D., Taylor C. M. et Cox P. M., 2006** : An observation-based estimate of the strength of rainfall-vegetation interactions in the Sahel. *Geophysical Research Letters*, 33, L16402.
- Lotsch A., Friedl M. A. et Anderson B. T., 2003** : Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. *Geophysical Research Letters*, 30, 14, 1774-1777.
- Lotsch A., Friedl M. A., Anderson B. T. et Tucker C. J., 2003** : Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. *Geophysical Research Letters*, 30 (14), 1774.
- Lu D., Batistella M., Moran E. F. et de Miranda E. E., 2005** : A comparative study of Terra ASTER, Landsat TM, and SPOT HRG data for land cover classification in the Brazilian Amazon. *The 9th World Multi-Conference on Systematics, Cybernetics, and Informatics (WMSCI 2005)*, Orlando, FL: International Institute of Informatics and Systematics, 411-416.
- Mahé G. et Olivry J.-C., 1991** : Changement climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. Hydrology for the Water Management of Large River Basins, *Proceedings of the Vienna Symposium*, August 1991. IAHS Publ. n° 201.
- Mahé G. et Olivry J.-C., 1999** : Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, Volume 328, Issue 9, Pages 621–626.
- Mahé G. et Paturel J.-E., 2009** : 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience*, 341 (7), 538-546.
- Mahé G., 2006** : Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20^{ème} siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. *HDR*, Université des Sciences et Techniques de Montpellier 2, 160 pages.
- Mahé G., J.-C. Olivry, R. Dessouassi, D. Orange, F. Bamba et E. Servat, 2000** : Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série Ila*, 330, 689-692.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.-C. et Wotling G., 2001** : Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2), 211-226.
- Maisongrande P., Duchemin B. et Dedieu G., 2004** : VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 9-14.
- Malo A. R. et Nicholson S. E., 1990** : A study of the rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using the normalised difference vegetation index. *Journal of Arid Environments*, 19, 1-24.

- Mama V. J., Orekan O. A. V., Houndagba C. J., Azontonde A., Tonii E., Akpassounou P., Adambiokou-Akakpo J. et Hounmenou A., 1998** : La gestion de l'information sur les sols et les eaux pour la sécurité alimentaire au Bénin: Rapport du Bénin, *présenté à l'Atelier sous-régional sur la gestion de l'information des sols et des eaux pour la sécurité alimentaire*, December, the 7th 1998, Cotonou, MDR, FAO, CENATEL.
- Marceau D. J., Howarth P. J. et Gratton D. J., 1994** : Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forest environment 2: The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 49, 105-117.
- Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C. et Lacaze R., 2003** : A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate*, 16, 1261-1282.
- Mberego S., Sanga-Ngoie K. et Kobayashi S., 2013** : Vegetation dynamics of Zimbabwe investigated using NOAA-AVHRR NDVI from 1982 to 2006: a principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (19), 6764-6779.
- Mc Sweeney C., New M., Lizcano G. et Lu X., 2010** : The UNDP Climate Change Country Profiles improving the accessibility of observed and projected climate information for studies of climate change in developing countries. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 157-166.
- Mihai B., Savulescu I., Sandric I. et Oprea R., 2006** : Application de la détection des changements à l'étude de la dynamique de la végétation des monts de Bucegi (Carpatés Méridionales, Roumanie). *Téledétection*, 6 (3), 215-231.
- Miranda-Aragón L., Treviño-Garza E. J., Jiménez-Pérez J., Aguirre-Calderón O. A., González-Tagle M. A., Pompa-García M. et Aguirre-Salado C. A., 2012** : NDVI-rainfall relationship using hyper-temporal satellite data in a portion of North Central Mexico (2000-2010). *African Journal of Agricultural Research*, 7 (6), 1023-1033.
- Morishima W. et Akasaka I., 2010** : Seasonal trends of rainfall and surface temperature over Southern Africa. *African Study Monographs*, Suppl.40, 67-76.
- Moron V., Philippon N., Fontaine B., 2004** : Simulation of West African monsoon circulation in four atmospheric general circulation models forced by prescribed sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 109 : D24105, DOI 10.1029/2004DJ004760.
- Mulindabigwi V., 2005** : Influence des systèmes agraires sur l'utilisation des terroirs, la séquestration du carbone et la sécurité alimentaire dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur au Bénin, *Thèse de Doctorat*, Université Bonn, Allemagne, 253 p.
- Myneni R. B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J. L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G. R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J. T., Votava P., Nemani R. R. et Running S. W., 2002** : Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2), 214-231.
- NASA, 2002** : Landsat-7 Science Data User's Handbook. *NASA/Goddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD, Chap. 11.
- Natta A. K., 2003** : Ecological assessment of riparian forests in Benin – Phytodiversity, phytosociology and spatial distribution of tree species. *PhD thesis*, Wageningen University, Pays-Bas, 215 pages.
- Niasse M., Afouda A. et Amani A., 2004** : Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification, *UICN, Gland*, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni, 82 p.
- Nicholson S. E., 2013** : The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *ISRN Meteorology*, volume 2013, article ID 453521, 32 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521>.
- Nicholson S., 2000** : Land surface processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics*, 38 (1), 117-139.
- Nicholson S., 2005** : On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615-641.

- Nicholson S., Tucker C. J. et Ba M. B., 1998** : Desertification, Drought and surface Vegetation: An example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 816-829.
- Nyamekye C., Osei E. M. et Oseitutu A., 2014** : Classification of time series NDVI for the assessment of land cover change in Ghana using NOAA/AVHRR data. *Journal of Geomatics*, 8 (1), 34-39.
- Oloukoi J., Mama V. J. et Agbo F. B., 2006** : Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des Collines au Bénin. *Téledétection*, 6(4), 305-323.
- Olsson L., Eklundh L. and Ardö J., 2005** : A recent greening of the Sahel - trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556-566.
- Orékan V., Abdoulaye D., Houndagba C. et Sinsin B., 2013** : Dynamique prospective des écosystèmes forestiers classés au Bénin : quelles perspectives pour une utilisation durable. AFRICAGIS2013, *Global Geospatial Conference 2013*, UNECA Conference Center, Addis Ababa, Ethiopia, November 4-8, 2013.
- Orékan V., Tente B., Houndagba C. J. et Abdoulaye D., 2008** : Occupation des terres et dynamique du couvert végétal. *Atlas de IMPETUS*, Chapitre 'Utilisation des terres', 153-162.
- Oszwald J., Lefebvre A., Arnault de Sartre X., Thales M. et Gond V., 2010** : Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (Para, Brésil) entre 1997 et 2006. *Téledétection*, 9 (2), 97-111.
- Paeth H. et Friederichs P., 2004** : Seasonality and time scales in the relationship between global SST and African rainfall. *Climate Dynamics*, 23, 815-837.
- Paeth H., Born K., Girmes R., Podzun R. et Jacob D., 2009** : Regional climate change in tropical and Northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *Journal of Climate*, 22, 114-132.
- Panthou G., 2013** : Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. *Thèse de Doctorat*, Université de Grenoble, 282 pages.
- Paturel J.-E., Servat E. et Delattre M. O., 1998** : Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 43(6), 937-946.
- Paturel J.-E., Ouédraogo M., Servat E., Mahé G., Alain D. et Boyer J.-F., 2003** : The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 125-137.
- Peters D. P. C., 2011** : Globalization: Ecological Consequences of Global-Scale Connectivity in People, Resources, and Information. In *'Business, Management and Economics – The Systemic Dimension of Globalization'* (P. Pachura Ed.), Intech, doi : 10.5772/19793.
- Peters J., Wieme V., Boeckx P., Samson R., Godoy R., Oyarzún C. et Verhoest N., 2005** : Possibilities for ecohydrological monitoring in natural and managed ecosystems in Southern Chile. *Gayana Botanica*, 62(2), 120-129.
- Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker C. J. et Stenseth N. C., 2005** : Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20 (9), 503-510.
- Peugeot C., Bock O., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Meynadier R., Séguis L., Lebel T. et Redelsperger J.-L., 2012** : Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie – n° Spécial AMMA*, octobre 2012, 55-63.
- Peugeot C., Cappelaere B., Vieux B. E., Séguis L. et Maia A., 2003** : Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology*, 279, 224-243.
- Peugeot C., Guichard F., Bock O., Bouniol D., Chong M., Boone A., Capplaere B., Galle S., Gosset M., Séguis L., Zannou A. et Redelsperger J.-L., 2011** : Meso-scale water cycle within the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, 12, 45-50.

- Philippon N. et Fontaine B., 2001** : The relationship between the Sahelian and previous second Guinean rainy seasons: A monsoon regulation by soil wetness. *Annales Geophysicae*, 20(4), 575-582.
- Philippon N., Jarlan L et Mougin E., 2006** : Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982 and 2002 by means of NOAA AVHRR NDVI data. *Journal of Climate*, 20, 1202-1218.
- Philippon N., Mougin E., Jarlan L. et Frison P.-L., 2005** : Analysis of the linkages between rainfall and land surface conditions in the West African monsoon through CMAP, ERS-WSC, and NOAA-AVHRR data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110, DOI : 10.1029/2005JD006394.
- Poças I., Cunha M. et Pereira L. S., 2012** : Dynamics of mountain semi-natural grassland meadows inferred from SPOT-VEGETATION and field spectroradiometer data. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (4), 4334-4355.
- Ponzoni F. J., Galvao L. S. et Epiphonio C. N., 2002** : Spatial resolution influence on the identification of land cover classes in the Amazon environment. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 74(4), 717-725.
- Quénol H., 2011** : Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. Volume 1 : Position et projet scientifique. *HDR*, Université Haute Bretagne Rennes 2, 103 pages.
- Redelsperger J.-L., Diedhiou A., Flamant C., Janicot S., Lafore J-P., Lebel T., Polcher J., Bourles B., Caniaux G., De Rosnay P., Debois M., Eymart L., Fontaine B., Geneau I., Ginoux K., Hoepffner M., Kane C., Law K., Mari C., Marticorena B., Mougin E., Pelon J., Peugeot C., Protat A., Roux F., Sultan B. et Van Den Akker E., 2006a** : AMMA : Le projet international d'études de la mousson africaine et de ses impacts. *La Météorologie*, 54, 22-32.
- Redelsperger J.-L., Thorncroft C. D., Diedhiou A., Lebel T., Parker D. et Polcher J., 2006b** : African monsoon multidisciplinary analysis: An International Research Project and Field Campaign. *American Meteorological Society*, doi:10.1175/BAMS-87-12-1739, 1739-1746.
- Richard J. A. et Jia X., 2005** : Remote Sensing Digital Image Analysis. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- Richards J. A., 1986** : Remote sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Kensington, 127-138.
- Robin M., 1998** : , 319 pages.
- Roko F. B. A., 2007** : Evolution des variables météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé et leurs influences sur l'évapotranspiration de référence. *Rapport de stage de master*, Université d'Abomey-Calavi, 81 pages.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et Deering D. W., 1973** : Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- Ruelland D., Dezetter A., Puech C. et Ardoin-Bardin S., 2008** : Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 3533-3551.
- Ruelland D., Tribotté A., Puech, C. et Dieulin C., 2011** : Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(6), doi:10.1080/01431161003623433.
- Sandholt I., Rasmussen K. et Andersen J., 2002** : A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224.
- Sarr B., 2011** : Present and future climate change in the semi-arid region of West Africa: a crucial input for practical adaptation in agriculture. *Atmospheric Science Letters*, 13 (2), 108-112.
- Schmidt H. et A. Karnieli, 2000** : Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments*, 45(1), 43-60.

- Schultz P. A. et Halpert M. S., 1995** : Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2755-2777.
- Sequist J. W., Hickler T., Eklundh L., Ardö J. et Heumann B., 2009** : Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics. *Biogeosciences*, 6, 469-477.
- Sequist J. W., Olsson L., Ardö J. et Eklundh L., 2006** : Broad-scale increase in NPP Quantified for the African Sahel, 1982-1999. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 5115-5122.
- Seghier J., Vescovo A., Padel K., Soubie R., Arjounin M., Boulain N., de Rosnay P., Galle S., Gosset M., Mouctar A. H., Peugeot C. et Timouk F., 2009** : Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 78-89.
- Séguis L., Kamagaté B., Favreau G., Descloitres M., Seidel J-L., Galle S., Peugeot C., Gosset M., Barbé L., Malinur F., Van Exter S., Arjounin M., Boubkraoui S. et Wubda M., 2011** : Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa) : Inter-annual variability of water budget. *Journal of Hydrology* 402, 1-13.
- Servat E., Paturel J. E., Lubes-Niel H., Kouame E., Travaglio M. et Marieu B., 1997** : Regarding the reduction of flow in Western and Central Africa. *Earth and Planetary Sciences*, 325, 9, 679-682.
- Shabanov N. V., Huang D., Yang W., Tan B., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Douglas E. A., Gower S. T., Huete A. R., Aragão L. E. O. C. et Shimabukuro Y. E., 2005** : Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *Geoscience and Remote Sensing*, 43 (8), 1855-1865.
- Shinoda M., 1995** : Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 565-639.
- Sinsin B. et Kampmann D., 2010** : Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest – Volume 1 : Bénin. *BIOTA AFRICA Project*, Cotonou & Frankfurt/Main, 726 pages.
- Soudani K., Le Maire G., Dufrêne E., François C., Delpierre N., Ulrich E. et Cecchini S., 2008** : Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing Environment*, 112(5), 2643-2655, doi: 10.1016/j.rse.2007.12.004
- Spence J. M., Taylor M. A. et Chen A. A., 2004** : The effect of concurrent sea-surface temperature anomalies in the tropical Pacific and Atlantic on Caribbean rainfall. *International Journal of Climatology*, 24, 1531-1541.
- Speth P., Christoph M. et Diekkrüger B., 2010** : Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa. Ebook, XVI, 675p., 255 illus., 235 illus. in color, Hard cover, ISBN 978-3-642-12957-5.
- Stathopoulou M., Cartalis C. et Petrakis M., 2007** : Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (15), 3291-3304.
- Stisen S., Sandholt I., Norgaard A., Fensholt R. et Eklundh L., 2007** : Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 110, 262-274.
- Sultan B., 2012** : Global warming threatens agricultural productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letters*, 7 (4), 1001.
- Sultan B., Roudier P., Quirion P., Alhassane A., Muller B., Dingkuhn M., Ciais P., Guimberteau M., Traore S. et Baron C., 2013** : Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, 8 (1), 4040.
- Sultand B. et Janicot S., 2003** : The West African Monsoon Dynamics. Part II: The “Preonset” and “Onset” of the Summer Monsoon. *Journal of Climate*, 16 (21), 3407-3427.

- Sultand B. et Janicot S., 2004** : La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. I : mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse*, 15 (4), 1-10.
- Swaine M. D., 1996** : Rainfall and soil fertility as factors limiting forest species distribution in Ghana. *Journal of Ecology*, 84, 419-428.
- Tarnavsky E., Garrigues S. et Brown M. E., 2008** : Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. *Remote Sensing of Environment*, 112, 535-549.
- Taylor C.M., Lambin E.F., Stephenne N., Harding R.J. et Essery R.L.H., 2002** : The influence of land-use change on climate in the sahel. *Journal of Climate*, 15, 3615-3629.
- Tchouto M. P. G., 2004** : Plant diversity in a Central African rain forest: Implications for biodiversity conservation in Cameroon. *Thèse de PhD*, Wageningen University, Pays-Bas, 208 pages.
- Thamm H. P., Judex M., Röhrig J. et Schulz O., 2008** : IMPETUS Atlas du Bénin : Résultats de Recherche 2000-2007. Troisième édition, ISBN-13 978-3-9810311-8-8, 144.
- Thorncroft C. D. et Blackburn M., 1999** : Maintenance of the African easterly jet. *Quarterly Journal Of the Royal Meteorological Society*, 125, 763-786.
- Tidjani A. A., Ozer A. et Karimoune S., 2009** : Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger). *Géo-Éco-Trop*, n° 33, n° special, 69-80.
- Tietjen B., Jeltsch F., Zehe E., Classen N., Groengroeft A., Schiffers K. et Oldeland J., 2010** : Effects of climate change on the coupled dynamics of water and vegetation in drylands. *Ecohydrology*, 3, 226-237.
- Totin V. S. H., Boko M. et Ogouwale E., 2004** : Dynamique de la mousson ouest africaine, régime hydrologique et gestion de l'eau dans le bassin supérieur de l'Ouémé. *Actes de la Conférence, IMPETUS Conférence Internationale, Cotonou, Bénin 4 - 6 octobre 2004*.
- Tottrup C., Schultz Rasmussen M., Eklundh L. et Jönsson P., 2007** : Mapping fractional forest cover across the highlands of mainland Southeast Asia using MODIS data and regression tree modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 23-46.
- Toukiloglou P., 2007** : Comparison of AVHRR, MODIS and VEGETATION for land cover mapping and drought monitoring at 1 km spatial resolution. *Thèse de Doctorant*, Université de Cranfield, England, 515 p.
- Townshend J. R., Masek J. G., Huang C., Vermote E. F., Gao F., Channan S., Sexton J. O., Feng M., Narasimhan R., Kim D., Song K., Song D., Song X., Noojipady P., Tan B., Hansen M. C., Li M. et Wolfe R., 2012** : Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 5 (5), 373-397.
- Tucker C. J. et Nicholson S. E., 1999** : Variations in the Size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28, 587-591.
- Tucker C.J., 1979** : Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol 8 (2), 127-150.
- Van Den Steen I., Wolff E., Debeir O., Van Ham P. et Latinne P., 2001** : Amélioration de l'interprétation numérique de l'occupation du sol. *23ème Symposium Canadien sur la Télédétection et du 10ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, 21-24 août 2001, Université de Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada.
- Van Rompaey R. S. A. R., 1993** : Forest gradients in West Africa: a spatial gradient analysis. *Thèse de doctorat*, Université de Wageningen, Pays-Bas, 142 pages.
- Vittek M., Brink A., Donnay F., Simonetti D. et Desclée B., 2014** : Land Cover Change Monitoring Using Landsat MSS/TM Satellite Image Data over West Africa between 1975 and 1990. *Remote Sensing*, 6 (1), 658-676.
- Vrieling A., Jan de Leeuw et Said M. Y., 2013** : Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 5, 982-1000.

- Wagner W. et Scipal K., 2000** : Large-scale soil moisture mapping in western Africa using the ERS scatterometer. *Geoscience and Remote Sensing*, 38 (4), 1777-1782.
- Wallace J. M., Smith S. et Bretherton C. S., 1992** : Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *American Meteorological Society*, 5, 561-576.
- Wang Q., Adiku S., Tenhunen J. et Granier A., 2005** : On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94, 244-255.
- Wang T., Kou X., Xiong Y., Mou P., Wu J. et Ge J., 2010** : Temporal and spatial patterns of NDVI and their relationship to precipitation in the Loess Plateau of China. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (7), 1943-1958.
- Wessels K. J., Prince S. D., Malherbe J., Small J., Frost P. E. et VanZyl D., 2007** : Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environment*, 68, 271-297.
- White F., 1986** : La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique UNESCO / AETFAT / UNSO, *ORSTOM et UNESCO, Paris, collection Recherches sur les ressources naturelles*, n° 20, 384 pages.
- Xiao X., Hagen S., Zhang Q., Keller M. et Moore B., 2006** : Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multitemporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 103 (4), 465-473.
- Xie Y., Sha Z. et Yu M., 2008** : Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review, *Journal of Plant Ecology*, Vol 1 (1), 9-23.
- Yang W., Huang D., Tan B., Stroeve J. C., Shabanov N. V., Knyazikhin Y., Nemani R. R. et Myneni R. B., 2006** : Analysis of Leaf Area Index and Fraction of PAR Absorbed by Vegetation Products From the Terra MODIS Sensor: 2000–2005. *Geoscience and Remote Sensing*, 44 (7), 1829-1842.
- Yin H., Udelhoven T., Fensholt R., Pflugmacher D. et Hostert P., 2012** : How Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Trends from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and Système Probatoire d'Observation de la Terre VEGETATION (SPOT VGT) Time Series Differ in Agricultural Areas: An Inner Mongolian Case Study. *Remote Sensing*, 4, 3364-3389.
- Yu F., Price K. P., Ellis J. et Shi P., 2003** : Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 87, 42–54.
- Yue W., Xu J., Tan W. et Xu L., 2007** : The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: application to Shanghai Landsat 7 ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (15), 3205-3226.
- Zeng N., Neelin J., Lau K. et Tucker C. J., 1999** : Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286 (5444), 1537-1540.
- Zeng X. et Eltahir E. A. B., 1998** : The Role of Vegetation in the Dynamics of West African Monsoons, *Journal of Climate*, 11, 2078-2096.
- Zhang C., Woodworth P. et Gu G., 2006** : The seasonal cycle in the lower troposphere over West Africa from sounding observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132 (621), 2559-2582.
- Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B. et Strahler A. H., 2005** : Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *Journal of Geophysical Research*, 110, D12103, doi:10.1029/2004JD005263.
- Zhu Z., Bi J., Pan Y., Ganguly S., Anav A., Xu L., Samanta A., Piao S., Nemani R. R., et Myneni R. B., 2013** : Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5, 927-948.
- Zin I., Zribi M., Otlé C., Hiernaux P., Lacaze R., Le Hénarat-Masclé S., Sanou B., André C., Guibert S., Saux-Picart S., Dessay N., Boulain H., Cappelaere B., Decroix L., Séghieri J. et Séguis L., 2009** : Land covers assessemant on the three AMMA experimental sites from SPOT

HRVIR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG-D-08-00159.

Zribi M., Pardé M., de Rosnay P., Baup F., Boulain N., Descroix L., Pellarin L., Mougín E., Ottlé C. et Decharme B., 2009 : ERS scatterometer surface soil moisture analysis of two sites in the south and north of the Sahel region of West Africa. *Journal of Hydrology*, 375, 253-261.

Annexes

Annexe A : Les matrices de confusion calculées avec les images LANDSAT

Détails de la matrice de confusion calculée lors la classification de l'occupation du sol de 2003 (au-dessus) et de 2012 (au-dessous)

		Données de référence											Précision individuelle (%)
		Ville	Inselberg	Eau	Champs	Jachère	Savane arbustive	Savane boisée	Forêt claire	Forêt décidue	Forêt dense	Total (pixel)	
Données classifiées	Ville	1479	0	65	6	1	10	42	59	21	5	1688	87,62
	Inselberg	17	1674	62	8	15	27	41	25	1	15	1885	88,81
	Eau	0	5	291	2	14	1	0	0	21	6	340	6,18
	Champs	27	0	3	2007	58	16	192	0	0	23	2326	86,29
	Jachère	20	0	31	14	546	24	1	1	7	20	664	82,23
	Savane arbustive	6	0	3	7	11	169	0	0	0	7	203	83,25
	Savane boisée	0	0	0	13	17	51	1012	1	13	9	1116	90,68
	Forêt claire	1	0	0	17	8	9	0	967	0	31	1033	93,61
	Forêt décidue	21	69	11	0	6	0	0	3	1568	38	1716	0,64
	Forêt dense	18	11	7	9	12	3	2	5	19	481	567	84,83
Total (pixel)	1589	1759	473	2083	688	310	1290	1061	1650	635	11538		
Précision globale (%)												88,85 %	
Kappa												0,8732	

		Données de référence											Précision individuelle (%)
		Ville	Inselberg	Eau	Champs	Jachère	Savane arbustive	Savane boisée	Forêt claire	Forêt décidue	Forêt dense	Total (pixel)	
Données classifiées	Ville	3098	3	75	75	31	56	1	0	0	2	3341	92,73
	Inselberg	0	9794	370	46	18	77	91	16	52	8	10472	93,53
	Eau	3	3	284	6	0	3	9	6	8	1	323	2,48
	Champs	49	0	24	4360	10	59	76	0	5	31	4614	94,50
	Jachère	15	0	40	10	555	6	4	0	4	27	661	83,96
	Savane arbustive	22	9	19	14	21	955	41	0	8	18	1107	86,27
	Savane boisée	5	0	53	30	50	310	2904	0	51	33	3436	84,52
	Forêt claire	0	94	0	65	85	3	0	2323	9	5	2584	89,90
	Forêt décidue	67	864	0	0	1	0	1	1	5555	12	6501	0,00
	Forêt dense	9	5	7	11	17	14	23	25	8	587	706	83,14
Total (pixel)	3268	10772	872	4617	788	1483	3150	2371	5700	724	33745		
Précision globale (%)												90,13%	
Kappa												0,8957	

Annexe B : Do T. *et al.*, 2011 - Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2011, vol. 24, 195-200)

VARIABILITE BIOCLIMATIQUE DE LA VÉGÉTATION DES
MONTAGNES OUEST-AFRICAINES : SUIVI PAR IMAGERIE SPOT-VGT
(2002-2009)

DO T. P. T.^(1, 2), BIGOT S.⁽¹⁾ et ZIN I.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université Joseph Fourier - Grenoble 1 / CNRS / G-INP / IRD, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - LTHE UMR 5564
BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 - France

Email : thao.do@ujf-grenoble.fr ; sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr ; isabella.zin@ujf-grenoble.fr

⁽²⁾ Université des Mines et de Géologie d'Hanoi

Département de Cartographie - Vietnam

Résumé : L'étude des relations entre les variations climatiques et l'activité photosynthétique de la végétation est maintenant courante grâce à l'utilisation du NDVI. Elle a permis l'étude de nombreuses interactions à l'échelle du domaine ouest-africain, mais peu de travaux se sont encore penchés sur les espaces de montagnes, où les variations sont plus complexes, à cause de l'altitude et des états de surface forestiers spécifiques, mais aussi à cause de la plus forte nébulosité qui peut biaiser les données satellitaires. Un travail essentiellement descriptif est donc présenté ici, à partir des données quotidiennes SPOT-VGT de résolution kilométrique, sur la période 2002-2009, et pour cinq domaines ouest-africains au moins situés au-dessus de 500 m d'altitude.

Mots-clés : Afrique de l'Ouest, télédétection, montagne, végétation.

Abstract : Monitoring bioclimatic variability of the West African mountain vegetation with SPOT-VGT data (2002-2010). Study of relationships between climate variations and vegetation photosynthetic activity is now current thanks to NDVI analyses. This index allowed us study of several interactions in West Africa, but few works still exist over African mountain domains, where variations are more complex because of height and specific forest cover, but also because of the strongest cloudiness which can introduce biases in the satellite data. A preliminary descriptive work is thus presented here, from the daily SPOT-VGT data, at kilometeric spatial resolution, over the period 2002-2009, and for five West African domains at least situated over 500 m a.s.l..

Keywords : Western Africa, remote sensing, mountain, vegetation.

Introduction

La végétation en milieu de montagne tropicale est une variable écologique et géophysique importante car elle peut évoluer rapidement et à cause de nombreuses raisons climatiques et/ou anthropiques (stress hydrique et thermique, incendies, déboisement, pratiques culturales,...), avec des interactions bio-géo-physiques différentes de celles qui ont pu être mises en évidence pour les espaces de savanes et de forêt de basses altitudes. A l'échelle ouest-africaine, ces modifications ont *a priori* été très significatives dans le contexte des changements pluviométriques (et des fortes variations démographiques) observés depuis une quarantaine d'années. Plusieurs études menées à l'échelle planétaire indiquent par ailleurs que les variations climatiques contemporaines ont déjà eu des effets significatifs sur la végétation de montagne à basse altitude au cours des 60 dernières années. La télédétection est alors l'outil adapté pour étudier sa dynamique spatio-temporelle, notamment quand il existe peu de données et observations *in situ* de ces espaces de moyennes et hautes montagnes africains, et que leur accès demeure souvent compliqué (physiquement et politiquement).

L'objectif de cette étude est donc de caractériser l'activité photo-synthétique (*i.e.* la dynamique phénologique) de la végétation des espaces de montagne ouest-africains (c'est-à-dire situés au dessus de 500 m d'altitude) à partir de données satellitaires et d'un indice comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Les typologies végétales discriminées permettront ainsi de distinguer les différentes sensibilités aux variations climatiques intra- et interannuelles.

1. Contexte et objectifs scientifiques

Cette recherche participe au programme international AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*), et plus spécifiquement au projet ALMIP (*AMMA-Land surface Model Intercomparison Project*) dont la phase 2 débute en 2011. Son objectif est d'obtenir une meilleure compréhension de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle de la mousson ouest-africaine en tenant compte de la variabilité des états de surface, donc en améliorant leur définition dans les modèles de surface continentale. Trois sites d'expérimentation et de suivi géophysique sont en activité au Mali, au Niger et au Bénin, afin notamment d'améliorer la compréhension des interactions entre climat et états de surface (figure 1).



Figure 1 : Localisation des trois sites de méso échelle AMMA-CATCH équipés pour étudier les grands processus ouest-africains des interactions entre climat, hydrologie et agrosystèmes (établi à partir d'une image MODIS ; adapté d'un document d'AMMA-CATCH 'Un observatoire hydrométéorologique sur l'Afrique de l'Ouest').

Physiquement, la notion d'état de surface végétal correspond à la définition d'une unité fonctionnelle homogène d'un point de vue hydrodynamique, cette unité étant décrite par la géomorphologie du site, son organisation pédologique superficielle, l'utilisation du sol et le couvert végétal (Lebel, 1995). Cette caractérisation des zones de végétation est particulièrement utile pour la modélisation de la relation pluie-débit. Mais elle reste encore très mal connue en milieu de montagne, surtout en domaine tropical. Par ailleurs, la définition générale simplifiée de la forêt tropicale, définie comme une formation végétale occupant des altitudes inférieures à 1300 m (FAO, 2000), ne permet pas de préciser la complexité des contrastes bio- et hydroclimatiques des étages intermédiaires de moyenne montagne (800-1300 m). Finalement, les recherches portant sur la phénologie de la végétation tropicale de montagne demeurent très rares (Koptur *et al.*, 1988). Fisher et Mustard (2007) signalent pourtant l'importance de la topographie dans les études comparatives sur les hétérogénéités spatio-temporelles de la phénologie, ce facteur compliquant par ailleurs la validation et comparaison entre mesures *in situ* et celles obtenues par télédétection.

2. Données et méthodologie

Éliminant en partie les variations simultanées d'éclairement dans les bandes visible et proche infrarouge, surtout dues aux hétérogénéités de structure du paysage observé et aux conditions de prises de vues différentes, le NDVI est lié à la proportion de radiations photosynthétiques absorbées par la végétation (Tucker *et al.*, 1991). Très largement utilisé dans les recherches en bioclimatologie depuis deux décennies, surtout dans l'étude des écosystèmes africains pour le suivi phytosanitaire de la végétation, la détection des feux ou la

mesure de la dégradation forestière (Achard *et al.*, 2002), cet indice est fortement corrélé à la production primaire nette et à l'accumulation de matière sèche (Davenport et Nicholson, 1993). Il ne peut cependant pas distinguer la physionomie des types végétaux mais plutôt leur phénologie générale. Ainsi, lorsque l'étude ne porte pas spécifiquement sur une plante, il vaut mieux alors parler de symphénologie qui désigne la phénologie de l'ensemble des plantes d'une association végétale, principe utilisé lors de synthèses réalisées par télédétection (Bigot, 2005). Toutes surfaces confondues, les valeurs normalisées du NDVI sont comprises entre -1 et 1, celles de la végétation varient en moyenne entre 0,1 et 0,8 car la réflectance dans le proche infrarouge est nettement supérieure à celle dans le visible. Les fortes valeurs de NDVI sont associées aux densités les plus importantes de la biomasse verte, mais cet indice a aussi tendance à saturer dans les valeurs élevées, rendant par exemple difficiles certaines distinctions au sein des forêts tropicales.

Disponibles depuis avril 1998, les données radiométriques issues des capteurs SPOT-VGT fournissent des images quotidiennes à l'échelle quasi planétaire dans quatre bandes spectrales (2 dans le visible et 2 dans l'infrarouge), avec une résolution spatiale de 1 km. L'ensemble des données, à la fois les valeurs radiométriques ainsi que toutes les métadonnées nécessaires aux corrections, est obtenu librement auprès du Joint Research Centre, sur le site internet du Flemish Institute for Technological Research (VITO) à l'adresse <http://free.vgt.vito.be>. La base analysée dans ce travail correspond aux données quotidiennes allant de janvier 2002 à décembre 2009 (les données issues du satellite SPOT 5 étant en acquisition depuis mai 2002).

A partir de cette base de données, cinq indices régionaux sont ensuite automatiquement calculés à partir des espaces ouest-africains situés au-dessus de 500 m d'altitude (figure 2). Il s'agit des indices nommés 'Guinée', 'Togo', 'Nigéria', 'Cameroun' et 'Algérie' qui permettront, en étudiant le NDVI de trois bandes altitudinales (500-1000 m, 1000-2000 m, plus de 2000 m), de comparer les principales variations phénologiques régionales.

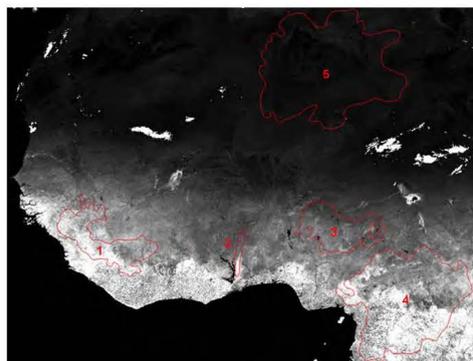


Figure 2 : Localisation des espaces de montagne (*i.e.* avec au moins des reliefs supérieurs à 500 m d'altitude) étudiés en Afrique de l'Ouest : 1) en Guinée, 2) au Togo, 3) au Nigeria, 4) au Cameroun, 5) en Algérie (à partir d'une image SPOT-VGT D10 du 21 septembre 2009).

3. Résultats

A partir des différents indices régionaux, sans tenir compte des niveaux d'altitude, plusieurs caractéristiques générales apparaissent (figure 3) :

- i) le NDVI des montagnes sahariennes de l'Atlas nord-africain demeure bas (<0,1) sur toute la période d'étude, révélant d'une part leur dominance minérale, avec une faible végétation surtout située en zone d'éboulis (Bussmann, 2006), et d'autre part, l'inutilité

d'un indice tel que le NDVI pour leur étude radiométrique ;

- ii) la relative similarité des variations saisonnières et interannuelles du NDVI des montagnes de Guinée et du Cameroun, avec cependant des valeurs maximales plus élevées au Cameroun où on observe également une bi-saisonnalité marquée en été (surtout entre 2006 et 2008) ;
- iii) les plus faibles valeurs de NDVI des montagnes du Nigéria, mais avec une amplitude annuelle élevée (entre 0,2 et 0,5 environ) ;
- iv) la forte amplitude annuelle du NDVI des montagnes togolaises (particulièrement en 2007 et 2008).

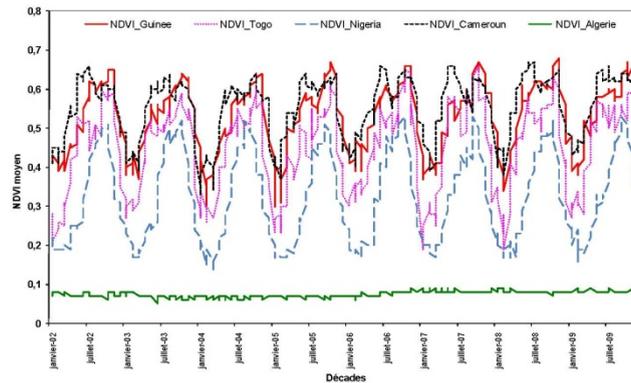


Figure 3 : Variations du NDVI à l'échelle de cinq régions montagnardes ouest-africaines (calculé à partir des données quotidiennes SPOT-VGT de janvier 2002 à décembre 2009).

Situées à des latitudes similaires, la phénologie des espaces de montagne guinéens et nigériens se distinguent cependant parfaitement, les valeurs enregistrées en Guinée étant très supérieures, même en saison sèche (figure 4). Cela provient en partie de la plus faible densité forestière des hauts plateaux du Nigéria, mais aussi du signal propres aux espaces savanicoles du Nigéria à ces latitudes.

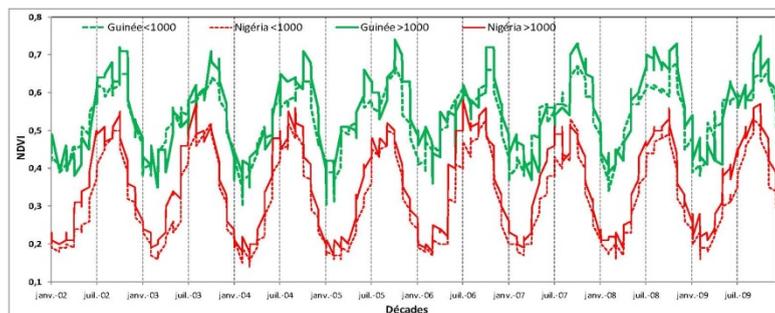


Figure 4 : Comparaisons des variations du NDVI (2002-2009) à l'échelle des massifs ouest-africains de Guinée et du Nigéria, d'une part pour les altitudes comprises entre 500 et 1000 m, et d'autre part, pour toutes les altitudes supérieures à 1000 m.

En montagne camerounaise, malgré le caractère ombrophile sempervirent des espaces forestiers d'altitude, des variations interannuelles du NDVI sont très significatives (figure 5).

On les observe en particulier en juin 2007 et mai 2008, avec des valeurs supérieures à 0,7. Cette relative saturation des valeurs estivales peut être due à la nébulosité, sans lien direct avec les variations phénologiques de surface, même si cette variable bioclimatique est essentielle pour comprendre la saisonnalité écologique des forêts de montagne (Bussmann, 2006 ; Bendix *et al.*, 2006).

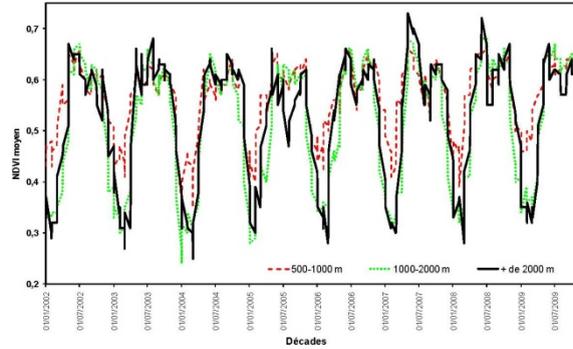


Figure 5 : Variations du NDVI (2002-2009) à l'échelle du massif camerounais, en fonction de trois tranches d'altitude (500-1000 m, 1000-2000 m et plus de 2000 m).

L'augmentation du NDVI correspond aussi à une augmentation importante de l'eau précipitable à l'échelle régionale entre juin et août 2007, qui peut avoir modifié l'activité photosynthétique de la végétation orotropicale camerounaise (figure 6). En Afrique tropicale, la ceinture végétale située au-dessus de la limite forestière prend souvent le terme d'étage afroalpin (Hauman, 1955). Avec des températures moyennes annuelles de l'ordre de 20°C à 900 m d'altitude (et environ 4°C en région sommitale), ces espaces de l'Adamaoua sont par ailleurs également souvent en partie cultivés car possédant des sols volcaniques fertiles, modifiant ainsi la symphénologie détectée par le NDVI.

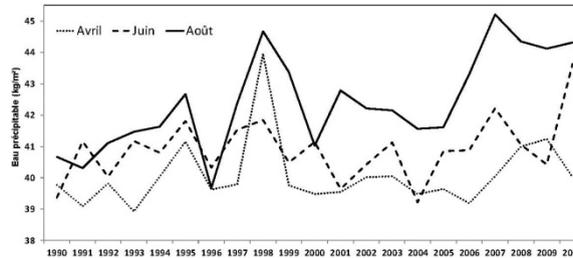


Figure 6 : Variations interannuelles (1990-2010) de l'eau précipitable (kg/m²) en avril, juin et août, pour un indice régional défini au Sud-Cameroun (10-12°30'N / 2°30'-5°W) et calculé à partir des réanalyses NCEP.

Ce sont finalement les espaces les plus bas (500-1000 m) qui enregistrent les plus faibles amplitudes annuelles du NDVI (figure 5). Cela s'explique notamment par le fait que ce sont les espaces forestiers les plus denses et riches d'un point de vue spécifique, avec un caractère sempervirent marqué (figure 7).

Conclusions et perspectives

En se basant sur les valeurs quotidiennes du NDVI issus des données SPOT-VGT, ce

travail préliminaire permet de juger de la grande disparité des variations symphénologiques des espaces de montagnes ouest-africains. Les analyses doivent maintenant se poursuivre en cherchant à croiser et fusionner différentes données issues de la télédétection satellitaire (SPOT-VGT et MODIS pour leur grande répétitivité temporelle, SPOT/HRV et Landsat/TM

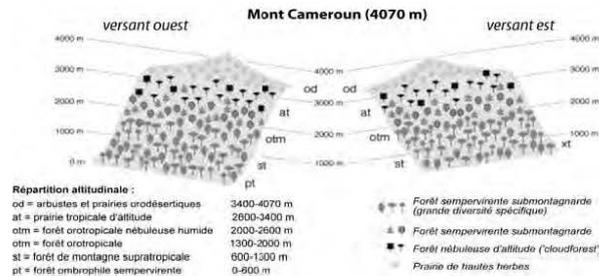


Figure 7 : La zonation végétale moyenne du Mont Cameroun (adapté d'après Bussmann, 2006).

pour leur haute résolution spatiale, TRMM 3B42 pour leurs estimations pluviométriques, MSG SEVIRI pour leurs estimations thermiques), afin d'aboutir à un diagnostic régional bioclimatique plus précis.

Remerciements : Ces recherches sont conduites dans le cadre du programme AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*) et participent au projet ALMIP-2 (*AMMA-Land surface Model Intercomparison Project*).

Bibliographie

- Achard F., Eva H., Stibig H. J., Mayaux P., Gallego J., Richards T. et Malingreau J.-P., 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, 297, 999-1002.
- Bendix J., Homeier J., Cueva Ortiz E., Emck P., Breckle S. W., Richter M. et Beck E., 2006. Seasonality of weather and tree phenology in a tropical evergreen mountain rain forest. *Int. J. Biometeorol.*, 50: 370-384.
- Bigot S., 2004. Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales – L'exemple de la Côte d'Ivoire. Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 399 pages.
- Bussmann R. W., 2006. Vegetation zonation and nomenclature of African Mountains - An overview. *Iyonia*, 11(1), 26 pages.
- Davenport M. L. et Nicholson S. E., 1993. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *Int. J. of Remote Sensing*, 12, 2369-2389.
- FAO, 2000 : Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts - Joindre les efforts nationaux et internationaux. Actes de l'atelier sous-régional sur les statistiques forestières et les perspectives pour le secteur forestier en Afrique / FOSA sous-région ECOWAS (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 13-18 décembre 1999), FAO, Rome, 310 pages.
- Fisher J. I. et Mustard J. F., 2007. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109, 261-273.
- Hauman L., 1955. La 'région afroalpine' en phytogéographie centro-africaine. *Webbia*, 11, 467-489.
- Koptur S., Haber W.A., Frankie G. W. et Baker H. G., 1988. Phenological studies of shrubs and treelet species in tropical cloud forests of Costa Rica. *J. Trop. Ecol.*, 4, 323-346.
- Lebel T., 1995. Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel. Dispositif de mesures au sol et premiers résultats. IRD Editions, 208 pages.
- Sequist J.W., Olsson L. et Ardö J., 2003. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. *Ecological Modelling*, 169, 131-155.

Annexe C : Do *et al.*, 2012 - Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2012, vol. 25, 231-236)

VARIABILITÉ DE L'ACTIVITÉ VÉGÉTALE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUÉMÉ (BÉNIN) : COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES MODIS ET ÉCOCLIMAP-2 (2005-2007)

Thao T. P. DO ^{1,2} et Sylvain BIGOT ¹

¹ Université Joseph Fourier - Grenoble 1 / CNRS / IRD, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - LTHE UMR 5564, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 – France.
thao.do@ujf-grenoble.fr ; sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr.

² Université des Mines et de Géologie d'Hanoi, Département de Cartographie, Dong ngac, Tu liem, Hanoi – Vietnam.

Résumé : Le changement climatique récent en Afrique de l'Ouest (baisse des précipitations) a des influences très significatives sur les écosystèmes, et notamment la végétation. On utilise ici des produits satellitaires, et spécifiquement le LAI (Leaf Area Index) qui est un descripteur de l'activité biophysique, pour l'étude des changements d'activité de la végétation de surface en lien avec la variabilité du climat. Cette étude est réalisée à l'échelle du bassin versant béninois de l'Ouémé supérieur (8.5°-10.5°N / 1.5°-3.0°W) avec des bases de données MODIS et ECOCLIMAP-2 sur la période 2005-2007. Un problème important qui apparaît dans cette zone est la prise en compte de la couverture nuageuse persistante pendant la saison pluie qui biaise notamment les données MODIS. L'étude combinée de l'indice LAI à partir de différentes sources des données peut permettre de diminuer significativement ce biais.

Mots-clés : Bénin, Ouémé, télédétection, climat, végétation, LAI.

Abstract: Variability of the vegetation activity in the Ouémé region (Benin): comparison between MODIS and ECOCLIMAP-2 data (2005-2007).

The recent climate change in Western Africa (decrease of precipitation) has very significant influences on the ecosystems, in particular vegetation. We use here satellite products, and specifically the LAI (Leaf Area Index) which is a good descriptor of the biophysic activity, for studied changes of surface vegetation activity in relation with the climate variability. This study is realized on the scale of Upper Ouémé region (Benin, 8.5°-10.5°N / 1.5°-3.0°W) from MODIS and ECOCLIMAP-2 products over the 2005-2007 period. An important problem which appears in this area is the persistent cloud cover during the rainy season which biases especially the MODIS data. The study from LAI comparisons can allow to decrease this problem.

Keywords: Benin, Ouémé, remote sensing, climate, vegetation, LAI.

Introduction

La végétation dans l'espace semi-aride joue un rôle important sur le cycle hydrologique et, dans un contexte de changement climatique, est déterminante pour étudier les variations des précipitations. Certaines études menées à l'échelle planétaire indiquent par ailleurs que les variations climatiques ont déjà eu des effets significatifs sur l'activité végétale, spécialement les années déficitaires en précipitation (Soudani *et al.*, 2008). En Afrique de l'Ouest, le programme AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis ; <http://www.amma-international.org/>) cherche à comprendre ces interactions, leurs causes, pour les quantifier et les prévoir. Dans ce cadre, trois régions de suivi de la variabilité géophysique ont été instrumentées (figure 1) : le site de Gourma (Mali), celui du Degré Carré de Niamey (Niger) et celui de la haute vallée de l'Ouémé (Bénin). Depuis 2007, alors qu'on observe plutôt une augmentation des moyennes pluviométriques régionales, des travaux portent spécifiquement sur l'observation et le suivi de la végétation pour mieux comprendre les interactions entre le climat et l'activité végétale intra-saisonnière.

Pour cette étude, la télédétection spatiale est un outil essentiel qui peut apporter des informations de grande qualité sur la variabilité spatio-temporelle des états de surface à différentes résolutions spatiales. C'est donc un outil utile et très efficace pour étudier les interactions entre la surface continentale (notamment la couverture végétale) et le climat,

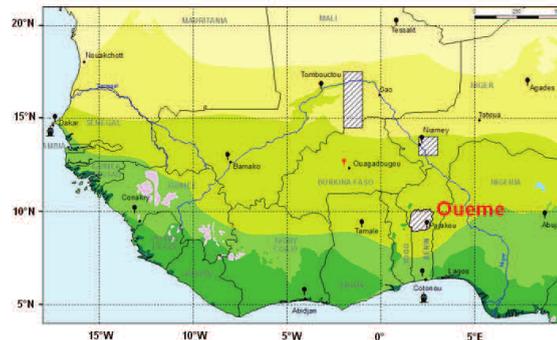
même si en revanche, la couverture nuageuse pendant la saison des pluies, notamment à l'échelle du domaine tropical, peut rendre difficile l'utilisation des données satellitaires pour suivre l'activité végétale.

L'objectif de cette étude est de comparer, à l'échelle du site béninois de l'Ouémé, les variations pluviométriques et celles d'un indice de végétation appelé Leaf Area Index (LAI) calculé à partir de deux sources de données : les données MODIS et les données ECOCLIMAP-2. L'analyse de la bonne adéquation entre ces données permet notamment de déterminer le gain ou la perte d'information spatiale et/ou temporelle en fonction de la résolution choisie, tout en déterminant les données qui peuvent minimiser de façon significative les biais provenant de la couverture nuageuse au cours de la saison des pluies.

1. La zone d'étude

La zone d'étude correspond au bassin versant supérieur de l'Ouémé (14 300 km²), au centre du Bénin, délimité par les latitudes 8,5°-10,5°N et les méridiens 1,5°-3,0°W (figure 1). Cette zone possède un climat de type soudanien avec des précipitations moyennes annuelles de 900-1200 mm, et une saison des pluies qui commence en avril (plus ou moins selon les années) et se termine en octobre (Lawin, 2007 ; Thamm *et al.*, 2008 ; Zin *et al.*, 2009). La répartition et les principales caractéristiques de la végétation régionale ont déjà été classées grâce à la télédétection par Bigot *et al.* (2005), Zin *et al.* (2009) ainsi que Bel (2010), qui ont déterminé essentiellement des espaces de forêts, de savane, de zone de cultures, de zone urbaine et de jachère. Selon Zannou (2011), la période 1978-2006 a enregistré de grands changements de végétation dans cette région, avec une dégradation des espaces forestiers et une augmentation des cultures et des jachères.

Figure 1 : Localisation des trois zones AMMA-CATCH (en hachures) en Afrique de l'Ouest où sont étudiées les interactions entre le climat, l'hydrologie et les états de surface (adapté à partir d'un document AMMA-CATCH / Observatoire hydrométéorologique sur Afrique de l'Ouest, résumant la répartition des principaux écosystèmes ouest-africains).



2. Données analysées et méthodologie

L'indice foliaire LAI est un indicateur bioclimatique dans l'étude des processus et des interactions entre le climat et la végétation. Il se définit comme le ratio de la surface totale supérieure des feuilles par rapport à une unité de surface. Il s'agit d'un indice utilisé par une très large communauté scientifique pour mesurer la vitalité de la végétation et définir ses variations intra- et interannuelles. Le LAI reflète l'adaptation de l'état des plantes aux changements climatiques, en particulier dans les zones arides et semi-arides où les variations interannuelles du climat sont importantes (Zhang *et al.*, 2005 ; Soudani *et al.*, 2008). Les valeurs normalisées du LAI sont comprises entre 0 et 7. Les fortes valeurs correspondent aux densités les plus importantes de la biomasse verte. Pour estimer le LAI grâce à la télédétection, il existe de nombreuses méthodes : 1) le développement de relations statistiques entre LAI et les indices de végétation (Wang *et al.*, 2005 ; Fan *et al.*, 2009) ; 2) l'utilisation

d'algorithme pour calculer des tables de correspondance (ou LUT – *Look-Up Table* ; Weiss *et al.*, 2004), 3) les réseaux de neurones (Xiao *et al.*, 2009) et 4) le recours à des modèles physiques d'inversion ou d'autres méthodes non paramétrique (Xiao *et al.*, 2009). Mais l'incertitude persiste dans sa précision, en fonction des résolutions spatio-temporelles et du type de données analysées. C'est une cause des grandes variétés de qualité des produits LAI, provoquées surtout par des questions d'instruments, de données manquantes et d'autres bruits parasitant les résultats, sans compter qu'il est souvent difficile et complexe de valider ces mesures indirectes à partir de calibration *in situ*.

Le LAI est par exemple estimé à partir de capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) lancé dans l'espace par la NASA en décembre 1999 pour la surveillance de l'atmosphère terrestre, des océans et des terres émergées. Le produit 'MOD15A2 LAI' avec une résolution spatiale de 1 km, proposant des composites sur 8 journées, est analysé ici sur la période 2005-2007, période sur laquelle nous disposons d'autres données radiométriques et climatiques sur la zone d'étude au Bénin. Les données ont été téléchargées avec l'outil de l'USGS, Global Visualization Viewer (Glovis : <https://glovis.usgs.gov/>). Leurs valeurs sont stockées avec un facteur qui doit ensuite être appliqué pour les transformer en valeurs biophysiques. Ces valeurs LAI de MOD15A2 ont ensuite été comparées aux valeurs provenant de la base de données LAI-ECOCLIMAP2.

Etablie avec une résolution spatiale de 1 km, à l'échelle mondiale et actualisée jusqu'en 2010, les données ECOCLIMAP comprennent deux composantes : 1) une classification des écosystèmes et 2) un ensemble cohérent de paramètres de surface continentaux (indice foliaire, fraction de couverture végétale, albédo et classification de la couverture des terres). Le produit ECOCLIMAP-2 a été spécialement développé dans le cadre du programme AMMA (Kaptue *et al.*, 2010) avec notamment l'estimation du LAI sur la base des produits MODIS, interpolée linéairement pour s'adapter à la résolution de 10 jours et de 1 km. A l'échelle de notre étude, ECOCLIMAP-2 a été ré-échantillonné à une résolution spatiale de 5 km.

3. Résultats

3.1. Etude de la variabilité de l'activité végétale interannuelle et intra-saisonnière

A partir des valeurs du LAI, il est possible d'identifier les principales variations saisonnières et interannuelles pour essayer de comprendre l'influence de la variabilité climatique. Le calcul est mené à l'échelle moyenne du bassin versant de l'Ouémé (figure 2).

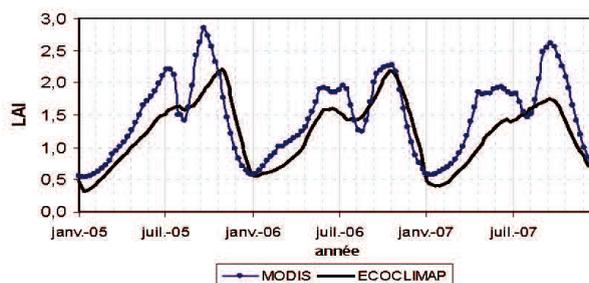


Figure 2 : Variabilité des valeurs du LAI moyen calculées à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé, sur la période 2005-2007 et en fonction de deux sources de données : MODIS et ECOCLIMAP-2.

La relation entre les deux indicateurs n'est pas rigoureusement synchrone ou identique sur la période d'étude, notamment pendant la saison des pluies. La dynamique annuelle du LAI

MODIS est bimodale (figure 3), avec un pic en juin et un autre en septembre, tandis que la dynamique temporelle du LAI ECOCLIMAP2 est plutôt monomodale (mais pas en 2006). Cela peut s'expliquer par les biais liés à la résolution des données et/ou au lissage que cela engendre sur les séries. Pour ECOCLIMAP-2, le maximum est par exemple beaucoup plus faible (1,75) en 2007 que celui observé avec MODIS (2,8) sur année 2007. Ces différences saisonnières en fonction des deux types de données compliquent donc l'interprétation des relations climat-végétation ainsi que l'interprétation régionale des processus en fonction des couvertures végétales. Plusieurs études indiquent également qu'il y a au moins deux problèmes liés au produit LAI MODIS (Xiao *et al.*, 2009).

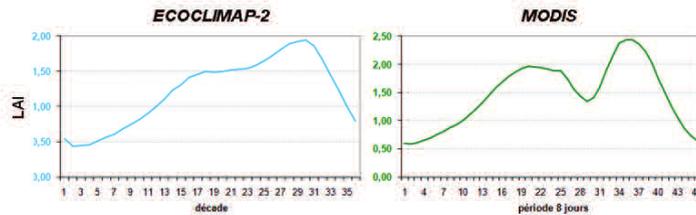


Figure 3 : Signatures saisonnières moyennes (2005-2007) du LAI dans le bassin versant de l'Ouémé selon les données ECOCLIMAP-2 et MODIS.

Selon des statistiques établies à partir des données SPOT-VGT sur la période 2002-2009 en étudiant spécifiquement le cœur de la saison des pluies (juillet-août), on observe que le pourcentage de nuages est alors maximum et entraîne une signature bimodale artificielle lors du calcul du LAI MODIS (figure 4).

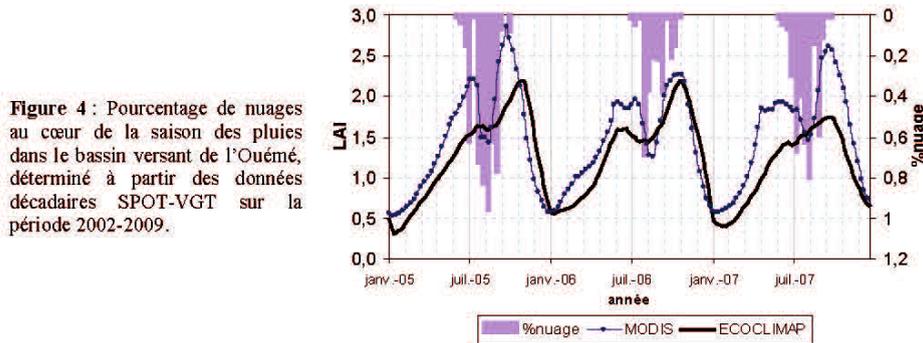


Figure 4 : Pourcentage de nuages au cœur de la saison des pluies dans le bassin versant de l'Ouémé, déterminé à partir des données décennales SPOT-VGT sur la période 2002-2009.

Cette variabilité de l'activité végétale vue au travers du LAI semble très complexe à décrire à cette échelle régionale moyenne, puis les variations intra-saisonnières et le caractère bimodal des séries MODIS ne peut pas s'interpréter directement en fonction du seul cumul pluviométrique. Ainsi, alors que les années 2005 et 2007 enregistrent un creux très significatif du LAI (figure 4) que l'on peut associer à la forte signature de la nébulosité ces années là, le caractère bimodal est également observable en 2006, année plus sèche (1080 mm, contre 1263 sur la moyenne 2002-2009) et avec une saison sèche moins chaude début 2005 (figure 5).

3.2. Etude de la variabilité selon différents types de couverts de végétation

Afin de mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle du LAI, l'analyse est conduite en fonction des principaux types d'occupation du sol (forêt, savane, zone de cultures, zone urbaine et jachère) établis selon des classifications automatiques supervisées (Bel, 2010).

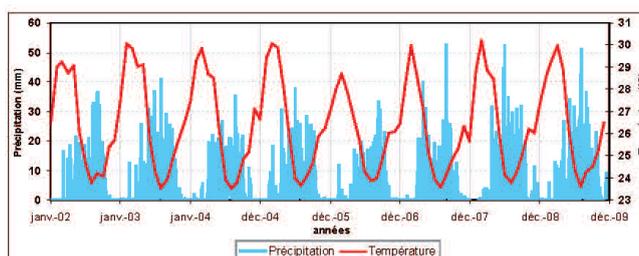
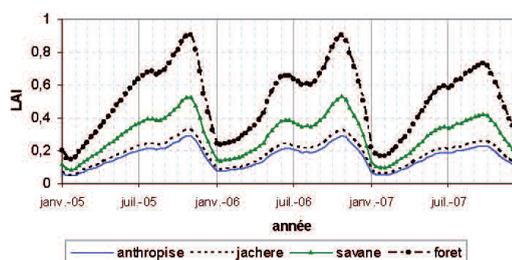


Figure 5 : Détermination de la variabilité pluvio-thermique saisonnière et interannuelle sur la période 2002-2009 à l'échelle moyenne du bassin de l'Ouémé supérieur. Analyse de la pluviométrie (histogramme) à l'échelle journalière à partir d'un indice stationnel (données AMMA) et de la température (courbe) à partir d'un indice régional simplifié calculé à partir des réanalyses NCEP.

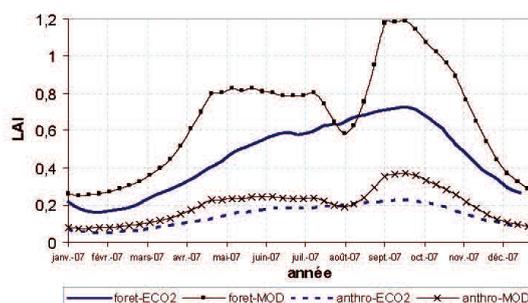
Les résultats indiquent des écarts significatifs de LAI entre les différentes classes (figure 6). Fondamentalement, les zones anthropisées et les zones de jachère enregistrent approximativement les mêmes valeurs (les plus faibles). Les valeurs les plus élevées correspondent aux espaces savanicoles et forestiers, ces derniers enregistrant cependant des valeurs de LAI (selon les données ECOCLIMAP-2) bien supérieures, de l'ordre de 0,9 pour les maxima saisonniers.

Figure 6 : Variabilité du LAI calculé à partir des données ECOCLIMAP-2 (2005-2007) et à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé, pour 4 principaux types d'occupation du sol.



L'observation plus spécifique des variations de deux classes d'occupation du sol (forêt et espaces anthropisés) au cours de l'année 2007 révèle des différences très importantes entre les signatures du LAI selon MODIS ou selon ECOCLIMAP-2 (figure 7).

Figure 7 : Comparaison des signatures du LAI, au cours de l'année 2007 et pour deux types d'occupation du sol (forêt et espaces anthropisés) dans le bassin versant de l'Ouémé, calculées à partir des données MODIS et ECOCLIMAP-2.



Conclusion

Ces résultats très préliminaires et sur une période très courte demandent évidemment maintenant plus d'analyses complémentaires pour pouvoir en tirer des observations et certains diagnostics systématiques sur les interactions climat/végétation et sur les potentialités des

produits satellitaires pour les étudier à l'échelle de notre domaine d'étude. Ainsi, d'autres produits sont actuellement en cours d'étude, comme les données SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) issues de plate-forme MSG et à une résolution spatiale de 3 km. De même, la prise en compte explicite de l'hétérogénéité spatiale grâce à la télédétection à plus haute résolution spatiale devrait permettre de mieux révéler les relations bioclimatiques et leurs différentes variations. Mais comme les choix des niveaux d'observation et de comparaison des échelles de paysages influenceront également les éléments discriminés, l'idéal serait de pouvoir intégrer les différentes données afin de mieux cerner les influences spatio-temporelles du climat sur les réactions en surface de la végétation.

Remerciements : Ces recherches sont conduites dans le cadre du programme AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*).

Références bibliographiques

- Bel C., 2010 : *Etablissement d'une carte d'occupation du sol et étude de la dynamique de la végétation*. Rapport de stage de master, LTHE, 35 p.
- Bigot S., Zin I. and Diedhiou A., 2005 : Apport de données de HRV de Spot pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin). *Télédétection*, 4 (4), 339-353.
- Fan L., Gao Y., Brück H. et Bernhofer C., 2009 : Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 151-156, DOI10.1007/s00704-007-0369-2.
- Kaptue Tchunte A., Roujean J.-L. et Faroux S., 2010 : ECOCLIMAP-II: An ecosystem classification and land surface parameters database of Western Africa at 1km resolution for the African monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project. *Rem. Sens. Environ*, 114, 961-976.
- Lawin A. E., 2007 : *Analyses climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin*. Thèse de Doctorat, INP Grenoble et Université d'Abomey-Calavi, 231 pages.
- Soudani K., Le Maire G., Dufrêne E., François C., Delpierre N., Ulrich E., Cecchini S., 2008 : Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. *Rem. Sens. Environ*, 112(5), 2643-2655.
- Thamm H. P., Judex M., Röhrig J. et Schulz O., 2008 : *IMPETUS Atlas Bénin*. Université Bonn, Allemagne, 141p.
- Wang Q., Adiku S., Tenhunen, Granier A., 2005 : On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote sensing of environment*, 94, 244-255.
- Weiss M., Baret F., Smith G.J., Jonckheere I. et Coppin P., 2004 : Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.*, 121, 37-53.
- Zhang X., M. A. Friedl, C. B. Schaaf, A. H. Strahler et Z. Liu, 2005 : Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments, *Journal of Geophysical Research*, 110, D12103, doi:10.1029/2004JD005263.
- Xiao Z. Q., Liang S. L., Wang J. D., Song J. L. & Wu X. Y., 2009 : A temporally integrated inversion method for estimating Leaf Area Index from MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 2536-2545.
- Zannou A. B. Y., 2011 : *Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin. Cas du bassin de l'Ouémé à Bététou*. Thèse de doctorat, CIPMA-Chaire UNESCO et Université d'Abomey-Calavi, 315 p.
- Zin I., Zribi M., Otlé C., Hiernaux P., Lacaze R., Le Hénarat-Masclé S., Sanou B., André C., Guibert S., Saux-Picart S., Dessay N., Boulain H., Cappelaere B., Decroix L., Séghieri J. et Séguis L., 2009 : Land cover assesment on the three AMMA experimental site from SPOT HRVIR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG-D-08-00159.

Annexe D : Do *et al.*, 2013 - Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2013, vol. 26, 206-211)

ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE LA COUVERTURE VÉGÉTALE ET LA TEMPÉRATURE DE SURFACE CALCULÉES À PARTIR DES DONNÉES LANDSAT ETM+ À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT DE L'OUÉMÉ SUPÉRIEUR (BÉNIN)

DO T. P. T.^{1,2}, BIGOT S.¹, ZIN I.¹ et GALLE S.¹

¹ Université Grenoble Alpes, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE UMR 5564, UJF / CNRS / IRD / G-INP)

Domaine universitaire, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 – France

Email : thao.do@ujf-grenoble.fr ; sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr

² Université des Mines et de Géologie d'Hanoi, Département de Cartographie

Dong ngac, Tu liem, Hanoi – Vietnam

Résumé : Au cours des dernières décennies, l'Afrique de l'Ouest a enregistré non seulement une réduction des précipitations annuelles moyennes, mais aussi une augmentation des températures. Ce paramètre a cependant été moins étudié alors qu'il est aussi important dans les interactions environnementales et les bilans géophysiques associés (échanges sol/végétation/atmosphère), ainsi que dans le cadre des impacts du changement climatique. Il demeure notamment complexe à étudier à l'échelle régionale, car la température est influencée à la fois par les variations climatiques et par les choix anthropiques qui déterminent l'occupation du sol (donc les qualités thermiques de surface et de l'atmosphère). La télédétection satellitaire à haute résolution spatiale est une des solutions pour améliorer la cartographie thermique en fonction de l'occupation du sol, et de ses évolutions. L'étude présentée ici porte sur l'utilisation de l'imagerie Landsat ETM+ pour analyser les contrastes de température de surface en fonction de différentes formations végétales (forêt dense, forêt décidue, forêt claire, savane boisée, savane arbustive, champs, jachère) dans une région du Nord-Bénin étudiée dans le cadre du programme international AMMA.

Mots-clés : Ouémé (Bénin), télédétection, température, végétation.

Introduction

En lien avec les variations climatiques enregistrées en Afrique de l'Ouest ces dernières décennies, la couverture végétale joue un rôle important dans les interactions entre la surface et l'atmosphère (Philippon *et al.*, 2005). Les études portant sur des indices de l'activité végétale issus de la télédétection montrent notamment leur étroite relation avec l'évolution saisonnière et interannuelle du climat. L'activité et l'abondance de la végétation influent également sur la température de surface et l'équilibre énergétique, donc sur tous les bilans climatiques. Mais les états de surface, aussi bien leur stabilité temporelle que leurs évolutions spatiales, dépendent aussi surtout de choix anthropiques (liés à l'agriculture et aux décisions d'aménagement). La cartographie des bilans géophysiques de surface doit donc être régulièrement revue au fur et à mesure des changements d'occupation et d'utilisation du sol, la télédétection satellitaire devenant l'outil idéal pour cela (aussi bien pour la définition des typologies de surface que de certaines propriétés physiques).

Les résultats proposés dans cet article à l'échelle d'un espace d'étude situé au Bénin sont uniquement ceux correspondant à la saison sèche de début 2012, étudiée grâce à des images Landsat ETM+. Ces travaux participent au programme AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis), et se focalise sur la haute vallée de l'Ouémé, une des trois zones ouest-africaines instrumentées dans le cadre de ce programme pour le suivi géophysique et l'analyse de la variabilité climatique. Les deux principaux objectifs sont de classer les principaux états de surface puis d'analyser leur relation fonctionnelle avec la température.

1. Contexte géographique

Le bassin versant de l'Ouémé Supérieur est situé au centre du Bénin (8,5°-10,5°N / 1,5°-3,0°W) et couvre une superficie de 14 366 km² (figure 1). Cette zone possède un climat soudanien avec une seule saison des pluies ; les précipitations moyennes annuelles (900-1200 mm) commencent normalement en avril, et se terminent en octobre (Zin *et al.*, 2009). Selon

un indice régional calculé à partir des réanalyses NCEP-NCAR sur la période 1948-2011, les températures moyennes annuelles sont de 26,3°C, les variations saisonnières étant marquées par des températures maximales en mars et minimales en août. Cet indice révèle également une tendance significative à la hausse des températures atmosphériques (au niveau géopotential 1000 hPa) moyennes annuelles depuis 1980. Plus généralement, des évolutions du climat récent ont provoqué des modifications des ressources en eau régionales, également couplées à un changement de l'occupation du sol sur le bassin versant de l'Ouémé Supérieur (Zannou, 2011).

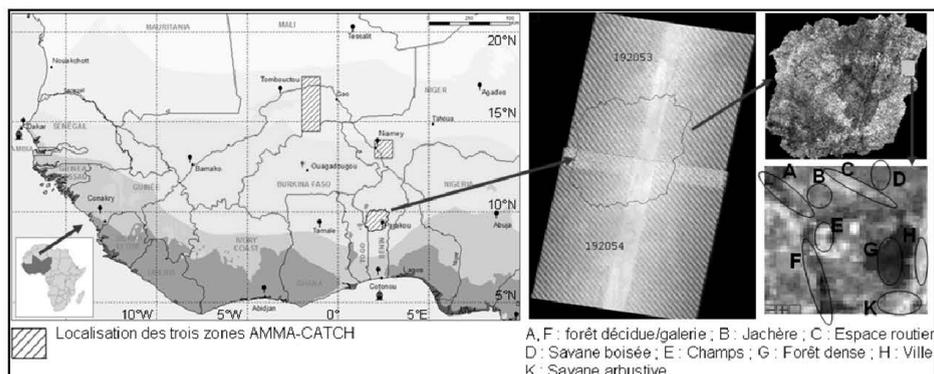


Figure 1. A gauche) localisation des trois zones AMMA-CATCH (hachures), notamment le bassin versant de l'Ouémé Supérieur, où sont étudiées les interactions entre le climat, l'hydrologie et l'occupation du sol (adapté d'après un document AMMA-CATCH / Observatoire hydrométéorologique sur Afrique de l'Ouest). A droite) limite de la zone d'étude de l'Ouémé sur une mosaïque de 2 scènes Landsat, avec l'exemple des différentes classes d'occupation du sol utilisées pour le ré-échantillonnage des classifications automatiques.

2. Données et méthodologie

2.1. Les données satellitaires retenues

Landsat est le nom commun des systèmes satellites (mis en orbite depuis 1972) dans le but de répondre aux exigences d'observation des changements des paysages naturels et anthropiques. La génération Landsat TM (*Thematic Mapper*) a été obtenue à partir du satellite Landsat 4 et 5, tandis que celle appelée ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) apparaît à partir du satellite Landsat 7 (Chander *et al.*, 2009). Après sélection des images récentes (2011-2012) et élimination de toutes les images inutilisables à cause de la trop grande couverture nuageuse, l'ensemble des données retenues dans cette étude comprend six images Landsat ETM+ acquises en janvier ou février 2012, soit durant la saison sèche, pour 3 dates différentes (13/01, 29/01 et 17/02) et provenant de la NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Les deux paires d'images (13/01 et 17/02) ont servi aux traitements et aux corrections des erreurs de capteur pour filtrer certains biais et parasites (figure 1), grâce à l'utilisation de protocoles et d'outils fournis par Landsat (voir par exemple http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php).

2.2. Le prétraitement des données

Chaque image est ensuite calibrée radiométriquement au moyen de deux transformations successives. La première convertit les valeurs numériques du rayonnement de l'image (appelées DN) en fonction de paramètres d'étalonnage pour les différents capteurs Landsat

ETM+. Ensuite, le rayonnement est converti en réflectance en normalisant l'angle d'élévation solaire (NASA, 2002). L'étalonnage est représenté par l'équation :

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi (\text{Grescale} * \text{Qcal} + \text{Brescale})d^2}{(\text{ESUN}\lambda\cos\theta)}$$

Où ρ_{λ} = réflectance TOA planétaire ; Grescale = gain pour la bande utilisée [$W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m) / DN$] ; Brescale = biais pour la bande utilisée [$W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$] ; Qcal = valeur de pixel calibré quantifiée [DN] ; π = constante mathématique approximativement égale à 3,14159 ; d = distance Terre-Soleil [unités astronomiques] ; ESUN λ = moyenne irradiance solaire exo-atmosphérique [$W / (m^2 \text{ microns})$] ; θ = angle zénithal solaire [degrés].

Le rayonnement terrestre est une fonction de deux paramètres : la température et l'émissivité. La bande thermique (*i.e.* la bande 6 pour ETM+, comprise entre 10,04 et 12,05 μm) est convertie en température de brillance, avec T_B qui signifie 'Temperature brightness' (NASA, 2002 ; Ruelland *et al.*, 2008).

$$T_B = K2 / (\ln(K1/L\lambda + 1))$$

Où T_B = temperature brightness (en Kelvin) ; K1, K2 sont des constantes appliquées pour Landsat7 ETM+ ; L λ (radiance spectrale à l'ouverture du capteur) = Grescale * Qcal + Brescale [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$].

Selon les lois de Planck et Stefan Boltzmann, les estimations de la température de surface (T_s) peuvent alors se calculer ainsi :

$$T_s = T_B / (1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \varepsilon)$$

Où $T(s)$ = la température de surface (en Kelvin) ; λ = la longueur d'onde du rayonnement émis (11,5 μm) ; $\rho = h \times c / \sigma$ ($1,438 \times 10^{-2}$ m K) ; h = la constante de Planck ($6,26 \times 10^{-34}$ J s) ; c = la vitesse de la lumière (2,998 $\times 10^8$ m / s) ; σ est constante de Stefan Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J K⁻¹) et ε l'émissivité.

Finalement, T_s est convertie en degrés Celsius. L'émissivité de la surface subie moins de changements dans le temps et dans l'espace que la température, elle est donc utilisée avant de calculer la température de surface. Il existe de nombreuses méthodes pour la calculer, mais celle utilisant la fraction du couvert végétal (appelé P_v) est la plus simple (Valor *et al.*, 1996) :

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon$$

Où P_v = la fraction du couvert végétal ; ε_v = l'émissivité du végétal ; ε_s = l'émissivité du sol nu ; $d\varepsilon$ = la fraction de l'émissivité causée par des réflexions internes ; $P_v = (NDVI - NDVI_{min})^2 / (NDVI_{max} - NDVI_{min})^2$; NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été calculé en utilisant les valeurs de réflectance des canaux du rouge (pred) et du proche infrarouge (pnir) ; $NDVI = (pnir - pred) / (pnir + pred)$.

2.3. Echantillonnage et classification

L'occupation du sol à l'échelle de l'Ouémé est définie selon différentes classes d'échantillonnage typique (figure 1), c'est-à-dire identifiable à partir de certains supports cartographiques ou photographiques. La définition de ces principales classes a d'abord été réalisée grâce à des cartes d'occupation du sol datant de 2000, 2005 et 2007 (Leroux, 2012) ; elle s'appuie aussi sur des descriptions de la végétation sur la zone étude réunies au cours de campagnes de terrain du programme AMMA, ainsi que sur des vérifications réalisées à partir des images de 2012 proposées sur Google Maps.

L'échantillonnage a finalement été calculé grâce à l'examen de l'histogramme spectral de l'image satellite pour chaque objet. Une classification automatique a ensuite été calculée en utilisant l'algorithme de type Maximum de Vraisemblance (*Maximum Likelihood*), utilisé dans beaucoup d'études sur la discrimination des couvertures de végétation (Subhash *et al.*, 2012).

3. Résultats

Après différents tests de classification, dix principaux types d'occupation du sol ont été classifiés (figure 2) : 1) la forêt dense (74,4 km² de la zone d'étude), 2) la forêt décidue (1282 km²), 3) la forêt claire (1295,8 km²), 4) la savane boisée (5389,6 km²), 5) la savane arbustive (3285,9 km²), 6) les espaces de jachère (882,3 km²), 7) les espaces cultivés (1857,4 km²), 8) les surfaces en eau (18,1 km²), 9) les inselberg (148,5 km²) et 10) les surfaces urbanisées (80,67 km²). Une validation de cette classification est ensuite réalisée à partir d'observations de terrain géoréférencées réalisées les années précédentes (ainsi qu'à partir d'une validation empirique fondée sur la comparaison avec des supports cartographiques d'occupation du sol). Les résultats statistiques de la classification (matrice de confusion) sont relativement satisfaisants, avec en moyenne plus de 87 % de pixels bien classés.

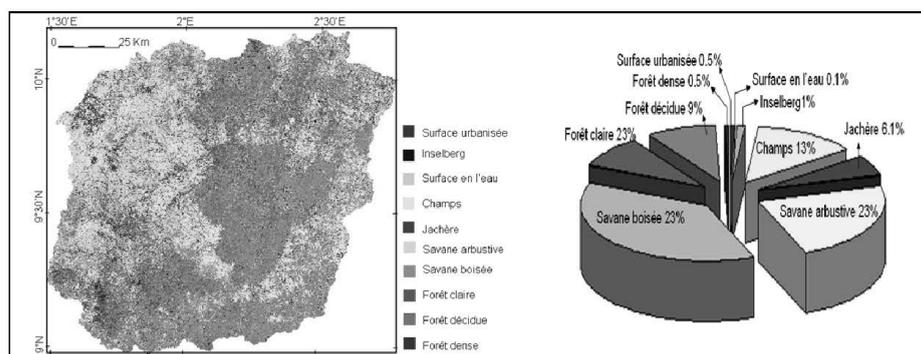


Figure 2. Résultat de la classification automatique des 10 principaux types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé Supérieur calculée à partir de l'image Landsat ETM+ du 29/01/2012.

Dans une seconde étape, les valeurs du NDVI, de l'émissivité et des températures de surface sont calculées pour la zone d'étude à partir de la même image (figure 3). Les régions où les valeurs de NDVI (ou d'émissivité) sont les plus basses (NDVI < 0,2 ; émissivité < 0,95) sont concentrées dans les parties nord-ouest de la zone d'étude et correspondent plutôt aux surfaces urbanisées, aux champs et jachères.

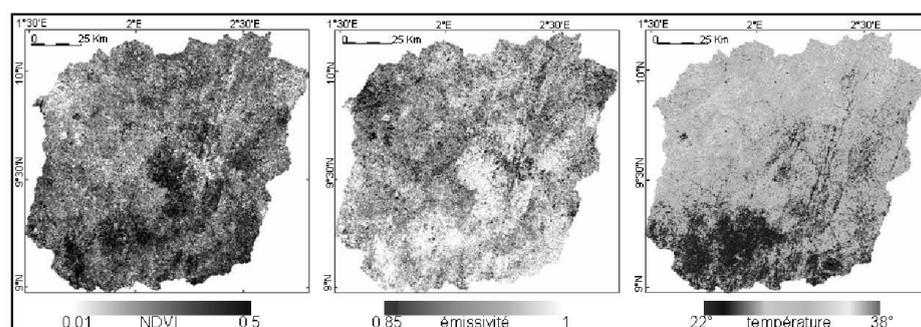


Figure 3. Carte du NDVI, de l'émissivité et de la température de surface (Ts) calculés à l'échelle de l'Ouémé Supérieur grâce à l'image Landsat ETM+ du 29 janvier 2012.

De faibles valeurs de NDVI sont également observées le long du fleuve Ouémé (qui s'étend du nord au sud à travers la zone d'étude) et dans les forêts décidues (autour du fleuve

ou bien alternant avec les forêts claires et les savanes boisées). Des niveaux élevés de NDVI ($NDVI > 0,2$ ou d'émissivité $> 0,95$) indiquent la présence de végétation verte, et correspondent aux savanes boisées, aux forêts claires et denses. Ces espaces se concentrent plutôt dans les parties centrales et sud-ouest de la zone d'étude. Les états de surface enregistrant les températures les plus élevées ($> 30^{\circ}C$) correspondent aux espaces les moins forestiers, soit plutôt la partie septentrionale de la zone d'étude. Les plus basses températures de surface ($< 30^{\circ}C$) sont observées principalement dans les régions correspondant aux types 'forêt' et 'surface en l'eau'. De telles températures sont également détectées pour les pixels associés aux espaces urbains, cela pouvant s'expliquer en partie par le mélange entre couvert urbain et végétation, et révélant par ailleurs la complexité d'analyse des propriétés de surface de ces 'mixels' (pixels mélangés) propres aux états de surface très anthropisés.

Une dernière étape cherche à établir une relation générale entre certains types d'occupation du sol, leur activité végétale (vue ici au travers de l'indice de végétation NDVI, et correspondant à la période spécifique de la saison sèche de début 2012) et la température de surface associée. Les relations bivariées NDVI/température sont particulièrement étudiées pour trois classes d'occupation du sol pouvant évoluer rapidement au cours des prochaines années, aussi bien pour des raisons climatiques (évolutions des contraintes bioclimatiques, notamment thermo-hygrométriques) qu'en fonction de choix anthropiques (parcellaire agricole, déboisement) : les espaces de jachère, les forêts claires et les forêts denses (figure 4).

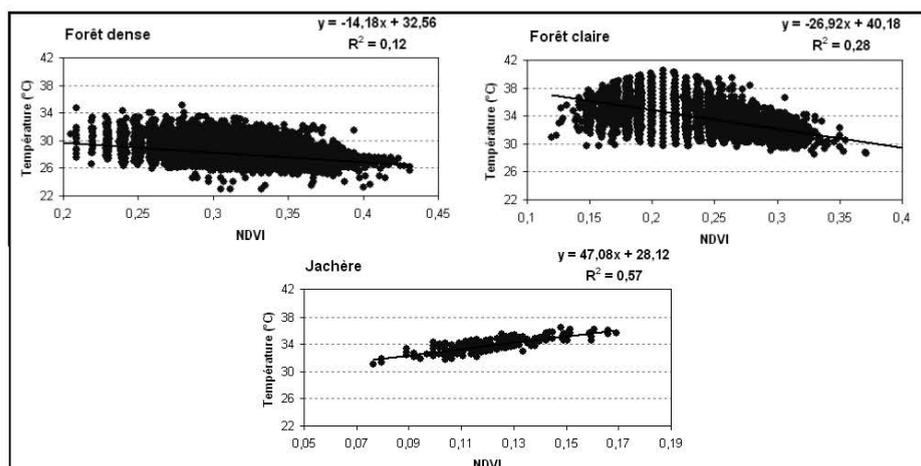


Figure 4. Relation entre température et activité végétale (NDVI) selon trois types d'état de surface de l'Ouémé Supérieur (identifiés à partir de l'image Landsat de janvier 2012) : forêt dense, forêt claire et jachère.

En zone boisée, la relation générale indique que les plus faibles valeurs de NDVI correspondent aux valeurs de T_s les plus élevées. Les valeurs de NDVI indiquent également que durant la saison sèche, leur amplitude est très grande (compris entre 0,2 et 0,43), en fonction de l'activité végétale des différentes formes de densité et d'associations végétales. L'amplitude thermique est plus faible en forêt dense (entre 25 et 34°C environ) qu'en forêt claire (29 à 41°C), caractéristique qui peut s'expliquer par la plus faible densité d'arbre au sol, et donc le rôle plus important du sol dans les échanges thermiques, surtout pendant cette période sèche durant laquelle la perte foliaire est très élevée. Le cas des espaces de jachère est particulier, puisque la liaison linéaire entre NDVI et T_s est positive et significative ($R^2 =$

0,57), mais les valeurs de NDVI sont très faibles (< 0,17), révélant la présence du sol nu durant la saison sèche.

Conclusion

Cette étude ponctuelle indique qu'il est possible de discriminer des relations fonctionnelles selon les principaux états de surface, en lien avec l'activité végétale et la température de surface. Ces résultats pourraient permettre d'estimer et de mieux comprendre les bilans climatiques au sol à l'échelle du domaine de l'Ouémé, en fonction des évolutions des superficies boisées et agricoles. D'autres indices pourront être calculés par ailleurs, par exemple un indice écoclimatique de type TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) pour estimer l'humidité du sol. Des mesures géophysiques collectées depuis plusieurs années sur cette zone expérimentale pourront venir compléter et valider ces premières conclusions. Malgré tout, il demeure encore différentes limites techniques pour aboutir à des bilans précis grâce aux classifications automatiques issues de la télédétection et au calcul d'indices biophysiques. Car la précision des résultats provenant d'études radiométriques dépend de la validation terrain qui doit être régulièrement répétée grâce à des campagnes de mesures *in situ*, pas toujours disponibles et/ou réalisables. Pour compléter cette première approche et afin d'aboutir à une méthodologie plus robuste, les analyses à partir de l'imagerie Landsat seront répétées sur d'autres années, mais également en tenant compte des conditions climatiques (pluviométriques notamment) avant et pendant les périodes étudiées.

Remerciements : Ces recherches sont conduites dans le cadre du programme AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*).

Bibliographie

- Chander G., Markham B. L., Helder D. L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of Environment*, **113**, 893-903.
- Leroux L., 2012. *Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS – Cas d'étude du communal de Djougou*. Rapport réalisé dans le cadre de l'ANR ESCAPE, Hydrosiences Montpellier, 62 pages.
- NASA, 2002. Landsat-7 Science Data User's Handbook, *NASA/Goddard Space Flight, Center, Greenbelt, MD*, Chap. 11.
- Philippon N., Martiny N., Camberlin P. et Richard Y., 2005. Impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne. *Journées de Climatologie – Nantes, 13-14 mars 2008 - Climat et société : Climat et végétation*.
- Ruelland D., Dezetter A., Puech C. et Ardoin-Bardin S., 2008. Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 3533-3551.
- Subhash T., Akhilesh S. et Seema S., 2012. Comparison of Different Image Classification Techniques for Land Use Land Cover Classification: An Application in Jabalpur District of Central India. *International Journal of Remote Sensing and GIS, Volume 1, Issue 1*, 26-31.
- Valor E. et Caselles V., 1996. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote sensing of Environment*, **57**, 167-184.
- Zannou A. B. Y., 2011. *Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin. Cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou*. Thèse de doctorat, CIPMA-Chaire UNESCO et Université d'Abomey-Calavi, 354 pages.
- Zin I., Zribi M., Otlé C., Hiernaux P., Lacaze R., Le Hénarat-Masclé S., Sanou B., André C., Guibert S., Saux-Picart S., Dessay N., Boulain H., Cappelaere B., Decroix L., Séghieri J. et Séguis L., 2009. Land cover assessment on the three AMMA experimental site from SPOT HRVIR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG-D-08-00159.

Annexe E : Résumé publié lors de la 4^{ème} Conférence Internationale AMMA (2-6 Juillet 2012, Toulouse, France).

MONITORING VARIABILITY OF VEGETATION IN THE UPPER OUEME BASIN IN BENIN: COMPARISON OF LAI COMPUTED FROM MSG-SEVIRI, MODIS AND ECOCLIMAP2

DO T. P. T. ^(1, 2), **BIGOT S.** ⁽¹⁾, **ZIN I.** ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université Joseph Fourier - Grenoble 1 / CNRS / G-INP / IRD, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - LTHE UMR 5564

BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 - France

Email : thao.do@ujf-grenoble.fr ; sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr ; isabella.zin@ujf-grenoble.fr

⁽²⁾ Université des Mines et de Géologie d'Hanoi

Département de Cartographie - Vietnam

Abstract: LAI (Leaf Area Index) is a key indicator in bioclimatic studies of processes and interactions between climate and vegetation. But uncertainty still persists in its accuracy, depending on spatio-temporal resolutions. The study of the variability of vegetation phenology is performed through the use of LAI over the Upper Ouémé basin (8.5 ° -10.5 N ° / 1.5 ° -3.0 ° W). The comparison of the values of LAI computed from three different sources of satellite data: 1) the decadal data from the database ECOCLIMAP-2 (2005-2007), 2) the 8 days LAI from MODIS data (2002-2009) and 3) the daily LAI obtained through the MSG-SEVIRI sensor (2006-2008). These three data sources have different spatial resolutions (1 km for MODIS 5 km for ECOCLIMAP-2 and 3 km for MSG-SEVIRI). This work shows on one hand the good match between these data. On the other hand it allows to determine the gain or loss of spatial and/or temporal information depending on resolutions. An important problem that appears is the persistent cloud cover during the rainy season which biases the MODIS data, the better resolution of MSG can significantly reduce the bias.

Keywords: Benin, Ouémé, vegetation, remote sensing, climate, LAI

Résumé : La variabilité saisonnière et interannuelle de la phénologie végétale dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin) : comparaison des indices LAI pour les données MSG-SEVIRI, MODIS et ECOCLIMAP-2.

Le LAI (Leaf Area Index) est un indicateur bioclimatique essentiel dans les études de processus et d'interactions entre climat et végétation. Mais beaucoup d'incertitude persiste encore dans sa précision, notamment en fonction des données et des résolutions spatio-temporelles utilisées. L'étude de la variabilité de la phénologie de la végétation (donc sa productivité saisonnière) est réalisée ici grâce à l'utilisation de l'indice LAI à l'échelle du bassin versant béninois de l'Ouémé supérieur (8.5°-10.5°N / 1.5°-3.0°W). Une comparaison des valeurs de LAI est réalisée à partir de trois sources différentes de données satellitaires : 1) les synthèses décennales issues de la base de données ECOCLIMAP-2 (2005-2007), 2) les synthèses de 8 jours issues des données MODIS (2002-2009) et 3) les synthèses quotidiennes obtenues grâce au capteur MSG-SEVIRI (2006-2008). Ces trois sources de données possédant différentes résolutions spatiales (1 km pour MODIS, 5 km pour ECOCLIMAP et 3 km pour MSG-SEVIRI), le travail réalisé ici permet de juger d'une part de la bonne adéquation entre les différents diagnostics provenant de ces données. Il permet d'autre part de déterminer les gains ou les pertes d'informations spatiales et/ou temporelles en fonction des produits et des résolutions utilisées. Un problème important qui apparaît par exemple est la prise en compte de la couverture nuageuse persistante pendant la saison pluie qui biaise les données MODIS, la meilleure résolution temporelle des données MSG permettant de diminuer très significativement ce biais.

Mots-clés : Bénin, Ouémé, télédétection, climat, végétation, LAI.

Liste des figures

Figure 0.1 : Ecarts à la moyenne 1950-1980 des températures mensuelles moyennes calculées au Bénin sur la période 1950-2012 à partir de 7 stations réparties dans le pays (la moyenne mobile annuelle est ajoutée en courbe en gras). Calculé grâce aux données mises à disposition par le Berkeley Earth	7
Figure 0.2 : Vulnérabilité des principaux biomes africains qui changeront sous l'influence du changement climatique entre la période historique 1901-2002 et celle projetée 2071-2100, et incertitude des simulations se basant sur la synthèse des 9 principaux scénarios de changement climatique potentiel.....	8
Figure 0.3 : Changements attendus, à l'échelle d'une partie de l'Afrique, des précipitations annuelles sur la période 2001-2050, et selon différentes simulations et combinaisons numériques régionales du climat utilisant le même scénario de base (SRES A1B) ; les résultats significatifs au seuil de 95 % sont indiqués par des points grisés.....	9
Figure 0.4 : Tendances et amplitudes (graphique du haut) des anomalies des températures moyennes de surface et (graphique du bas) des anomalies pluviométriques moyennes au Bénin sur la période observées (1960-2006) et simulées (2007-2100) selon les 3 principaux scénarios du GIEC (2007), A2 en rouge, A1B en bleu et B1 en vert ; toutes les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1979-99 ; les simulations sont issues de la synthèse de 15 modèles ; sur la période observée, les courbes en gras signalent la moyenne et la médiane ; sur la période simulée, les courbes en gras signalent les médianes).....	10
Figure 0.5 : Résumé des principales évolutions attendues à l'échelle africaine sur la période 2080-2099 des fonctions de distribution des percentiles (5, 17, 33, 50, 66, 83 et 95 %) des températures (graphique de gauche) et des précipitations (graphique de droite), selon une combinaison des résultats issus du scénario SRES A1B et CMIP3-Ensemble, et en se basant sur la moyenne de 1961-1990.....	10
Figure 0.6 : Synthèse de la variabilité des anomalies pluviométriques de l'espace sahélien (10–20°N / 17°W–38°E) en juin-juillet-août sur la période 1950-2049, selon le scénario A1B du GIEC (les anomalies indiquées en histogrammes sont calculées à l'échelle mensuelle par rapport à la moyenne 1950-99 ; elles sont définies à partir de la moyenne des sorties de 18 modèles couplés océan-atmosphère issues de la base de données IPCC/PCMDI/AR4 ; les croix rouges correspondent à la médiane des 18 modèles ; la zone grisée définit leur amplitude interquartile ; les courbes en bleu indiquent l'évolution observée (bleu clair) ou simulée (bleu foncé) d'un indice thermique des températures de surface atlantiques, avec Atlantique Nord moins Atlantique Sud).....	11
Figure 1.1 : Schéma des composantes essentielles de la mousson de l'Afrique de l'Ouest.....	18
Figure 1.2 : Schéma résumant la migration de la mousson africaine en visualisant le cycle saisonnier des précipitations (moyennes trimestrielles, calculées sur la période 1951-2002).....	18
Figure 1.3 : Evolution des indices pluviométriques en Afrique de l'Ouest de la décennie 1950 à la décennie 1980	20
Figure 1.4 : Anomalies pluviométriques en saison des pluies (de juin à octobre) pour un indice régional correspondant au Sahel sur la période 1950-2012.	21
Figure 1.5 : Déficit annuel moyen du débit observé dans la plupart des bassins versants en Afrique de l'Ouest de part et d'autre de la discontinuité hydroclimatique enregistrée dans les années 1970	23
Figure 1.6 : Comparaison des grands espaces climatiques et des formations végétales en Afrique de l'Ouest et Centrale : a) les moyennes des précipitations totales annuelles (1951-2002) ; b) les principales transitions climatiques ; c) la distribution des principales formations végétales.....	24
Figure 1.7 : Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA-CATCH ; source : http://www.amma-catch.org	28
Figure 1.8 : Exemple du réseau hydrographique idéalisé utilisé dans ALMIP à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé pour modéliser les ruissellements et processus hydriques	29
Figure 1.9 : Localisation du bassin supérieur de l'Ouémé et vue d'ensemble de géographie.....	30

Figure 1.10 : Régimes pluviométriques annuels moyens calculés dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur pour quatre sous-périodes différentes entre 1954 et 2006	31
Figure 1.11 : Réseau hydrométrique et sous-bassins de l'Ouémé bassin versant.....	32
Figure 1.12 : Régime pluvio-hydrologique dans le bassin versant de Bétérou sur la période 2005-2008 mesurée à station C328 (Bétérou).....	32
Figure 1.13 : Carte des forêts classées du Bénin en fonction des trois principales zones climatiques.....	33
Figure 1.14 : Exemple des différents types des végétations observés dans le bassin versant de l'Ouémé ; source des clichés : Bouchez J.-M. (LTHE/IRD), Seghieri J. (CESBIO/IRD), Varado N. (LTHE).....	34
Figure 1.15 : Exemple de l'évolution de l'occupation du sol à trois dates différentes (1978, 1995 et 2006) analysées grâce à la télédétection satellitaire à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur.....	35
Figure 1.16 : Les principaux calendriers culturels dans l'Ouémé supérieur	36
Figure 1.17 : Etablissements humains, évolutions démographiques entre 1992 et 2002, ainsi que les projections pour 2025 à l'échelle du bassin de l'Ouémé supérieur.....	36
Figure 2.1 : a) Début moyen de l'activité végétale en Afrique (pour la première saison de l'année civile) calculé avec les données NDVI3g sur la période 1981-2011 en utilisant le seuil d'une méthode adaptative ; b) la fin moyenne de l'activité ; c et d) le début et la fin d'activité pour les zones enregistrant une deuxième saison	43
Figure 2.2 : Carte des différents LAI produits à l'échelle d'une partie de l'Afrique de l'Ouest à la fin de septembre 2007 à partir de quatre types de données (d'après Gessner <i>et al.</i> , 2013) : a) MODIS (MOD15A2), b) GEOV1, c) CYCLOPES et d) LSA-SAF.....	44
Figure 2.3 : Exemple de la cartographie planétaire d'une synthèse sur 8 jours du LAI issue des données MODIS (MOD15A2) valable pour le 17 mai 2014 (source : http://landweb.nascom.nasa.gov/).....	47
Figure 2.4 : Les quatre principaux domaines géographiques couverts par les produits de type LSASAF, avec l'Europe (Euro), l'Afrique du Nord (NAfr), l'Afrique du Sud (SAfr) et l'Amérique du Sud (SAme).....	48
Figure 2.5 : Description des principales étapes de construction de la base de données ECOCLIMAP-2	49
Figure 2.6 : Exemple d'un zoom multiscalair sur la commune d'Affon, au Bénin (en bordure du fleuve Ouémé) à partir d'images Landsat possédant une résolution spatiale variant entre 15 et 120 m.....	50
Figure 2.7 : Exemple du réseau en activité en 2002 à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur, avec la localisation des deux sites à instrumentation renforcée, celui du bassin de la Donga et le super-site à son extrémité sud-est (document extrait du rapport de campagne 2002 : http://www.amma-catch.org/).....	51
Figure 2.8 : Evolution du nombre de stations pluviométriques en activité dans le réseau AMMA-Catch de l'Ouémé supérieur, et de son taux de fonctionnement, sur la période 1997-2010 (pas de données disponibles pour 2004) ; établi à partir des données du rapport de campagne 2010 disponible à partir de http://www.amma-catch.org/).....	52
Figure 2.9 : Principales stations pluviométriques du réseau AMMA-Catch dans le bassin de l'Ouémé supérieur (carte de gauche, avec le réseau hydrographique), et stations en fonctionnement en 2010 (carte de droite, avec les principales routes et pistes).....	52
Figure 2.10 : Carte de l'occupation du sol sur le bassin de l'Ouémé supérieur en 2000 à partir d'une classification de scènes Landsat.....	53
Figure 2.11 : Carte de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé supérieur établie pour l'année 2007 (en trait blanc : le bassin de l'Ouémé et, en son sein, celui de la Donga ; en trait bleu : le réseau hydrographique ; en trait noir : les routes principales	54

Figure 2.12 : Les pourcentages d'occupation du sol selon cinq types dans le bassin versant l'Ouémé supérieur en 2007.....	55
Figure 2.13 : Cartographie de l'occupation du sol sur une partie du bassin de l'Ouémé supérieur en 2000, établie à partir d'une classification d'images Landsat ETM+	55
Figure 2.14 : Cartographie de l'occupation du sol en 3 principaux types sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé supérieur en 2012 établie à partir d'une image MODIS.....	56
Figure 2.15 : Evolution des trois principales occupations du sol entre 1973, 1986, 2000 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé	56
Figure 2.16 : Exemple du traitement du LAI-MODIS à l'échelle de l'Ouémé Supérieur, avec le passage des données brutes (à gauche) à une classification automatique non supervisée (à droite). 57	
Figure 2.17 : Exemple de sélection de sites d'entraînement (Region of Interest : ROI) lors d'une phase d'analyse d'une image Landsat ETM par classification automatique supervisée.	58
Figure 3.1 : Résumé conceptuel des interactions entre des gradients directs (nutriments, humidité, température), leurs déterminants environnementaux (climat, géologie, topographie) et la végétation naturelle potentielle, influencée par les pressions anthropiques.	63
Figure 3.2 : Cadre conceptuel reliant les échelles spatiales et temporelles et définissant les principales rétroactions pour aboutir à des modèles d'échelle continentale, avec des conséquences sur la dynamique écoclimatique d'échelle plus fine. Les flèches bleues (<i>respectivement rouges</i>) traduisent des dynamiques dans le sens d'une vision downscaling (<i>respectivement upscaling</i>).....	64
Figure 3.3 : Schéma illustrant l'étude des interactions entre climat et surface en essayant de tenir compte d'une approche multiscalaire	65
Figure 3.4 : Comparaison entre les cartes d'occupation des sols au Bénin en 1975 et 2000 (source : http://lca.usgs.gov/).	66
Figure 3.5 : Cartographie des espaces forestiers à l'échelle de la zone d'étude de l'Ouémé supérieur selon différentes résolutions spatiales propres à quatre types de produits issus de la télédétection satellitaire : 30 m, 1 km, 3 km et 5 km (le carroyage représente une grille de 25 km de résolution) ; sur la carte, le couleur vert représente "la forêt".	67
Figure 3.6 : Estimations des superficies forestières du bassin de l'Ouémé supérieur en fonction de quatre résolutions spatiales choisie pour le pixel élémentaire.	68
Figure 3.7 : Localisation des deux scènes LANDSAT 7 ETM+ pour couvrir le bassin supérieur de l'Ouémé.	69
Figure 3.8 : Image LANDSAT 7 ETM+ du 29/01/2012 avant (à gauche) et après (à droite) correction.	70
Figure 3.9 : Exemple d'un extrait issu d'une image LANDSAT 7 ETM+ de 29/01/2012 sur le bassin de l'Ouémé supérieur (à gauche) et de sa classification non supervisée en 8 classes (à droite) : les trois occupations du sol différentes (espaces encadrés) apparaissent cependant en grande partie dans les différentes classes.	70
Figure 3.10 : Schéma résumant les grandes étapes analytique pour la mise en œuvre de la classification supervisée sur la zone d'étude à partir de deux images LANDSAT ETM+.....	71
Figure 3.11 : Paramètres radiométriques calculés à l'échelle du bassin de l'Ouémé supérieur grâce à l'image LANDSAT ETM+ du 05/02/2003 : le NDVI (en haut à gauche), l'émissivité (en haut à droite) et la température de surface (en bas à droite).	73
Figure 3.12 : Idem que pour la figure 3.11, mais pour l'image LANDSAT ETM+ du 29/01/2012.	74
Figure 3.13 : Exemple de cinq zooms successifs à différentes échelles et à proximité de la ville de Djougou, extraits à partir de Google Map, et permettant une reconnaissance visuelle des principaux états de surface, dans un objectif de classification supervisée.....	76
Figure 3.14 : Relation bivariée entre le NDVI et la température de surface calculés à partir d'image Landsat ETM+ selon les 10 principaux types d'occupations du sol préétablis sur l'Ouémé supérieur en février 2003 (a) et janvier 2012 (b).	77

Figure 3.15 : Relation bivariée entre température de surface et activité végétale (NDVI) selon trois types d'état de surface de l'Ouémé supérieur (identifiés à partir de l'image LANDSAT ETM+ de janvier 2012) : forêt dense, forêt claire et jachère.....	78
Figure 3.16 : Réflectance spectrale selon les 10 types d'occupation du sol préétablis dans l'Ouémé supérieur : pour février 2003 (en haut) et janvier 2012 (en bas).....	79
Figure 3.17 : Exemple de la localisation des ROI (' <i>Region of Interest</i> ') sélectionnés sur l'image Landsat ETM+ de février 2003 pour représenter les 10 principaux types d'occupation du sol observés sur l'Ouémé supérieur (les encarts correspondent à un zoom de l'image Landsat associé à chaque fois à une illustration photographique du type de couverture rencontrée).	80
Figure 3.18 : Résultat de la classification automatique en 10 principaux types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur calculée à partir de l'image LANDSAT ETM+ du 05/02/2003.....	82
Figure 3.19 : Idem que pour la figure 3.18, mais pour l'image LANDSAT ETM+ du 29/01/2012.	83
Figure 3.20 : Résumé des superficies correspondant aux 10 principales classes d'occupation du sol du bassin versant de l'Ouémé supérieur en février 2003 et janvier 2012.	83
Figure 3.21 : Changement (en %) de l'occupation du sol en Afrique de l'Ouest établis à partir de l'imagerie Landsat sur la période 1975-1990 : évolutions selon la latitude (graphique du haut) ; évolution de la déforestation (carte de gauche) ou du déboisement (carte de droite).....	85
Figure 3.22 : Evolutions des espaces forestiers entre 2003 et 2012 dans l'Ouémé supérieur établies à partir de l'analyse diachronique d'images LANDSAT ETM+.....	86
Figure 3.23 : Idem que figure 3.22, mais pour l'évolution des espaces mixtes (savane, jachère, champs) entre 2003 et 2012.	86
Figure 3.24 : Résumé cartographique des principales dynamiques de l'utilisation des terres exercées par l'extension des régions agricoles dans le centre du Bénin entre 1991 et 2000 (établi à partir d'une étude diachronique utilisant des images LANDSAT ; les régions de la forêt protégée sont incluses dans les statistiques traitées).....	87
Figure 3.25 : Estimations des évolutions de l'occupation du sol dans l'Ouémé supérieur à partir de l'observation (2000) et de modélisations géostatistiques (2005 à 2025) ; d'après Judex <i>et al.</i> (2006). 88	
Figure 3.26 : Tendances démographiques au Bénin entre 1960 et 2008 : population totale (en millions), population rurale (en millions) et % de population urbaine	89
Figure 3.27 : Evolutions des températures décennales au sol (LST, <i>Land Surface Temperature</i>) au cours des années 2002 à 2012 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga (les températures sont estimées par satellite et mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal ; la courbe bleue en gras représente la moyenne des 11 années).....	90
Figure 4.1 : Cartographie des quatre principales variables suivies par satellite et décrivant la dynamique géophysique des états de surface à l'échelle d'une partie de l'Afrique de l'Ouest allant de la Côte d'Ivoire au Nigéria : a) le NDVI, b) la température de surface moyenne diurne (en °C), c) le LAI, d) le FPAR (en %) ; moyennes calculées sur la période 2000-2012 à partir des données MODIS (données mises à disposition par le ASIS – <i>Africa Soil Information Service</i>).	95
Figure 4.2 : Comparaison des signatures saisonnières moyennes du LAI pour le bassin versant de l'Ouémé supérieur sur la période 2005-2008 définies à partir des produits MODIS, ECOCLIMAP-2 et MSG-SEVIRI (les précipitations journalières moyennes sont indiquées par les valeurs en histogramme).....	96
Figure 4.3 : Détails pour l'année 2007 pour la comparaison entre LAI selon MODIS, LAI selon ECOCLIMAP-2 et NDVI selon SPOT-VGT calculé à l'échelle de l'Ouémé supérieur.	97
Figure 4.4 : Comparaison des signatures phénologiques saisonnières moyennes (2005-2008) calculées à l'échelle de l'Ouémé supérieur à partir de quatre types de données et indicateurs satellitaires : le LAI selon MODIS, le LAI selon MSG-SEVIRI, le LAI selon ECOCLIMAP-2 et le NDVI selon SPOT-VGT.....	97

Figure 4.5 : Comparaison entre les trois signatures saisonnières moyennes obtenues à l'échelle de l'Ouémé à partir de trois types de données satellitaires : le LAI ECOCLIMAP-2 (2005-2007), le NDVI SPOT/VGT (2002-2009) et le LAI MODIS (2002-2009).....	98
Figure 4.6 : Variabilité décadaire du NDVI issu de SPOT-VGT et calculée sur l'ensemble du bassin versant de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2009 : le NDVI régional minimum et maximum est représenté en pointillés, la courbe en gras représente la moyenne et les valeurs en histogramme indiquent le pourcentage de pixels bruités par la nébulosité pour chaque décade.	99
Figure 4.7 : Relation entre le pourcentage de pixels du NDVI SPOT-VGT biaisés par la nébulosité et la latitude calculée à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur (calculé à partir des données décadaires de la période 2002-2012 ; les pixels bruités par la nébulosité sont définis par les métadonnées de SPOT).....	100
Figure 4.8 : Relation bivariée entre les valeurs du NDVI et de l'EVI définis à l'échelle d'une indice régional de 50 x 50 km centré sur Djougou (les valeurs en rouge sont celles calculées sur les mois de JJA ; calculé à partir des données MODIS mises à disposition par l'IRI – <i>International Research Institute for Climate and Society</i>).	101
Figure 4.9 : Comparaison entre les indices de végétation NDVI et EVI sur la période 2001-2013 définis à l'échelle d'une indice régional de 50 x 50 km centré sur Djougou (calculé à partir des synthèses à 15 jours définies avec les données MODIS mises à disposition par l'IRI – <i>International Research Institute for Climate and Society</i>).	101
Figure 4.10 : Exemple de la comparaison entre NDVI (à gauche) et EVI (à droite) cartographiés à l'échelle de l'ensemble du Bénin pour la synthèse sur 15 jours allant du 28 juillet au 12 août 2005 (calculé à partir des données MODIS mises à disposition par l'IRI – <i>International Research Institute for Climate and Society</i>).	102
Figure 4.11 : Zoom issu de la figure 4.10 et détaillant la comparaison entre NDVI (à gauche) et EVI (à droite) à l'échelle de l'Ouémé supérieur (le fleuve Ouémé coupe la carte du Nord au Sud) pour la synthèse sur 15 jours allant du 28 juillet au 12 août 2005.	103
Figure 4.12 : Idem que la figure 4.11, mais pour un zoom à l'échelle de l'Ouémé supérieur pour la synthèse du 18 février au 5 mars 2013.	103
Figure 4.13 : Variations du NDVI pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga calculé grâce aux données satellitaires pentadaires eMODIS (<i>EROS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>) mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal.....	104
Figure 4.14 : Valeurs du NDVI cumulées sur l'année à partir des données pendataires eMODIS (<i>EROS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>) sur la période 2001-2013, pour la région Ouémé-Donga (données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal) ; la moyenne est indiquée en pointillés.	105
Figure 4.15 : Comparaison du NDVI cumulé sur les années 2001 à 2013 pour la région Ouémé-Donga à partir des données pendataires eMODIS (la moyenne des 13 années est indiquée en gras ; l'histogramme représente l'amplitude des valeurs pour chaque pentade sur toute la période (données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal).	105
Figure 4.16 : Ecart à la moyenne 2001-2013 du NDVI pour la région Ouémé-Donga calculés à partir des données pendataires eMODIS (la courbe en bleu correspond aux écarts pentadaires, la courbe en rouge à la moyenne mobile définie sur une fenêtre de 31 pentades) ; élaboré avec les données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal.	106
Figure 4.17 : Ecart à la moyenne annuelle du NDVI SPOT-VGT calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur.....	107
Figure 4.18 : Schéma illustrant les principaux éléments phénologiques analysés grâce au logiciel TIMESAT pour définir la saison végétative sur une série temporelle d'un indice de végétation : le début (a) et la fin (b) de la saison, le niveau de 80 % (c et d), la plus grande valeur (e), l'amplitude (f) et la longueur (g) de la saison ; (h) et (i) représentent l'intégrale indiquant l'effet cumulatif de la végétation durant la saison (document issu de Eklundh et Jönsson, 2011).	108
Figure 4.19 : Estimation de la phénologie saisonnière moyenne du NDVI-eMODIS pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga grâce à une fonction double logistique définie grâce à l'outil TIMESAT (les données NDVI sont pentadaires ; les débuts et fins de saison de	

végétation sont respectivement indiqués pour chaque année par des triangles verts et des ronds rouges, sauf en 2013 où les biais du NDVI sont trop importants)..... 109

Figure 4.20 : *Graphique de gauche*) la durée (en pentades) de la saison de végétation estimée pour les années 2002 à 2012 à partir des séries pentadaires du NDVI-eMODIS à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga ; *graphique de droite*) la pentade de début et de fin de saison végétative. Calculé à partir des données mises à disposition par le USGS Fews Net Data Portal, et à partir d'une fonction double logistique appliquée grâce à l'outil TIMESAT..... 110

Figure 5.1: Evolution des anomalies pluviométriques en août et octobre (en mm) à l'échelle d'un indice ouest-africain sahélien (10-20°N / 20°W-10°E) sur la période 1900-2013 (écarts calculés par rapport à la moyenne 1950-79 ; les moyennes mobiles sont calculées sur une fenêtre de 11 ans et indiquées en gras ; d'après les données fournies par le NOAA NCDC Global Historical Climatology Network Data – University of Washington – JISAO)..... 126

Figure 5.2 : Anomalie standardisées des précipitations (1921-2006) pour trois grandes régions pluviométriques définies en Afrique de l'Ouest : le Sahel Ouest, le Sahel Central et la Côte Guinéenne (la carte précise les stations utilisées pour le calcul des 3 indices) ; d'après Fink *et al.*, 2008. 127

Figure 5.3 : Variation des écarts pluviométriques des mois de juin et août à la station de Natitingou sur la période 1921-2012 (calculés par rapport à la moyenne trentenaire 1971-2000, à partir des données disponibles dans la base de données internationales du GHCN Version 2 ; les courbes en gras correspondent aux moyennes mobiles respectives, définies sur une fenêtre de 10 ans). 128

Figure 5.4 : Evolution des anomalies des températures atmosphériques (en °C) à la station de Parakou entre 1950 et 2012, la série thermique ayant été soumise à un ensemble de tests statistiques pour juger de son homogénéité sérielle (document issu du *Berkeley Earth*)..... 129

Figure 5.5 : Ecarts à la moyenne 1950-1980 des températures mensuelles moyennes minimales (TN) et maximales (TX) calculées au Bénin sur la période 2002-2012 à partir de sept stations réparties dans le pays (calculé grâce aux données mises à disposition par le *Berkeley Earth*). 130

Figure 5.6 : Rappels des principales stations pluviométriques ayant servi au calcul des champs pluviométriques interpolés à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé supérieur à une résolution de 0,01°, avec sur la carte de droite, un zoom des points de grille situés vers la sous-région de Djougou et Donga (le réseau hydrographique est également indiqué). 130

Figure 5.7 : Comparaison des totaux pluviométriques mensuels moyens calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur grâce à deux types de champs interpolés (à partir du réseau stationnel AMMA-Catch) : un champ interpolé par un krigeage simple et un autre interpolé par une méthode lagrangienne..... 131

Figure 5.8 : Relation bivariée entre d'une part, la pluie mensuelle à la station de Djougou (2002-2012) et d'autre part, celle calculée localement par interpolation simple par krigeage (à gauche) ou par interpolation lagrangienne (à droite)..... 131

Figure 5.9 : Comparaison des variations pluviométriques mensuelles sur la période 2002-2012 entre la station de Djougou (points), le pixel le plus proche issu d'une interpolation par krigeage simple (ligne jaune) et celui issu d'une interpolation lagrangienne (pointillés)..... 132

Figure 5.10 : Variations pluviométriques mensuelles sur la période allant de janvier 2002 à décembre 2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : comparaison entre la série de Djougou, la moyenne régionale calculée à partir du champ pluviométrique interpolé et les estimations par satellite (produit TRMM, version 7) du pixel le plus proche de la station de Djougou (les corrélations linéaires entre d'une part Djougou et le pixel TRMM, et d'autre part, Djougou et le champ interpolé, sont signalées en haut à droite)..... 133

Figure 5.11 : Graphique présentant deux relations bivariées des cumuls pluviométriques mensuels (en mm) à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012 : en bleu) entre les estimations pluviométriques de type RFE (issues de MODIS) et la moyenne du champ interpolé par krigeage ; en rouge) entre la station de Djougou et les estimations correspondant aux données TRMM (version 7, produit 3B43) ; les droites et équations de régression linéaire sont indiquées pour les deux cas. 133

Figure 5.12 : Comparaison entre les totaux pluviométriques annuels à la station de Djougou et ceux calculés à l'échelle de tout le bassin versant de l'Ouémé supérieur (avec les champs pluviométriques interpolés par krigeage) pour les années 2002 à 2012 (source des données : AMMA-Catch).	134
Figure 5.13 : Totaux pluviométriques annuels (en mm) à Djougou et pour l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012, comparés aux écarts thermiques (en °C) des TN et TX définis à l'échelle du Bénin (par rapport à la moyenne 1950-80).....	134
Figure 5.14 : Cumuls pluviométriques annuels à la station de Djougou pour les années 2002 à 2012 à partir des données journalières (source des données : AMMA-Catch).	135
Figure 5.15 : Cumuls pluviométriques annuels calculés pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de la région de l'Ouémé-Donga grâce aux estimations pluviométriques satellitaires décennales définies par le USGS Fews Net Data Portal à partir du RFE (<i>Rainfall Estimate</i>) qui se base sur l'intégration de plusieurs sources satellites et sur une résolution spatiale de 8 km.	136
Figure 5.16: Cumuls pluviométriques annuels (en mm) dans le bassin de l'Ouémé supérieur entre 2002 et 2012, et comparaison avec les anomalies thermiques (en °C) des températures de surface de l'Atlantique (TSO) décrites par l'indice AMM (<i>Atlantic Meridional Mode</i>) en janvier et septembre.....	137
Figure 5.17: Anomalie thermiques (en °C) des températures de surface de l'océan mondial pour le 17 janvier 2011 (carte du haut) et le 16 septembre 2010 (carte du bas) ; adapté d'après des documents issus de la NOAA/NESDISS.	138
Figure 5.18 : Extrait de la carte des tendances éco-climatiques définies à l'échelle ouest-africaine grâce à une combinaison d'imageries satellitaires sur la période 1998-2010 : les zones en grisé correspondent à une stabilité observée sur la période d'étude de 13 ans, celles en vert à une tendance générale à un verdissement mais avec parallèle des précipitations stables (' <i>anomalous greening</i> '), et celles en bleu à un verdissement associé à une hausse corollaire des précipitations (' <i>climatic greening</i> '); les zones en rouge correspondent à des dégradations importantes de type ' <i>hot-spot</i> '; adapté d'après Boschetti <i>et al.</i> (2012).	139
Figure 5.19 : Schéma résumant les principales étapes de l'analyse des liaisons entre la variabilité des précipitations traduite par le champs pluviométrique interpolé grâce au réseau stationnel et celle des champs du NDVI sur la période 2002-2012 grâce à une analyse par SVD.	140
Figure 5.20 : Résultats spatio-temporels issus du premier mode factoriel obtenu par SVD (Singular Value Decomposition) calculée entre les précipitations mensuelles (95,7 % de la variance expliquée) et le NDVI SPOT-VGT (77,9 % de la variance expliquée) sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : en haut, la comparaison des coefficients temporels des variations pluviométriques et du NDVI ; en bas, les coefficients spatiaux des précipitations (carte de gauche) et du NDVI (carte de droite).....	141
Figure 5.21: Comparaison entre la carte des températures de surface de l'Ouémé supérieur calculée à partir de l'image LANDSAT ETM+ du 29/01/2012, et la carte correspondant au premier mode du NDVI à partir de la SVD calculée précédemment (cf. figure 5.20).....	142
Figure 5. 22 : a) Relation saisonnière moyenne entre les précipitations et le NDVI à l'échelle de l'Ouémé supérieur (calculé sur la période 2001-2013 grâce aux estimations pluviométriques (RFE, <i>Rainfall Estimate</i>) et au NDVI décennales fournis par le USGS Fews Net Data Portal) ; b) Corrélation linéaire entre les 2 variables, avec un décalage de 0 à 11 décades, où les variations des précipitations précèdent celles du NDVI (les histogrammes en gris foncé indiquent les coefficients significatifs au seuil de 0,99 %).....	144
Figure 5.23 : Corrélations linéaires entre précipitations (RFE, <i>Rainfall Estimate</i>) et NDVI décennales calculés pour chaque année de la période 2001-2013 (avec un décalage de 0 à 11 décades, où les variations des précipitations précèdent celles du NDVI ; la droite horizontale en pointillé indique les coefficients significatifs au seuil de 0,99 % ; calculé à partir des données fournies par le USGS Fews Net Data Portal).....	144
Figure 5.24 : Corrélations linéaires entre d'une part trois paramètres phénologiques (décade de début et de fin de saison végétative, ainsi que sa durée) et d'autre part les précipitations décennales cumulées pour la même année calculées à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012 (les dates phénologiques sont établies à partir du NDVI-eMODIS et calculées sous TIMESAT ; les précipitations correspondent aux estimations RFE ; les pointillées horizontales correspondent au seuil de significativité à 95 %.....	145

- Figure 5.25 :** Résultats spatio-temporels issus du premier mode factoriel (PC1) obtenu par SVD calculée entre les anomalies pluviométriques mensuelles (73,2 % de la variance expliquée) et celles du NDVI (2,5 % de la variance) calculées sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : en haut, la comparaison des coefficients temporels des variations pluviométriques et du NDVI ; en bas, les coefficients spatiaux des précipitations (carte de gauche) et du NDVI (carte de droite)..... 147
- Figure 5.26 :** Comparaison entre les cumuls pluviométriques interpolés pour une année plutôt en dessous de la moyenne régionale, l'année 2005 (carte de gauche) et une année au-dessus de la moyenne, l'année 2009 (carte de droite), à l'échelle du bassin de l'Ouémé supérieur (documents issus des rapports de campagne 2005 et 2009 de l'observatoire AMMA-Catch). 148
- Figure 5.27:** Idem que pour la figure 5.25, mais pour le deuxième mode factoriel (PC2), avec respectivement 5,8 % de la variance expliquée pour les précipitations et 13,2 % pour le NDVI..... 149
- Figure 5.28 :** Evolution des anomalies annuelles standardisées entre 1983 et 2012 pour deux indices définis à l'échelle du domaine sahélien (données fournies par Anyamba *et al.*, 2014) : un indice pluviométrique et un indice du NDVI ; la comparaison est établie sur la période 2002-2012 avec les résultats issus du premier mode de la SVD calculée entre précipitations et NDVI à l'échelle de l'Ouémé supérieur, les valeurs factorielles ayant été ici multipliées par (-1) pour faciliter la comparaison. 149
- Figure 5.29 :** Diagramme temps-longitude des anomalies du NDVI mensuel entre 2000 et 2012 sur un transect sahélien moyen 10°-20°N, et compris entre 18°W et 40°E (les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1981-2012, à partir des données GIMMS version 3, appelées aussi NDVI3g, provenant de NOAA-AVHRR ; adapté d'après un document de Anyamba *et al.*, 2014). 150
- Figure 5. 30 :** Idem que pour la figure 5.??, mais pour le troisième mode factoriel (PC3), avec respectivement 3,9 % de la variance expliquée pour les précipitations et 10,9 % pour le NDVI..... 151
- Figure 5.31:** Idem que pour la figure 5.??, mais pour le quatrième mode factoriel (PC4), avec respectivement 5,5 % de la variance expliquée pour les précipitations et 2 % pour le NDVI..... 152

Liste des tableaux

Tableau 0.1 : Comparaison entre les évolutions thermiques (en °C par siècle) observées au Bénin et celles observées à des échelles géographiques supérieures depuis quatre dates seuils (les évolutions au Bénin sont calculées à partir de 7 stations nationales ; les taux d'incertitude sont indiqués en italique ; adapté à partir des résultats fournis par le Berkeley Earth).	8
Tableau 1.1 : Description des principaux types de végétation dans le bassin supérieur de l'Ouémé (d'après Roehring <i>et al.</i> , 2005 ; Hiepe, 2008 ; Leroux, 2012).	34
Tableau 2.1 : Ensemble des spécifications concernant les produits MODIS de type MOD15A2 (d'après https://lpdaac.usgs.gov/).	47
Tableau 2.2 : Principales caractéristiques radiométriques du capteur SEVIRI embarqué par MSG (Jiang <i>et al.</i> , 2006 ; Fensholt <i>et al.</i> , 2006).	48
Tableau 2.3 : Les principales caractéristiques radiométriques des bandes LANDSAT 7 ETM+ (Source : NASA, 2002).	50
Tableau 2.4 : Dynamique d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé selon les données dérivées de la classification de scènes LANDSAT entre 1991 et 2000, et en fonction de cinq types d'occupation du sol (Judex <i>et al.</i> , 2006).	53
Tableau 3.1 : Les dix principaux types d'occupation du sol observés à l'échelle de l'Ouémé supérieur et établis à partir de toutes les nomenclatures et classifications préétablies sur la région.	75
Tableau 3.2 : Matrice résumant le calcul des coefficients de Jeffries-Matusita (JM) et de Divergence Transformée à partir des échantillons d'entraînement sélectionnés sur l'image LANDSAT ETM+ de février 2003, afin de définir la qualité de la séparabilité des différentes classes (les plus faibles valeurs sont repérées en grisé).	81
Tableau 3.3 : Idem que le tableau 3.2, mais pour l'image LANDSAT ETM+ de janvier 2012.	81
Tableau 3.4 : Comparaison de la précision (précision globale et indice de Kappa) de la classification supervisée en fonction des différents algorithmes testés.	82
Tableau 3.5 : Les principaux changements de l'occupation du sol calculés (en km ²) entre février 2003 et janvier 2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur en comparant les 2 classifications réalisées à partir des images LANDSAT ETM+.	84
Tableau 3.6 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1995 et 2006 par district phytogéographique au Bénin (les signes + et - traduisent les évolutions en ha). Document extrait de l'Atlas de biodiversité du Bénin (2010).	88
Tableau 5.1 : Comparaison entre les cumuls pluviométriques annuels calculés sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur soit à partir des moyennes du champ stationnel interpolé, soit à partir des estimations de type RFE ; le rang des 11 années est indiqué en italique au dessous de chacun des cumuls annuels.	135
Tableau 5.2 : Synthèse de la variance expliquée (en %) par les quatre premiers modes obtenus à l'issue d'une SVD (Singular Value Decomposition) calculée entre les anomalies pluviométriques mensuelles et celles du NDVI SPOT-VGT à l'échelle de l'Ouémé supérieur sur la période 2002-2012.	146

Liste des annexes

Annexe A : Les matrices de confusion calculées avec les images LANDSAT	178
Annexe B : Do T. <i>et al.</i>, 2011 – Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2011, vol. 24, 195-200)	179
Annexe C : Do <i>et al.</i>, 2012 – Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2012, vol. 25, 231-236)	186
Annexe D : Do <i>et al.</i>, 2013 – Article publié dans les Publications de l'Association Internationale de Climatologie » (2013, vol. 26, 206-211)	194
Annexe E : Résumé publié lors de la 4^{ème} Conférence Internationale AMMA (2-6 Juillet 2012, Toulouse, France).....	201

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	3
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	5
INTRODUCTION GENERALE	7
CONTEXTE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE	7
PROBLEMATIQUE ET QUESTIONNEMENT	12
OBJECTIFS ET RESULTATS ATTENDUS	13
ORGANISATION DE LA THESE	13
PARTIE 1 :	15
LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	15
1.1. LA VARIABILITE CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST : LES PRINCIPALES EVOLUTIONS OBSERVEES AU COURS DES 60 DERNIERES ANNEES	17
1.1.1. Mécanismes principaux du climat en Afrique de l'Ouest	17
1.1.2. Synthèse sur la variabilité interannuelle des précipitations ouest-africaines	19
1.1.3. Les évolutions constatées de la relation pluie-débit	21
1.1.4. Les conséquences environnementales à l'échelle des interactions climat-végétation	23
1.2. LE PROGRAMME AMMA : OBJECTIFS ET APPROCHES MULTI-ECHELLES	25
1.2.1. Les objectifs scientifiques, mesures et dispositifs	25
1.2.2. Les principales échelles spatiales d'analyse	26
1.2.3. Les projets en lien avec AMMA	26
1.2.3.1. Système d'observation de AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique)	26
1.2.3.2. Le programme ALMIP (AMMA Land Surface Model intercomparison Project)	28
1.2.4. Justification du choix de la zone d'étude de l'Ouémé Supérieur	29
1.3. LE BASSIN VERSANT EXPERIMENTAL DE L'OUEME SUPERIEUR AU BENIN	30
1.3.1. Localisation géographique	30
1.3.2. Les conditions hydro-climatiques moyennes	31
1.3.3. L'occupation du sol et les principales associations végétales	33
1.4. CONCLUSION DE LA PARTIE 1	38
PARTIE 2	39
DONNEES SATELLITAIRES ANALYSEES ET METHODOLOGIES RETENUES	39
2.1. LA TELEDETECTION SATELLITAIRE POUR L'ETUDE DES INTERACTIONS BIOPHYSIQUES CLIMAT-VEGETATION	41
2.1.1. Rappel des fondements théoriques de la télédétection	41
2.1.2. Construction d'indices néo-canaux (de type NDVI ou LAI)	41
2.1.3. Capacité de l'information satellitaire dans l'étude des interactions climat-végétation	44
2.2. LES DONNEES ENVIRONNEMENTALES ANALYSEES	46
2.2.1. Les données satellitaires disponibles	46
2.2.1.1. Les données issues de SPOT Végétation (2002-2012)	46
2.2.1.2. Les données MODIS (2002-2009)	46
2.2.1.3. Les données SEVIRI (2006-2009)	47
2.2.1.4. Les données de type ECOCLIMAP-2 (2005-2007)	49
2.2.1.5. Les données LANDSAT ETM+	49
2.2.2. Les données pluviométriques stationnelles analysées	51
2.2.2.1. Le réseau de l'OHHVO	51
2.2.2.2. Qualité du réseau	51
2.2.3. Les cartes d'occupation du sol à l'échelle de l'Ouémé supérieur	52
2.2.3.1. La carte d'occupation créée par le projet IMPETUS	52
2.2.3.2. La carte d'occupation du sol définie par C. Bel (2010)	54
2.2.3.3. Les cartes produites pour 2000 et 2012 par L. Leroux (2012)	55
2.3. METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES	57
2.3.1. La classification des images issues de la télédétection	57

2.3.1.1. La classification non supervisée.....	57
3.1.2. La classification supervisée.....	58
2.3.2. L'Analyse en Composantes Principales (ACP)	58
2.3.3. La Singular Value Decomposition (SVD)	59
2.4. CONCLUSION DE LA PARTIE 2	61
PARTIE 3 :.....	63
OCCUPATION DU SOL ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES : PRINCIPALES TENDANCES ET TYPOLOGIE EN PERSPECTIVE D'UNE ANALYSE ECO-CLIMATIQUE	63
3.1. L'HETEROGENEITE SPATIALE ET APPROCHE MULTISCALEIRE	64
3.2. ÉCHELLES ADAPTEES POUR LE SUIVI DE LA VEGETATION DE L'OUEME	66
3.2.1. Définition de l'occupation du sol sur la période 2002-2012	66
3.2.1.1. Sélection des données analysées	69
3.2.1.2. Mise en œuvre des analyses radiométriques	70
3.2.1.3. Estimation de l'évolution la couverture végétale entre 2003 et 2012	83
3.2.2. Mise en perspective des évolutions d'occupation du sol	87
3.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 3	91
PARTIE 4 :.....	93
ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ACTIVITE VEGETALE AUX ECHELLES SAISONNIERE ET INTERANNUELLE	93
4.1. COMPARAISON DES PRODUITS SATELLITAIRES ET CARACTERISATION DES VARIABILITES PHENOLOGIQUES.....	95
4.1.1. Les principales différenciations saisonnières	95
4.1.2. La prise en compte de la nébulosité dans l'analyse des phénophases saisonnières.....	99
4.1.3. Synthèse sur l'utilisation des données SPOT-VGT et MODIS pour l'estimation de la dynamique interannuelle.....	103
4.2. L'ACTIVITE VEGETALE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME SUPERIEUR SELON L'OCCUPATION DU SOL (2002-2012)	110
4.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 4	124
PARTIE 5 :.....	125
LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE ET LES RELATIONS SPATIO-TEMPORELLES AVEC L'ACTIVITE VEGETALE A L'ECHELLE DE L'OUEME SUPERIEUR.....	125
5.1. ANALYSES DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES	126
5.1.1. La variabilité pluviométrique ouest-africaine au cours des dernières décennies	126
5.1.2. Quelle variabilité observée à l'échelle du Bénin et de l'Ouémé supérieur ?	127
5.1.2.1. Les tendances à long terme (1921-2012)	127
5.1.2.2. Les champs pluviométriques régionaux définis grâce aux données AMMA-Catch (2002-2012)	130
5.1.2.3. Les champs pluviométriques régionaux définis grâce aux estimations satellitaires (2002-2012)	132
5.1.2.4. Synthèse sur la variabilité pluviométrique de la période 2002-2012	133
5.1.2.5. Piste de compréhension de certains forçages du climat de l'Ouémé supérieur.....	136
5.2. L'ACTIVITE DE LA VEGETATION EN REPONSE AUX PRECIPITATIONS (2002-2012)	138
5.2.1. La variabilité spatio-temporelle des liens climat-végétation.....	139
5.2.1.1. Le recours à une technique multivariée : la SVD	139
5.2.1.2. Résultats de la SVD à partir des séries mensuelles brutes 2002-2012	140
5.2.2. Le déphasage temporel régional entre précipitations et NDVI.....	142
5.2.2.1. Rappels sur les principaux acquis des études phénologiques ouest-africaines.....	142
5.2.2.2. Résultats sur le décalage temporel pluie/NDVI à l'échelle de l'Ouémé supérieur	143
5.2.3. Synthèse sur les modes de variabilité interannuelle entre NDVI et précipitations	146
5.2.3.1. Le premier mode de la SVD	146
5.2.3.2. Le second mode de la SVD.....	148
5.2.3.3. Le troisième mode de la SVD.....	150
5.2.3.4. Le quatrième mode de la SVD	151
5.3. CONCLUSION DE LA PARTIE 5	153
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	155
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	159
ANNEXES.....	177

LISTE DES FIGURES	203
LISTE DES TABLEAUX	211
LISTE DES ANNEXES	212
TABLE DES MATIERES	213

Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiscalaire des interactions climat - surface en Afrique de l'Ouest : Etude du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin)

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) dont un des objectifs est de mieux connaître les dynamiques régionales des interactions climat-environnement-société. Elle est une contribution à l'étude de la variabilité spatio-temporelle de la végétation, en fonction des différents types d'occupation du sol et sous contrainte des variations saisonnières et interannuelles de la pluviométrie sur la partie supérieure du bassin versant du fleuve Ouémé, au Bénin. Cette espace possède un important réseau de surveillance hydroclimatique au sol, l'observatoire AMMA-Catch, qui fournit de nombreuses données *in situ*. L'analyse s'appuie aussi sur différentes données issues de la télédétection satellitaire optique (LANDSAT, SPOT-VGT, MODIS, MSG-SEVIRI ou ECOCLIMAP) pour l'étude de l'occupation du sol, de la variabilité photosynthétique de la végétation ou des estimations pluviométriques (RFE – *Rainfall Estimate*). L'étude porte principalement sur trois questions : 1) les modifications des états de surface récemment observées dans cette zone expérimentale de l'Ouémé supérieur ; 2) la valorisation des différentes données issues de la télédétection satellitaire pour diagnostiquer la variabilité bioclimatique régionale de la végétation ; 3) la compréhension des interactions à l'interface climat/végétation, pour interpréter certaines variations bioclimatiques intra- et interannuelles en fonction des principaux états de surface. Les principaux résultats suggèrent qu'il est possible de discriminer des relations fonctionnelles selon les principaux états de surface forestiers ou très anthropisés. Les analyses diachroniques par classification d'images Landsat (ETM+) montrent que les espaces cultivés enregistrent régionalement une augmentation de 25 % sur la période 2003-2012. Les superficies de jachère diminuent, alors que les savanes arbustives augmentent. Tous les espaces forestiers perdent en superficie sur la décennie observée, en particulier les forêts denses (a priori protégées dans cette région) avec une baisse supérieure à 16 %. La variabilité spatio-temporelle d'un indice de végétation (NDVI) est significativement dépendante des trois principaux modes d'occupation du sol, même si l'artefact dû à la nébulosité complique les analyses et interprétations. Les contrastes entre le domaine de forêt naturelle encore préservée (la forêt classée) et les espaces en mutation agricole (cultures et jachères) sont particulièrement visibles. Sur la décennie 2002-2012, il n'y a pas de tendance des pluies, mais plutôt une succession de phases sèches et humides, qui induisent finalement une stabilité interannuelle du NDVI. Le déphasage moyen entre pluies et activité végétale est en moyenne de quatre décades, mais il semble que la fin de la saison végétative recule ait reculé d'au moins 10 jours sur la période étudiée, traduisant une modification des précipitations de fin d'année.

Contribution of remote sensing to the multi-scale study of climate – land cover relationships in West Africa: study of the Upper Oueme Basin (Benin)

This thesis is part of the international AMMA program (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Multidisciplinary Analysis of African Monsoon) whose objective is to better understand the regional dynamics of climate-environment-society interactions. It is a contribution to the study of the spatio-temporal variability of vegetation, according to different land use types and under the constraints of seasonal and interannual variations in rainfall in the upper basin of Ouémé river, Benin. This area has an extensive network of hydro-climatic ground monitoring, observatory AMMA-Catch, which provides many in-situ data. The analysis also relies on data from different optical remote sensing satellites (LANDSAT, SPOT-VGT, MODIS, MSG-SEVIRI or ECOCLIMAP) for the study of land occupation, variability of photosynthetic vegetation or rainfall estimate (RFE). The study focuses mainly on three questions: 1) the changes in surface conditions recently observed in the experimental area of upper Ouémé; 2) the analysis of various data from satellite remote sensing to diagnose regional bioclimatic variability of vegetation; 3) the understanding of climate/vegetation interface interactions, in order to interpret certain intra-and interannual bioclimatic variations depending on the main surface conditions. The main results suggest that it is possible to discriminate the functional relationships from the main conditions of forest or anthropized surface. The diachronic analysis through the classification of Landsat (ETM+) images show that the cultivated areas recorded regionally an increase of 25% over the period of 2003-2012. The areas of set-aside decrease, while shrublands increase. All forests lost in area over the decade observed, particularly dense forest (presumably protected in this region) with a drop of over 16%. The spatio-temporal variability of a vegetation index (NDVI) significantly depends on three main types of land use, even though the noise due to the cloud cover complicates the analysis and interpretation. The contrasts between the preserved natural forest area (the forest reserve) and the agricultural areas (crops and fallow) are particularly visible. Over the decade 2002-2012, there is no trend of rainfall, but rather a succession of wet and dry phases, which ultimately induce an interannual stability of NDVI. The average phase difference between rainfall and vegetation activity is four decades, but it seems that the end of the vegetation growing season has retreated back to at least 10 days during the study period, reflecting a change in rainfall at the end of the year.