HAL
open science

Étude de la variabilité pluviométrique et des saisons de végétation dans la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin) entre 2001 et 2013

Ophélia Lebrat

To cite this version:

Ophélia Lebrat. Étude de la variabilité pluviométrique et des saisons de végétation dans la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin) entre 2001 et 2013. Ingénierie de l'environnement. 2015. dumas-01282372

HAL Id: dumas-01282372

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01282372

Submitted on 3 Mar 2016

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.

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Institut de Géographie Alpine

Stage

LTHE

MASTER 2

Domaine : Sciences Humaines et Sociales

Mention : Sciences du Territoire

Spécialité Recherche :

Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement

Etude de la variabilité pluviométrique et des saisons de végétation dans la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin) entre 2001 et 2013

Réalisé au Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)

Mémoire soutenu le : 3 septembre 2015

Devant un jury composé de :

> Maître de stage :

. M. Sylvain BIGOT (Pr UJF-LTHE)

> Examinateurs :

. Mme Sandra ROME (MCf UJF-LTHE)

Ophélia LEBRAT

Année 2014-2015

ENS DE LYON

UNIVERSITE CHAMBERY ANNECY SAVOIE

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Université Jean Monnet SAINT-ETIENNE

Remerciements

Ce mémoire marque la fin de mon stage de master 2, qui m'a permis d'approfondir mes connaissances en climatologie et en biogéographie, ainsi que mes compétences dans le maniement et la mise en valeur de données environnementales. Cela a été possible en grande partie grâce à Sylvain BIGOT, à travers ses nombreux conseils prodigués tout au long du stage. Je tiens donc à le remercier très chaleureusement pour sa grande disponibilité et son suivi sans failles durant ces 6 derniers mois.

Ce stage m'a aussi une fois de plus prouvé l'importance d'échanger avec les autres professionnels présents dans la structure d'accueil. Ces échanges permettent en effet d'avoir un regard extérieur sur notre sujet alimentant ainsi notre réflexion, mais les compétences et les connaissances des autres peuvent également être une aide très précieuse. Je tiens ainsi à remercier tout d'abord Guillaume QUANTIN qui m'a permis de disposer des données pluviométriques du service d'observation AMMA-CATCH, en me les convertissant au format qui m'intéressait. Je souhaite également remercier Thierry PELLARIN et Sylvie GALLE pour les quelques conseils qu'ils ont pu me prodiguer, notamment pour me permettre de cadrer davantage le sujet et de cibler les données à utiliser pour mener à bien l'étude.

Merci à mes collègues, Léo, Marine, Lise et Valentin, pour la bonne ambiance qui régnait dans le bureau et pour les bons goûters que l'on a pu partager ensemble, qu'ils aient été fabriqués par nos petites mains où non... Parce qu'une bonne glace durant les fortes chaleurs n'était pas de trop !

Merci également aux copains, Charlène, Victor, Thibault, Charlotte, Théo, aux amis d'amis, et aux colocataires d'amis, pour les délicieux moments de pauses passés en leur compagnie, à siroter une petite mousse à la terrasse d'un café, à jouer à la pétanque jusqu'à ne plus apercevoir le cochonnet, à se dandiner au rythme de la batucada, ou encore à se baigner dans les eaux turquoises des calanques... D'indispensables moments qui ont ponctué cette période de stage et plus largement l'ensemble de cette dernière année universitaire.

Je tiens à remercier en particulier Charlène et Florian, pour leur soutien inébranlable, pour leurs conseils avisés et pour leur écoute. Sans eux, la réalisation de la mission de stage aurait certainement été plus difficile... Merci également à eux d'avoir pris le temps de relire quelques parties de mon mémoire, et un grand merci ma relectrice de choix, ma maman, d'avoir lu intégralement mon mémoire pour tenter de venir à bout des coquilles persévérantes.

Pour finir, merci à Sandra ROME de faire partie de mon jury de soutenance. Merci également à l'ensemble de l'équipe pédagogique du master STADE pour la qualité de leur enseignement et leur disponibilité. Et même si j'apprécie leur sympathie, j'espère de tout cœur pouvoir tourner une nouvelle page dans mon ascension vers le monde professionnel (car rien n'est fait à l'heure où j'écris ces lignes !).

Merci à tous !

Liste des acronymes, sigles et abréviations

AMMA-CATCH : Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CHyC : Cryosphère, Hydrosphère et Climat de montagne

CPC : Climate Prediction Center

DL : Double Logistique

EOS : Earth Observing System

EROS : Earth Resources Observation and Science

ESA : Agence Spatiale Européenne

EVI : Indice de Végétation Amélioré

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

FPAR : Fraction du Rayonnement Photosynthétique Actif

GA : Gaussien Asymétrique

GPCP : Global Precipitation Climatology Project

HMCI : HydroMétéorologie, Climat et Impacts

HRVIR : Haute Résolution Visible et InfraRouge

HyBIS : Hydrogéophysique et Bilans Spatialisés

INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

LTHE : Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NBAR : Nadir BRDF Adjusted Reflectance

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OSUG : Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

PAR : Rayonnement Photosynthétique Actif

RCP : Representative Concentration Pathway

RFE 2.0 : African Rainfall Estimation Algorithm Version 2

RIVER : Processus hydrologiques, érosion et transport de sédiments

SG : Savitzky-Golay

SPOT : Satellite Pour l’Observation de la Terre

TRANSPORE : TRANSferts couplés en milieux POREux hétérogènes

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

USGS : U.S. Geological Survey

Sommaire

Remerciements 2
Liste des acronymes, sigles et abréviations 4
Sommaire 6
Avant-propos 8

Introduction 10

1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOPHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE 15
  1.1. Localisation 15
  1.2. Climat 16
  1.3. Formations végétales naturelles et contexte agricole 16

2. DONNÉES ET MÉTHODES 19
  2.1. Analyse des saisons de végétation 19
  2.2. Analyse des saisons pluviométriques 26

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 32
  3.1. Caractéristiques générales des saisons végétales 32
  3.2. Évolution des paramètres saisonniers de la végétation 33
  3.3. Relations entre la saison végétative et les précipitations 37
  3.4. Autres variables bioclimatiques et anthropiques pouvant influencer la saison végétative des formations végétales 38

Conclusion 41

Références bibliographiques 42
Références webographiques 47
Tables des figures 48
Table des tableaux 49
Table des matières 50
Table des annexes 51

Avant-propos

Ce stage de deuxième année de master s'est réalisé au Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE, UMR 5564), sous la direction du professeur Sylvain BIGOT. Le laboratoire fait partie de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG), structure fédérative regroupant plusieurs autres laboratoires grenoblois spécialisés en géophysique et géosciences. Le LTHE compte en 2015 cinq équipes de recherche : HMCI (HydroMétéorologie, Climat et Impacts), HyBIS (Hydrogéophysique et Bilans Spatialisés), RIVER (Processus hydrologiques, érosion et transport de sédiments), TRANSPORE (TRANSferts couplés en milieux POREux hétérogènes), et CHyC (Cryosphère, Hydrosphère et Climat de montagne) ; ce stage s’est déroulé dans le cadre scientifique de l’équipe HyBIS.

Cette recherche s'est faite sur une période de 5 mois, du 2 mars au 31 juillet 2015. Le mémoire présenté a donc pour vocation d'exposer les travaux effectués depuis le début de la mission, en détaillant le contexte de l'étude, la méthode mise en place et les résultats obtenus. L'objectif est de valoriser par la suite les résultats à travers une publication dans la revue scientifique internationale de langue anglaise *Applied Geography*.

Introduction

L'Afrique de l'Ouest est marquée par une forte variabilité pluviométrique, avec une alternance entre les phases sèches et humides (figure 1). Cette variabilité est historiquement perceptible sur plusieurs milliers d'années (Vernet, 2002), ainsi que sur plusieurs centaines d'années (Brooks, 2004). Elle a également été étudiée à l'échelle des XIXe et XXe siècles par de nombreux auteurs (Hulme, 1992 ; Servat *et al.*, 1998 ; Nicholson *et al.*, 2000 ; L'Hote *et al.*, 2002 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Nicholson *et al.*, 2012 ; Nicholson, 2013). Les études portant sur le siècle dernier ont notamment permis de voir la forte variabilité décennale, inter- et intra-annuelle des cumuls pluviométriques. Une longue période majoritairement déficitaire en termes de cumuls pluviométriques a ainsi été mise en évidence à partir de la fin des années 1960, touchant principalement les régions soudano-sahéliennes, ainsi que la zone guinéenne. Cette période fut précédée dans les années 1950-1960 par des cumuls pluviométriques souvent supérieurs à la moyenne. Mais ces périodes dites "sèches" ou "humides" peuvent cependant être marquées ponctuellement par des années excédentaires ou déficitaires. Elles peuvent également être caractérisées par des mois dont le cumul pluviométrique varie significativement autour de la moyenne. L'Afrique de l'Ouest est donc caractérisée par une variabilité pluviométrique temporelle forte.

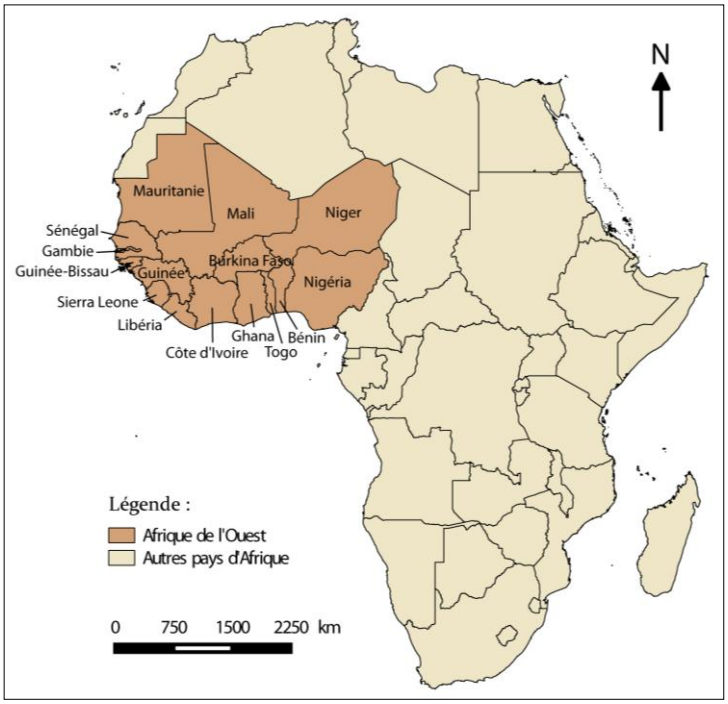


Figure 1 : Localisation de l'Afrique de l'Ouest, définie ici par les 15 pays membres de la Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO) en 2015 (sauf le Cap Vert et Mauritanie comprise).

Cette variabilité hydroclimatique a une influence majeure sur les sociétés d'Afrique de l'Ouest. En effet, les populations présentes, en particulier au Sahel, sont très dépendantes des précipitations qui conditionnent les ressources alimentaires, hydriques et financières, et donc, tous les aspects socio-économiques. Cette vulnérabilité face à la variabilité des pluies s'est gravement manifestée, en particulier au Sahel, suite à la longue période de sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'Ouest durant la deuxième moitié du XXe siècle (Caldwell, 1975). Cela peut s'expliquer notamment par le poids de l'agriculture dans cette région (Caldwell, 1975 ; Blein *et al.*, 2008), dont l'empreinte est perceptible dans l'espace lorsque l'on observe la carte d'occupation du sol (2008-2012) réalisée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) (figure 2). Or il a été montré que la culture pluviale par exemple, très pratiquée en Afrique de l'Ouest, est fortement dépendante de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle des précipitations (Ingram *et al.*, 2002 ; Berg *et al.*, 2009 ; Sultan, 2011). Cette relation prégnante entre le climat et le rendement des cultures est parfaitement perçue par les agriculteurs locaux, la date de début de saison des pluies conditionnant par exemple la date de semis des cultures. D'après les acteurs locaux travaillant dans le secteur agricole, trois indicateurs climatiques déterminent principalement la productivité des cultures : 1) la date de début et de fin de saison des pluies,

2) la répartition des pluies durant la saison, et 3) le cumul pluviométrique total de la saison (Ingram *et al.*, 2002). L'information et les prévisions climatiques relatives à ces trois aspects sont donc décisives car elles vont conditionner les prises de décision. L'enjeu est d'autant plus grand que 80 % des besoins alimentaires des populations d'Afrique de l'Ouest sont satisfaits par les productions régionales (Blein *et al.*, 2008).

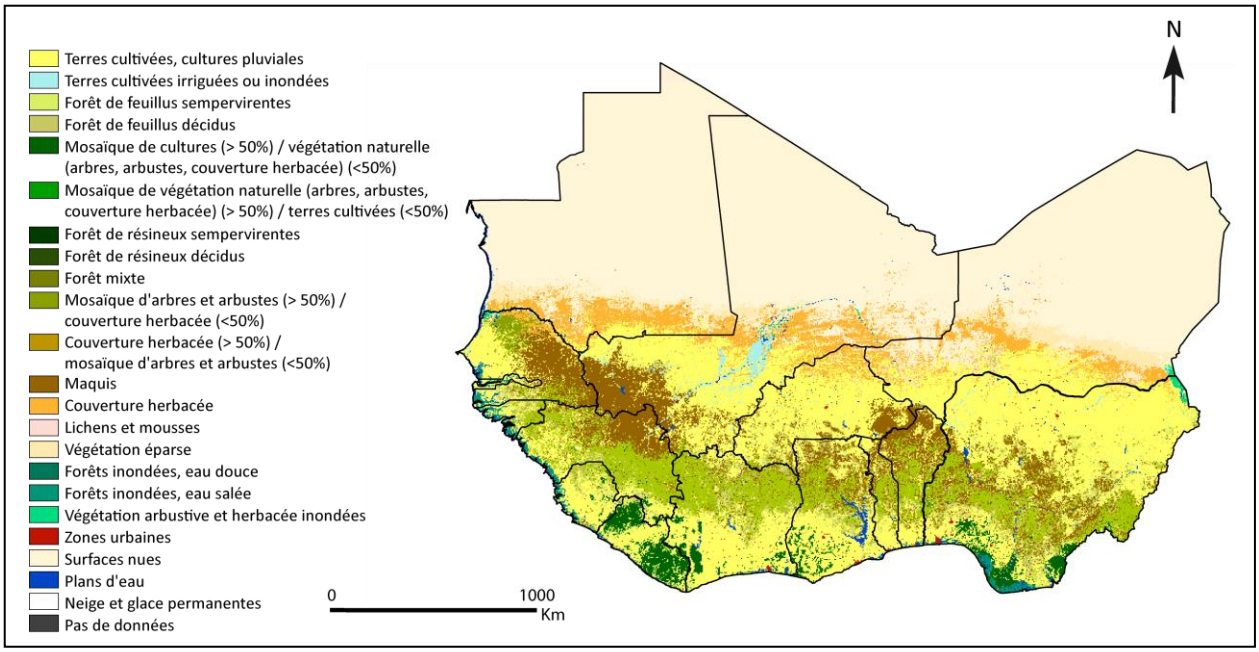


Figure 2 : Carte d'occupation du sol à 300 m de résolution spatiale pour l'année 2010 (2008-2012), produite par l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre du programme de Surveillance des variables Climatiques Essentielles, connu sous le nom de "ESA Climate Change Initiative" (http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php).

Plus généralement, c'est la végétation d'Afrique de l'Ouest qui est influencée par la variabilité pluviométrique. La sécheresse survenue à la fin des années 1960 a entraîné une modification des surfaces végétalisées (rétraction de la végétation par endroits), une diminution de la densité en arbres, ainsi qu'une réduction de la richesse en espèces des forêts dans le Sahel ouest-africain (Gonzalez, 2001). Ces changements ont des conséquences sur les écosystèmes naturels, mais également sur les sociétés humaines qui utilisent encore la végétation naturelle pour s'approvisionner en bois de chauffage, en bois de construction, dans la médecine traditionnelle, mais aussi dans leur alimentation, notamment durant les périodes de sécheresse (Caldwell, 1975 ; Gonzalez, 2001). Il y a donc une forte vulnérabilité des populations agricoles et, plus généralement, humaines ouest-africaines, ainsi qu'une vulnérabilité des écosystèmes naturels, conditionnées en partie par la variabilité des pluies. C'est dans ce contexte qu'il est apparu important de décrire et comprendre la variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest et ses influences sur l'activité végétale, dans l'objectif d'améliorer la prévision, et d'aider les acteurs locaux dans leurs prises de décision en termes de stratégies agricoles ou encore, de protection et de gestion des milieux naturels.

De nombreuses études ont montré que la variabilité des précipitations conditionne en partie l'activité photosynthétique des plantes de manière très significative (Nicholson *et al.*, 1990 ; Davenport et Nicholson, 1993 ; Eklundh et Olsson, 2003 ; Herrmann *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2005 ; Philippon *et al.*, 2005 ; Hoscilo *et al.*, 2014). Pour réaliser cette mise en relation, les scientifiques se sont beaucoup appuyés sur l'observation par satellite, qui permet de mesurer l'activité photosynthétique de la végétation, notamment à travers l'utilisation de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) défini par Rouse *et al.* (1973) et

Tucker (1979). L'activité végétale peut cependant ne pas répondre instantanément (à l'échelle saisonnière ou interannuelle) aux variations des précipitations et réagir avec un décalage temporel plus ou moins important (Nicholson *et al.*, 1990 ; Davenport et Nicholson, 1993 ; Nicholson *et al.*, 1998 ; Zheng et Eltahir, 1998). De plus, cette corrélation positive ne se vérifie pas toujours. Hoscilo *et al.* (2014) ont ainsi montré que certaines zones d'Afrique de l'Ouest ont enregistré une hausse (*baisse*) des valeurs maximales du NDVI entre 2001 et 2010 sans que les cumuls pluviométriques annuels aient augmenté (*diminué*) régionalement, ce qui suggère que d'autres facteurs que les précipitations entrent en jeu, qu'ils soient anthropiques (changement d'occupation du sol dû à l'homme, feux, irrigation artificielle, surpâturage, etc.) ou naturels (aléas climatiques, feux, etc.). Herrmann *et al.* (2005) ont constaté que dans les régions sahéliennes, la réponse du NDVI aux variations des cumuls pluviométriques est différente selon le type de milieu, la végétation située dans des zones semi-arides étant très dépendante des précipitations, contrairement à celle implantée dans les zones plus arides au nord et plus humides au sud (figure 3).

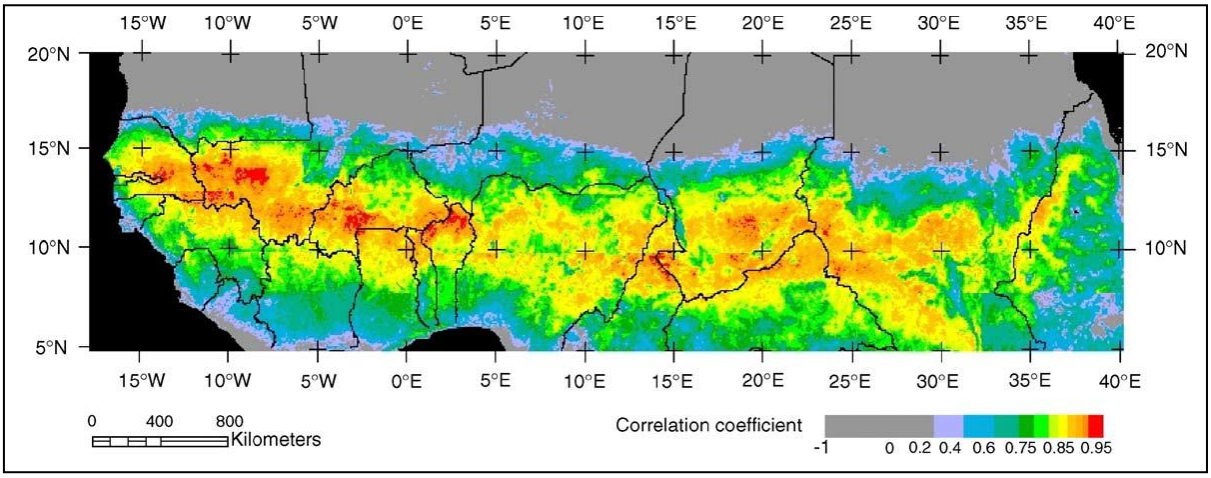


Figure 3 : Corrélations linéaires du NDVI mensuel avec les cumuls pluviométriques du Global Precipitation Climatology Project (GPCP) trimestriels cumulés, calculées sur la période 1982-2003 (Source : Herrmann *et al.*, 2005).

L'influence des cumuls pluviométriques sur l'activité végétale en Afrique est donc variable et contrastée dans l'espace. Ce phénomène pourrait en partie s'expliquer par le type de formation végétale. En effet, Nicholson *et al.* (1990) ont montré qu'au Sahel ouest-africain, l'influence des précipitations varie selon le type de végétation, les formations situées dans des zones plutôt sèches paraissant plus sensibles. L'étude de Davenport et Nicholson (1993) centrée sur l'Afrique de l'Est, vient appuyer ces résultats, les formations dites "sèches" (bush/fourrés/arbustes-prairies) paraissant réagir immédiatement aux précipitations, contrairement aux autres formations qui ont une réponse plus tardive (forêts, miombo). En Afrique Australe, la relation entretenue entre les cumuls pluviométriques et l'activité végétale paraît également influencée par le type de végétation (Richard et Poccard, 1998).

Plusieurs études se sont ainsi intéressées à l'activité photosynthétique de la végétation et à leur relation avec la variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest, comme cela a pu être mis en évidence précédemment. D'autres études, moins fréquentes, se sont davantage intéressées à l'évolution du rythme biologique de la végétation (début, fin, durée et amplitude de la période de croissance des plantes) à l'échelle de l'Afrique (Jonsson et Eklundh, 2002 ; Vrieling *et al.*, 2013), en Afrique de l'Ouest (Eklundh et Olsson, 2003 ; Heumann *et al.*, 2007) ou dans des régions ouest-africaines plus spécifiques (Groten et Ocatre, 2002 ; Butt *et al.*, 2011). Rares sont celles ayant mis ces caractéristiques en relation avec les précipitations (Zhang *et al.*, 2005 ; Brown et de Beurs, 2008), et encore plus celles prenant en considération

le type de végétation (Zhang *et al.*, 2005). Les travaux effectués par Zhang *et al.* (2005) sont donc assez singuliers, puisqu'ils se sont intéressés aux caractéristiques saisonnières de quatre formations végétales (forêts, végétation arbustive, savanes, végétation herbacée), tout en les mettant en relation avec la variabilité pluviométrique en Afrique sur la période 2000-2003. Pour délimiter les différentes formations végétales ciblées, la carte d'occupation du sol mondiale basée sur les données MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) à 1 km de résolution spatiale a été utilisée. Les données journalières satellitaires TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), à 1° de résolution spatiale (ce qui équivaut approximativement à 111 km) ont été exploitées pour avoir une estimation des cumuls pluviométriques. Pour finir, l'activité végétale a été mesurée grâce à l'indice de végétation amélioré (EVI) (Huete *et al.*, 1999), établi grâce aux images MODIS NBAR (Nadir BRDF Adjusted Reflectance) acquises tous les 16 jours à une résolution spatiale de 1 km, et agrégées à 1° de résolution spatiale pour pouvoir les comparer avec les produits de pluie. Ces travaux permettent d'avoir ainsi un bon aperçu de la relation existante entre la variabilité pluviométrique, la saisonnalité de la végétation, selon le type de formation. Cependant, cette approche n'est pas adaptée pour aider les acteurs à prendre des décisions localement étant donné son manque de précision géographique, les diagnostics établis restant surtout valables pour de larges sous-régions. De plus, les espaces cultivés ont été exclus de l'étude, en partie parce que la résolution spatiale des données ne permettait pas de les étudier spécifiquement.

L'étude présentée ici tente donc d'étudier la relation existante entre les caractéristiques saisonnières propres à différentes formations végétales (début, fin et durée de la période de croissance des plantes) avec la variabilité pluviométrique à une résolution spatiale plus fine. En cela, l'étude peut se rattacher à la phénologie végétale, qui est l'étude de la périodicité des phénomènes morphologiques et physiologiques des plantes, plus précisément l'étude du rythme des évènements biologiques répétitifs, des facteurs biotiques et abiotiques expliquant ces rythmes, et des relations existantes entre différentes espèces ou une seule espèce végétale (Le Floc'h, 1969 ; Lieth, 1974) ; Le Floc'h (1969) insiste sur le fait que la phénologie vise également à mettre en relation ces différents paramètres avec les autres variables écologiques, et notamment avec le climat. Elle porte sur la période 2001-2013, fenêtre temporelle suffisante pour observer d'éventuelles variations significatives. La zone d'étude située au Bénin correspond au site de méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé défini dans le cadre du service d'observation AMMA-CATCH (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique). Elle a été choisie notamment parce qu'elle permet l'accès à des données climatiques de qualité et en quantité suffisante. L'autre intérêt est qu'elle se situe dans l'espace guinéen, moins étudié que le Sahel, en particulier parce que la couverture nuageuse plus fréquente rend l'observation satellitaire plus difficile.

Trois questions majeures articulent donc ce mémoire de stage :

1) **Les dates de début et fin de saison végétative, ainsi que la durée des saisons propres à différentes formations végétales sont-elles similaires ?**
2) **Les paramètres saisonniers des différentes formations végétales varient-ils d'une année à l'autre ? Existe-il des saisons "anormales" ?**
3) **Les précipitations expliquent-elles en totalité ou en partie les caractéristiques saisonnières des formations végétales ?**

Ce questionnement amène à dresser des hypothèses de travail, qui seront par la suite validées ou non :

1) En partant du fait que chaque espèce composant les différents milieux a une physionomie et un fonctionnement qui lui est propre, et que chaque milieu est composé d'espèces dominantes ou de conditions environnementales différentes (pédologie, hydrologie, etc.), nous supposons que les métriques saisonnières varient d'une formation végétale à une autre.
2) Les facteurs environnementaux peuvent varier en intensité, en fréquence et en répartition dans le temps et dans l'espace (ex : pluviométrie, température, luminosité, teneur en humidité du sol, niveau de la nappe alluviale, etc.). Cela laisse penser que les paramètres saisonniers des différentes formations végétales ne sont pas figés et peuvent varier plus ou moins fortement d'une année à l'autre, des années au caractère exceptionnel pouvant certainement être distinguées.
3) L'eau étant un besoin vital pour les plantes, les précipitations expliquent sans doute en grande partie les caractéristiques saisonnières propres aux différentes formations végétales, d'autant plus que de nombreux auteurs ont pu mettre en évidence la corrélation linéaire existant entre les deux variables.

Afin de répondre à ces questions et vérifier ces hypothèses, ce mémoire s'articule en quatre parties. La première présente le contexte climatique, agricole, et environnemental associé au Bénin et à la zone d'étude. La deuxième partie développe les données utilisées ainsi que la méthodologie employée pour *i*) extraire les données relatives à l'activité végétale et aux cumuls pluviométriques, *ii*) définir les caractéristiques saisonnières des formations végétales étudiées (début, fin, et durée de la période de croissance des plantes) et *iii*) déterminer les saisons des pluies. La troisième partie expose les résultats obtenus, c'est-à-dire les caractéristiques et les anomalies perceptibles dans la saisonnalité des formations végétales, et leurs interrelations avec les précipitations. Une interprétation et une discussion des résultats sont effectuées dans cette même partie pour comprendre l'intérêt de l'étude et mesurer sa fiabilité.

1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOPHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

1.1. Localisation

Comme mentionné précédemment, les limites de la zone d'étude correspondent à celles du site méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin), site étudié et instrumenté par le service d'observation AMMA-CATCH. Ce service constitue la composante d'observation du programme AMMA, qui vise à analyser et comprendre les interactions entre les systèmes atmosphériques, océaniques et terrestres et leurs contrôles sur la dynamique de la mousson ouest-africaine (Lebel *et al.*, 2009). L'observatoire AMMA-CATCH se concentre plus spécifiquement sur 3 sites de méso-échelle situés au Mali (Gourma ; 14,8°N-17,3°N et 2°O-1°O), au Niger (Degré Carré de Niamey ; 13°N-14°N et 1,6°E-3°E), et au Bénin (Haute Vallée de l'Ouémé ; 9°N-10°N et 1,5°E-3°E), d'une superficie respective de 27 000 km², 16 000 km² et 14 200 km². Ces trois régions sont très contrastées de par leur position géographique, leurs caractéristiques écologiques et climatiques, leur fonctionnement hydrologique, et leur occupation du sol. La densité élevée du réseau de capteurs associé à d'autres types d'observations sur ces sites a l'avantage de permettre l'étude approfondie des interactions entre la dynamique de la végétation et le cycle de l'eau, des rétroactions continent-atmosphère, et des estimations de bilans d'eau, sur des périodes plus ou moins longues. En effet, les premières mesures effectuées remontent à 1984 pour le site méso-échelle du Gourma, 1990 pour le Degré Carré de Niamey, et 1997 pour la Haute Vallée de l'Ouémé. En plus de se situer dans l'espace guinéen, aux processus climatiques et environnementaux complexes, le site méso-échelle du Bénin (figure 4) permet maintenant l'accès à des chroniques d'observations supérieures à 10 ans, ainsi qu'à d'autres types de données géophysiques.

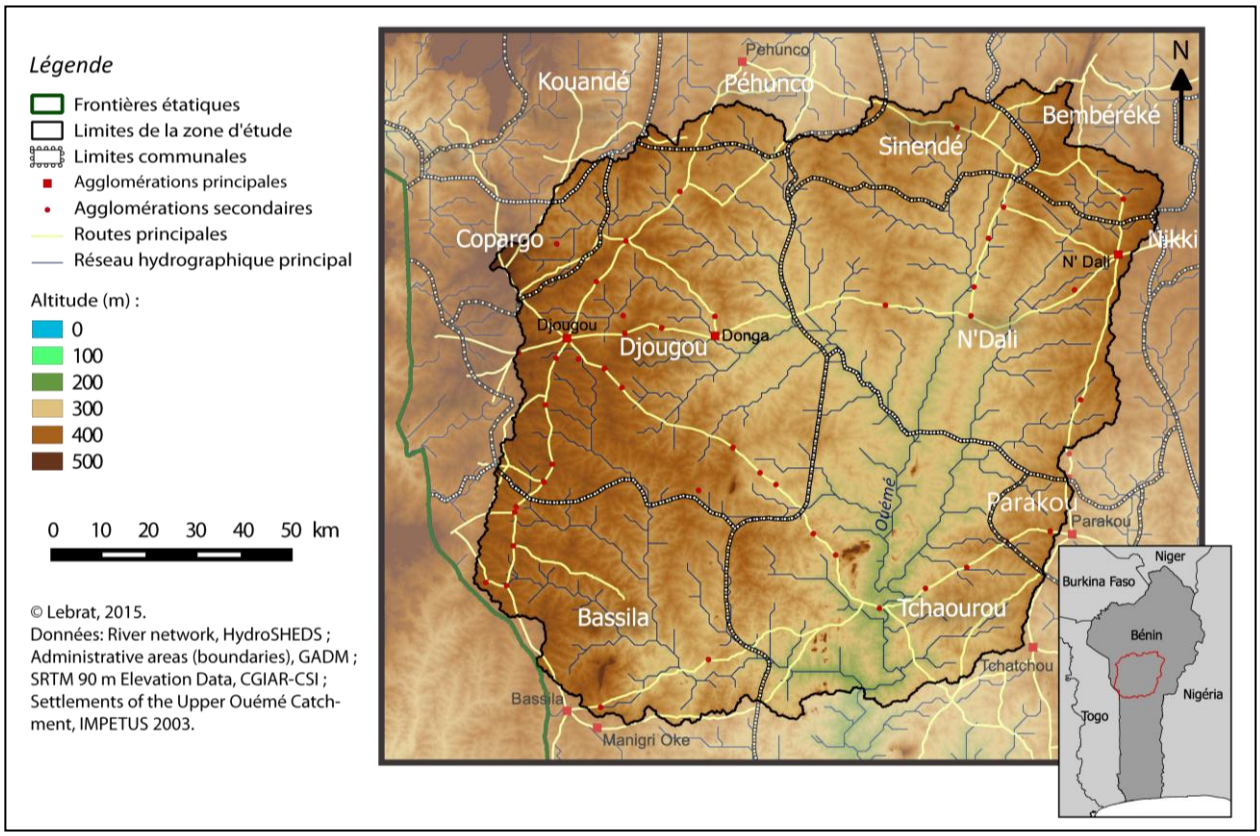


Figure 4 : Localisation du site méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé au Bénin, et présentation des principales caractéristiques physiques et administratives du site.

Le site correspond globalement à la partie haute du bassin versant du fleuve Ouémé, dont l'exutoire se trouve près de Cotonou, et s'étend principalement sur les départements de la Donga et du Borgou, et dans une moindre mesure, sur le département de l'Atacora. Il repose plus spécifiquement sur le territoire de 11 communes (Kouandé, Péhunco, Sinendé, Bembéréké, Nikki, N'Dali, Parakou, Tchaourou, Bassila, Djougou et Copargo), les communes de Djougou, N'Dali, Tchaourou et Bassila représentant la grande majorité du secteur d'étude. Le paysage est une pénéplaine caractérisée par des inselbergs isolés (Judex *et al.*, 2009), avec une altitude variant entre 236 et 529 m d'altitude. Les régions les plus élevées se trouvent principalement à l'ouest du bassin, et les plus basses se concentrent à proximité du fleuve Ouémé.

1.2. Climat

Les caractéristiques climatiques du Bénin sont très variables dans l'espace (Judex *et al.*, 2009), c'est pourquoi il est important de définir le climat à l'échelle de la zone d'étude et non pas du pays. Le bassin versant de l'Ouémé Supérieur est caractérisé par un climat unimodal, avec une seule saison des pluies apparaissant approximativement du mois de mai au mois d'octobre. Les cours d'eau sont sous l'influence de cette saison pluvieuse unimodale, avec un débit élevé durant la saison des pluies (ex : débit moyen de l'Ouémé à Bétérou en septembre durant la période 1952-2002 : 249 m^3/s) ; pendant la saison sèche, presque tous les cours d'eau s'assèchent. Les températures moyennes mensuelles varient entre 25 et 30°C sur l'année (1961-1990), les valeurs les plus élevées étant enregistrées durant la saison sèche. La durée d'insolation moyenne mensuelle varie entre 260 heures et 120 heures au cours de l'année (1961-1990), en étant plus importante pendant la saison sèche que pendant la saison des pluies.

1.3. Formations végétales naturelles et contexte agricole

Le bassin versant de l'Ouémé Supérieur est composé de différents milieux (Judex *et al.* 2009). Il est possible de retrouver des formations dites "naturelles", telles que des forêts (forêt dense, forêt galerie, forêt claire) et des savanes (savane boisée, savane arborée, savane arbustive, savane saxicole). Ces formations sont définies par la FAO (2005) comme suit :

- Forêt dense : *Formation à peuplement fermé avec des arbres et des arbustes atteignant diverses hauteurs. La plupart des arbres des étages supérieurs perdent leurs feuilles une partie de l'année. Le sous-bois est formé d'arbustes décidus et sur le sol se trouvent çà et là des touffes de graminées* ;
- Forêt galerie : *Formations fermées de forêt dense qui accompagnent les cours d'eau dans les régions de formations ouvertes et de savanes* ;
- Forêt claire : *Formation à peuplement ouvert avec des arbres de petite et moyenne taille dont les cimes sont plus ou moins jointives. L'ensemble du couvert laisse largement filtrer la lumière. Au sol, les graminées sont peu abondantes et peuvent être mélangées à d'autres plantes suffrutescentes ou herbacées* ;
- Savane boisée : *Constituée d'arbres et d'arbustes formant un couvert clair laissant largement passer la lumière* ;
- Savane arborée : *Formation dans laquelle arbres et arbustes sont disséminés parmi le tapis graminéen* ;
- Savane arbustive : *Arbustes uniquement parmi le tapis graminéen* ;
- Savane saxicole : *Formations similaires à des savanes arborées et arbustives, mais qui se trouvent sur des rochers*.

Les types de cultures produits dans les départements de la Donga, de Borgou et de l'Atacora sont assez diversifiés, ce que montrent les données relatives aux productions agricoles du Bénin en 2011-2012 de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Sur ces trois départements sont ainsi majoritairement cultivés des racines et des tubercules (igname, manioc, patate douce, taro, pomme de terre). La production de céréales (maïs local, sorgho, petit mil, riz, fonio) constitue également une part importante de leurs productions agricoles. Pour finir, sont produites des cultures maraîchères (tomate, piment, gombo, légumes feuilles, oignon, coton, arachide, ananas, canne à sucre, palmier à huile, tabac). Les strates herbacées et arbustives sont alors principalement représentées. Le système de production agricole fonctionne sous la forme de cycles de jachères variables, ce qui explique que les terres cultivées soient généralement représentées comme des mosaïques de champs et de végétation en jachère (Judex *et al.*, 2009). Les terres situées à proximité de Djougou et Parakou sont utilisées de manière intensive en raison de la densité de population plus élevée des villes, laissant peu de place à la forêt et à la savane (Judex *et al.*, 2009). De vastes espaces agricoles s'étendent également le long de la route reliant les deux villes, empiétant parfois sur les forêts classées. L'activité de déforestation destinée à accroître les superficies de terres agricoles est en effet très présente sur le site, et les forêts classées, telles que la forêt classée de l'Ouémé Supérieur (située au centre de la zone d'étude), ne sont pas totalement épargnées, même si elles sont relativement bien respectées (figure 5 ; Judex *et al.*, 2009).

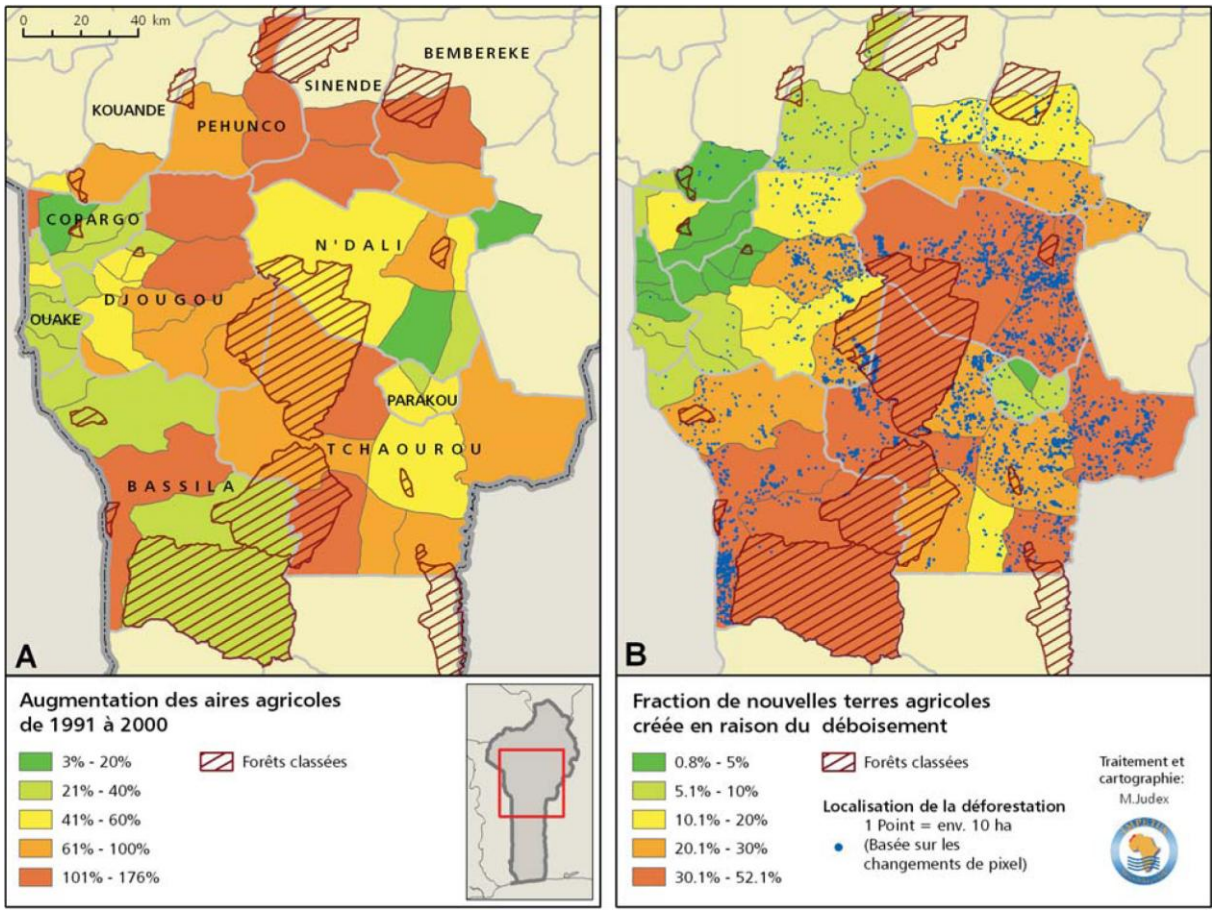


Figure 5 : Dynamiques de l'utilisation des terres dues à l'extension des régions agricoles. Les données sont dérivées d'images LANDSAT du 13/12/1991 et du 26/10/2000. Les régions de la forêt protégée sont inclues dans les statistiques fournies (Source : Judex *et al.*, 2009).

L'occupation du sol végétal de la zone d'étude est donc très diversifiée, en étant à la fois d'origine naturelle et anthropique. Le tableau 1 expose la part que représente chaque grand type de milieu (zones urbanisées comprises) sur les communes principales du secteur d'étude, soit Tchaourou, N'Dali, Bassila et Djougou.

	Tchaourou	N'Dali	Bassila	Djougou	TOTAL
Forêt et savane dense	66,23	60,04	75,50	25,32	**59,65**
Savane	24,43	31,80	20,29	54,30	**30,53**
Agglomération	0,07	0,08	0,02	0,17	**0,08**
Région agricole	9,27	8,08	4,18	20,20	**9,74**

Tableau 1: Utilisation des terres en 2000 (en %) pour les quatre communes principales composant la zone d'étude (d'après Judex *et al.*, 2009).

La figure 6 permet de se représenter visuellement quelques milieux présents au sein du secteur d'étude.

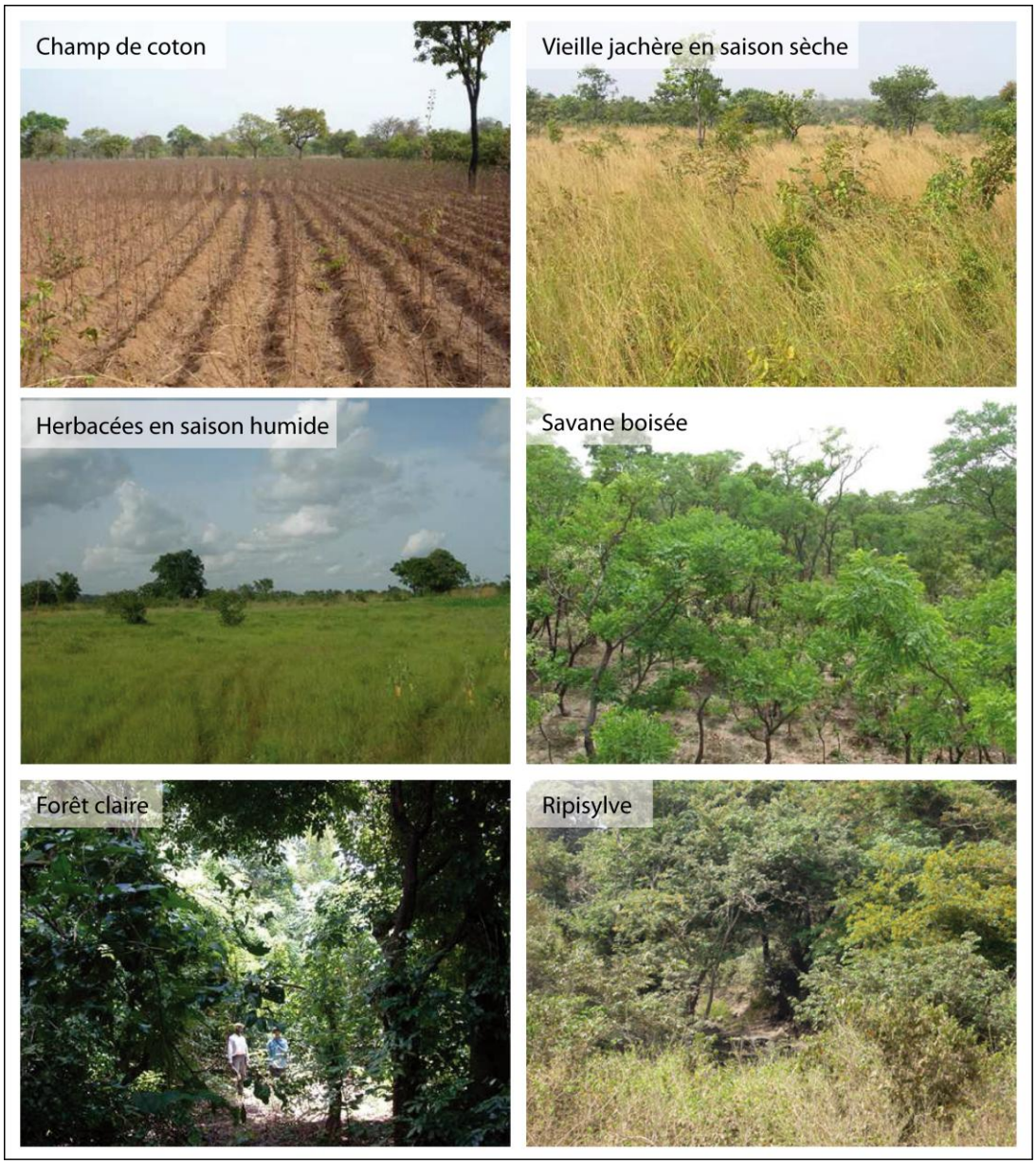


Figure 6 : Représentations photographiques de 6 milieux présents dans la zone d'étude (Source : Bel, 2010).

2. DONNÉES ET MÉTHODES

2.1. Analyse des saisons de végétation

2.1.1. Données environnementales utilisées

2.1.1.1. Occupation du sol

L'occupation du sol de la Haute Vallée de l'Ouémé définie pour l'année 2007 par Zin (2011) dans le cadre de AMMA-CATCH a tout d'abord été exploitée pour définir les formations végétales à étudier et mettre en place des points d'extraction, utilisés pour extraire les données NDVI et les données pluviométriques. Cette carte (figure 7), d'une résolution spatiale de 20 m, a été réalisée grâce à une combinaison d'images satellites provenant des capteurs SPOT/VEGETATION et SPOT/HRVIR (Haute Résolution Visible et InfraRouge). Elle résume la mosaïque paysagère, notamment les grands groupements végétaux, en définissant les zones de forêt, de savane boisée, les terres en jachère et les espaces anthropisés (dont les cultures).

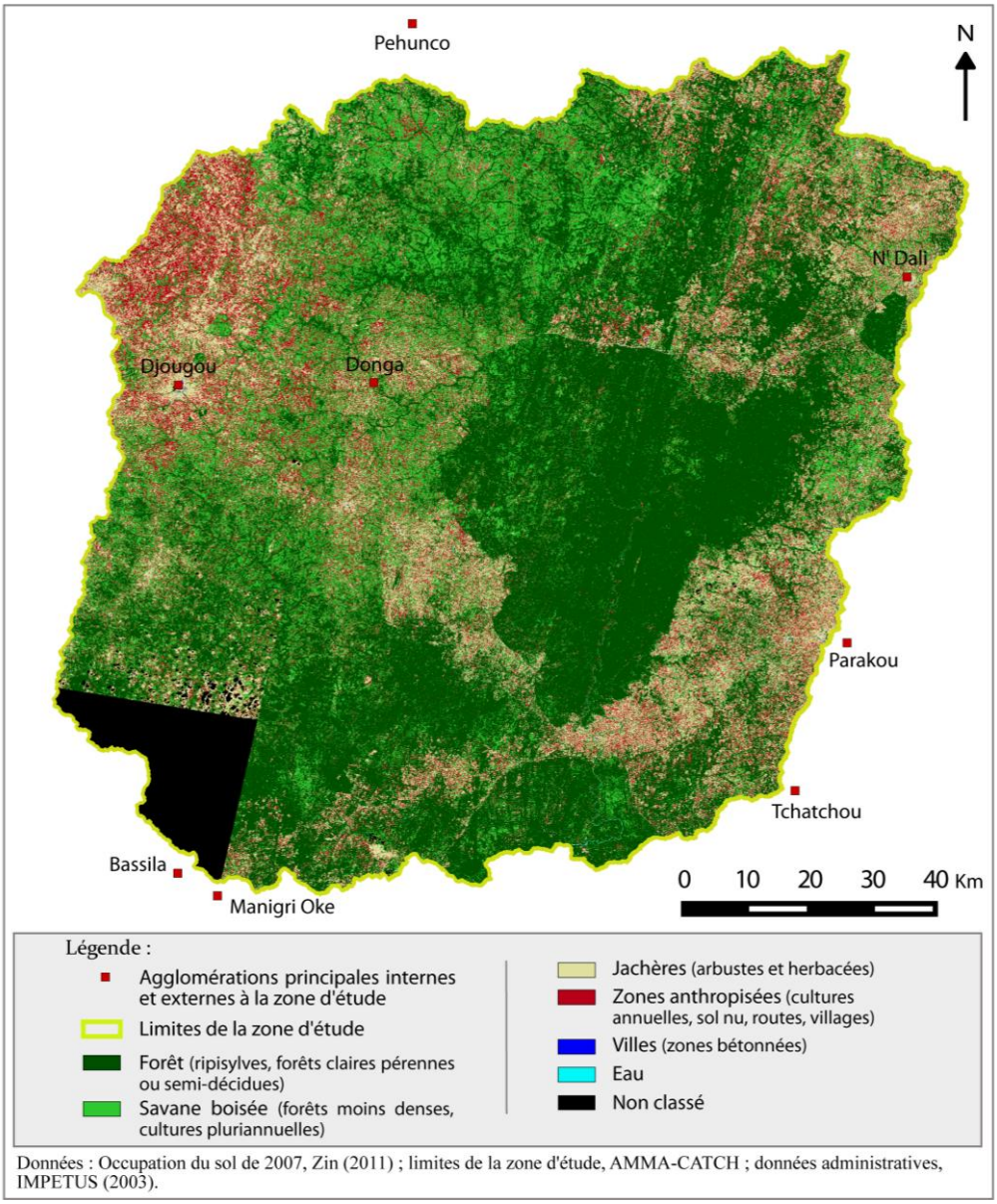


Figure 7 : Occupation du sol de la Haute Vallée de l'Ouémé en 2007, d'après des classifications établies à partir d'images SPOT.

Cette carte d'occupation du sol est l'outil de base de la méthodologie développée ensuite pour étudier les liaisons entre le NDVI et les précipitations (figure 8).

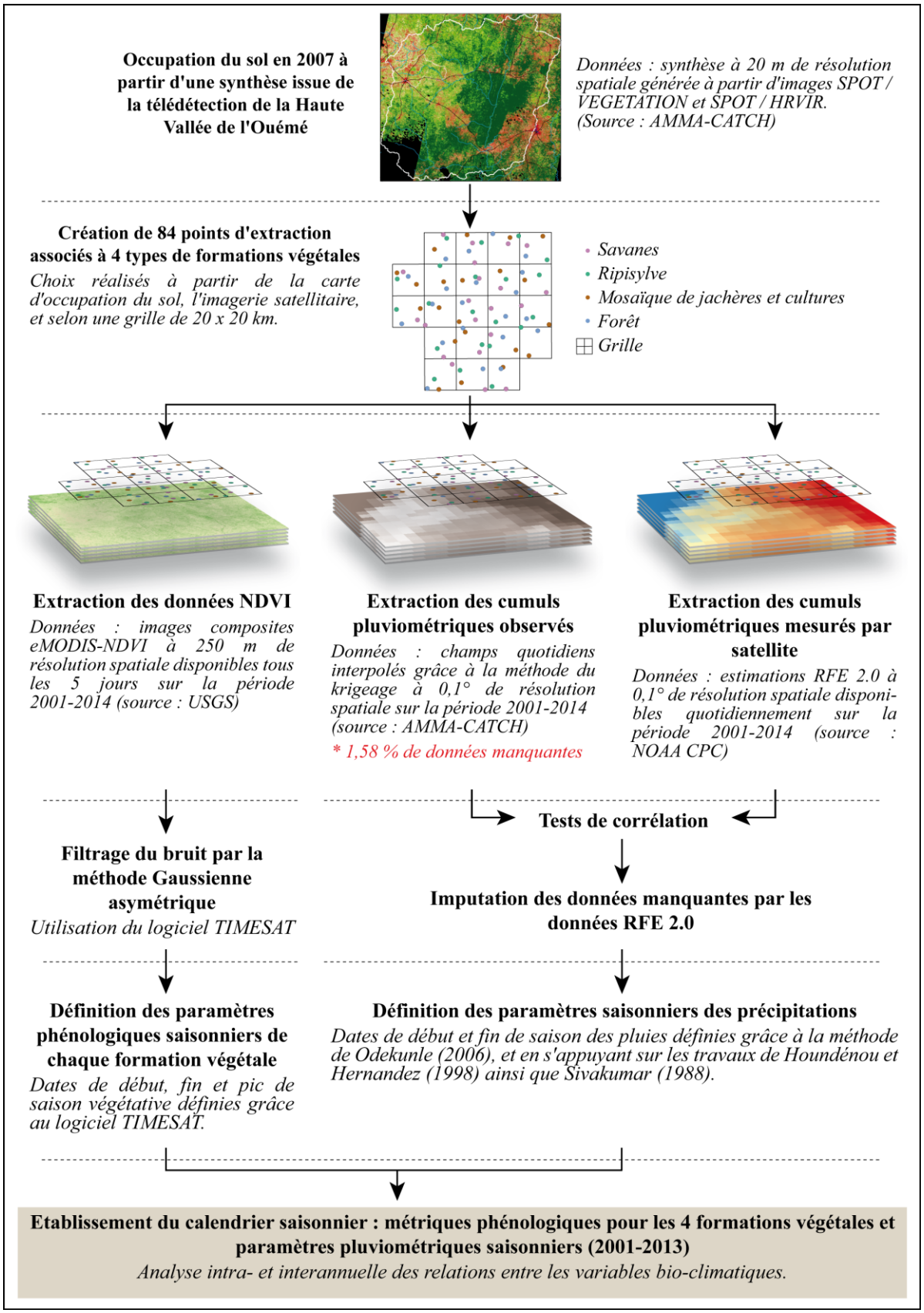


Figure 8 : Schéma récapitulatif de la méthodologie adoptée pour l'étude conjointe des relations précipitations et activité végétale grâce aux données provenant de l'observation *in situ* et de la télédétection.

2.1.1.2. Données NDVI

L'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) est un indice de végétation calculé à partir des bandes du proche infrarouge (PIR) et du rouge (R) des données satellitaires (Rouse *et al.*, 1973 ; Tucker, 1979 ; équation 1).

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \qquad \text{(équation 1)}$$

Les valeurs du NDVI s'étendent théoriquement de -1 à 1. De manière générale, la couverture végétale est caractérisée par un NDVI positif, les valeurs les plus élevées correspondant à une couverture végétale dense, et inversement pour les couvertures végétales plus diffuses (Holben, 1986). Il constitue un bon indicateur du niveau de production chlorophyllienne (corrélée à l'activité photosynthétique des plantes) et de la biomasse végétale associés à un milieu donné (De La Taule *et al.*, 2012), ce qui explique son utilisation répandue dans la mesure de l'activité végétale et la cartographie des espaces végétalisés. Cependant, le NDVI sature rapidement dans les milieux où la végétation est très dense, en devenant insensible à des valeurs élevées de l'indice de surface foliaire (*i.e.* rapport de la surface foliaire photosynthétique à la surface du sol ; Hopkins, 2003), ce qui peut amener à une sous-estimation de l'activité végétale dans les régions caractérisées par une biomasse végétale dense (Gu *et al.*, 2013). Le NDVI est ensuite très sensible aux effets de l'atmosphère (aérosols, vapeur d'eau, etc.) et aux changements de géométrie d'acquisition, qui tendent à diminuer les valeurs, ainsi qu'aux effets du sol liés à sa couleur et à sa composition notamment (Holben, 1986 ; Gao *et al.*, 2000 ; Jonsson et Eklundh, 2002). C'est en particulier à cause des perturbations atmosphériques que l'étude de l'activité végétale le long de la côte guinéenne pose problème, en faussant le signal ou en masquant certaines régions (Vrieling *et al.*, 2013). C'est pourquoi il est possible d'utiliser en parallèle l'Indice de Végétation Amélioré (EVI ; Huete *et al.*, 1999 ; Zhou *et al.*, 2014). Cet indice a en effet la capacité de saturer moins rapidement, et d'être moins sensible aux perturbations atmosphériques et aux effets du sol (Gao *et al.*, 2000 ; Huete *et al.*, 2006).

Pour réaliser cette étude, le choix a cependant été fait d'analyser le NDVI pour mesurer l'activité végétale des différentes formations, principalement parce que son utilisation permettait l'accès à des données à haute fréquence temporelle (pentadaire), non disponible pour l'EVI. Ces données sont distribuées par le centre EROS (*Earth Resources Observation and Science*) de l'USGS (*U.S. Geological Survey ;* http://earlywarning.usgs.gov/fews). Les produits "eMODIS NDVI" sont générés à partir des images provenant du satellite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) Terra et acquises par la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dans le cadre du programme EOS (*Earth Observing System*) ; ces images ont au préalable subi une correction des effets atmosphériques (diffusion moléculaire, absorption de l'ozone et des aérosols) grâce à l'utilisation d'algorithmes développés par l'équipe scientifique MODIS (*MODIS Science Team ;* USGS, 2012, 2013). Les images eMODIS NDVI, d'une résolution spatiale de 250 m, sont produites tous les 5 jours pour les régions situées ailleurs qu'aux Etats-Unis en utilisant les acquisitions des 10 derniers jours (USGS, 2012, 2013). Chaque pixel prend alors la valeur maximale des pixels associés aux images composites acquises durant cette période (Jenkerson *et al.*, 2010). Dans le cadre de l'étude, 1008 images eMODIS ont ainsi été récupérées, à raison d'une image tous les 5 jours à partir de janvier 2001 jusqu'à décembre 2014.

2.1.2. Constitution de la base de données NDVI propre à chaque formation végétale

2.1.2.1. Détermination des formations végétales étudiées

Les classes végétales décrites par la carte d'occupation du sol ont été réajustées pour l'étude. Tout d'abord parce qu'une comparaison empirique menée avec *Google Earth* (à l'aide

des photos aériennes de l'année 2007 si possible, sinon avec les autres photos disponibles prises entre 2001 et 2015 ou avec l'imagerie satellitaire SPOT de 2015) a révélé que les classes "jachères" et "zones anthropisées" représentent toutes les deux en grande majorité les espaces cultivés. De même, il est apparu intéressant d'étudier plus spécifiquement la ripisylve, définie par Natta (2003) dans le contexte du Bénin comme étant une forêt située en bordure d'un cours d'eau dominée par des essences ligneuses. Pour cette dernière définition, le terme de "forêt" inclut tous les types de forêt, ainsi que la savane boisée. La relation étroite qu'entretient la ripisylve avec les cours d'eau (Natta, 2003) laisse penser qu'elle peut avoir une relation éco-climatique différente des autres espaces forestiers, d'où l'intérêt de l'étudier plus spécifiquement. La forte pression humaine qu'elle subit dans le pays, ainsi que son importance écologique et sociétale (Natta *et al.*, 2002), justifient davantage son étude et sa compréhension, notamment dans un contexte de changement climatique.

Pour délimiter les zones de ripisylve, seule la classe "Forêt" a été considérée. Il était ensuite important de connaître l'aire d'extension de la forêt riveraine. Afin de définir une largeur moyenne de la ripisylve dans la Haute Vallée de l'Ouémé, les images eMODIS NDVI, sur lesquelles les forêts riveraines se distinguent clairement, ont été utilisées. Si l'on se fonde sur ces images, les pixels correspondant à la ripisylve peuvent s'étendre sur une largeur allant jusqu'à 900 m, en sachant qu'un pixel fait 250 m de côté. De manière à délimiter approximativement son aire d'extension en créant une zone tampon, le réseau hydrographique défini dans le cadre de AMMA-CATCH a été utilisé. Ce dernier permet d'avoir une représentation assez juste des différents cours d'eau régionaux, mais il ne suit pas parfaitement leur tracé réel. Il a donc été décidé de considérer que la ripisylve s'étend en moyenne sur 700 m de part et d'autre du lit des cours d'eau. Cette distance, probablement exagérée dans certains cas, permet de prendre en considération l'ensemble des pixels correspondant à de la végétation susceptible d'être influencée par les cours d'eau et de limiter les confusions potentielles avec les autres formations forestières.

L'étude porte donc finalement sur quatre grandes formations végétales :

1. La forêt (forêt dense et forêt claire au-delà de 700 m d'un cours d'eau) ;
2. La ripisylve (forêt dense et forêt claire à moins de 700 m d'un cours d'eau) ;
3. La savane (boisée, arborée, arbustive, et saxicole) ;
4. La mosaïque de jachères et de cultures.

2.1.2.2. Extraction des données NDVI pour chaque formation végétale

A la suite de cette typologie, une série de points d'extraction est définie pour chaque formation végétale (figure 9). Afin d'établir une répartition homogène des points, une grille est instaurée. Chaque carré ("zones d'apprentissage") de cette grille doit comporter idéalement les quatre formations végétales, avec des portions d'espaces d'une superficie supérieure à celle des pixels des images eMODIS, qui est de 0,06 km². En fonction de ces critères, la taille des zones d'apprentissage est fixée à 20 km de côté (400 km²). Les zones situées en périphérie du secteur d'étude ou celles comportant des étendues importantes d'espaces non classées (car perturbations dues aux nuages) ont été exclues.

Au final, 21 carrés recouvrant au total 59,15 % de la zone d'étude initiale sont sélectionnés (voir annexes 1, 2 et 3 pour les statistiques relatives à l'occupation du sol de chaque zone d'apprentissage). Dès lors, un point par zone d'apprentissage est associé à chaque formation végétale étudiée, ce qui équivaut à 21 points d'extraction par classe végétale. Cela permet d'obtenir un échantillon pertinent et suffisamment robuste de valeurs NDVI propre aux 4 formations, pour une représentation relativement précise de l'activité végétale de chaque groupement.

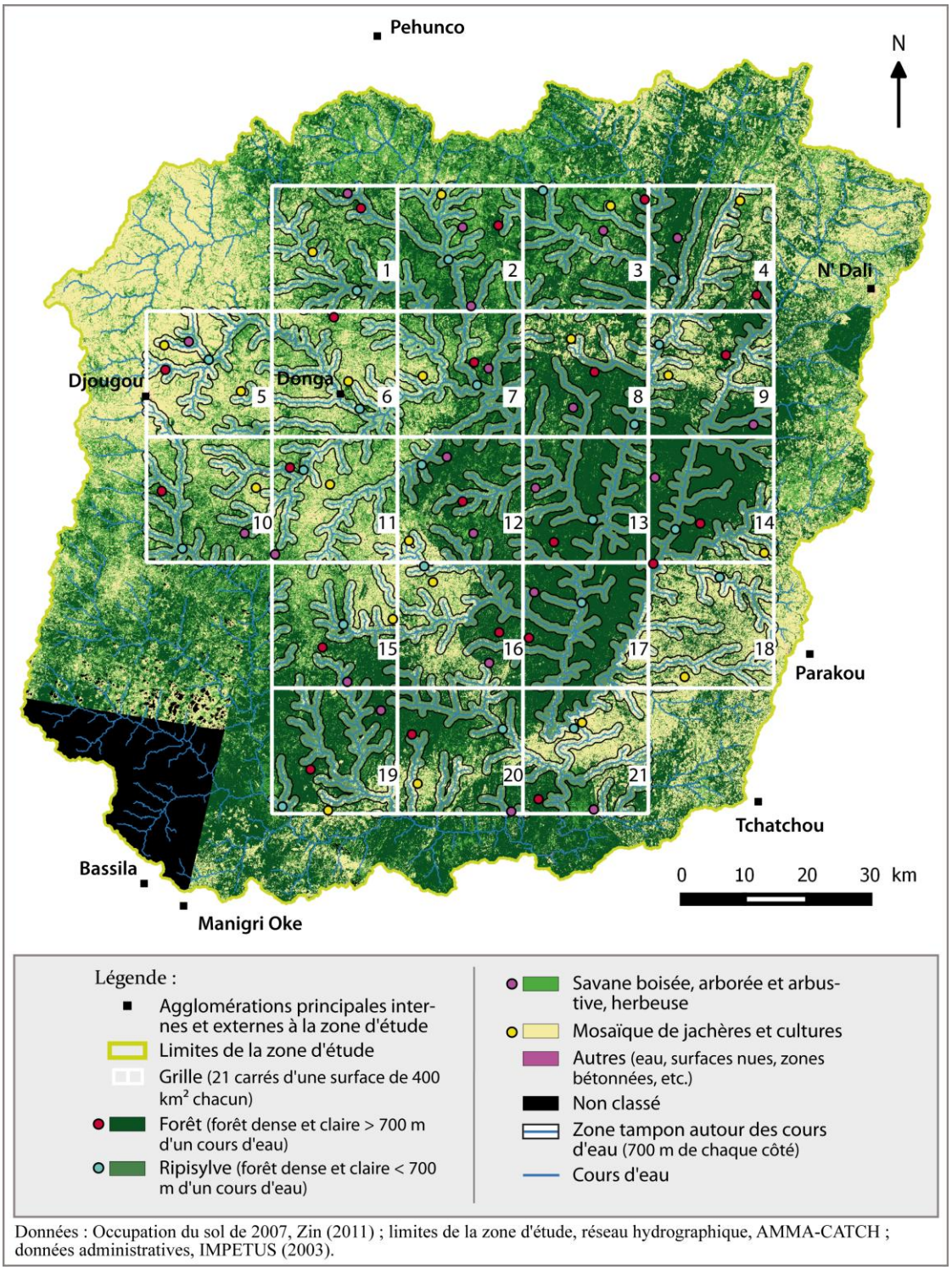


Figure 9 : Représentation des points d'extraction propres à chaque formation végétale et de la grille d'analyse mise en place au sein de la zone d'étude.

Durant cette étape, *Google Earth* est utilisé afin de vérifier la vraisemblance de la carte d'occupation du sol avec l'imagerie aérienne et satellitaire (environ 31 photos aériennes ont été exploitées, avec une date de prise de vue variant entre 2001 et 2015 ; l'imagerie satellitaire de 2015 issue du capteur SPOT est utilisée lorsqu'aucune photo aérienne n'était disponible pour une zone donnée). Cette méthode a permis de voir que des espaces cultivés apparaissant dans la zone d'apprentissage n°13 n'existaient pas sur la photo aérienne de 2007 et qu'ils étaient confondus avec du sol nu.

Parallèlement à cela, les étendues d'espaces classés en "Savane" peuvent être faibles et sont parfois devenues des zones agricoles (cas constaté pour les zones d'apprentissage n°6 et 18). Ces observations ont alors conduit à affecter 3 points d'extraction associés à la "Mosaïque de jachères et de cultures" et à la "Savane" à d'autres zones d'apprentissage. Pour finir, les points associés à la ripisylve ont été implantés à moins de 700 m des cours d'eau, en se servant à la fois de la carte d'occupation du sol et de *Google Earth*.

Les 84 points d'extraction ainsi créés sont ensuite utilisés pour extraire les valeurs NDVI des pixels auxquels ils sont associés, pour les 1008 images eMODIS disponibles. A chaque point d'étude correspond alors des valeurs de NDVI à un pas de temps pentadaire sur la période 2001-2014, ce qui correspond à 21 168 données NDVI par formation végétale (21 points d'étude x 1008 images). La série est ensuite épurée en ne gardant que les valeurs NDVI maximales pour chaque pentade associée à un groupement donné, afin d'éliminer les éventuelles valeurs biaisées.

2.1.2.3. Extraction des métriques phénologiques saisonnières grâce à l'outil TIMESAT

Le logiciel TIMESAT, développé par Jonsson et Eklundh (2002), est utilisé pour filtrer le bruit présent dans les chroniques radiométriques, et pour estimer des paramètres phénologiques saisonniers discriminants pour chaque formation végétale. Cet outil propose différents algorithmes qui permettent de lisser les séries en proposant notamment l'utilisation des filtres "Savitzky-Golay" (SG), "Gaussien asymétrique" (GA) ou "double logistique" (DL), tout en définissant plusieurs paramètres statistiques d'ajustement (Jonsson et Eklundh, 2002, 2004). Les approches GA et DL semblent être moins sensibles au bruit que l'approche SG (Jönsson et Eklundh, 2004 ; Gao *et al.*, 2008), et donnent de ce fait de meilleurs résultats dans la définition des paramètres phénologiques des différentes formations végétales. Selon Gao *et al.* (2008), les filtres GA et DL fournissent des résultats assez proches, mais la méthode GA semble être moins sensible aux séries chronologiques incomplètes. En raison de la présence de données manquantes, et aussi de certaines parties qui subissent des artefacts, Gao *et al.* (2008) ou Tan *et al.* (2011) ont de ce fait utilisé le filtre GA pour traiter leurs séries temporelles. Dans le cadre de l'étude menée ici, il n'y a aucune donnée manquante, mais la qualité des données peut cependant varier (à cause des biais d'origine atmosphérique). Le filtre GA est donc préféré au DL pour sa capacité accrue à traiter les séries de données satellitaires (figure 10).

Il est ensuite possible de déterminer certains paramètres saisonniers de l'activité végétale. Pour cela, plusieurs éléments doivent être renseignés (Eklundh et Jönsson, 2012) (figure 10). Il faut d'abord indiquer le nombre de saisons végétatives à traiter ("*Seasonality parameter*"). Les deux fonctions suivantes consistent à ajuster la courbe lissée à l'enveloppe supérieure des données NDVI ("*No. of envelope iterations*", valeur renseignée allant de 1 à 3 ; "*Adaptation strength*", valeur renseignée allant de 1 à 10). Pour finir, il est indispensable de définir la méthode à employer pour déterminer le début et la fin de saison végétative ("*Start of season method*"). La première méthode proposée consiste à définir une proportion de l'amplitude saisonnière associée à chacune des périodes ; pour la seconde, des valeurs NDVI sont renseignées, dont le dépassement marque le début ou la fin de saison. Les différents critères sont donc remplis ainsi pour les analyses :

- ***Seasonality parameter = 1***, puisque la zone d'étude béninoise se caractérise par une seule saison végétative (Vrieling *et al.*, 2013).
- ***No. of envelope iterations = 2***, qui correspond à un ajustement moyen à l'enveloppe supérieure.
- ***Adaptation strength = 3***, qui correspond à une force d'adaptation normale.

- ***Start of season method = 1: amplitude***. Il est difficile dans le cadre de cette étude de définir des valeurs seuils du NDVI pour établir le début et la fin de la période végétative. Une valeur seuil unique peut ne pas convenir à toutes les régions et à toutes les espèces (Tan *et al.*, 2011). Etant donné que l'étude se fonde sur des groupements végétaux, et non pas sur des espèces spécifiques, et qu'elle prend en considération des formations végétales dispersées sur le secteur d'étude, il a donc semblé préférable de ne pas établir de valeurs seuils pour définir le début et la fin de la période végétative de chaque groupement. D'autant plus qu'aucun document n'a pu être trouvé fournissant des valeurs seuils propres au début et à la fin de saison des formations végétales de la zone d'étude.
- ***Season start / stop = 0,1.*** Le début et la fin de saison ont été fixés respectivement à 10 et 90 % de l'amplitude saisonnière (noté 0,1 pour chaque case), ratios fixés par Jönsson et Eklundh (2004) dans leur étude portant sur les paramètres phénologiques de la végétation en Afrique.

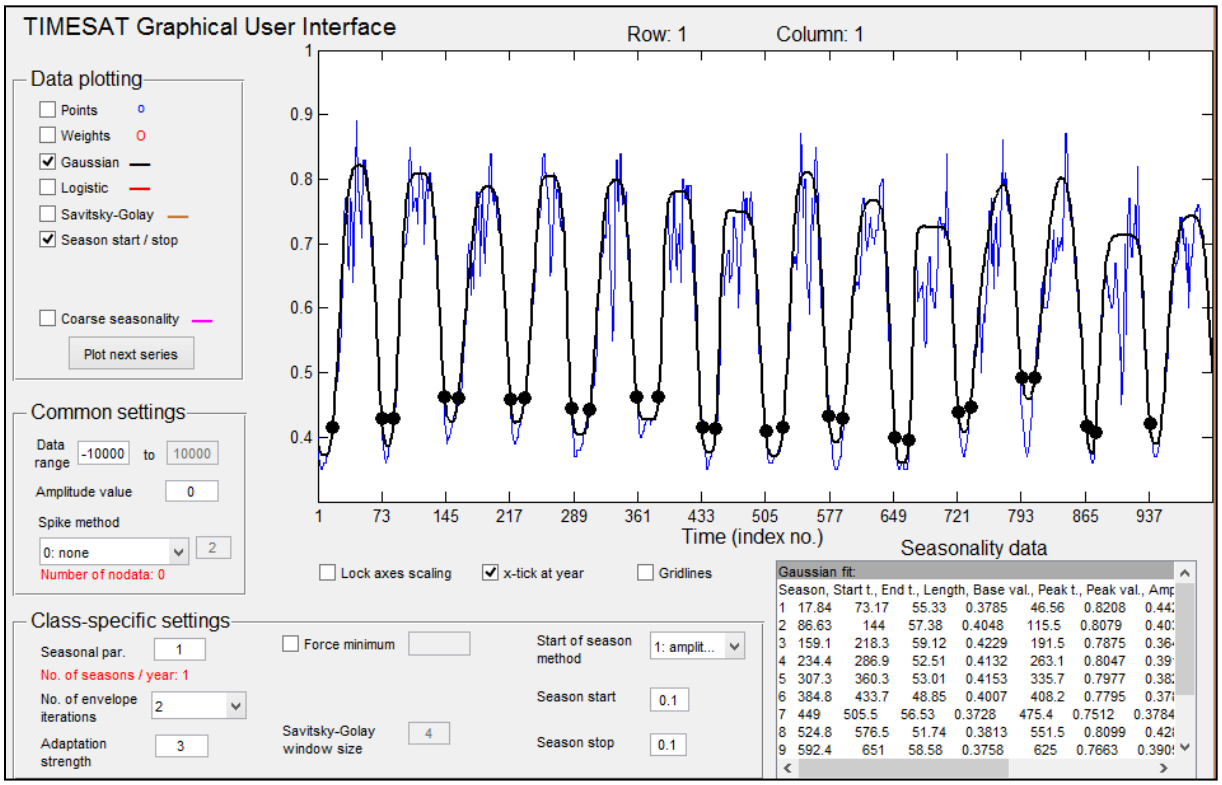


Figure 10 : Exemple d'une copie écran de l'interface graphique du logiciel TIMESAT. La courbe bleue représente la variation du NDVI de 2001 à 2014 sans élimination du bruit ; la courbe noire représente la variation du NDVI après que la série ait été lissée grâce à la méthode gaussienne asymétrique ; les points noirs représentent le début et la fin de saison végétative pour chaque cycle déterminé suivant les paramètres renseignés.

Ces différents critères prédéfinis, TIMESAT peut ensuite calculer un certain nombre de métriques phénologiques saisonnières, les principales métriques utilisées dans cette étude étant décrites par la figure 11.

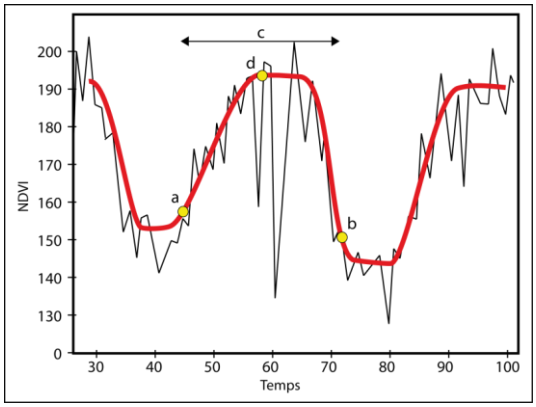


Figure 11 : Paramètres saisonniers de la végétation calculés par TIMESAT - Date de début (a) et fin (b) de la saison végétative, durée de la saison végétative (c), et date du pic de saison (d) (Source : Eklundh et Jönsson, 2012).

2.2. Analyse des saisons pluviométriques

2.2.1. Données pluviométriques utilisées

2.2.1.1. Produits d'observation

Les chroniques pluviométriques utilisées se fondent sur les mesures effectuées par le réseau stationnel implanté depuis 1997 sur le site de méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé par le service d'observation AMMA-CATCH (figure 12).

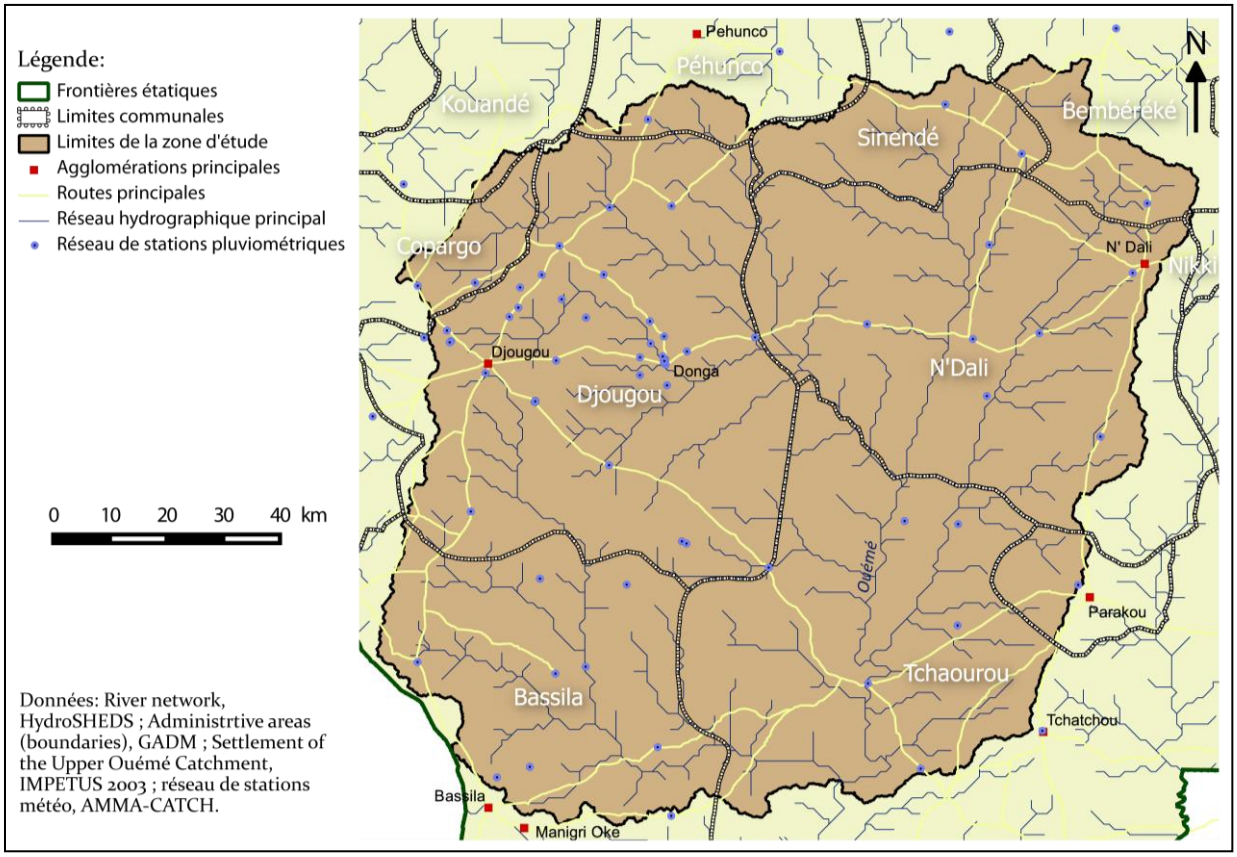


Figure 12 : Localisation des 78 stations pluviométriques installées sur le site de la Haute Vallée de l'Ouémé. Stations mises en service entre 1999 et 2008, dont une quarantaine toujours en activité en 2015.

Le réseau de stations couvrant la période d'étude du 01/01/2001 au 21/12/2014 a varié entre 31 et 56 stations. Ces séries ont ensuite été post-traitées (G. Quentin, comm. pers., 2015) afin de créer des champs quotidiens de la pluviométrie observée, grâce à des méthodes d'interpolation spatiale. La méthode du krigeage (Krige, 1951 ; Matheron, 1963) a été utilisée afin de donner une estimation de la pluviométrie pour un maillage couvrant la zone d'étude à une résolution spatiale de 0,1° (environ 11,13 km de côté, soit un pixel de 124 km²). Le semi-variogramme (annexe 4) décrit l'évolution de la semi-variance en fonction de la distance entre les mesures et indique que l'interpolation obtenue est de qualité très pertinente pour une étude régionale.

2.2.1.2. Produits satellitaires

Les produits satellitaires RFE 2.0 (*African Rainfall Estimation Algorithm Version 2*) sont une estimation des cumuls pluviométriques journaliers à 0,1° de résolution spatiale couvrant l'ensemble du continent africain, créés par le CPC (*Climate Prediction Center*), centre rattaché à la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (NOAA, 2001). Disponibles depuis le 1er janvier 2001 (remplaçant les précédents produits RFE 1.0 accessibles à partir du 1er juin 1995 ; Herman *et al.*, 1997), les produits RFE 2.0 sont issus de

mesures réalisées par 3 satellites différents et combinées à des données provenant de stations pluviométriques *in situ* (NOAA, 2001). Les données journalières RFE 2.0 ont ainsi été récupérées à compter du 1er janvier 2001 au 31 décembre 2014 via le site internet du CPC (http://www. cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/data.shtml).

2.2.2. Constitution de la base de données pluviométriques

2.2.2.1. Données manquantes et imputations

Les données pluviométriques d'observation AMMA-CATCH sont ensuite extraites des images résultant de l'interpolation spatiale des données via les points d'extraction créés pour chaque formation végétale, avant d'être moyennées pour chaque jour. Il s'avère que la série comporte 1,58 % de données manquantes, avec 3 périodes dépourvues d'informations (du 01/01/2007 au 14/01/2007, du 01/01/2008 au 17/02/2008, et du 13/12/2014 au 31/12/2014). Afin de combler ces lacunes sérielles, les données RFE 2.0 sont utilisées. Seules les données couvrant les mois de décembre, janvier, février et mars sont exploitées pour ces analyses, le mois de mars étant aussi inclus pour consolider l'analyse.

Les produits de données satellitaires sont d'abord testés afin de vérifier leur niveau de correspondance avec les données d'observation. La mise en relation des séries RFE 2.0 et AMMA-CATCH montre qu'une relation linéaire élevée existe entre les deux variables (figure 13.1). Le coefficient de corrélation linéaire R, calculé pour chacune des 11 périodes (2001-2002, … 2013-2014, sauf 2006-2007 et 2007-2008 à cause des lacunes sérielles enregistrées) permet de voir (selon le test de Bravais-Pearson) que la relation est significative à plus de 99,99 % pour toutes les périodes. Il est cependant possible de constater que les cumuls RFE 2.0 ont tendance à être supérieurs (ex : en 2012-2013) ou inférieurs (ex : en 2003-2004) aux cumuls pluviométriques mesurés par le réseau stationnel AMMA-CATCH selon les périodes (figure 13.2).

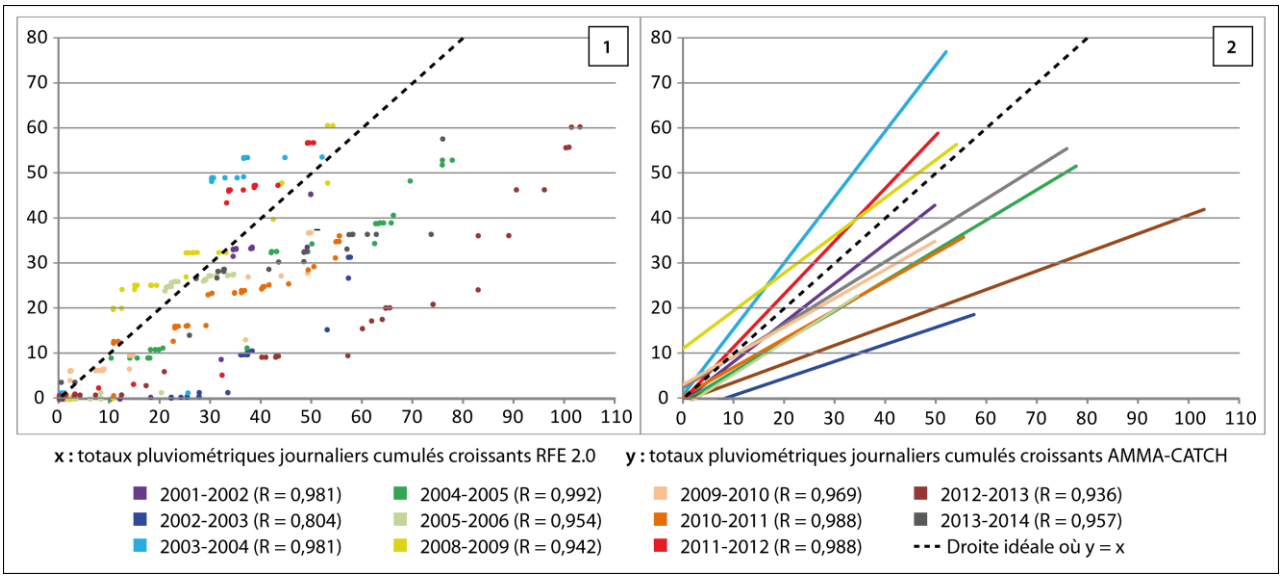


Figure 13 : Totaux pluviométriques RFE2.0 journaliers cumulés croissants en fonction des totaux pluviométriques AMMA-CATCH journaliers cumulés croissants (1) et droites de régression linéaires associées (2), pour les mois de décembre, janvier, février et mars sur la période 2001-2014 (les années 2006-2007 et 2007-2008 sont exclues car incomplètes).

Les cumuls pluviométriques des deux produits semblant décalés dans le temps, le coefficient de corrélation est calculé entre les deux séries pour différents décalages temporels

et pour les mois de décembre à mars (2001-2014). La corrélation est finalement meilleure lorsque la série RFE 2.0 est retardée de 1 jour (figure 14).

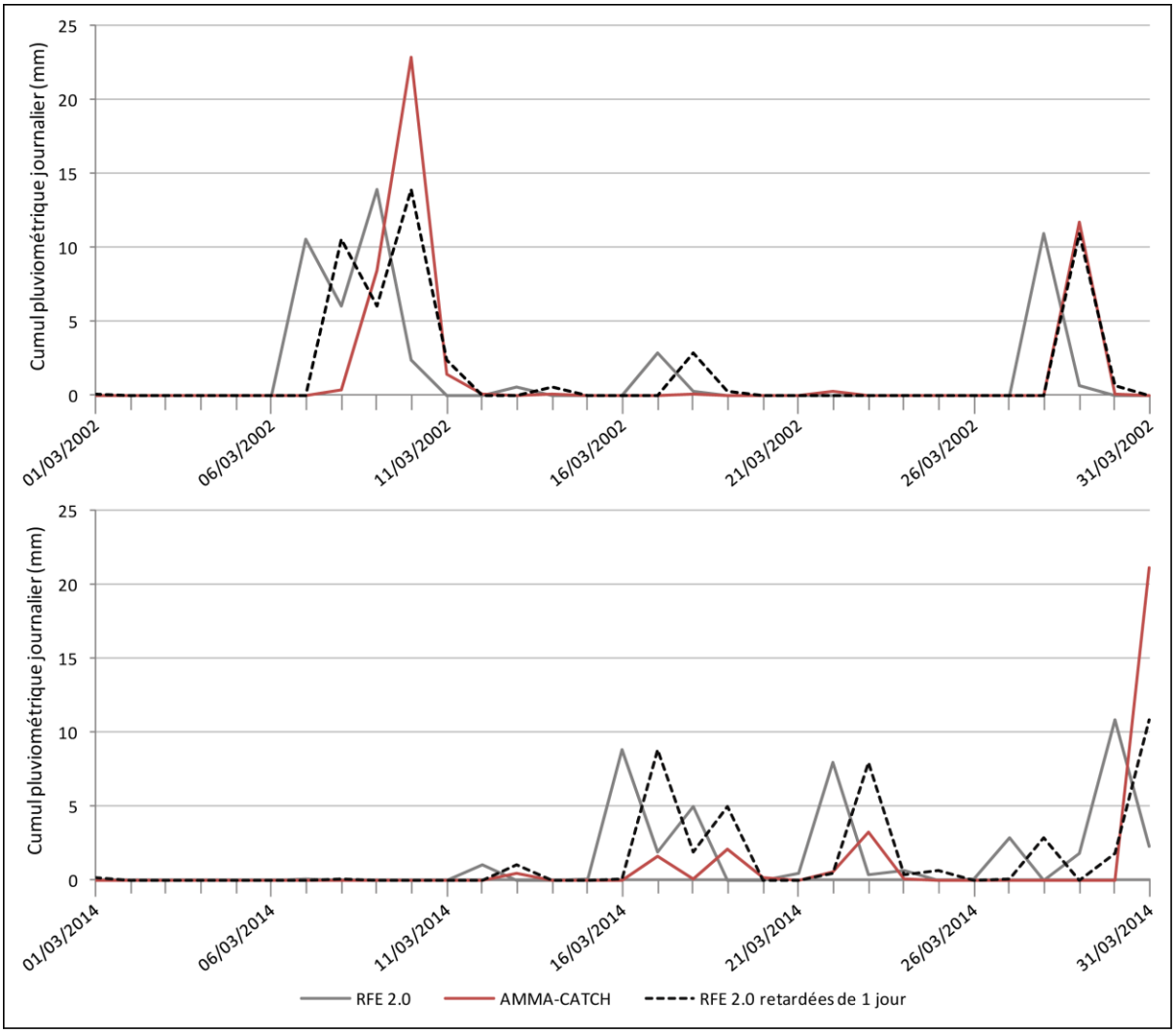


Figure 14 : Cumuls pluviométriques journaliers estimés par les RFE 2.0 avec et sans retard de 1 jour, mis en relation avec les cumuls observés par le réseau stationnel AMMA-CATCH : exemple en mars 2002 et mars 2014.

Il a été montré précédemment (figure 13) que les cumuls RFE 2.0 ont tendance à être supérieurs ou inférieurs à ceux mesurés par les stations AMMA-CATCH en fonction des années. Cette observation se vérifie à l'échelle journalière, et il s'avère que les données RFE 2.0 sont en moyenne inférieures aux données d'observation durant le mois de décembre (-0,09 mm/jour), et supérieures aux données d'observation en janvier (+0,10 mm/jour), février (+0,20 mm/jour) et mars (+0,54 mm/jour) (figure 15).

Après ajustements, les données RFE 2.0 sont utilisées pour remplacer les cumuls pluviométriques manquants dans la série d'observations AMMA-CATCH. Pour cela, les données RFE 2.0 sont décalées de 1 jour dans le temps, et les valeurs supérieures à 0 mm par jour sont réévaluées (-0,10 mm pour les jours du mois de janvier, -0,20 mm en février, et +0,09 mm en décembre).

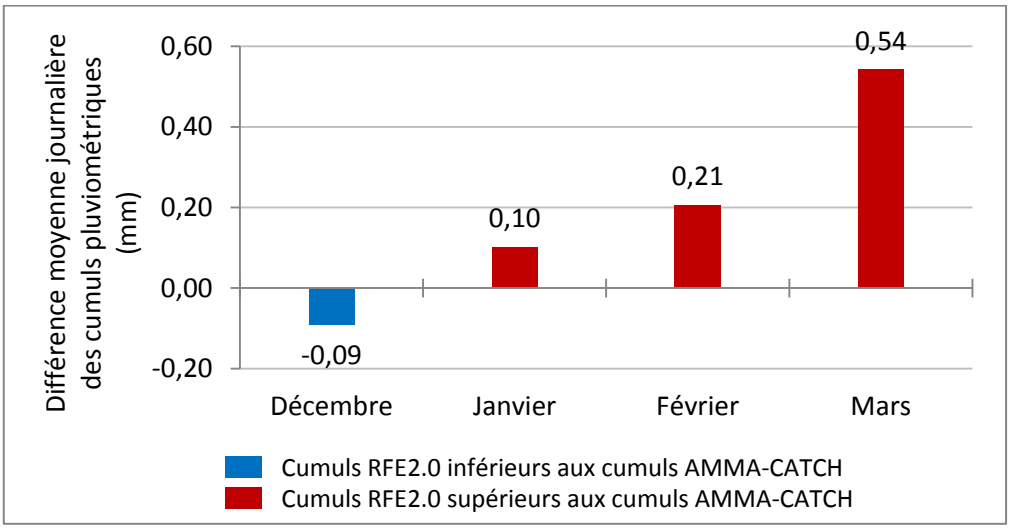


Figure 15 : Différence moyenne journalière entre les cumuls pluviométriques RFE 2.0 et ceux issus des mesures stationnelles AMMA-CATCH pour les mois de décembre à mars sur la période 2001-2014 (les années 2006/2007 et 2007/2008 sont exclues car incomplètes).

2.2.2.2. Caractérisation des saisons des pluies

Les dates de début et de fin de saison des pluies sont ensuite déterminées. Pour cela, la méthode de Odekunle (2006) est appliquée (figure 16). L'intérêt est qu'elle a été développée au Nigéria, pays limitrophe du Bénin, ce qui rend son application cohérente géographiquement. De plus, l'auteur définit le début et la fin de saison des pluies à l'échelle pentadaire, permettant alors à cette échelle la comparaison des dates de début et de fin de saison des pluies avec celles des saisons végétatives. Dans un premier temps, ne sont considérés comme jours de pluie seulement les jours ayant un cumul supérieur ou égal à 0,85 mm, seuil à partir duquel les cumuls ont une influence sur les cultures en Afrique de l'Ouest (Garbutt *et al.*, 1981). Odekunle (2006) a ainsi pu constater que le fait de ne seulement considérer ces jours de pluie donne de meilleurs résultats. L'étape suivante consiste à établir la moyenne des cumuls pluviométriques tous les 5 jours, puis de calculer le pourcentage que représente chaque pentade par rapport à la somme annuelle des cumuls moyens par pentade. Enfin, les pourcentages sont cumulés pour chaque année. C'est à partir de cette dernière étape que peuvent être définis les pentades de début et de fin de saison des pluies.

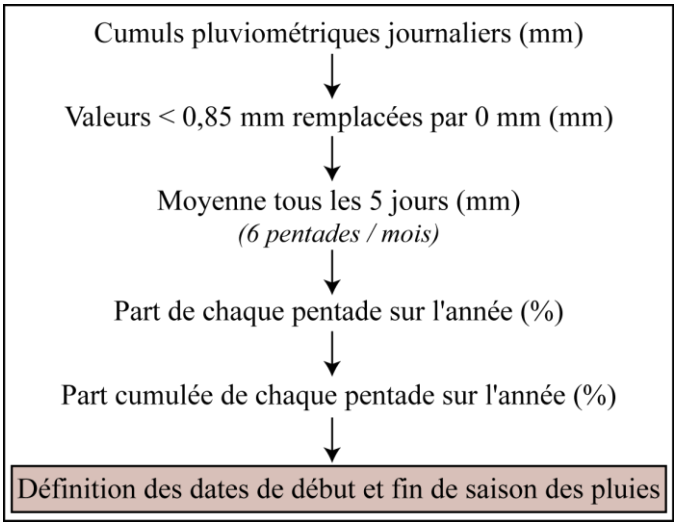


Figure 16 : Schéma exposant les différentes étapes méthodologiques permettant d'aboutir à la définition des dates de début et de fin de saison des pluies, inspirées de la méthode de Odekunle (2006).

Dans son étude, Odekunle (2006) associe le début de saison à la première pentade atteignant ou dépassant le pourcentage cumulé de 7 à 8 % (le seuil de 7 % est retenu pour notre étude), et d'une valeur de 90 % pour la fin de saison. La méthode révèle que le début de saison commence entre la 19e et 26e pentade (soit de début avril à début mai), excepté pour

l'année 2008 dont le début de saison commencerait *a priori* à la 5e pentade (fin janvier) (figure 17). La date de début de saison trouvée pour 2008 n'est pas cohérente climatologiquement. En effet, d'après des enquêtes de terrain effectuées auprès des agriculteurs dans le département de l'Atakora (Bénin), qui couvre une partie de la zone d'étude, par Houndénou et Hernandez (1998), les cumuls pluviométriques sont généralement assez conséquents à partir du 1er mai pour commencer à semer ; de même, dans les travaux de Sivakumar (1988) appliqués à l'Afrique de l'Ouest (Niger et Burkina Faso), la date de début de saison des pluies est définie comme étant le premier jour après le 1er mai lorsque la pluviométrie cumulée sur trois jours atteint au moins 20 mm, sans qu'ils soient suivis pendant les 30 jours suivants d'une séquence sèche excédant 7 jours. Le début de saison associé à la 5e pentade en 2008 paraît donc anormal puisque cela voudrait dire que la saison des pluies commencerait au mois de janvier pour cette année ; d'autant plus qu'il est suivi de 8 pentades "sèches" (0 mm), ce qui équivaut à environ 40 jours sans précipitations. Cette date anormalement précoce trouvée suite à l'utilisation de la méthode de Odekunle (2006) est causée par des cumuls pluviométriques élevés mesurés pour le 20/01/2008 (101,68 mm) et le 21/01/2008 (11,87 mm). Cela explique pourquoi le seuil de 7 % est atteint prématurément dans l'année. Ces cumuls en 2008 font partie de la séquence de données RFE 2.0 imputée à la série d'observations, et il demeure difficile de déterminer si ces cumuls reflètent des évènements pluvieux véritablement enregistrés.

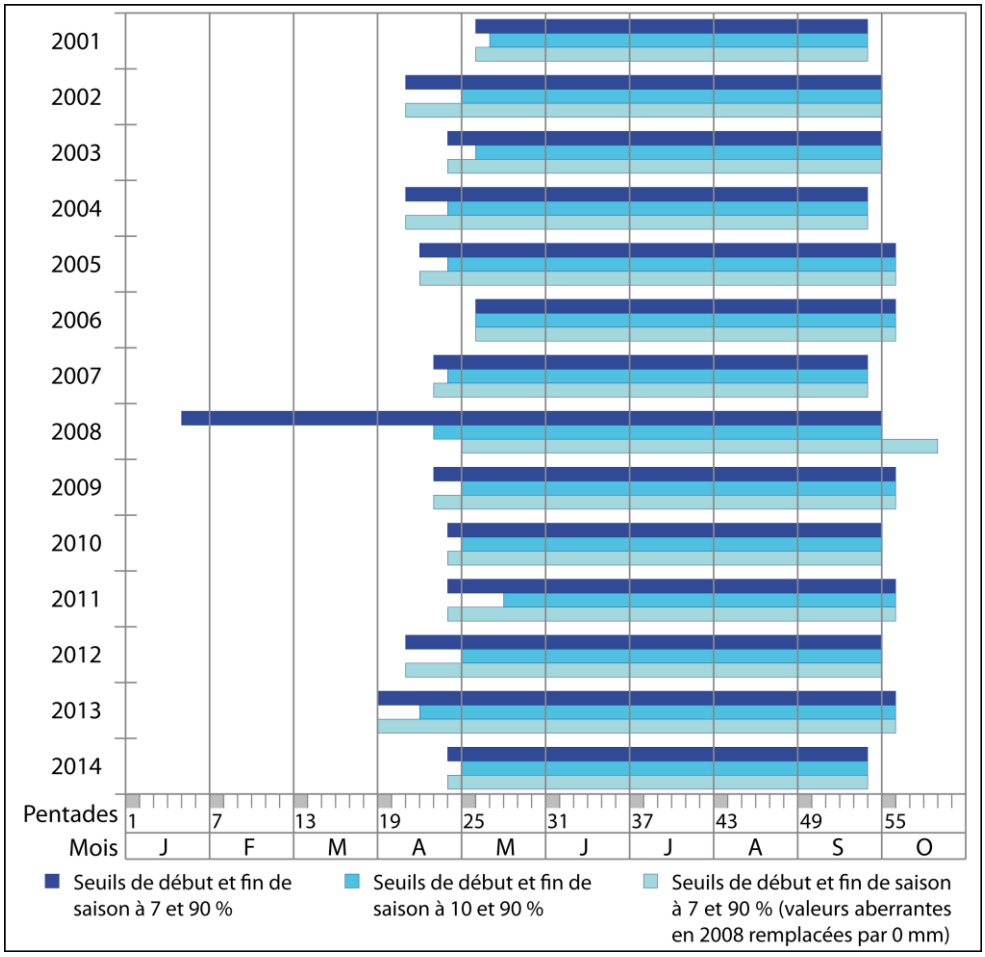


Figure 17 : Etendue annuelle des saisons des pluies sur la période 2001-2014 selon 3 méthodes initialement fondées sur la méthode de Odekunle (2006). A noter le caractère particulier du début de saison de l'année 2008 établi avec les seuils à 7 et 90 %, anormalement précoce dans l'année et certainement faux.

Pour pallier à ce problème, les deux valeurs problématiques ont d'abord été remplacées par 0 mm, en considérant que ces cumuls sont une erreur liée à l'estimation par satellite. Cette réévaluation donne des résultats plus cohérents, avec un début de saison qui commencerait à la 25e pentade en 2008, soit à la première pentade du mois de mai (figure 17). Cependant, l'incertitude liée à la vraisemblance de ces deux valeurs rend cette dernière méthode critiquable. Un autre procédé a alors été mis en place, consistant à rehausser la valeur seuil. Il semble que le seuil de 10 % est le plus cohérent à la fois pour l'année 2008 mais aussi pour les autres années, puisqu'il permet de respecter au mieux les conditions citées précédemment, à savoir la proximité de la date du 1er mai, et un début de saison non suivi par une séquence sèche excédant 7 jours (2 pentades dans le cas de l'étude) durant les 30 jours suivants (soit 6 pentades). Les débuts de saison varient alors de la 22e à la 28e pentade (de mi-avril à mi-mai) entre 2001 et 2014, le début de saison de l'année 2008 étant associé à la 23e pentade (fin avril), ce qui est beaucoup plus cohérent (figure 17). C'est donc cette dernière méthode qui est retenue pour caractériser la date de début de saison des pluies pour le secteur géographique étudié.

La fin de saison, associée au seuil de 90 %, varie entre la 53e à la 55e pentade sur la période 2001-2014 (soit de fin septembre à début octobre) (figure 17). Un des critères de définition de la fin de saison des pluies ouest-africaine selon Sivakumar (1988) est qu'elle doit apparaître après le 1er septembre. Les résultats concordant avec cette dernière règle, la méthode de Odekunle (2006) utilisée pour définir la fin de saison des pluies n'a pas été modifiée.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques générales des saisons végétales

L'analyse des paramètres saisonniers de la végétation permet de remarquer que, de manière générale, la saison végétative des plantes débute durant la deuxième moitié du mois de mars et se termine fin décembre mi-janvier, avec une durée allant de 56 à 59 pentades. Une variabilité inter-groupements des dates de début et fin de saison végétative a cependant été mise en avant (figure 18). En moyenne, sur la période 2001-2013, la saison végétative débute plus tôt pour les forêts (15e pentade de l'année civile, soit mi-mars) que pour les autres formations végétales, le début de saison le plus tardif étant celui de la mosaïque de cultures et jachères (18e pentade, soit fin mars). La fin de saison la plus précoce est celle de la savane (72e pentade, soit fin décembre), alors que celle de la ripisylve est la plus tardive (75e pentade, soit mi-janvier). La durée moyenne de la plus courte saison végétative est associée à la savane et à la mosaïque de cultures et jachères (56 pentades soit environ 280 jours), avec ensuite la ripisylve (58 pentades soit environ 290 jours) puis la forêt (59 pentades soit environ 295 jours).

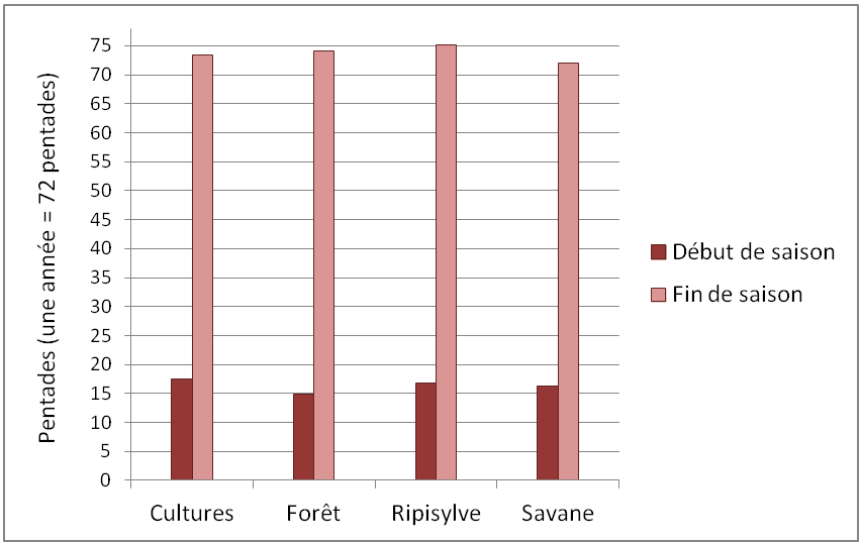


Figure 18 : Date moyenne de début et fin de saison végétative des quatre formations végétales sur la période 2001-2013.

Selon les travaux de Zhang *et al.* (2005), le début de saison des quatre formations végétales étudiées (forêts, zones arbustives, savanes, prairies) situées entre 9 et 10° de latitude nord (intervalle où se situe la zone d'étude) en Afrique sahélienne et sub-sahélienne commence environ entre la 18e et 30e pentade (de fin mars à fin mai) et se termine entre la 68e et 73e pentade (de début décembre à début janvier), pour le cas de 2000-2001. Bigot et Do (2015) trouvent que la saison végétative à l'échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé commence entre la 18e et la 25e pentade (de fin mars à début mai) et se termine entre la 68e et la 70e pentade (décembre) sur la période 2002-2012, avec une durée moyenne de 44 à 45 pentades. Tous ces calendriers ne correspondent donc pas exactement, mais ils ne sont en fait pas directement comparables. Ainsi, les travaux de Zhang *et al.* (2005) ne sont pas centrés sur la zone d'étude, sont limités à la période 2000-2001, avec des images composites EVI acquises tous les 16 jours à 1 km de résolution spatiale, et non pas des images composites NDVI disponibles tous les 5 jours à 250 m de résolution spatiale ; une méthode différente a également été utilisée pour déterminer le début et la fin de saison végétative des groupements végétaux ciblés. De même, Bigot et Do (2015) ont certes utilisé des produits satellitaires semblables et exploité le logiciel TIMESAT pour déterminer les paramètres saisonniers de la végétation, mais il est probable que les paramètres de calage renseignés dans TIMESAT diffèrent de ceux définis pour cette étude.

Malgré quelques divergences dans les dates de début et fin de saison végétative trouvées dans les trois études, celles-ci sont assez proches et les intervalles se superposent, ce qui rend

les résultats pertinents. L'idéal serait de réaliser des observations sur le terrain, afin de déterminer pour une année donnée les dates de début et fin de saison pour chaque formation végétale et d'y associer une valeur NDVI seuil, à utiliser ensuite dans les paramètres de calibration du logiciel TIMESAT. Une campagne sur le terrain permettrait également de vérifier si les points d'extraction associés aux différentes formations végétales correspondent bien à la formation ciblée à un instant précis.

D'après le classement des groupements établi selon la chronologie des dates de début et de fin de saison végétative, la saison des formations dites "naturelles" démarre plus tôt que celle de la mosaïque de cultures et jachères (dans l'ordre chronologique : la forêt, la savane, la ripisylve, la mosaïque de milieux). La majorité des cultures produites étant des cultures annuelles, c'est à dire que les plantes meurent à la fin de la saison, il est possible de supposer que l'homme joue un rôle dans la définition des métriques phénologiques saisonnières des zones culturales notamment en début de saison, en admettant qu'il ressème chaque année, ce qui pourrait expliquer en partie pourquoi la mosaïque de jachères et cultures démarre sa saison végétative plus tardivement que les autres groupements végétaux. La fin de saison végétative suggère également certains décalages entre les formations. Dans ce cas, les formations dominées par des essences ligneuses entrent en dormance plus tardivement (forêt et ripisylve). De manière générale, le système racinaire des arbres descend jusqu'aux couches profondes du sol contrairement à celui des espèces herbacées et des cultures (Boffa 2000), ce qui pourrait expliquer en partie ce temps de latence des systèmes forestiers. Mais il reste difficile de valider ces résultats, les expérimentations sur la zone d'étude demeurant peu nombreuses à ce sujet. Zhang et al. (2005) a établi une analyse saisonnière de quatre formations végétales en prenant en considération le gradient latitudinal en Afrique sahélienne et sub-sahélienne, et a pu observer qu'à ces latitudes, le début et la fin de saison des formations sont très variables, ce qui rend le classement chronologique des formations difficile. Mais à proximité de 10° de latitude Nord, les auteurs trouvent que les forêts, suivies des savanes, démarrent leur saison végétative avant les groupements arbustifs et herbacés, ce qui concorde avec nos résultats. A ces mêmes latitudes, les prairies entrent en dormance en premier, suivies des milieux arbustifs, des savanes, puis de la forêt, ce qui concorde également avec les résultats de notre étude régionale. Selon Zhang *et al.* (2005), les espaces situés entre 9°N et 10°N sont une zone charnière en termes de début et fin de saison végétative, avec un bouleversement de la hiérarchie des formations.

3.2. Évolution des paramètres saisonniers de la végétation

Les paramètres saisonniers des formations végétales sont très variables d'une année à l'autre (figure 19). Les dates de début, de fin, ainsi que la durée des saisons végétatives peuvent varier de plusieurs pentades, comme c'est le cas par exemple pour la mosaïque de cultures et jachères dont la différence entre la date de début de saison la plus précoce et la plus tardive sur la période 2001-2013 est de 12 pentades, ce qui équivaut à 60 jours environ (12 pentades pour la savane, 11 pour la ripisylve et 8 pour la forêt). L'écart entre la date de fin de saison la plus précoce et celle la plus tardive est plus faible, mais il peut tout de même s'élever jusqu'à 5 pentades pour la savane (soit environ 25 jours). Cette variabilité relative aux dates de début et de fin de saison végétative induit une fluctuation de la durée des saisons sur la période d'étude, allant de 49 à 61 pentades pour la mosaïque de cultures et jachères, de 54 à 63 pentades pour la forêt, de 52 à 63 pentades pour la ripisylve, et de 48 à 61 pentades pour la savane (figure 19).

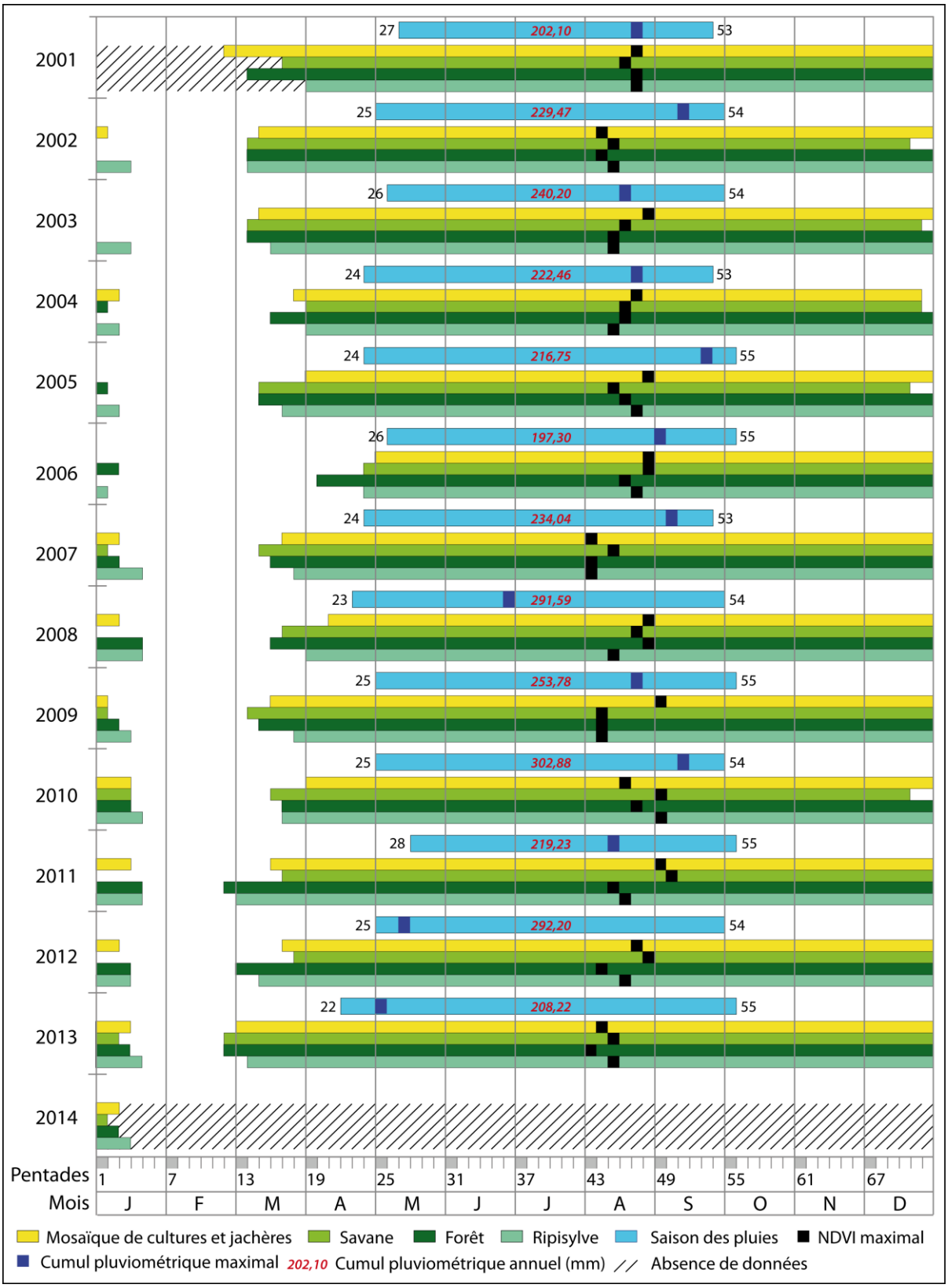


Figure 19 : Calendrier saisonnier de l'activité végétale pour la mosaïque de cultures et jachères, pour la savane, pour la forêt et pour la ripisylve, avec également la durée de la saison des pluies (calculés sur la période allant de 2001 à début 2014 sur le site méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé au Bénin).

Afin de faire ressortir les saisons végétales (tous groupements confondus) au caractère exceptionnel s'étant produites durant la période 2001-2013, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est réalisée. L'objectif est de rassembler les saisons végétales en fonction de leur similarité relative à la durée de saison des quatre groupements. Celle-ci est fondée sur la distance euclidienne pour déterminer le critère de ressemblance entre les individus (les saisons végétales, soit 13 saisons[1]), et la méthode de Ward est utilisée pour agréger les classes entre elles. L'histogramme des indices de niveau (figure 20.1) permet de déterminer le nombre de classes à retenir. Deux sauts d'inertie peuvent être distingués. Un premier saut suggère que deux grandes classes ressortent. Les saisons 2, 3, 7, 9, 11, 12, 13 semblent ainsi se ressembler (figure 20.2), avec une durée de saison globalement supérieure à la moyenne de la période (figure 21) ; les autres saisons (1, 4, 5, 6, 8, 10 ; figures 20.2) sont au contraire plutôt caractérisées par une durée de saison inférieure à la moyenne (figure 21).

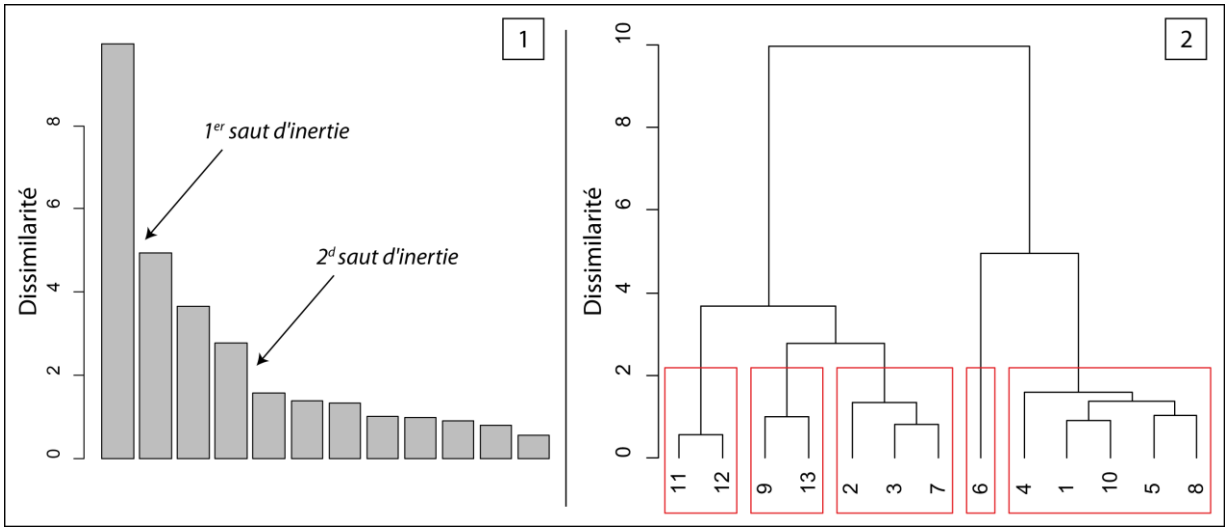


Figure 20 : Histogramme des indices de niveau (1) et dendrogramme (2) réalisés dans le cadre d'une CAH (distance euclidienne et méthode de Ward utilisées) pour classer les saisons similaires ensemble, tous groupements confondus.

Le deuxième saut d'inertie permet de voir qu'au sein de ces deux premières grandes classes, des groupes de saisons peuvent se distinguer et un total de 5 classes ressort (figure 20.2). Il apparaît clairement que la saison 6 a un caractère exceptionnel, puisqu'elle ne paraît ressembler à aucune autre saison. En effet, c'est la plus courte saison enregistrée pour les 4 formations végétales sur l'ensemble de la période (figure 21). Les saisons 11 et 12, et dans une moindre mesure 9 et 13 semblent également se distinguer des autres saisons. Elles sont en effet caractérisées par une durée de saison souvent très supérieure à la moyenne (jusqu'à 5 pentades en plus environ), la savane n'étant cependant pas concernée pour les saisons 11 et 12. D'après les analyses, il semble donc que les saisons 6, 9, 11, 12 et 13 sont assez exceptionnelles entre 2001 et 2013. Les travaux de Bigot et Do (2015) confortent ces premiers résultats, puisqu'ils ont également remarqué la durée relativement courte de la saison végétative en 2006, et celle plutôt longue des saisons de 2009 et 2012. Leurs résultats montrent en revanche que la saison végétative de 2011 est particulièrement courte, ce qui ne transparaît pas dans nos analyses. Il apparaît également important de prendre en considération le type de formation végétale. En effet, certains groupements peuvent avoir une durée de

[1] Les saisons végétatives des différentes groupements sont associées à un numéro car elles s'étalent souvent sur deux années consécutives. Ainsi, la saison n°**1** = 2001-2002, n°**2** = 2002-2003, n°**3** = 2003-2004, n°**4** = 2004-2005, n°**5** = 2005-2006, n°**6** = 2006-2007, n°**7** = 2007-2008, n°**8** = 2008-2009, n°**9** = 2009-2010, n°**10** = 2010-2011, n°**11** = 2011-2012, n°**12** = 2012-2013, n°**13** = 2013-2014.

saison longue par rapport aux autres saisons durant une année donnée, alors que d'autres groupements enregistrent une saison plus courte que les autres années sur cette même année.

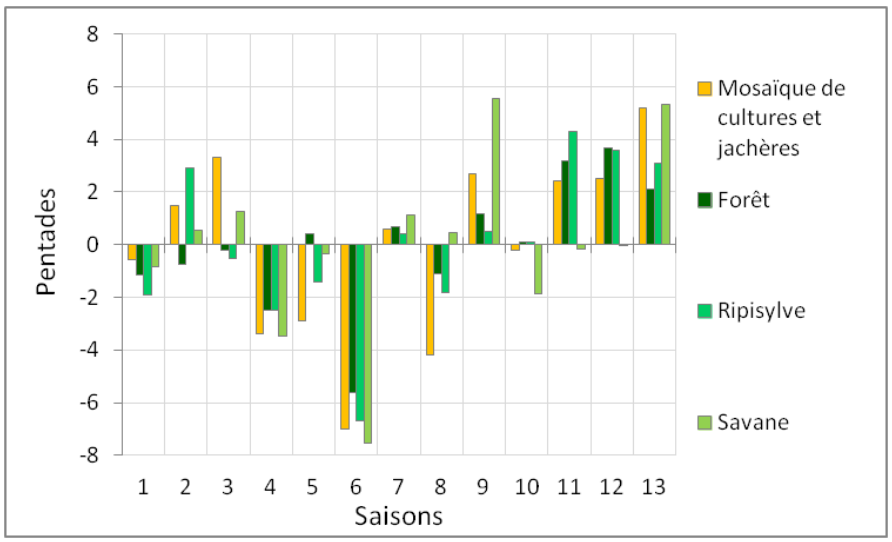


Figure 21 : Ecart à la moyenne de la durée des saisons végétatives des quatre formations végétales sur la période allant de 2001 à début 2014.

L'objectif est maintenant de chercher à savoir si le caractère exceptionnel de la durée des saisons mises en évidence précédemment s'explique par un début de saison végétative anormalement précoce ou une fin de saison anormalement tardive, et si les saisons de chaque groupement varient de manière similaire. Le début de saison et la fin de saison de chaque formation sont d'abord mis en relation avec la durée de leurs saisons végétatives. Il s'avère qu'une corrélation linéaire forte existe entre la durée de saison et le début de saison pour tous les groupements. En admettant une significativité de la relation à 98 %, il s'avère en effet que la corrélation est significative pour les quatre formations végétales, dépassant même le seuil de 99,99 % selon la table de Bravais-Pearson. En revanche, aucune relation significative n'a été décelée entre la durée et la fin de saison des groupements ; seule la mosaïque de cultures et jachères atteint le seuil de 90 %. La durée des saisons végétatives sur la période 2001-2013 semble donc principalement influencée par la variabilité du début des saisons. Néanmoins, la durée des saisons de la mosaïque de cultures et jachères pourrait bien être également influencée par la variabilité de la date de fin de saison végétative. La saison 6 en est la démonstration la plus frappante avec un début de saison beaucoup plus tardif que pour les 12 autres saisons végétatives pour les quatre formations végétales, sans que la fin de saison ne soit anormale sur cette même saison (figure 22).

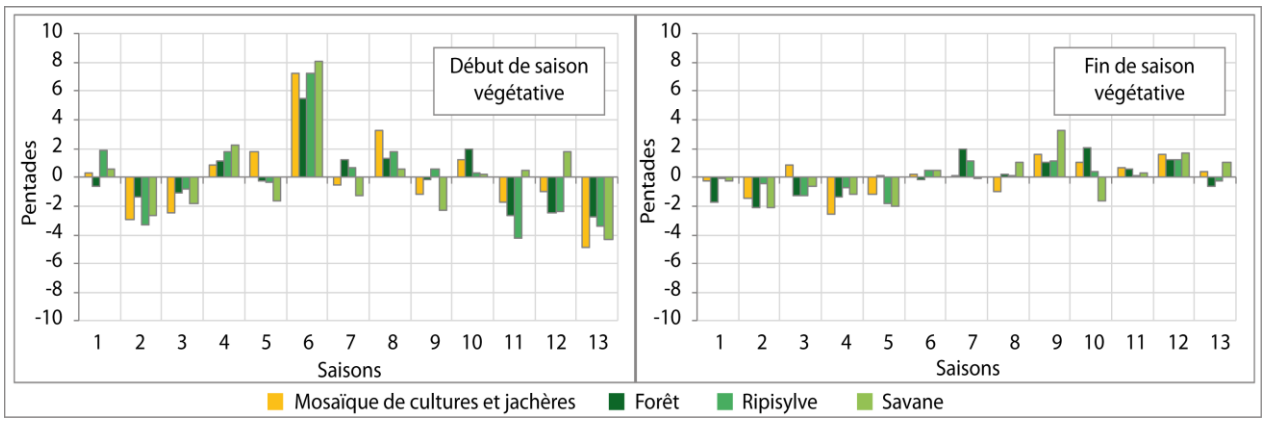


Figure 22 : Ecart à la moyenne des dates de début et fin de saison végétative pour les quatre formations végétales sur la période allant de 2001 à début 2014.

Pour la saison 9, la durée de saison plus longue que la moyenne, principalement pour la savane et la mosaïque de jachères et cultures, pourrait s'expliquer par un début de saison plus précoce pour ces deux derniers groupements (respectivement -2 et -1 pentades) ainsi que par une fin de saison plus tardive (3 pentades plus tard pour la savane, 2 pour la mosaïque de cultures et jachères, et 1 pour la forêt et la ripisylve). Les saisons 11, 12 et 13 semblent également affectées par un début de saison plus précoce (la savane faisant exception pour les saisons 11 et 12) ; la fin de saison ne semble pas avoir un poids important dans leur longueur exceptionnelle, sauf peut-être pour la saison 12 (environ 1 à 2 pentades plus tard pour les 4 formations).

De manière générale, c'est donc effectivement la variabilité du début de la saison végétative qui semble expliquer le plus la durée des saisons exceptionnelles sur la période allant de 2001 à début 2014. Durant la saison 9, la durée de saison de la mosaïque de jachères et cultures ainsi que de la savane parait cependant être aussi bien influencée par un début de saison plus précoce et une fin de saison plus tardive que la moyenne de la période. L'importance de considérer le type de végétation transparaît là encore, puisque durant les saisons 11 et 12, la savane enregistre un début de saison plus tardif que la moyenne pendant que les autres formations sont caractérisées par un début de saison particulièrement précoce. La réalisation d'analyses sans distinguer le type de végétation est donc utile pour mettre en évidence les différentes tendances et anomalies, mais il semble primordial de réaliser les analyses à l'échelle des formations végétales pour caractériser les fluctuations saisonnières propres à chacune.

3.3. Relations entre la saison végétative et les précipitations

L'intérêt est maintenant de savoir si la variation des dates de début et fin de saison végétatives, notamment lors des saisons exceptionnelles (6, 9, 11, 12 et 13), peut être expliquée par les précipitations. De nombreuses études ont montré que la variabilité des précipitations conditionne en partie l'activité photosynthétique des plantes de manière très significative (Nicholson *et al.*, 1990 ; Davenport et Nicholson, 1993 ; Eklundh et Olsson, 2003 ; Herrmann *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2005 ; Philippon *et al.*, 2005 ; Hoscilo *et al.*, 2014). Zhang *et al.* (2005) trouvent eux aussi une forte corrélation positive entre le début de saison des pluies et le début de saison végétative propre à différentes formations dans les régions sahéliennes et sub-sahéliennes ; la fin de saison des pluies et la fin de saison végétative sont également corrélées positivement, avec cependant un décalage d'environ 54 jours. Il semblerait alors logique que les paramètres saisonniers des quatre formations végétales soient conditionnés en grande partie par les précipitations.

A première vue, il ne semble cependant pas y avoir de relation entre la durée de saison végétative et la durée de saison des pluies, entre le début de saison végétative et le début de saison des pluies, ni entre la fin de saison végétative et la fin de saison des pluies (figure 19). Aucune corrélation linéaire n'est en effet décelée entre ces différentes variables, pour chacune des quatre formations végétales. Nous cherchons à savoir ensuite si le total pluviométrique de chaque année a une influence sur la durée des saisons végétatives. Il est possible de constater que le total pluviométrique de 2006 est le plus faible de la période 2001-2013 (figure 23), ce qui pourrait en partie expliquer pourquoi la saison 6 (2006-2007) est la plus courte saison végétative pour les 4 formations. De même, en 2012, le total pluviométrique annuel est bien plus élevé que la moyenne de la période (+53 mm), ce qui pourrait expliquer la durée particulièrement longue de la saison végétative de la mosaïque de jachères et cultures, de la forêt, et de la ripisylve durant la saison 12 (2012-2013). La durée plutôt supérieure à la moyenne de la saison 9 peut également être associée à un total pluviométrique annuel supérieur à la moyenne de la période (+14,5 mm). Néanmoins, cette corrélation jusque là

positive ne se vérifie pas pour les saisons 11 et 13, et il s'avère qu'aucune corrélation linéaire n'est décelée sur la période 2001-2013 entre les totaux pluviométriques annuels et la durée des saisons de chaque groupement. Il semblerait donc que les précipitations ne soient pas un facteur explicatif majeur dans la variabilité des métriques phénologiques propres aux quatre formations végétales présentes sur le site de méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé sur la période 2001-2013.

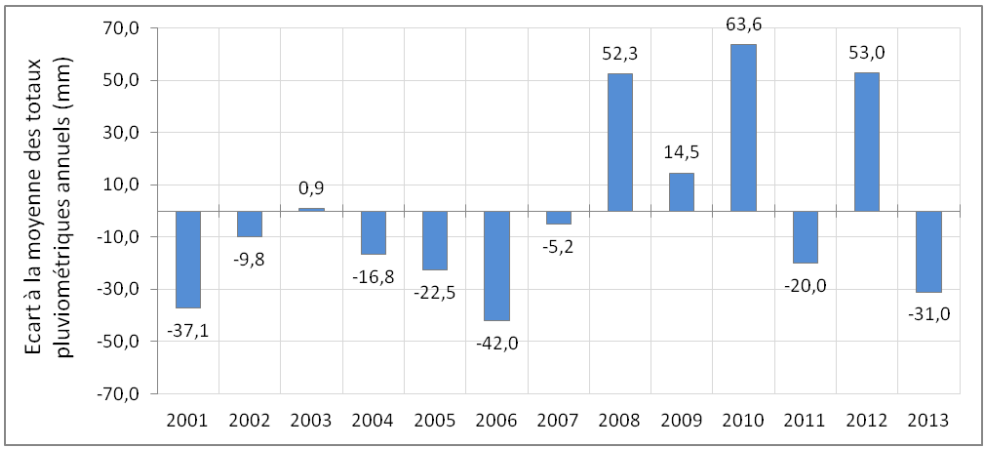


Figure 23 : Ecart à la moyenne des cumuls pluviométriques annuels sur la période 2001-2013.

3.4. Autres variables bioclimatiques et anthropiques pouvant influencer la saison végétative des formations végétales

Aucune réelle corrélation n'est perceptible entre les paramètres saisonniers des formations végétales et les précipitations sur la zone d'étude, alors que de nombreuses études ont pu vérifier cette relation en Afrique de l'Ouest. Néanmoins les travaux de Hoscilo *et al.* (2014) montrent bien la grande variabilité spatiale de la relation entretenue entre les cumuls pluviométriques et le NDVI, notamment en Afrique de l'Ouest. Cette variabilité spatiale est représentée par la figure 24, sur laquelle sont exposés les espaces où le NDVI et les cumuls pluviométriques sont corrélés positivement ("climatic greening" et "climatic degradation"), et ceux dont l'activité végétale n'est pas expliquée par les précipitations ("non climatic degradation" et "non climatic greening"). Les zones non colorées correspondent aux zones dont la significativité de la relation entre les deux variables n'est pas avérée (seuil $p<0.1$).

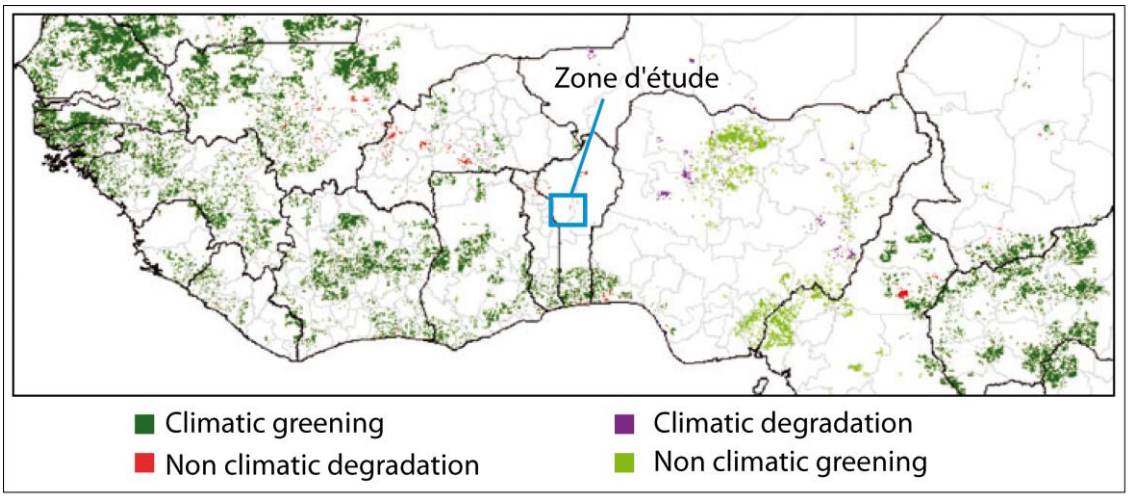


Figure 24 : Distribution des espaces connaissant une hausse ou une baisse d'activité végétale (NDVI) sur la période 2001-2010 liées respectivement à une hausse ("climatic greening") ou une baisse de la pluviométrie ("climatic degradation"), ou non expliquées par les précipitations ("non climatic greening et non climatic degradation").

Nous pouvons voir que sur la zone d'étude, aucune corrélation positive significative n'a été décelée par les auteurs, ce qui vient potentiellement conforter les résultats trouvés. Il ne paraît pas non plus y avoir de corrélation négative significative entre les deux variables. Ces résultats portent cependant sur les tendances observées sur la période 2001-2010. Qu'en est-il de la relation entre les deux variables à l'échelle interannuelle, mensuelle, ou pentadaire sur le secteur d'étude ? En sachant que la relation entre les deux variables est très hétérogène dans l'espace, et que cette dernière question n'a pas été analysée de manière approfondie sur le site de méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé, il est alors difficile de confirmer ou non les résultats de l'étude.

En partant du fait que les précipitations n'influencent pas véritablement la variabilité des saisons végétatives propres aux différentes formations végétales sur la zone d'étude, cela signifie que d'autres paramètres entrent en jeu, qu'ils soient naturels ou anthropiques, comme a pu le suggérer Hoscilo *et al.* (2014). Les changements d'occupation du sol observés sur la zone d'étude pourraient éventuellement expliquer en partie les résultats, en supposant que certains points d'extraction des données aient été associés à une zone ayant subi des modifications au cours de la période. En effet, le site de méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé a connu une augmentation des superficies de terres cultivées (127 433 ha en 1991 contre 194 216 ha en 2000) au détriment des forêts et savanes (déboisement et déforestation), le taux variant selon les communes (Judex *et al.*, 2009). Le phénomène a sans doute continué de progresser jusqu'à aujourd'hui. L'indice NDVI est capable de détecter les changements d'occupation du sol, et notamment la mise à nu d'espaces suite à la déforestation des milieux (Benhanifia *et al.*, 2004). La figure 25 montre ainsi l'influence que peut avoir un aménagement caractérisé par de la terre battue apparente (ici probablement un aérodrome construit en périphérie de Parakou) sur les valeurs NDVI, tirant celles-ci à la baisse.

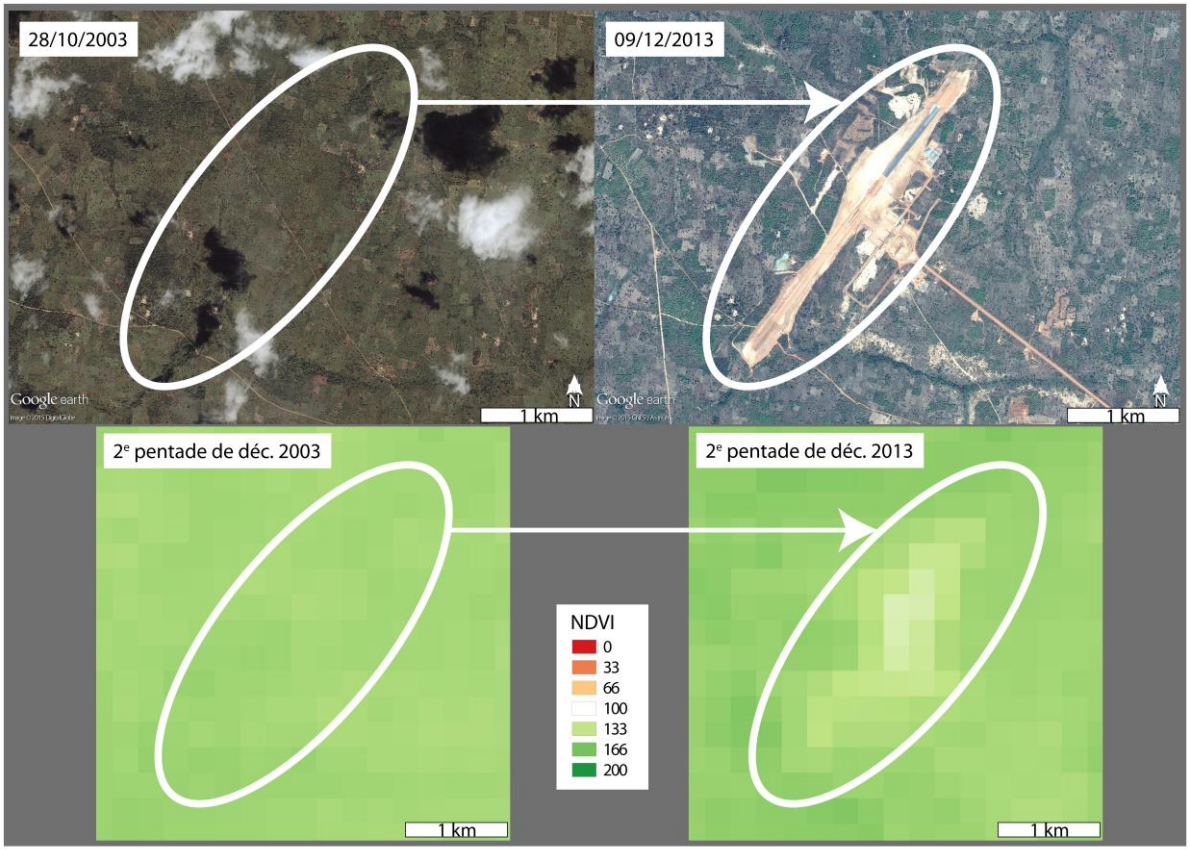


Figure 25 : Influence de l'aménagement d'un site sur les valeurs du NDVI (en légende : (NDVI - 100) /100).

Un changement d'occupation du sol éventuel sur les zones où ont été associés les points d'extraction pourrait ainsi avoir des répercussions sur les analyses chronologiques. Néanmoins, seules les valeurs maximales associées à chaque pentade et pour chaque formation végétale ont été gardées, justement pour éliminer les éventuelles valeurs biaisées par un changement d'occupation du sol ou à cause de perturbations atmosphériques. Il est donc peu probable qu'un changement d'occupation du sol survenu en quelques points sur les 21 par groupement aient perturbé les analyses, d'où l'intérêt de multiplier les points d'étude afin de limiter les biais. Le changement d'occupation du sol n'est donc probablement pas un facteur explicatif des résultats.

Différents auteurs ont prouvé que l'activité végétale est influencée par le rayonnement solaire. Myneni et Williams (1994) ont ainsi mis en évidence l'existence d'une corrélation positive entre le NDVI et la fraction du rayonnement photosynthétique actif (FPAR) absorbé par les tissus végétaux de la canopée. De même, une étude effectuée par Huete *et al.* (2006) en Amazonie a montré que l'activité végétale est plus importante durant la saison sèche pour une grande partie de la forêt amazonienne (48,3 % du bassin est exposé à un "verdissement" important durant la saison sèche, et 29,4 % des forêts ont tendance à "verdir" de manière significative). Ainsi, l'activité végétale des forêts amazoniennes paraît être davantage liées au rayonnement photosynthétique actif (PAR), plus important durant la saison sèche ; les zones de pâturage semblent au contraire étroitement liées à la variation des cumuls pluviométriques. La sensibilité au rayonnement photosynthétique actif de l'activité des formations végétales étudiées dans la Haute Vallée de l'Ouémé pourrait donc être une des explications à la non corrélation des saisons végétatives avec les précipitations.

Pour finir, la composition du sol peut elle aussi influencer l'activité végétale. En effet, un sol sableux va par exemple permettre l'infiltration de l'eau précipitée, qui est de ce fait disponible pour la croissance des plantes ; alors que l'imperméabilité d'un sol argileux va entraîner le ruissellement ou l'évaporation des eaux en surface, limitant la teneur en humidité du sol dans les zones racinaires (Casenave et Valentin, 1992 ; Mualem et Assouline, 1996 ; Rietkerk *et al.*, 2000). La végétation en place sur des sols argileux a de ce fait besoin de cumuls pluviométriques plus importants pour démarrer sa période végétative (Kumar et al., 2002).

Conclusion

L'objectif de l'étude, qui était de savoir si les précipitations ont une influence sur la saison végétative de différentes formations végétales sur la période 2001-2013, a été atteint. Il semblerait ainsi qu'il n'y ait aucune corrélation linéaire directe entre les précipitations et les saisons végétatives, pour les quatre formations végétales. Il n'est cependant pas possible de vérifier précisément l'ensemble des relations, étant donné qu'aucun travail réalisé à partir d'observations et de mesures *in situ* appliqué à la zone d'étude n'a été effectué sur ce type d'analyse. Notre troisième hypothèse n'est donc pas validée.

Il est ensuite clairement mis en évidence que les métriques saisonnières varient d'une formation végétale à une autre. La forêt va ainsi entrer dans sa période végétative avant les autres formations végétales, viennent ensuite la savane, la ripisylve, et pour finir la mosaïque de jachères et cultures. La fin de saison va apparaître en premier pour la savane et la mosaïque de jachères et cultures, puis toucher la forêt et pour finir la ripisylve. Il paraît donc important de prendre en considération le type de formation végétale dans les analyses portant sur les relations entretenues entre diverses variables bioclimatiques et les saisons végétatives, pour une prise de décision adaptée à chaque milieu. Notre première hypothèse est alors validée.

Enfin, les dates de début et de fin de saison végétative des différents groupements sont très variables d'une année à l'autre, avec un écart à la moyenne de la période parfois considérable. Les métriques phénologiques des quatre formations végétales varient relativement dans le même sens, et les saisons exceptionnelles disséminées à travers la CAH concernent globalement toutes les formations. Mais il existe tout de même des exceptions, avec des saisons végétatives ayant une durée supérieure à la moyenne pour certains groupements alors qu'elle se trouve être inférieure à la moyenne pour d'autres. Ce phénomène montre là encore l'importance de distinguer les différents groupements végétaux dans les analyses, car leurs caractéristiques saisonnières ne varie pas toujours de la même manière. Notre deuxième hypothèse est donc validée.

L'intérêt serait maintenant de chercher à savoir quelles sont les variables qui influencent majoritairement le début et la fin de saison végétative de différentes formations végétales, en commençant par prendre par exemple en considération le rayonnement photosynthétique actif, ou encore en étudiant la relation entretenue entre l'activité végétale et le type de sol dans la Haute Vallée de l'Ouémé. La compréhension des relations demeurant entre différentes variables climatiques ou écologiques avec les métriques phénologiques de différents types de végétation est primordiale pour une gestion et une préservation appropriée, surtout dans un contexte de changement climatique (IPCC, 2013), car si les précipitations ne devraient pas trop évoluer en Afrique de l'Ouest ou enregistrer une très légère hausse quel que soit le scénario RCP (*Representative Concentration Pathway*) d'ici à 2100, les températures devraient continuer à augmenter et atteindre +1 à +5°C par rapport à la moyenne 1986-2005 en 2100. Des changements pourraient également survenir au niveau de la teneur en humidité de l'air, des radiations solaires arrivant à la surface de la Terre, ou encore du débit des rivières (IPCC, 2013). Ces changements environnementaux auront certainement des conséquences sur les métriques phénologiques de la végétation. D'où l'importance de bien comprendre les interactions entretenues entre la végétation et les différents paramètres bioclimatiques, en vu de limiter l'impact du changement climatique sur les écosystèmes naturels et sur les sociétés à travers les pratiques agricoles, en mettant en place des actions de prévention (ex : agir sur les comportements humains pour anticiper les conséquences) et de protection (ex : mettre en place des aires protégées).

Références bibliographiques

Benhanifia K., Haddouche D., Smahi Z., Bensaid A., Hamimed A. (2004). Characterization of the deforestation effect in a semi-arid region by the use of satellite images. *International Society for Optics and Photonics*, 5232, 324–332. doi : 10.1117/12.513722

Berg A., Quirion P., Sultan B. (2009). Weather-index drought insurance in Burkina-Faso: assessment of its potential interest to farmers. *Weather Clim. Soc.*, 1(1), 71–84. doi : 10.1175/2009WCAS1008.1

Bigot S., Do T. (2015). Evolution récente des variations pluviométriques et de l'activité végétale dans le bassin versant expérimental de l'Ouémé Supérieur (Bénin). *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, 245–250.

Blein R., Soulé B.G., Yérima B. (2008). *Les potentialités agricoles de l'Afrique de l'Ouest*. Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest, Paris, Fondation pour l'Agriculture et la Ruralité dans le Monde, 119 p.

Boffa J.M. (2000). *Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 284 p.

Brooks N (2004). Drought in the African Sahel: long term perspectives and future prospects. Tyndall Center for Climate Change Research, working paper 61, 37 p.

Brown M.E., de Beurs K.M. (2008). Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. *Remote Sens. Environ.*, 112, 2261–2271.

Butt B., Turner M.D., Singh A., Brottem L. (2011). Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3367–3376. doi : 10.1016/j.rse.2011.08.001

Caldwell J.C. (1975). *La sécheresse dans le Sahel et ses conséquences démographiques*. Washington, Comité de liaison outre-mer, Conseil américain pour l'enseignement supérieur, 121 p.

Casenave A., Valentin C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.*, 130, 231–249. doi : 10.1016/0022-1694(92)90112-9

Davenport M.L., Nicholson S.E. (1993). On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *Int. J. Remote Sens.*, 14, 2369–2389. doi : 10.1080/01431169308954042

De La Taule M.D.P., Morissette S., Ménard P., Jean K. (2012). L'imagerie multispectrale comme outil d'analyse et de diagnostic pour la productivité des sols en agriculture de précision, 4 p. doi : hal-00671100

Eklundh L., Jönsson P. (2012). *TIMESAT 3.1 software manual*. Lund university, 82 p.

Eklundh L., Olsson L. (2003). Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophys. Res. Lett.*, 30(8), 1430. doi : 10.1029/2002GL016772

FAO (2005). Evaluation des ressources forestières mondiales 2005 - Bénin - rapport national. Rome, 17 p.

Gao F., Morisette J.T., Wolfe R.E., Ederer G., Pedelty J., Masuoka E., Myneni R., Tan B., Nightingale J. (2008). An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI time series. *Geosci. Remote Sens. Lett.*, IEEE, 5(1), 60–64. doi : 10.1109/LGRS.2007.907971

Gao X., Huete A.R., Ni W., Miura T. (2000). Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.*, 74(3), 609–620. doi : 10.1016/S0034-4257(00)00150-4

Garbutt M.D.J., Stern R.D., Dennett M.D., Elston J. (1981). A comparison of the rainfall climate of eleven places in West Africa using a two-part model for daily rainfall. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B*, 29(1-2), 137–155. doi : 10.1007/BF02278197

Gonzalez P. (2001). Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Clim. Res.*, 17(2), 217–228. doi : 10.3354/cr017217

Groten S.M.E., Ocatre R. (2002). Monitoring the length of the growing season with NOAA. *Int. J. Remote. Sens.*, 23(14), 2797–2815. doi : 10.1080/01431160110070843

Gu Y., Wylie B.K., Howard D.M., Phuyal K., Ji L. (2013). NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecol. Indic.*, 30, 1–6. doi : 10.1016/j.ecolind.2013.01.041

Herman A, Kumar VB, Arkin PA, Kousky JV (1997). Objectively determined 10-day African rainfall estimates created for famine early warning systems. *Int. J. Remote Sens.*, 18(10), 2147–2159. doi : 10.1080/014311697217800

Herrmann S.M., Anyamba A., Tucker C.J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. Glob. *Environ. Change*, 15(4), 394–404. doi : 10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004

Heumann B.W., Seaquist J.W., Eklundh L., Jönsson P. (2007). AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sens. Environ.*, 108(4), 385–392. doi : 10.1016/j.rse.2006.11.025

Holben B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 7(11), 1417–1434. doi : 10.1080/01431168608948945

Hopkins W.G. (2003). *Physiologie végétale*. Bruxelles, De Boeck Supérieur, 536 p.

Hoscilo A., Balzter H., Bartholomé E., Boschetti M., Brivio P.A., Brink A., Clerici M., Pekel J.F. (2014). A conceptual model for assessing rainfall and vegetation trends in sub-Saharan Africa from satellite data. *Int. J. Climatol*., publié en ligne sur Wiley Online Library. doi : 10.1002/joc.4231

Houndénou C., Hernandez K. (1998). Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sci. Chang. Planétaires/Sécheresse*, 9(1), 23–34.

Huete A., Didan K., Van Leeuwen W., Jacobson A., Solanos R., Laing T. (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13) - Algorithm theoretical basis document - version 3.1. Vegetation Index and Phenology Lab., 213 p.

Huete A.R., Didan K., Shimabukuro Y.E., Ratana P., Saleska S.R., Hutyra L.R., Yang W., Nemani R., Myneni R (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophys. Res. Lett.*, 33(6), L06405. doi : 10.1029/2005GL025583

Hulme M. (1992). Rainfall changes in Africa: 1931–1960 to 1961–1990. *Int. J. Climatol.*, 12(7), 685–699. doi : 10.1002/joc.3370120703

Ingram K.T., Roncoli M.C., Kirshen P.H. (2002). Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agric. Syst.*, 74(3), 331–349. doi : 10.1016/S0308-521X(02)00044-6

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, Cambridge University Press; Cambridge, United Kingdom and New York, 1535 p.

Jenkerson C., Maiersperger T., Schmidt G. (2010). eMODIS: A User-Friendly Data Source. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1055, 10 p.

Jönsson P., Eklundh L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *Geosci. Remote Sens., IEEE Trans On*, 40(8), 1824–1832. doi : 10.1109/TGRS.2002.802519

Jönsson P., Eklundh L. (2004). TIMESAT — a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Comput. Geosci.*, 30(8), 833–845. doi : 10.1016/j.cageo.2004.05.006

Judex M., Röhrig J., Schulz O., Thamm H.P. (2009). *IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de recherche 2000–2007*. Troisième édition. Université de Bonn, Département de Géographie, 144 p.

Krige D.G. (1951). *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*. Thèse de doctorat, Université de Witwatersrand, 272 p.

Kumar L., Rietkerk M., van Langevelde F., van de Koppel J., van Andel J., Hearne J., de Ridder N., Stroosnijder L., Skidmore A.K., Prins H.H.T. (2002). Relationship between vegetation growth rates at the onset of the wet season and soil type in the Sahel of Burkina Faso: implications for resource utilisation at large scales. *Ecol. Model.*, 149(1), 143–152. doi : 10.1016/S0304-3800(01)00520-8

Le Barbé L., Lebel T., Tapsoba D. (2002). Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–90. *J. Clim.*, 15(2), 187–202. doi : 10.1175/1520-0442(2002)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2

Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C., Seguis L. (2009). AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview. *J. Hydrol.*, 375(1-2), 3–13. doi : 10.1016/j.jhydrol.2009.03.020

Le Floc'h E. (1969). *Caractérisation morphologique des stades et phases phénologiques dans les communautés végétales*. Thèse de doctorat, université U.S.T.L. Montpellier II, CNRS-CEPE doc No. 45, 132 p.

L'hote Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.*, 47(4), pp. 563–572. doi : 10.1080/02626660209492960

Lieth H. (1974). Purposes of a phenology book. In Lieth H. (ed.) : *Phenology and seasonality modeling*. Berlin, Heidelberg, Springer, 3–19. doi : 10.1007/978-3-642-51863-8_1

Matheron G. (1963). Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, 58(8), 1246–1266. doi : 10.2113/gsecongeo.58.8.1246

Mualem Y., Assouline S. (1996). Soil sealing, infiltration and runoff. In Issar A.S., Resnick S.D. (eds.) : *Runoff, infiltration and subsurface flow of water in arid and semi-arid regions*. Pays-Bas, Springer, 131–181.

Myneni R.B., Williams D.L. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.*, 49(3), 200–211.

Natta A.K. (2003). *Ecological assessment of riparian forests in Benin: phytodiversity, phytosociology and spatial distribution of tree species*. Thèse de doctorat, université de wageningen, 216 p.

Natta A.K., Sinsin B., van der Maesen L.J.G. (2002). Riparian forests, a unique but endangered ecosystem in Benin. *Bot. Jahrb.* 124(1), 55–69. doi: 10.1127/0006-8152/2002/0124-0055

Nicholson S.E. (2013). The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. *Int. Sch. Res. Not.*, 2013, e453521. doi: 10.1155/2013/453521

Nicholson S.E., Davenport M.L., Malo A.R. (1990). A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Clim. Change*, 17(2-3), 209–241.

Nicholson S.E., Dezfuli A.K., Klotter D. (2012). A two-century precipitation dataset for the continent of Africa. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93(8), 1219–1231. doi : 10.1175/BAMS-D-11-00212.1

Nicholson S.E., Some B., Kone B. (2000). An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Clim.*, 13(14), 2628–2640. doi : 10.1175/1520-0442(2000)013<2628:AAORRC>2.0.CO;2

Nicholson S.E., Tucker C.J., Ba M.B. (1998). Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(5), 815–829. doi : 10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2

NOAA CPC (2001). The NOAA Climate Prediction Center African Rainfall Estimation Algorithm Version 2.0.4 p.

Odekunle T.O. (2006). Determining rainy season onset and retreat over Nigeria from precipitation amount and number of rainy days. *Theor. Appl. Climatol.*, 83(1-4), 193–201. doi : 10.1007/s00704-005-0166-8

Philippon N., Mougin E., Jarlan L., 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. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 110(D24), D24115. doi: 10.1029/2005JD006394

Richard Y., Poccard I. (1998). A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. Int. *J. Remote Sens.*, 19(15), 2907–2920.

Rietkerk M., Ketner P., Burger J., Hoorens B., Olff H. (2000). Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecol.*, 148(2), 207–224.

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deerin D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium, 309-317.

Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Travaglio M, Ouedraogo M., Boyer J.-F., Lubes Niel H., Fritsch J.-M., Masson J.-M., Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. In Servat E., Hughes D., Fritsch J.-M., Hulme M. (eds.) : *Water resources variability in Africa during the 20th century = Variabilité des ressources en eau en Afrique au 20ème siècle*. Wallingford : AISH, 252, 323-337.

Sivakumar M.V.K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, 42(4), 295–305. doi : 10.1016/0168-1923(88)90039-1

Sultan B. (2011). L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales. HDR, Université Pierre et Marie Curie, 137 p.

Tan B., Morisette J.T., Wolfe R.E., Gao F., Ederer G., Nightingale J., Pedelty J. (2011). An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. *Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. IEEE, J. Of*, 4(2), 361–371. doi : 10.1109/JSTARS.2010.2075916

Tucker C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8(2), 127–150.

Vernet R. (2002). Climate during the late Holocene in the Sahara and the Sahel: evolution and consequences on human settlement. In Hassan F.A. (ed.) : *Droughts, food and culture - Ecological Change and Food Security in Africa's Later Prehistory*. US, Springer, 47–63.

Vrieling A., de Leeuw J., Said M.Y. (2013). Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sens.*, 5(2), 982–1000. doi: 10.3390/rs5020982

Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Liu Z. (2005). Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *J. Geophys. Res. Atmospheres (1984-2012)*, 110(D12), D12103. doi : 10.1029/2004JD005263

Zheng X., Eltahir E.A. (1998). The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons. *J. Clim.*, 11(8), 2078–2096.

Zhou L., Tian Y., Myneni R.B., Ciais P., Saatchi S., Liu Y.Y., Piao S., Chen H., Vermote E.F., Song C., Hwang T. (2014). Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 509(7498), 86–90. doi: 10.1038/nature13265

Références webographiques

USGS (2013). eMODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - Product Documentation. Disponible sur internet : http://earlywarning.usgs.gov/fews/product/ 115 [consulté le 10/06/2015].

USGS (2012). eMODIS (EROS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Disponible sur internet : https://lta.cr.usgs.gov/emodis [consulté le 10/06/2015].

Tables des figures

Figure 1 : Localisation de l'Afrique de l'Ouest, définie ici par les 15 pays membres de la Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO) en 2015 (sauf le Cap Vert et Mauritanie comprise). 10

Figure 2 : Carte d'occupation du sol à 300 m de résolution spatiale pour l'année 2010 (2008-2012), produite par l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre du programme de Surveillance des variables Climatiques Essentielles, connu sous le nom de "ESA Climate Change Initiative" (http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php). 11

Figure 3 : Corrélations linéaires du NDVI mensuel avec les cumuls pluviométriques du Global Precipitation Climatology Project (GPCP) trimestriels cumulés, calculées sur la période 1982-2003 (Source : Herrmann *et al.*, 2005). 12

Figure 4 : Localisation du site méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé au Bénin, et présentation des principales caractéristiques physiques et administratives du site. 15

Figure 5 : Dynamiques de l'utilisation des terres dues à l'extension des régions agricoles. Les données sont dérivées d'images LANDSAT du 13/12/1991 et du 26/10/2000. Les régions de la forêt protégée sont inclues dans les statistiques fournies (Source : Judex *et al.*, 2009). 17

Figure 6 : Représentations photographiques de 6 milieux présents dans la zone d'étude (Source : Bel, 2010). 18

Figure 7 : Occupation du sol de la Haute Vallée de l'Ouémé en 2007, d'après des classifications établies à partir d'images SPOT. 19

Figure 8 : Schéma récapitulatif de la méthodologie adoptée pour l'étude conjointe des relations précipitations et activité végétale grâce aux données provenant de l'observation *in situ* et de la télédétection. 20

Figure 9 : Représentation des points d'extraction propres à chaque formation végétale et de la grille d'analyse mise en place au sein de la zone d'étude. 23

Figure 10 : Exemple d'une copie écran de l'interface graphique du logiciel TIMESAT. La courbe bleu représente la variation du NDVI de 2001 à 2014 sans élimination du bruit ; la courbe noir représente la variation du NDVI après que la série ait été lissée grâce à la méthode gaussienne asymétrique ; les points noirs représentent le début et la fin de saison végétative pour chaque cycle déterminé suivant les paramètres renseignés. 25

Figure 11 : Paramètres saisonniers de la végétation calculés par TIMESAT - Date de début (a) et fin (b) de la saison végétative, durée de la saison végétative (c), et date du pic de saison (d) (Source : Eklundh et Jönsson, 2012). 25

Figure 12 : Localisation des 78 stations pluviométriques installées sur le site de la Haute Vallée de l'Ouémé. Stations mises en service entre 1999 et 2008, dont une quarantaine toujours en activité en 2015. 26

Figure 13 : Totaux pluviométriques RFE2.0 journaliers cumulés croissants en fonction des totaux pluviométriques AMMA-CATCH journaliers cumulés croissants (1) et droites de régression linéaires associées (2), pour les mois de décembre, janvier, février et mars sur la période 2001-2014 (les années 2006-2007 et 2007-2008 sont exclues car incomplètes). 27

Figure 14 : Cumuls pluviométriques journaliers estimés par les RFE 2.0 avec et sans retard de 1 jour, mis en relation avec les cumuls observés par le réseau stationnel AMMA-CATCH : exemple en mars 2002 et mars 2014. 28

Figure 15 : Différence moyenne journalière entre les cumuls pluviométriques RFE 2.0 et ceux issus des mesures stationnelles AMMA-CATCH pour les mois de décembre à mars sur la période 2001-2014 (les années 2006/2007 et 2007/2008 sont exclues car incomplètes)..... 29

Figure 16 : Schéma exposant les différentes étapes méthodologiques permettant d'aboutir à la définition des dates de début et de fin de saison des pluies, inspirées de la méthode de Odekunle (2006)..... 29

Figure 17 : Etendue annuelle des saisons des pluies sur la période 2001-2014 selon 3 méthodes initialement fondées sur la méthode de Odekunle (2006). A noter le caractère particulier du début de saison de l'année 2008 établi avec les seuils à 7 et 90 %, anormalement précoce dans l'année et certainement faux. 30

Figure 18 : Date moyenne de début et fin de saison végétative des quatre formations végétales sur la période 2001-2013..... 32

Figure 19 : Calendrier saisonnier de l'activité végétale pour la mosaïque de cultures et jachères, pour la savane, pour la forêt et pour la ripisylve, avec également la durée de la saison des pluies (calculés sur la période allant de 2001 à début 2014 sur le site méso-échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé au Bénin). 34

Figure 20 : Histogramme des indices de niveau (1) et dendrogramme (2) réalisés dans le cadre d'une CAH (distance euclidienne et méthode de Ward utilisées) pour classer les saisons similaires ensemble, tous groupements confondus. 35

Figure 21 : Ecart à la moyenne de la durée des saisons végétatives des quatre formations végétales sur la période allant de 2001 à début 2014..... 36

Figure 22 : Ecart à la moyenne des dates de début et fin de saison végétative pour les quatre formations végétales sur la période allant de 2001 à début 2014..... 36

Figure 23 : Ecart à la moyenne des cumuls pluviométriques annuels sur la période 2001-2013. 38

Figure 24 : Distribution des espaces connaissant une hausse ou une baisse d'activité végétale (NDVI) sur la période 2001-2010 liées respectivement à une hausse ("climatic greening") ou une baisse de la pluviométrie ("climatic degradation"), ou non expliquées par les précipitations ("non climatic greening et non climatic degradation")..... 38

Figure 25 : Influence de l'aménagement d'un site sur les valeurs du NDVI (en légende : (NDVI - 100) /100). 39

Table des tableaux

Tableau 1: Utilisation des terres en 2000 en % pour les quatre communes principales composant la zone d'étude (Judex *et al.*, 2009)..... 18

Table des matières

Remerciements ... 2
Liste des acronymes, sigles et abréviations ... 4
Sommaire ... 6
Avant-propos ... 8
Introduction ... 10
1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOPHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE ... 15
1.1. Localisation ... 15
1.2. Climat ... 16
1.3. Formations végétales naturelles et contexte agricole ... 16
2. DONNÉES ET MÉTHODES ... 19
2.1. Analyse des saisons de végétation ... 19
2.1.1. Données environnementales utilisées ... 19
2.1.1.1. Occupation du sol ... 19
2.1.1.2. Données NDVI ... 21
2.1.2. Constitution de la base de données NDVI propre à chaque formation végétale ... 21
2.1.2.1. Détermination des formations végétales étudiées ... 21
2.1.2.2. Extraction des données NDVI pour chaque formation végétale ... 22
2.1.2.3. Extraction des métriques phénologiques saisonnières grâce à l'outil TIMESAT 24
2.2. Analyse des saisons pluviométriques ... 26
2.2.1. Données pluviométriques utilisées ... 26
2.2.1.1. Produits d'observation ... 26
2.2.1.2. Produits satellitaires ... 26
2.2.2. Constitution de la base de données pluviométriques ... 27
2.2.2.1. Données manquantes et imputations ... 27
2.2.2.2. Caractérisation des saisons des pluies ... 29
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION ... 32
3.1. Caractéristiques générales des saisons végétales ... 32
3.2. Évolution des paramètres saisonniers de la végétation ... 33
3.3. Relations entre la saison végétative et les précipitations ... 37
3.4. Autres variables bioclimatiques et anthropiques pouvant influencer la saison végétative des formations végétales ... 38
Conclusion ... 41
Références bibliographiques ... 42
Références webographiques ... 47
Tables des figures ... 48
Table des tableaux ... 49
Table des matières ... 50
Table des annexes ... 51

Table des annexes

Annexe 1 : Caractéristiques d'occupation du sol associées à chacun des 21 carrés de la grille établie sur la zone d'étude..... 52

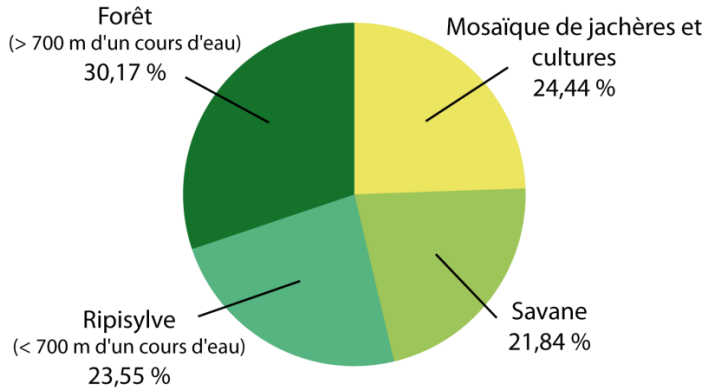
Annexe 2 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des 21 carrés selon le niveau de ressemblance de leur occupation du sol (forêt, ripisylve, savane, mosaïque de cultures et jachères). 53

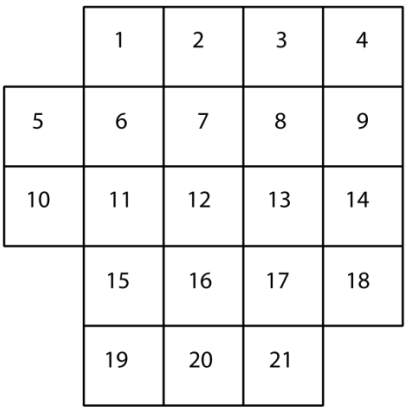
Annexe 3 : Interprétation spatiale et statistique de la CAH appliquée à la grille de 21 carrés. Les carrés de même couleur font partie de la même classe. 54

Annexe 4 : Semi-variogramme associé au krigeage effectué sur les données pluviométriques d'observation..... 54

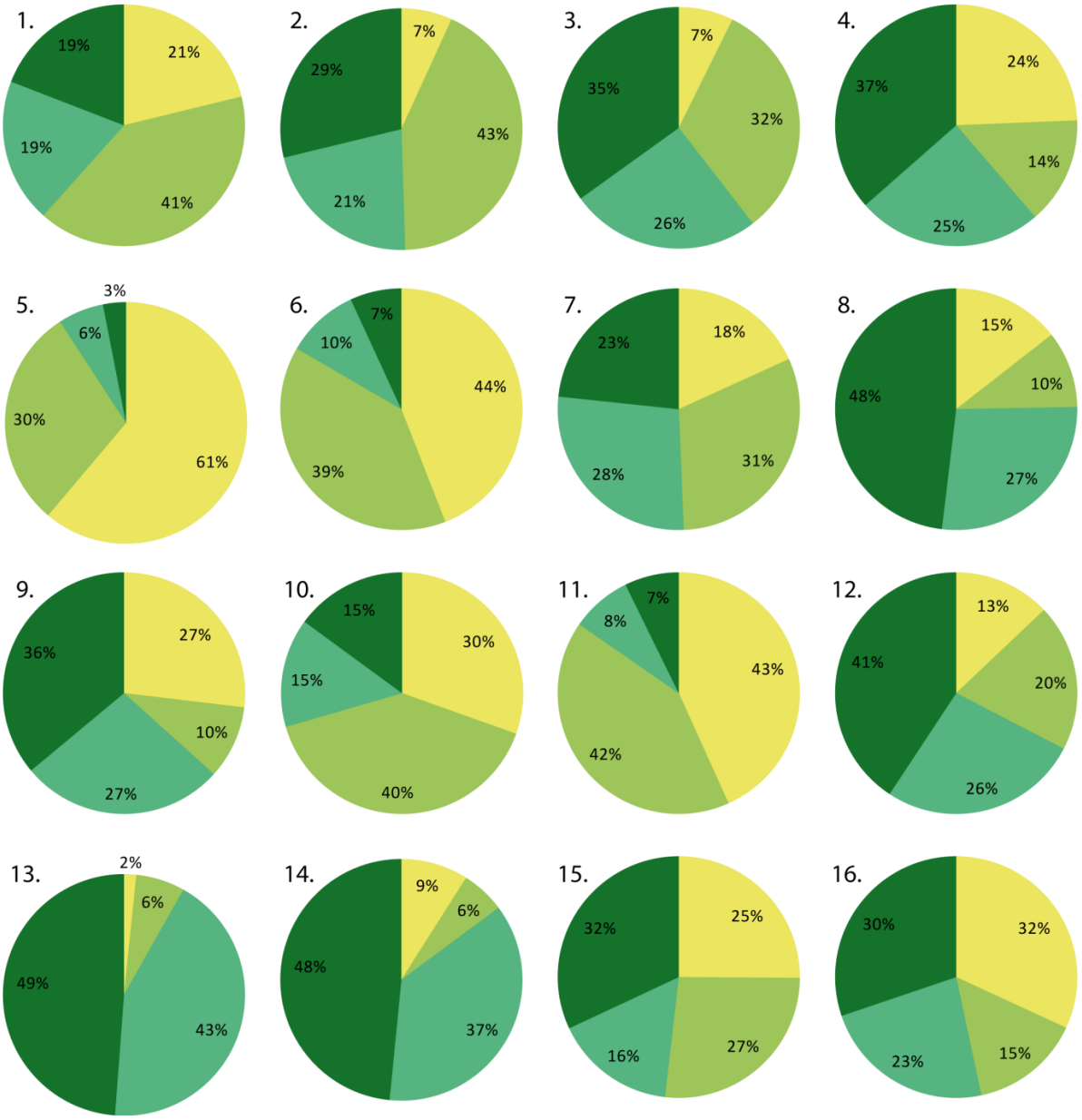
Annexe 1 : Caractéristiques d'occupation du sol associées à chacun des 21 carrés de la grille établie sur la zone d'étude.

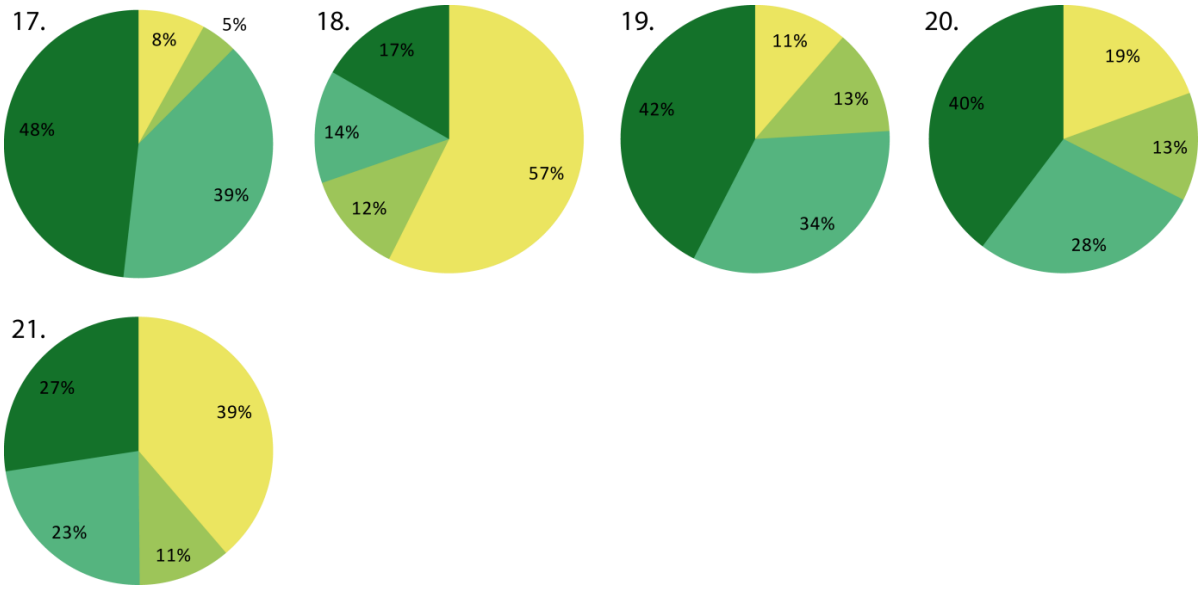
Part totale des formations végétales représentées sur les 21 carrés :





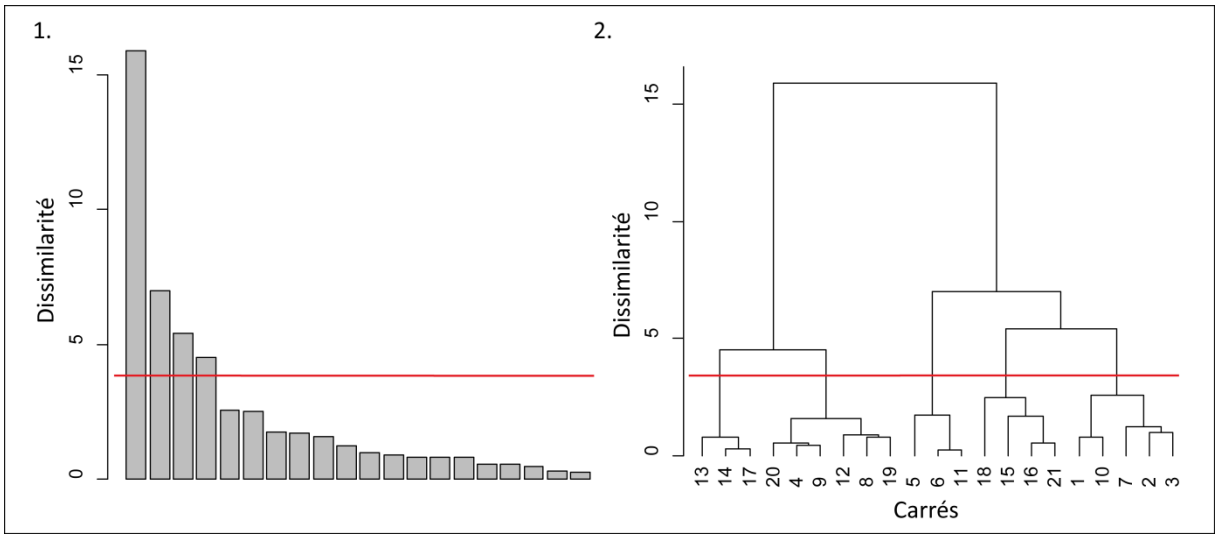
Part des formations végétales représentées pour chaque carré :



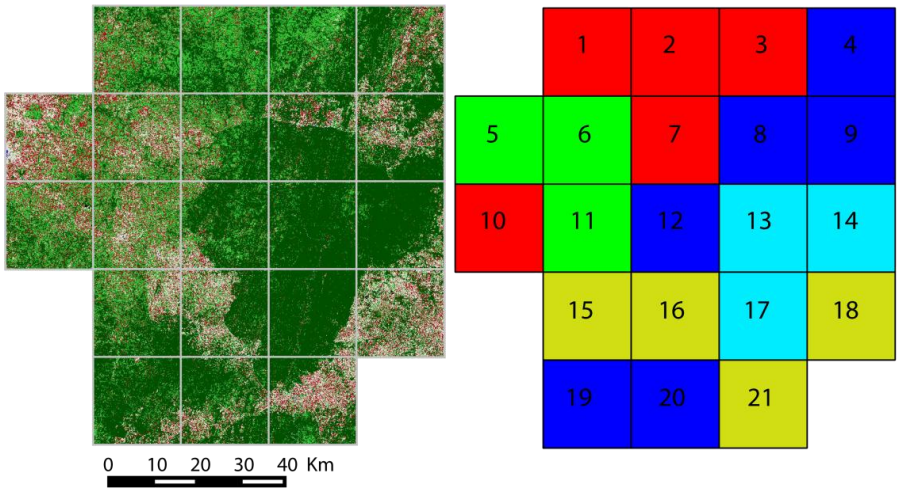


Annexe 2 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des 21 carrés selon le niveau de ressemblance de leur occupation du sol (forêt, ripisylve, savane, mosaïque de cultures et jachères).

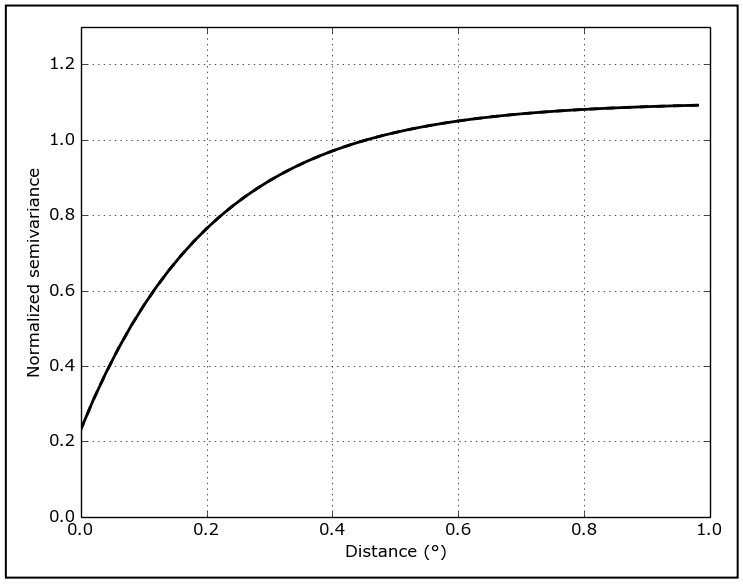
Réalisation d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) fondée sur la distance euclidienne pour déterminer le critère de ressemblance entre les individus (carrés), et utilisant la méthode de Ward pour agréger les classes entre elles. L'histogramme des indices de niveau (1.) a permis de distinguer 5 classes majeures de carrés. L'arbre hiérarchique obtenu (2.) permet de repérer les carrés compris au sein de ces 5 classes distinctes.



Annexe 3 : Interprétation spatiale et statistique de la CAH appliquée à la grille de 21 carrés. Les carrés de même couleur font partie de la même classe.



Classes de Carrés	Superficie moyenne (%)			
	Mosaïque de cultures et jachères	Savanes	Ripisylve (<700m d'un cours d'eau)	Forêt (>700m d'un cours d'eau)
	6,23	5,60	39,70	48,48
	18,22	13,32	27,88	40,59
	16,79	37,31	21,69	24,22
	38,28	16,24	18,92	26,56
	49,50	36,79	7,99	5,72

Valeur maximale pour chaque classe figurant en rouge.

Annexe 4 : Semi-variogramme associé au krigeage effectué sur les données pluviométriques d'observation.