

SUIVI PAR TÉLÉDÉTECTION DE LA SAISONNALITÉ DE LA VÉGÉTATION ET DU CLIMAT DANS LA ZONE DE TRANSITION FORÊT-SAVANE EN RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE

BAPTISTE DICARA

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR: PR. ADELINÉ FAYOLLE

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le promoteur membre du personnel enseignant de GxABT.

SUIVI PAR TÉLÉDÉTECTION DE LA SAISONNALITÉ DE LA VÉGÉTATION ET DU CLIMAT DANS LA ZONE DE TRANSITION FORÊT-SAVANE EN RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE

BAPTISTE DICARA

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR: PR. ADELINÉ FAYOLLE

Résumé

Objectifs L'objectif principal de ce travail est de caractériser la phénologie d'une zone de transition forêt-savane d'Afrique centrale, à partir de données de télédétection, et de déterminer le rôle des précipitations sur la phénologie foliaire. Pour y arriver, les objectifs secondaires consistent à caractériser l'occupation du sol par la végétation dans la zone d'étude, étudier la saisonnalité du fonctionnement de la canopée et des précipitations, et finalement étudier la relation entre le démarrage de la végétation et des précipitations.

Localisation La zone d'étude de 10 000 km² est centrée sur M'Baïki, en République centrafricaine (RCA). Elle se situe dans la transition forêt-savane au nord du bassin du Congo, dans le sud de la République centrafricaine. Cette zone est caractérisée par la présence de forêts tropicales semi-décidues et de savanes mésiques.

Méthodes L'occupation du sol a été déterminée par photo-interprétation de la couverture arborée. La phénologie foliaire de la végétation a été étudiée à travers l'indice de végétation « Enhanced Vegetation Index » (EVI). Deux méthodes de détection du démarrage de la végétation, et une méthode de détection du démarrage des précipitations ont été expérimentées.

Résultats Depuis 2000, la superficie de la forêt tropicale a considérablement diminuée, à cause des activités humaines des villes environnantes. Une saisonnalité annuelle marquée des précipitations est observée, expliquant la dominance des cycles phénologiques annuels. Le cycle de la végétation, en savane et en forêt, est en avance sur celui de précipitations.

Conclusions Un impact intense de la pression anthropique depuis 2000 a pu être mis en évidence, en particulier dans la périphérie de Bangui. Ensuite, l'hypothèse de « pre-rain green-up » et l'adaptation à long terme de la végétation à la saisonnalité des précipitations ont été confirmées pour les forêts tropicales humides et les savanes mésiques d'Afrique centrale.

Mots-clés Télédétection, Phénologie, Climat, Forêts tropicales, Savanes, Afrique centrale, République centrafricaine

Abstract

Objectives The main objective of this work is to characterize the phenology of a forest-savanna transition zone in Central Africa, based on remote sensing data, and to determine the role of rainfall on leaf phenology. To achieve this, several steps were carried out. The secondary objectives are to characterize the vegetation land cover in the study area, to study the seasonality of canopy functioning and rainfall, and finally to study the relationship between vegetation and rainfall onsets.

Location The 10 000 km² study area is centred on M'Baiki in the Central African Republic (CAR). It is located in the forest-savanna transition in the northern part of the Congo Basin, in the southern Central African Republic. The area is characterized by the presence of semi-deciduous tropical forests and mesic savannas.

Methods Land use was determined by photo-interpretation of tree cover. Leaf phenology of the vegetation was studied through the Enhanced Vegetation Index (EVI). Two methods of detecting vegetation onset and one method of detecting precipitation onset were tested.

Results Since 2000, the area of tropical forest has decreased considerably due to human activities in the surrounding cities. A marked annual seasonality of precipitation is observed, explaining the dominance of annual phenological cycles. The vegetation cycle, in savannah and forest, is ahead of the rainfall cycle.

Main conclusions An intense impact of anthropogenic pressure since 2000 has been highlighted, particularly in the outskirts of Bangui. Then, the « pre-rain green-up » hypothesis and the long-term adaptation of vegetation to seasonal rainfall patterns were confirmed for the tropical rainforests and mesic savannas of Central Africa.

Keywords Remote sensing, Phenology, Climate, Tropical forests, Savannas, Central Africa, Central African Republic

Remerciements

Je tiens à accorder mes tout premiers remerciements à Adeline et Nassim qui m'ont encadré et épaulé tout au long de ce travail. Merci avant tout pour votre accueil chaleureux et le temps que vous m'avez accordé, ainsi que pour vos nombreux conseils et pour vos précieuses relectures qui m'ont permis d'avancer dans les meilleures conditions.

Je tiens également à remercier tous les membres de foresterie tropicale pour leur accueil, les ô combien nombreuses pauses cafés et la productivité qu'elles ont engendrées. Un merci particulier au bureau faune qui m'a permis de travailler efficacement. Je remercie aussi les membres de forêts qui m'ont aidé pour l'acquisition et le traitement de mes données.

Un immense merci à mes parents, pour m'avoir soutenu et encouragé autant qu'ils le pouvaient depuis le début de mes (longues) années d'études à Gembloux, ainsi que pour toutes les années ayant précédées. Un très grand merci à Sarah pour la relecture et courage pour tes études, tu verras que ça ira de mieux en mieux au fil des années. Merci beaucoup à Thomas aussi pour le carnaval et les quelques verres qu'on boira encore. Un merci tout particulier à mes deux Nonna que j'adore. Un grand merci à Melisa pour son soutien. Merci également au reste de ma famille que je n'ai pas cité.

Full merci à Oriane pour l'entrain qu'elle me donne tous les jours, pour Mimosa et Chat-Deux. Merci de me soutenir autant, à deux on sera prêt pour toutes les excursions qui nous attendent !

Merci à mes amis, ceux de (très) longue date, et ceux que j'ai rencontré à Gembloux. Merci en vrac au groupe Whaaaat (yes quoi), aux membres de la Constellation Bicentenaire, aux OF7eurs et aux Pioupiou. Un merci également à toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu la chance de koter tout au long de mes études : en commençant par l'Epic Meal Kot (on aurait pu l'appeler comme ça) au 27, en passant par le KDR et finalement le bienséant Fouillis.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Table des figures	vi
Liste des annexes	vii
Liste des tableaux	vii
Liste des équations	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction	1
1. Contexte	1
2. Phénologie	1
3. Phénologie tropicale	3
4. La télédétection pour suivre la phénologie.....	5
Objectifs	7
Matériel et méthodes	9
1. Zone d'étude.....	9
2. Acquisition et traitement des données.....	10
2.1 Identification des zones forestières	11
2.2 Indice de végétation	12
2.3 Données climatiques	12
3. Analyse des données	13
3.1 Transitions d'occupation du sol	13
3.2 Saisonnalité de la végétation et des précipitations.....	13
3.3 Onset de la végétation et des précipitations	14

3.3.1	Approche par occupation du sol	15
3.3.2	Approche par pixel	17
Résultats		18
1.	Transitions d'occupation du sol	18
2.	Saisonnalité de la végétation et des précipitations	20
3.	Onset de la végétation et des précipitations	24
3.1	Approche par occupation du sol	24
3.2	Approche par pixel.....	26
Discussion et Perspectives		28
Conclusion.....		35
Bibliographie.....		36
Annexes.....		43

Table des figures

Figure 1. Distribution des (a) périodes de sécheresse et des (b) biomes terrestres sur le continent africain.	3
Figure 2. Evolution des recherches phénologiques au cours du temps en zone tempérée (haut) et tropicale (bas) depuis 1700.	4
Figure 3. Délimitation de la zone d'étude à différentes échelles.	7
Figure 4. Localisation de la zone d'étude.	9
Figure 5. Diagramme ombrothermique pour la ville de M'Baïki.	10
Figure 6. Organigramme de l'acquisition et du traitement des données employées.	11
Figure 7. Méthodologie du calcul de l'onset de la végétation selon Archibald & Scholes (2007).	15
Figure 8. Quelques paramètres de saisonnalité générés dans TIMESAT.	16
Figure 9. Diminution de la proportion de zones forestières et changements de répartition des classes de couverture arborée entre 2000 et 2018.	18
Figure 10. Changement d'occupation du sol de la zone d'étude entre 2000 et 2018.	19
Figure 11. Saisonnalité de la végétation en forêt et en savane, et des précipitations	21
Figure 12. Anomalies dans les valeurs d'EVI en savane sur le long terme et comportement similaire de la forêt et la savane.	23
Figure 13. Lien entre l'onset de la végétation (SOS, Start of Season) et l'onset des précipitations (SOR, Start of Rain) à travers des régressions linéaires de différentes méthodes.	25
Figure 14. Déphasage de l'onset de la végétation et des précipitations en employant (a et b) Archibald & Scholes (2007) et (c et d) TIMESAT.	27

Liste des annexes

Annexe 1. Précocité de la croissance de la végétation sur l'arrivée des pluies à travers les séries temporelles.	43
Annexe 2. Détection de l'origine de l'outlier.	44
Annexe 3. Scalogramme de la transformée par ondelettes des séries temporelles des (a) précipitations, (b) de l'EVI en forêt et (c) de l'EVI en savane.	45
Annexe 4. Scalogramme de la cohérence en ondelettes entre les séries temporelles (a) des précipitations et de l'EVI en forêt, et (b) des précipitations et de l'EVI en savane	46

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des valeurs de Quality Assessment (QA) ainsi que leurs descriptions	12
Tableau 2. Coefficients des régressions linéaires de la Figure 13.	26

Liste des équations

Équation 1. Formule du NDVI.	5
Équation 2. Formule de l'EVI	6
Équation 3. Formule du calcul de l'onset de la végétation selon Archibald & Scholes (2007).	15
Équation 4. Formule du calcul de l'onset de la végétation grâce à TIMESAT.	16
Équation 5. Formules du calcul de l'onset des précipitations	16

Liste des abréviations

IUCN : International Union for Conservation of Nature

MEA : Millenium Ecosystem Assessment

COMITAAS : Commission Interministérielle de Terminologie de la Télédétection Aérospatiale

LAI : Leaf Area Index

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NIR : Near-Infrared, **R** : Red, **B** : Blue

EVI : Enhanced Vegetation Index

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

LSP : Land Surface Phenology

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

RCA : République centrafricaine

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

JRC : Joint Research Center

QA : Quality Assessment

NASA : National Aeronautics Spatial Administration

ESRI : Environmental Systems Research Institute

SOS_F : Start of Season pour la forêt

SOS_R : Start of Season pour la savane

SOR : Start of Rain

RDC : République démocratique du Congo

Introduction

1. Contexte

Les changements environnementaux induits par les activités humaines sont tels que l'on parle d'une nouvelle ère géologique à l'échelle planétaire, l'Anthropocène (Lewis & Maslin, 2015). Ces changements majeurs sont caractérisés par des modifications de l'utilisation des terres, du climat, des cycles biogéochimiques ainsi que par des modifications biologiques des écosystèmes, via le prélèvement et l'introduction d'espèces (Vitousek et al., 1997). Ces modifications impactent en profondeur la structure, la composition, et le fonctionnement des écosystèmes, et les biens et services qu'ils fournissent aux sociétés humaines (Chapin et al., 2000). Les rapports de l'International Union for Conservation of Nature (IUCN) affirment que ces impacts entraînent une crise de biodiversité sans précédent dans l'histoire de l'humanité (Vié et al., 2009). D'après le Millenium Ecosystem Assessment (MEA), les taux d'extinctions actuels pourraient être jusqu'à mille fois supérieur à celui des cinq premières extinctions de masse (MEA, 2005), et la 6^{ème} extinction de masse est déjà en train de se produire.

Les forêts tropicales abritent entre 50 et 80% de la biodiversité terrestre et sont le réservoir de 40 à 50% du carbone végétal terrestre (Lewis et al., 2009; Mitchard, 2018; Slik et al., 2015; Sullivan et al., 2017). Ces réservoirs de biodiversité et de services écosystémiques sont particulièrement fragiles, et sur de nombreux aspects, largement méconnus.

2. Phénologie

La phénologie est une variable particulièrement sensible au changement du climat (Ahas et al., 2002). Elle permet d'étudier les impacts des changements globaux et est de plus reconnue comme une variable essentielle de biodiversité (Pereira et al., 2013). D'autre part, de plus en plus de travaux ayant attrait à la phénologie utilisent la télédétection. Ces avancées permettent de standardiser les observations et les indicateurs de biodiversité utilisés dans les programmes de suivis phénologiques.

La phénologie, dérivée du grec *phaino* signifiant « montrer » ou « se produire », est l'étude de la périodicité qui caractérise les cycles biologiques des êtres vivants (Lieth, 1974). La germination et la floraison des plantes au printemps, la période de migration ou la nidification des oiseaux, l'hibernation des animaux, etc., sont toutes des illustrations de la phénologie. Cette dernière est une variable particulièrement sensible aux changements

climatiques. Chez les plantes, par exemple, l'augmentation des températures printanières est responsable d'un débourrage précoce des arbres en milieu tempéré (Yu et al., 2010) ou encore de l'avancement des dates de récoltes de la vigne en France (Chuine et al., 2004). La phénologie est en parallèle responsable d'un grand nombre de rétroactions saisonnières : l'albédo, la conductance de la canopée, les flux d'eaux, de CO₂, d'énergie et de composés volatils organiques (Richardson et al., 2012), ayant chacun à leur tour une influence sur le climat.

Historiquement, le cycle des saisons a été et est toujours un indicateur indirect utilisé pour définir les périodes de semis et de récoltes en agriculture (Ruml & Vulic, 2005). La phénologie ne s'est cependant construite en tant que science à part entière que depuis ces deux derniers siècles, et elle n'est reconnue comme telle que depuis une cinquantaine d'années (Schwartz, 2003). La phénologie permet de mesurer les réponses des êtres vivants aux changements saisonniers naturels et également aux perturbations globales actuelles, tant à l'échelle de l'individu qu'à l'échelle du biome (Schwartz, 1999). Les modifications des cycles phénologiques de plantes et d'animaux liées aux changements du climat ont récemment mis en lumière cette science (Chuine et al., 2004; Humphrey et al., 1997; Menzel & Fabian, 1999; Peñuelas et al., 2002; Sparks & Jeffree, 2000).

D'un point de vue pratique, l'étude de la phénologie des plantes correspond à l'observation, l'enregistrement et l'interprétation des phases de développements récurrentes et généralement saisonnières: l'éclosion des bourgeons, la dynamique racinaire, la croissance annuelle, la feuillaison, la floraison, la fructification, l'abscission et la germination (Fenner, 1998; Groover et al., 2017; McCormack et al., 2014). L'étude de la phénologie est particulièrement importante car elle est étroitement liée avec les autres cycles biologiques et impacte l'entièreté de l'écosystème, tels que la dynamique des populations d'insectes, de champignons et d'herbivores.

En climat tempéré, comme en Europe, au Japon et aux Etats-Unis, des enregistrements phénologiques sont mis en place depuis plus de deux siècles (Chevet et al., 2011; Miller-Rushing et al., 2008) et des études robustes ont montré leur efficacité à caractériser les cycles biologiques (Hubálek, 2004; Norton & Kelly, 1988). Néanmoins, leur mise en place longue et fastidieuse est un obstacle à leur diffusion (Lechowicz & Koike, 1995). En outre, la phénologie est très sensible au type de saisonnalité, à la biologie et à la géologie de l'écosystème (Chuine & Beaubien, 2001; Morin et al., 2007; Régnière & Nealis, 2002;

Regniere & Jesse, 2003). De ce fait, les études sont difficilement généralisables et il existe encore de nombreuses pistes de recherches à investiguer concernant la phénologie.

3. Phénologie tropicale

Dans la zone intertropicale, les températures moyennes mensuelles ne descendent pas en dessous de 18°C et la saisonnalité des températures est très peu marquée (Köppen, 1900; Peel et al., 2007). Contrairement aux climats tempérés, ce n'est donc pas ce facteur qui régit les saisons (Archibald et al., 2010). En Afrique, les biomes se différencient selon un gradient de précipitations et de saisonnalité (Figure 1a) qui pilote leur répartition (Figure 1b) depuis l'équateur vers les latitudes plus élevées (White, 1983).

En Afrique centrale, la forêt tropicale est le biome dominant. Néanmoins, en fonction des feux ou des perturbations animales, des savanes ou d'autres formations édaphiques comme les mangroves et les marécages peuvent également être retrouvées (Atangana et al., 2019; Dexter et al., 2018; Higgins et al., 2016; Lehmann et al., 2014; Peel et al., 2007; White, 1983).

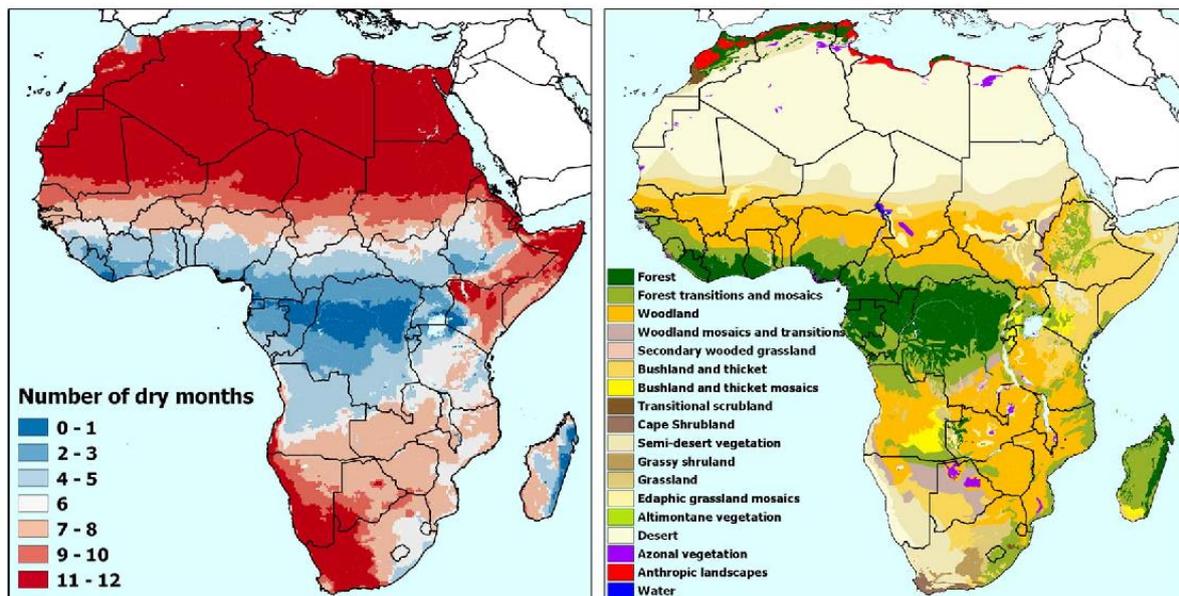


Figure 1. Distribution des (a) périodes de sécheresse et des (b) biomes terrestres sur le continent africain. D'après (Bouvet et al., 2018)

En région tropicale, et notamment en Afrique, les études sur la phénologie sont encore limitées (Figure 2). Néanmoins, il a été mis en évidence que les cycles végétatifs sont influencés par la disponibilité en eau (Borchert, 1994; Reich, 1995; Xiao et al., 2006) et en lumière (Wright & van Schaik, 1994). En Afrique centrale, la saisonnalité du climat est très marquée avec une alternance entre saisons sèches et humides (White, 1983). Les saisons

sèches sont d'ailleurs plus marquées et plus longues en Afrique centrale qu'en Amérique du sud et centrale, ce qui explique la dominance des cycles annuels de la phénologie reproductive des arbres suivis in situ (Adamescu, 2018) et de la canopée suivie par télédétection (Gond et al., 2013).

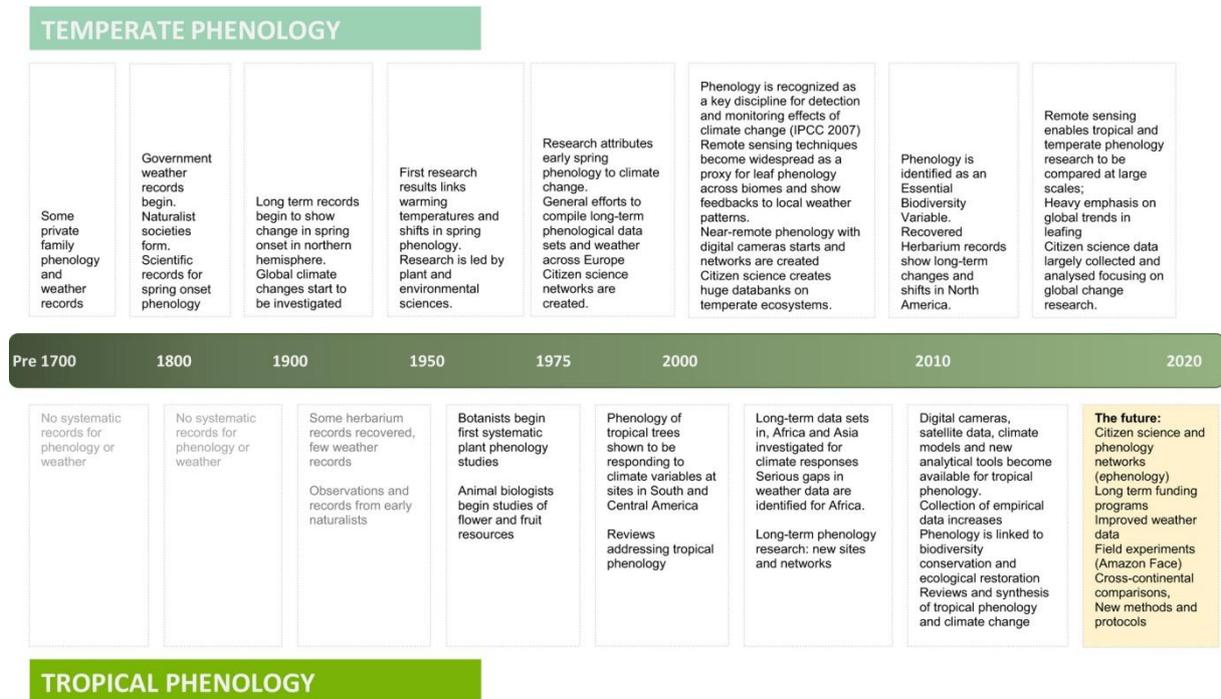


Figure 2. Evolution des recherches phénologiques au cours du temps en zone tempérée (haut) et tropicale (bas) depuis 1700.

D'après (Abernethy et al., 2018).

La majorité des caractérisations phénologiques en zones tropicales déjà existantes ont été réalisées grâce à des observations in situ. Néanmoins, les études phénologiques en milieu tropical sont encore sporadiques et les données long-terme sont rarement disponibles (Figure 2). Il existe deux approches principales de la phénologie en forêt tropicales : l'observation des houppiers sur le terrain, depuis le sol avec des jumelles, comme dans de nombreuses études en Afrique (Adamescu, 2018; Bush et al., 2016), et la collecte et la reconnaissance des fleurs et des graines qui tombent dans des collecteurs installés en forêt, comme en Amérique centrale et du Sud et en Asie du Sud-Est (Norden et al., 2007; Sakai, 2001; Wright & van Schaik, 1994). Cette dernière méthode nécessite un suivi très régulier, au moins hebdomadaire, et l'échantillonnage n'est pas maîtrisé. Pour les arbres tropicaux, les phénophases suivantes sont généralement reconnues : la floraison et la fructification, et plus sporadiquement la feuillaison (Butt et al., 2015; de Camargo et al., 2018; Dunham et al., 2018; Kurten et al., 2018; Stevenson et al., 2008).

4. La télédétection pour suivre la phénologie

La télédétection est définie depuis 1988 par la Commission Interministérielle de Terminologie de la Télédétection Aérospatiale (COMITAAS) comme étant: « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ». L'obtention de données sur le terrain étant particulièrement difficile en forêt tropicale, l'utilisation de données de télédétection se révèle encourageante. En effet, en plus de ne pas nécessiter d'enregistrements sur le terrain, la télédétection a l'avantage de pouvoir fournir des informations continues à grande échelle et de pouvoir être archivées et partagées aisément (Noormets, 2009).

Dans les années 60, la télédétection a commencé à être utilisée comme moyen pour analyser la végétation terrestre à travers des indices de végétation simple comme l'indice de surface foliaire, en anglais Leaf Area Index (LAI) (Miller, 1967). Le LAI caractérise quantitativement la canopée et correspond au ratio de la surface foliaire par rapport à la surface du sol. Depuis, les indices de végétation se sont multipliés avec chacun leur avantage et utilisation spécifique (Lyon et al., 1998).

En région tempérée, l'indice de végétation le plus couramment utilisé, pour détecter et caractériser la végétation, est l'indice de végétation par différence normalisée, en anglais Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Le NDVI a été développé avec l'arrivée des satellites et des images multispectrales, en particulier les bandes d'infrarouge proche et rouge, en anglais, respectivement Near-InfraRed (NIR) et Red (R) (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Équation 1. **Formule du NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index). Avec NIR (Near-Infrared) et R (Red).

Il est encore utilisé aujourd'hui car il permet d'identifier rapidement et efficacement la végétation ainsi que de quantifier la capacité photosynthétique de la canopée. Il permet de définir les zones plus ou moins végétalisées très efficacement mais n'est plus efficace à partir d'un seuil de LAI supérieur à 4m²/m², ce qui est le cas en forêt tropicale (Gao et al., 2000; Huete et al., 2002; Noormets, 2009).

En région tropicale, les forêts sont extrêmement denses et structurellement complexes, ce qui rend le NDVI peu utilisable. Pour pallier à ce désavantage, d'autres indices ont été développés et utilisés pour caractériser la phénologie tropicale, comme l'Enhanced Vegetation Index (EVI) (Huete et al., 2002; Jiang et al., 2008; Suepa et al., 2016). Cet indice utilise, en

plus des deux bandes spectrales du NDVI, la bande bleue (B) ainsi que les coefficients L, C1, C2 et G valant respectivement 1, 6, 7.5 et 2.5.

$$EVI = G * \frac{NIR - R}{NIR + C1 * R - C2 * B + L} \quad (2)$$

Équation 2. **Formule de l'EVI** (Enhanced Vegetation Index). Avec NIR (Near-InfraRed), R (Red), B (Blue) et L,C1,C2,G (Coefficients de correction)

L'EVI est l'indice de végétation le plus performant en forêt dense. Il possède tous les avantages du NDVI, mais ne sature pas en atteignant un seuil de LAI élevé. Il permet de détecter des changements subtils dans la dynamique saisonnière de la phénologie de la canopée (Gond et al., 2013; Huete et al., 2006; Noormets, 2009; Xiao et al., 2005). Néanmoins, il est à noter que les régions trop nébuleuses posent des soucis, dû au manque de continuité dans les jeux de données (Myneni et al., 2006; Philippon et al., 2019).

L'EVI est calculé à partir des instruments de mesures embarqués à bord de satellites depuis 1999. La mission englobant ces instruments de mesures et les satellites associés portent le nom de MODIS² pour Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, en français : radiomètre spectral pour l'imagerie de moyenne résolution. Ces satellites fournissent une image composite des différentes bandes spectrales tous les seize jours ou tous les huit jours. De ce fait, les images composites disponibles permettent généralement d'éliminer les biais engendrés par les nuages (Pennec et al., 2011). Si la nébulosité est trop importante, il est possible de travailler à plus grande échelle spatiale et/ou temporelle, en utilisant des données mensuelles et/ou en travaillant sur des valeurs agrégées d'EVI (Myneni et al., 2006).

Les travaux récents utilisent d'ailleurs les bases de données des satellites MODIS pour étudier la phénologie tropicale. A titre d'exemple, en Afrique australe, Ryan et al. (2017) ont montré dans différents types de végétation que le verdissement démarrait avant les premières pluies. Ce résultat est expliqué par l'hypothèse de « pre-rain green-up » déterminée par des facteurs ultimes plutôt que proximaux. Les facteurs ultimes correspondent aux stimuli externes qui déclenchent ou maintiennent les processus biologiques avec résilience sur le long terme. Les facteurs proximaux correspondent aux stimuli directs qui provoquent un changement des processus biologiques.

² <https://modis.gsfc.nasa.gov/>

Objectifs

L'objectif principal de ce travail est de caractériser la phénologie d'une zone de transition forêt-savane d'Afrique centrale à partir de données de télédétection (approche de Land Surface Phenology), et de déterminer le rôle des précipitations sur la phénologie, en tant que déterminant ultime (l'adaptation à long terme de la végétation à la saisonnalité du climat) ou proximal (l'impact direct du climat sur la végétation). Pour parvenir à cet objectif principal, ce travail s'articule en trois sous-objectifs.

Tout d'abord, il a été décidé de travailler dans les zones de forêts semi-décidues, qui couvrent de vastes surfaces en Afrique centrale (Fayolle, Swaine et al., 2014; Fayolle, Picard et al., 2014), et dont le fonctionnement est fortement saisonnier, les arbres de la canopée perdant leur feuille pendant la saison sèche (Ouedraogo et al., 2016). La zone choisie est constituée de forêts situées à la limite Nord du bassin du Congo, en République centrafricaine (Figure 3). Ces forêts, situées autour de la ville de M'Baïki, présentent une saisonnalité marquée (Adamescu, 2018), néanmoins la végétation environnante inclut également des zones de savanes (Gond et al., 2013), et potentiellement des zones de forêts dégradées et des zones déforestées. En effet, la filière du bois énergie impacte fortement les zones à proximité des centres urbains (Schure et al., 2010). Le premier sous-objectif consiste donc en la caractérisation de l'occupation du sol par la végétation dans la zone d'étude.

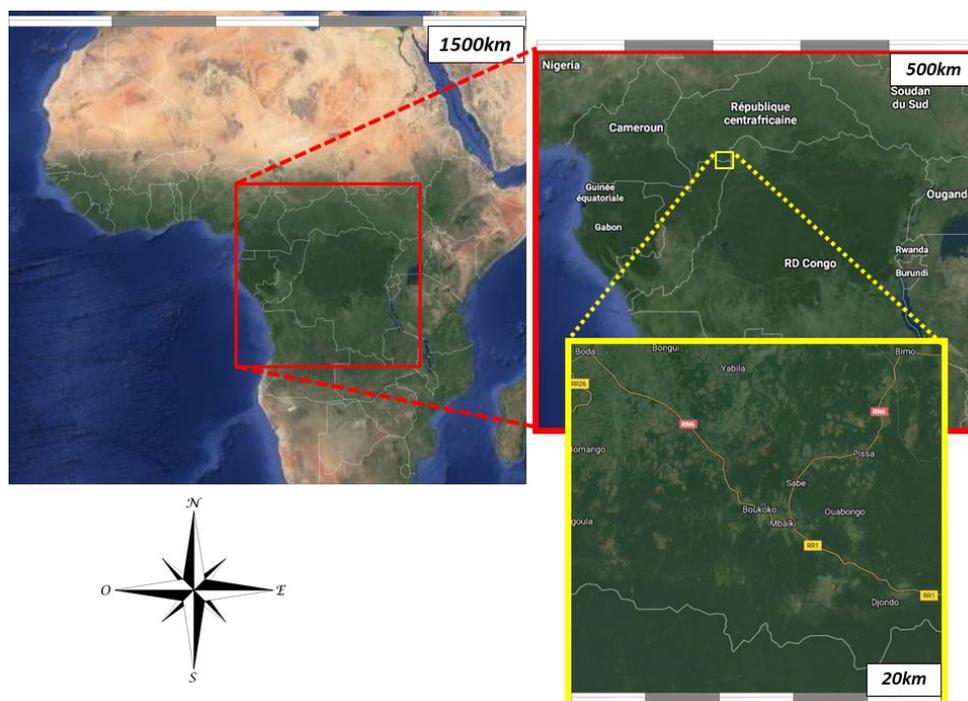


Figure 3. **Délimitation de la zone d'étude à différentes échelles.** En haut à gauche : Afrique. En haut à droite : Afrique Centrale. En bas à droite : Zone d'étude de 10 000 km² centrée sur M'Baïki.

Ensuite, après avoir délimité les zones forestières à partir d'un seuil de couverture arborée, le deuxième sous-objectif consiste à étudier la saisonnalité du fonctionnement de la canopée et des précipitations. La phénologie foliaire est étudiée à partir de l'indice de végétation le plus pertinent en région tropicale : le Enhanced Vegetation Index, obtenu à partir des satellites MODIS (Huete et al., 2002; Noormets, 2009). Les données climatiques de précipitations sont récupérées de la mission Tropical Rainfall Measuring Mission³ (TRMM) pour la zone et la période d'étude. Les variations saisonnières et sur le long terme de l'indice de végétation et des précipitations ont été étudiées séparément pour les zones stables de forêt et de savane. Un profil phénologique moyen a été construit, représentant la saisonnalité moyenne sur l'ensemble de la période. Le profil moyen a été utilisé afin de construire une série temporelle des anomalies phénologiques. La même approche a également été utilisée pour les précipitations.

Enfin, le troisième sous-objectif se focalise sur le lien entre le démarrage de la végétation et des précipitations. Ce lien a été étudié par occupation du sol (zones stables de forêt et de savane) et par pixel sur la zone entière. Plus spécifiquement, l'hypothèse de « pre-rain green-up » (Ryan et al., 2017) a été testée en calculant, pour chaque année, le jour de l'année correspondant au démarrage de la végétation et des précipitations. Deux méthodes de calcul du démarrage de la végétation ont été testées. La première est celle proposée par Archibald & Scholes (2007), la seconde a été réalisée en employant le logiciel TIMESAT. La méthode employée pour le calcul du démarrage des précipitations est celle proposée par Tadross et al. (2005).

³ <https://pmm.nasa.gov/TRMM>

Matériel et méthodes

1. Zone d'étude

La zone étudiée est centrée sur la ville de M'Baïki ($3^{\circ} 52' 15''N$, $17^{\circ} 59' 06''E$) en République centrafricaine (RCA), et se trouve à cent kilomètres au sud-ouest de la capitale Bangui (Figure 4). D'une superficie totale de 10 000 km² (100 km * 100 km), la zone d'étude correspond à la limite nord du bassin du Congo en bordure du massif de forêt tropicale d'Afrique centrale. Elle comprend des zones de savanes, de forêts, des zones agricoles et des implantations villageoises. Un dispositif de recherche de la dynamique forestière y est par ailleurs implanté depuis 1981 dans les forêts de Boukoko et de la Lolé (Gourlet-fleury et al., 2013).

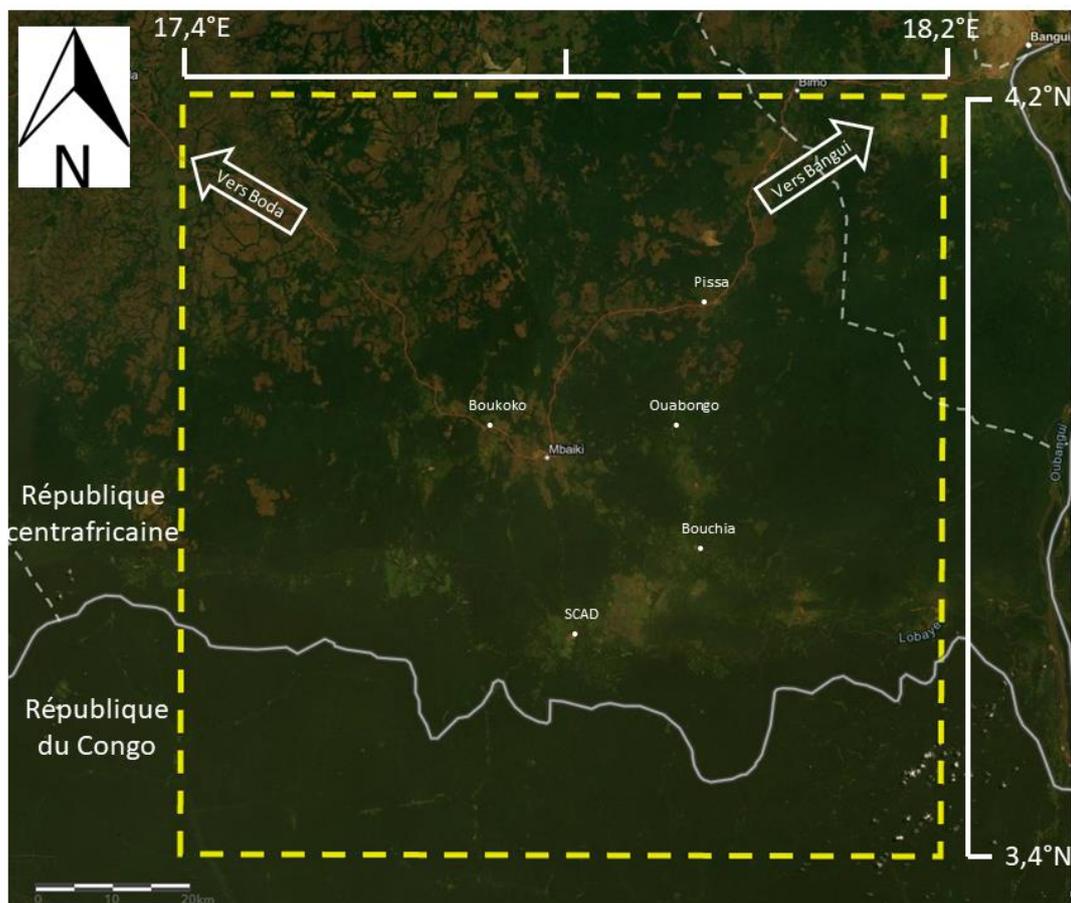


Figure 4. Localisation de la zone d'étude de 10 000km² centrée sur M'Baïki. Carte satellitaire de fond : Environmental Systems Research Institute (ESRI) World Imagery.

Dans cette zone, le climat est tropical avec des températures et des précipitations moyennes annuelles atteignant respectivement 25°C et 1700 mm (Figure 5). La saisonnalité est marquée par un déficit hydrique de décembre à février (Gourlet-fleury et al., 2013), les températures restant constantes tout au long de l'année. Le diagramme ombrothermique de la région de

M’Baïki a été construit à partir des données de températures provenant de la base de données WorldClim, et des bases de données de précipitations provenant de la base de données TRMM.

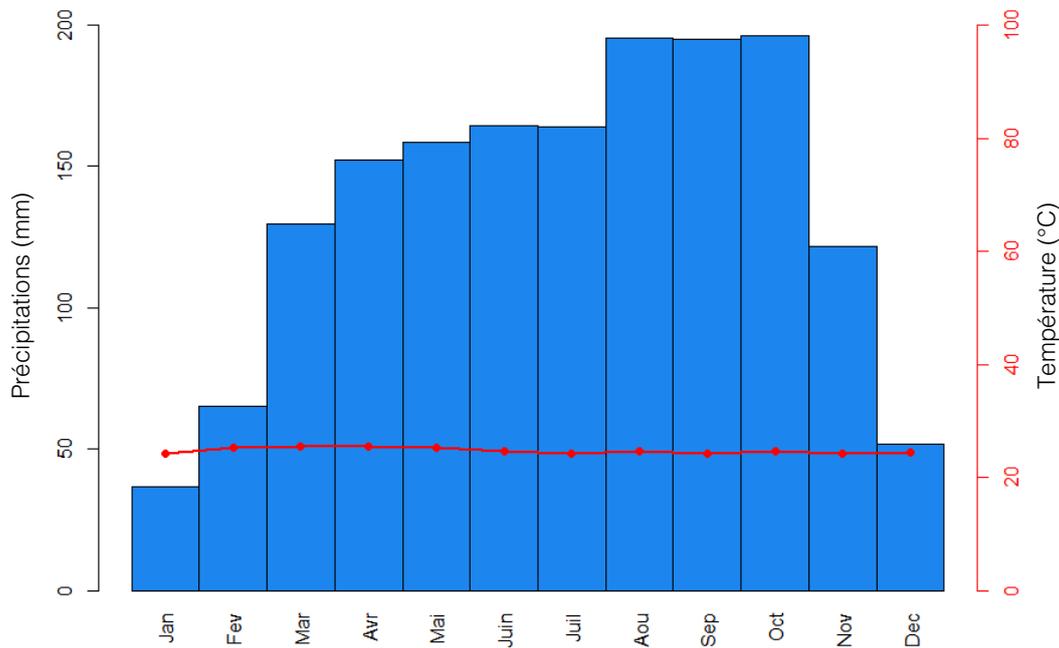


Figure 5. **Diagramme ombrothermique pour la ville de M’Baïki.** En bleu, les histogrammes des précipitations mensuelles provenant de TRMM. En rouge, le profil des températures moyennes mensuelles provenant de WorldClim.

La géologie de la région de Bangui-M’Baïki est caractérisée par des séries du Précambrien supérieur. Les sols correspondent à des acrisols (World Reference Base for Soil Resources, 2014) et sont le résultat de l’altération du matériel parental qui se transforme en un sol profond, rouge et ferrallitique. Ces sols très peu fertiles sont naturellement recouverts de forêts (Boulvert Y., 1986; Gourlet-fleury et al., 2013).

La végétation de cette région appartient au centre d’endémisme guinéo-congolais (White, 1983). Les forêts de la zone sont caractérisées par l’abondance d’arbres appartenant aux familles des Malvaceae, Cannabaceae, Sapotaceae et Meliaceae (Boulvert Y., 1986; Fayolle et al., 2012; Fayolle, Swaine et al. 2014; Fayolle, Picard et al. 2014; Gond et al., 2013; Harris, 2002). Cette région est également largement constituée de zones ouvertes de savanes mésiques caractérisées par une couverture arborée clairsemée.

2. Acquisition et traitement des données

Différents types de données et traitements ont été utilisés lors de cette étude (Figure 6). Dans un premier temps, la distinction entre la forêt et les autres occupations du sol (« Land cover » en anglais) a été réalisée à partir des données des plans d’eau et de la couverture arborée

(« Tree cover » en anglais). Dans un second temps, le nettoyage des données de l'indice de végétation a été réalisé à l'aide du critère de fiabilité disponible (QA). Enfin les données de précipitations journalières ont été extraites.

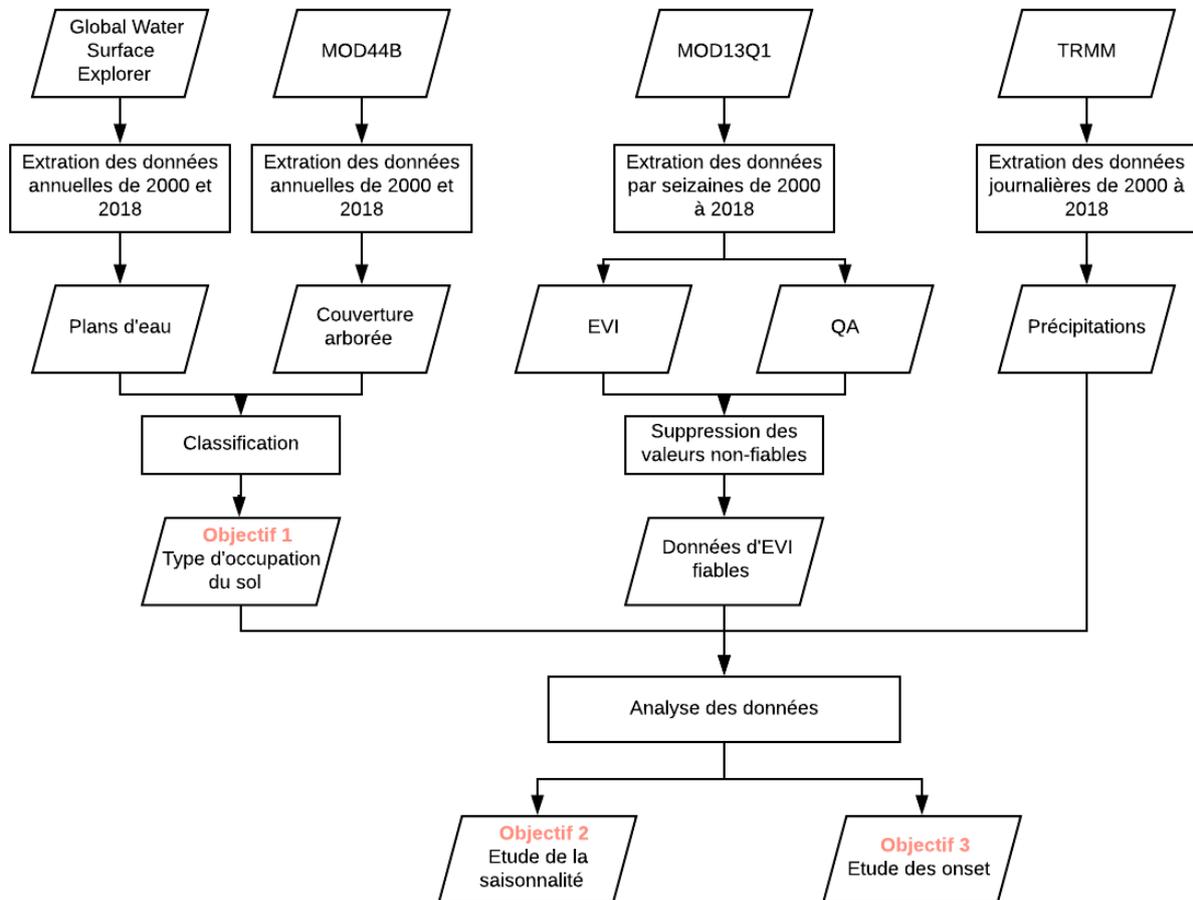


Figure 6. **Organigramme de l'acquisition et du traitement des données employées.** Les parallélogrammes correspondent aux données et aux bases de données. Les rectangles correspondent aux traitements effectués. MOD44B et MOD13Q1 sont deux produits de la base de données MODIS. TRMM est la base de données des précipitations.

2.1 Identification des zones forestières

Afin de cartographier l'occupation du sol, les données relatives aux plans d'eau et à la couverture arborée ont tout d'abord été acquises.

Les plans d'eau et la rivière Lobaye, important cours d'eau qui a donné son nom à la province, ont été cartographiés grâce à la carte du programme « Global Surface Water Explorer » mis en place par le Joint Research Center (JRC) et disponible en ligne (<https://global-surface-water.appspot.com/download>). La tuile téléchargée a ensuite été découpée selon l'emprise de la zone d'étude. Ce produit donne accès, pour chaque pixel de 30 mètres de résolution, à une valeur de 0 ou 1 en fonction de l'absence ou de la présence d'eau. Une fois les pixels concernés identifiés, ils ont été retirés de l'étude de la végétation.

Pour différencier les zones forestières des autres zones, c'est-à-dire des villes et des savanes, les données MODIS du produit MOD44B, correspondant à la couverture arborée, ont été employées. Ce produit donne accès, pour chaque pixel de 250 mètres de résolution, au pourcentage de couverture arborée. L'acquisition de ces images est réalisée à partir du package MODIS de R (Koen, 2019), et ce pour les années 2000 et 2018.

Afin que la résolution du raster des plans d'eau et de la rivière corresponde avec le raster de la couverture arborée, ce premier a été reprojété à une résolution de 250 mètres.

2.2 Indice de végétation

Pour caractériser la phénologie foliaire de la zone d'étude, les données d'EVI employées proviennent du produit MOD13Q1 du satellite MODIS. Ce produit possède une résolution de 250 mètres et fournit une image composite tous les 16 jours. En plus de l'indice de végétation (EVI), un avantage supplémentaire des images MODIS est la disponibilité d'un critère de qualité, « Quality Assessment » en anglais (QA), qui décrit la fiabilité du pixel (Tableau 1). Les données d'EVI et de QA ont donc été collectées par seizaine, pour l'ensemble de la zone d'étude, et pour la période 2000-2018 via le package MODISTools de R (Koen, 2019). Enfin, à chaque date, chaque pixel d'EVI est filtré à partir de sa valeur de QA afin de ne conserver que les valeurs d'EVI cohérentes, c'est à dire celles qui correspondent à un QA de 0 ou 1.

Tableau 1. **Résumé des valeurs de Quality Assessment (QA) ainsi que leurs descriptions.** -1 : Pas de données. 0 : Fiable. 1 : Utile mais dépend d'autres informations. 2 : Présence de neige/glace. 3 : Présence de nuages.

Rank key	Summary QA	Description
-1	Fill/No data	Not processed
0	Good data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but depend on other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

2.3 Données climatiques

Les données de précipitations journalières proviennent du produit TRMM_3B42 de la mission TRMM (Huffman & Bolvin, 2018; Kummerow et al., 1998). Les données fournies depuis 1998 par cette mission sont journalières et ont une résolution de 20km. La méthodologie de téléchargement est explicitement renseignée sur le site de la National Aeronautics and Space Administration (NASA, https://disc.gsfc.nasa.gov/data-access#windows_wget). Etant donné

la faible disparité des pluies à l'intérieur de la zone d'étude, la moyenne des précipitations sur toute la zone a été utilisée.

3. Analyse des données

3.1 Transitions d'occupation du sol

Pour définir quel seuil de pourcentage de couverture arborée est le plus pertinent pour mettre en évidence les forêts, différentes valeurs ont été testées sur la couverture arborée MOD44B de 2018. Les résultats obtenus ont été comparés empiriquement avec des images de 2018 de l'Environmental Systems Research Institute (ESRI) World Imagery. De ces manipulations, la valeur choisie est de 50% de couverture arborée pour délimiter les pixels forestiers. Les zones au-dessus de cette valeur ont été nommées « forêts » et les zones en dessous de cette valeur, regroupant les villes, les savanes et les zones agricoles, ont été nommée « non-forêts ». Cette classification des pixels a été appliquée aux images de 2000 et de 2018, et une matrice de transition a été établie, divisant la zone d'étude en quatre classes:

- Les forêts stables : zones définies comme forêt en 2000 et en 2018, considérées comme stables tout au long de l'étude ;
- Les non-forêts stables : zones définies comme non-forêt en 2000 et en 2018, considérées comme stables tout au long de l'étude ;
- Les pertes de forêts : zones définies comme forêt en 2000 et non-forêt en 2018, considérées comme instables tout au long de l'étude ;
- Les gains de forêts : zones définies comme non-forêt en 2000 et forêt 2018, considérées comme instables tout au long de l'étude.

La couleur des puces correspond au code couleur qui a été employé dans les figures.

L'étude des forêts de la zone d'étude s'est portée sur les zones définies comme « forêts stables ». La zone d'étude se situant en pleine zone de transition forêt-savane, il a été jugé intéressant d'également étudier les savanes spécifiquement. Cependant, les zones de « non-forêts stables » étant également constituées de zones urbaines et de zones agricoles, l'analyse des savanes a été restreinte à une zone moins anthropisée. Cette analyse a été réalisée en ne sélectionnant que les zones de « non-forêts stables » situées au-dessus de 4°N, loin de l'influence de la ville de M'Baïki.

3.2 Saisonnalité de la végétation et des précipitations

Pour chaque date, une valeur unique d'EVI a été définie pour les forêts et les savanes, en calculant respectivement la moyenne des EVI des pixels de forêt stable et de savane. La même méthodologie a également été employée pour les précipitations sur l'entièreté de la

zone. De ces données, les séries temporelles à long terme de la forêt, la savane et des précipitations ont été étudiées.

Ensuite, dans le but de comparer les caractéristiques saisonnières de la forêt et de la savane, les séries annuelles et la série des valeurs moyennes d'EVI ont été comparées entre les deux types de végétation.

Le terme « detrending » en anglais, ou détendancer en français, se réfère au fait d'extraire la composante tendancielle des données d'une série temporelle. Cette opération permet d'observer les anomalies d'un signal et a pour but de constater si :

- Un signal évolue au cours du temps ;
- Des signaux réagissent de la même manière aux perturbations.

Un detrending des séries temporelles d'EVI en forêt et en savane et des précipitations a été réalisé. En forêt et en savane le detrending a été réalisé sur les semaines. Pour les précipitations, les données journalières ont été sommées par dizaines de jour. Pour chaque date (tous les seize jours pour l'EVI et tous les dix jours pour les précipitations), une valeur moyenne a été calculée, et la différence entre la valeur de chaque date et la valeur moyenne associée a été réalisée. Ensuite, afin de pouvoir lire le résultat plus aisément, deux lissages des données, avec des paramètres de lissage différents, ont été réalisés grâce à une régression polynomiale de type loess. Ces lissages ont fortement aplani les courbes et les valeurs obtenues n'ont donc pas été étudiées, seule l'allure a été prise en compte dans l'analyse.

3.3 Onset de la végétation et des précipitations

Le terme « onset » en anglais, signifie littéralement démarrage en français. Pour la forêt, il correspond à la mise en place des nouvelles feuilles dans la canopée. Pour la savane, il correspond à la croissance de la végétation herbacée. Pour les précipitations, il correspond au début de la saison des pluies. Afin d'étudier la relation entre l'onset de la végétation et l'onset des précipitations, ceux-ci ont été calculés pour chaque année, et selon deux méthodes différentes.

1. Approche par occupation du sol
 - Onset de la végétation : à la fois sur la zone de forêt et de savane;
 - Onset des précipitations : sur la zone entière de 10 000 km² (100 km * 100 km).
2. Approche par pixel
 - Onset de la végétation : par pixel de 400 km² (20 km * 20 km);
 - Onset des précipitations : par pixel de 400 km² (20 km * 20 km).

3.3.1 Approche par occupation du sol

L'onset de la végétation a été calculé à la fois en forêt et en savane. Ces calculs ont été réalisés deux fois : en utilisant la méthode d'Archibald & Scholes (2007) et en utilisant le logiciel TIMESAT⁴. L'onset des précipitations a été calculé au moyen de la méthode de Tadross et al. (2005).

Les données des séries temporelles étant espacées de 16 jours, un lissage a été réalisé dans le but d'extraire une donnée tous les 8 jours, afin d'améliorer la résolution temporelle. Différentes méthodes de lissage sont régulièrement employées dans ce type d'étude et sont implémentées dans TIMESAT : Savitsky-Golay (SG), Asymmetric Gaussian (AG) et Double Logistic (DL). La première (SG) permet de détecter des changements rapides car elle est très sensible aux bruits, tandis que les deux autres (AG et DL) donnent des informations plus robustes sur le début et la fin de la saison (Jönsson & Eklundh, 2002). Afin de détecter les onsets, la première méthode (SG) n'a donc pas été utilisée. Les deux autres méthodes donnant des résultats similaires, c'est la méthode AG qui a été employée afin de lisser les données.

Premièrement, le calcul de l'onset de la végétation est basé sur la formule d'Archibald & Scholes (2007). Celui-ci est détecté lorsque la valeur de l'EVI au temps t est supérieur à la moyenne des quatre observations précédentes (Équation 3 et Figure 7), espacées de 8 jours dans le cas présent (Archibald & Scholes, 2007; Ryan et al., 2017).

$$EVI_t > \frac{EVI_{t-1} + EVI_{t-2} + EVI_{t-3} + EVI_{t-4}}{4} \quad (3)$$

Équation 3. Formule du calcul de l'onset de la végétation selon Archibald & Scholes (2007). Avec EVI (Enhanced Vegetation Index) et t (Temps).

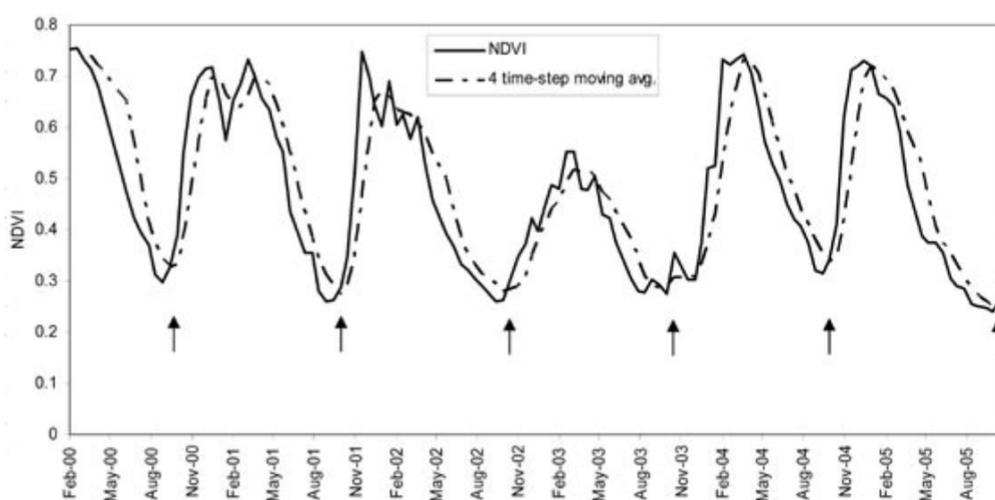


Figure 7. Méthodologie du calcul de l'onset de la végétation selon Archibald & Scholes (2007). L'onset est détecté lorsque le signal (NDVI dans la figure et EVI dans le contexte de cette étude) croise la moyenne mobile des quatre données précédentes. Ce moment annuel est marqué d'une flèche.

⁴ <http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>

Deuxièmement, le calcul de l'onset de la végétation a été réalisé à l'aide de TIMESAT (<http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>). Il s'agit d'un logiciel servant spécifiquement à analyser les séries temporelles de données satellites. Le calcul de l'onset se base sur l'amplitude d'EVI de la saison, et il est détecté lorsque la valeur d'EVI atteint vingt pourcent de l'amplitude saisonnière (Équation 4 et Figure 8) (Jönsson & Eklundh, 2006; Schwartz, 2003).

$$\text{Onset} = 0,2 * \text{Amplitude saisonnière} \quad (4)$$

Équation 4. **Formule du calcul de l'onset de la végétation grâce à TIMESAT.** Sur la Figure 8, l'onset correspond au (a) et l'amplitude saisonnière au (g).

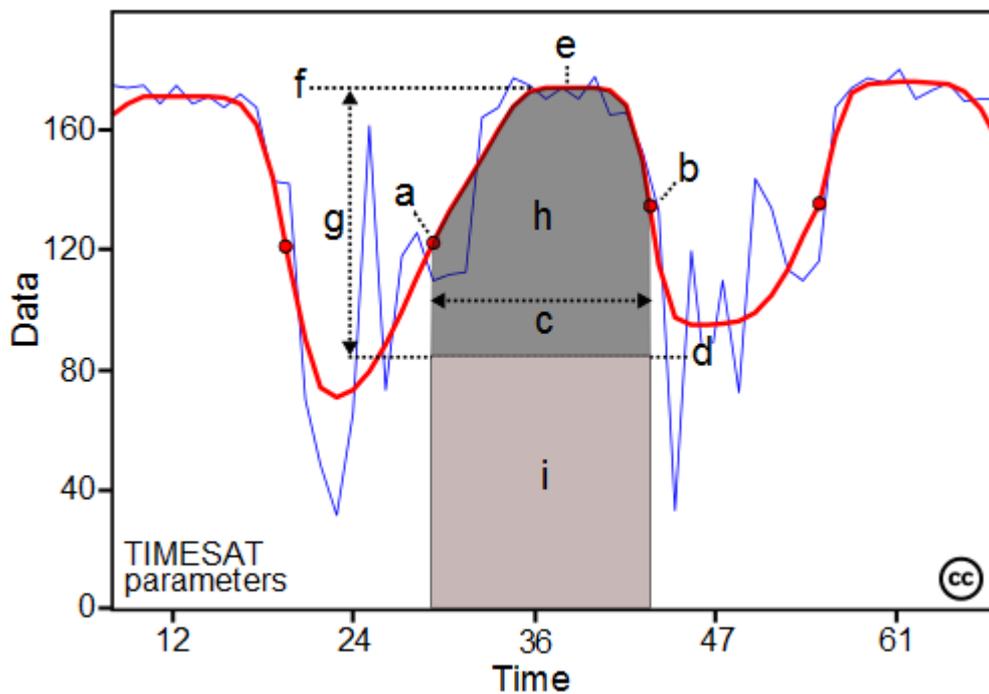


Figure 8. **Quelques paramètres de saisonnalité générés dans TIMESAT.** (a) début de la saison, (b) fin de la saison, (c) durée de la saison, (d) minimum de la saison, (e) milieu de la saison, (f) maximum de la saison, (g) amplitude, (h) valeur intégrée de l'indice. Extrait de <http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>.

Pour les précipitations, de nombreuses méthodes afin de détecter l'onset en zone tropicale existent (Butt et al., 2011; Leite-Filho et al., 2019; Stern & Coe, 1982; Tadross et al., 2005). Le calcul retenu après essais est la méthode de Tadross et al. (2005). L'onset a été détecté lorsque deux conditions sont remplies :

- La première décade (10 jours) reçoit plus de 25 mm de pluie (Equation 4);
- Les deux décades suivantes reçoivent au moins 20 mm de pluie au total (Equation 4).

$$\overline{P_{j-30\dots j-21}} > 25 \text{ et } \overline{P_{j-20\dots j-1}} > 20 \quad (5)$$

Équation 5. **Formules du calcul de l'onset des précipitations.** Avec P (Précipitations) et j (Jour).

Une fois les onsets annuels obtenus pour la forêt, la savane et les précipitations, les valeurs ont été observées. Ensuite, afin d'étudier le lien entre les valeurs d'onset entre Forêt/Précipitations et Savane/Précipitations, leur relation a été étudiée à travers une régression linéaire.

3.3.2 Approche par pixel

Cette partie a été traitée différemment et a eu pour but d'étudier la différence entre onsets de la végétation et de la pluie sur l'entièreté de la zone. La distinction entre forêt et savane n'a plus été faite et les deux méthodes (Archibald & Scholes, 2007 et TIMESAT) ont été utilisées pour détecter les onsets de la végétation.

Pour chaque date, une valeur unique d'EVI a été définie par pixel de 20 km de résolution, en calculant la moyenne des EVI des pixels à l'intérieur de celui-ci. Les valeurs de précipitations étant déjà à cette résolution, aucune opération n'a été effectuée. Après ces manipulations, la zone n'est donc plus constituée que de 25 pixels.

L'onset de la végétation et des précipitations a été calculé pour chaque pixel et chaque année. Pour chaque année, une courbe de distribution de fréquence des onsets des 25 valeurs a été construite, pour la végétation et les précipitations. La moyenne a également été construite. Finalement, la différence entre les onsets de précipitations et de végétation a été réalisée et la courbe de distribution des fréquences également construite.

Résultats

1. Transitions d'occupation du sol

Entre 2000 et 2018, la diminution des zones forestières et le changement de répartition des classes de couvertures arborées ont pu être mis en évidence (Figure 9), et le seuil de couverture arborée choisi pour mettre en évidence les forêts est de 50%.

La bimodalité de la couverture arborée est le facteur qui a permis de définir ce seuil (Figure 9, histogrammes). A partir de ce seuil, la distinction entre les forêts et les savanes/villes/zone agricole a été réalisée. La part de forêt sur la zone d'étude est passée de 81% à 74%, au profit des savanes, villes et parcelles agricoles représentant 26% de la surface en 2018. La zone faisant 10 000 km², le passage de 8 100 km² de forêts à 7 400 km² représente un taux de déforestation globale de 8.64% en 18 ans, ce qui correspond à un taux de déforestation annuel moyen de 0.48%. En 2018, les zones de couvertures denses (>60% de couverture arborée) diminuent toutes, au profit des zones de couvertures moins denses. Les classes de couvertures arborées situées entre 50 et 80% sont toujours les plus représentées sur la zone d'étude, cependant les couvertures moins denses (<60% de couverture arborée) sont de plus en plus présentes.

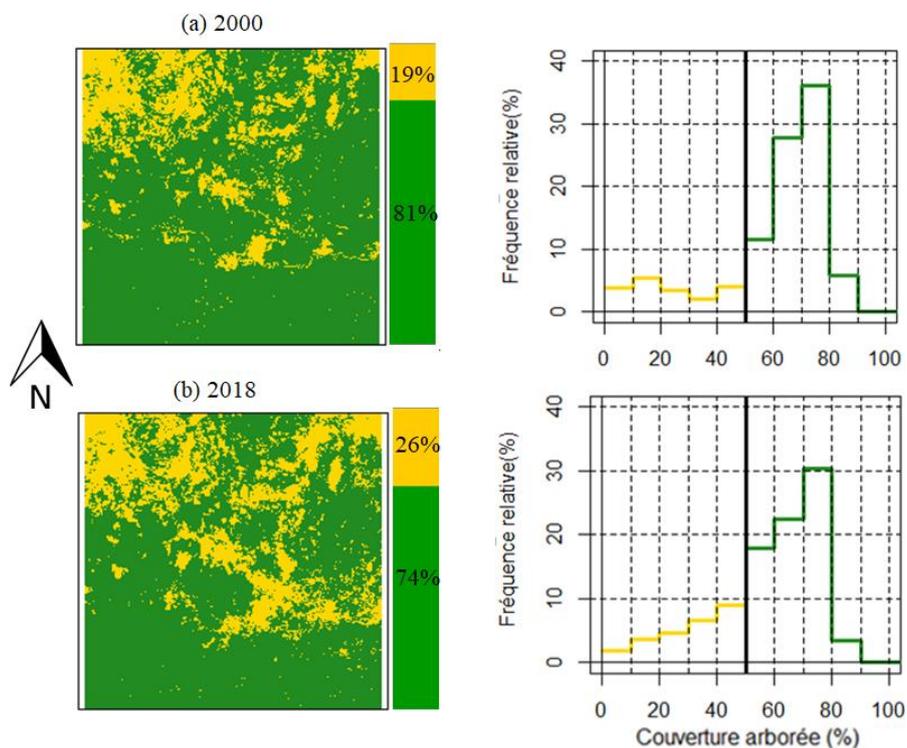


Figure 9. **Diminution de la proportion de zones forestières et changements de répartition des classes de couverture arborée entre 2000 et 2018.** Cartes de la zone d'étude en (a)2000 et en (b)2018 et leurs histogrammes de fréquence de répartition des classes de couvertures arborées. En vert, les zones forestières et en jaune les zones non-forestières. Zones déterminées à partir du seuil de 50% de couverture arborée.

De 2000 à 2018, l'expansion des zones urbaines au détriment des forêts est évidente (Figure 10). En effet, les zones déforestées, sont majoritairement localisées:

- Aux alentours de M'Baïki (au centre de la zone d'étude) et de Bangui (au nord-est de la zone d'étude) ;
- Le long des axes reliant ces deux villes et de l'axe partant de M'Baïki vers l'est.

La valeur de cet effritement, correspondant aux pertes de forêts, représente 9.5% de la zone d'étude. Par ailleurs, 2.3% de la zone est constitué de nouvelles superficies forestières. Celles-ci, quoique relativement parsemées sur l'ensemble de la zone, sont majoritairement situées en bordure de savane, au nord et nord-ouest de la zone. Les superficies de forêts stables constituent néanmoins 71.7% de la zone. Elles sont quasiment omniprésentes dans le paysage et se répartissent partout aux alentours des villes et de la savane. Les étendues de non-forêts stables représentent quant à elles 16.5% de la zone d'étude et sont composées des savanes, des villes, des zones agricoles et des bordures des axes routiers. Les villes sont repérables grâce à la forte déforestation qu'elles occasionnent, et sont donc localisées au centre et au nord-est, tandis que les savanes sont situées dans la partie nord-ouest de la zone.

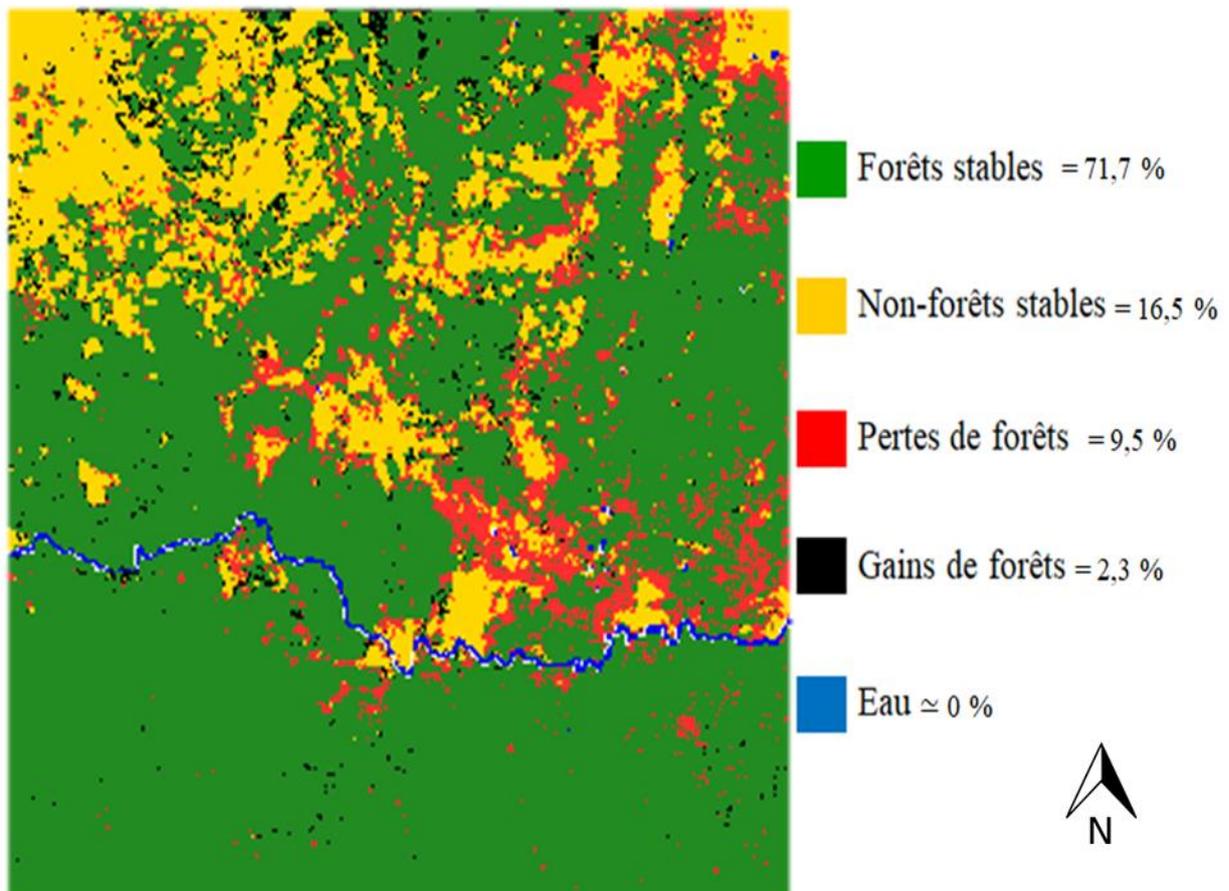


Figure 10. **Changement d'occupation du sol de la zone d'étude entre 2000 et 2018.** En vert : forêts stables = 71,7% ; En jaune : non-forêts stables = 16,5% ; En rouge : pertes de forêts = 9,5% ; En noir : gains de forêts = 2,3% ; En bleu : zones d'eau ≈ 0%.

2. Saisonnalité de la végétation et des précipitations

Sur la période 2000-2018, la série temporelle d'EVI met en évidence une saisonnalité des forêts et des savanes très marquée ainsi qu'un fonctionnement clairement annuel régi par la succession des saisons sèches et des saisons humides (Figure 11a).

Les précipitations journalières, renseignées sur l'échelle d'ordonnée de droite, correspondent aux histogrammes bleu clair et sont aussi fortement saisonnières. Les saisons sèches se présentent essentiellement de décembre à février. Les précipitations des saisons humides atteignent généralement des valeurs journalières de l'ordre de 40 mm. Celles-ci peuvent néanmoins atteindre des valeurs extrêmes, comme en 2001 où une pluie de 104 mm a été enregistrée. Les précipitations annuelles moyennes sont de 1700 mm. Les séries temporelles d'EVI, renseignées sur l'échelle d'ordonnée de gauche, de la forêt en vert et de la savane en jaune, sont toutes deux similairement annuelles et saisonnières. Cependant, les minima en savane tombent à 0.19 et sont systématiquement inférieurs aux minima en forêts, qui atteignent 0.31.

Si le fonctionnement des deux types de végétation est fortement annuel, les comportements de la forêt et de la savane au cours d'une année sont néanmoins différents. En observant les profils annuels d'EVI (Figure 11b et c), les deux types de végétations présentent des profils caractéristiques. Le profil annuel de la savane est unimodal, contrairement à celui de la forêt qui est bimodal. En effet, en savane, la valeur minimale (0.23 ± 0.03) se situe en janvier et les valeurs maximales atteignent un palier (0.52 ± 0.04) de mai à septembre. En forêt, bien que la valeur minimale (0.36 ± 0.04) se situe également en janvier, la valeur maximale (0.54 ± 0.03) est atteinte en mai, l'EVI baisse ensuite jusqu'à 0.49 ± 0.04 avant de remonter à nouveau jusqu'à ré-atteindre la valeur maximale en septembre.

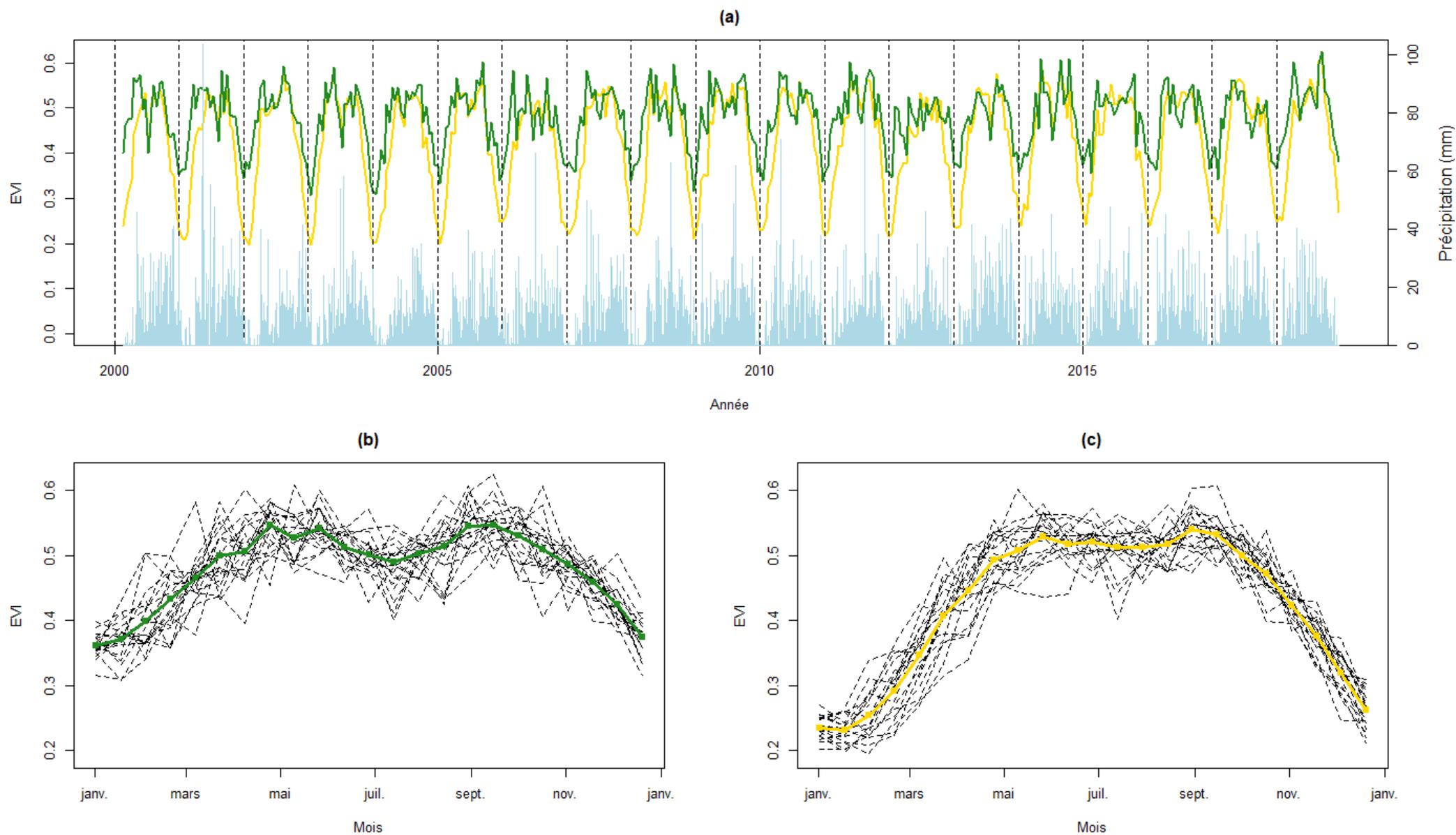


Figure 11. **Saisonnalité de la végétation en forêt et en savane, et des précipitations.** (a) Séries temporelles de l'EVI et des précipitations de 2000 à 2018. En vert : le profil d'EVI en forêt, en jaune: le profil d'EVI en savane et en bleu clair, les histogrammes journaliers des précipitations (b) Profils annuels de 2000 à 2018 de l'EVI en forêt en pointillés et profil moyen de l'EVI en vert (c) Profils annuels de 2000 à 2018 de l'EVI en savane en pointillés et profil moyen de l'EVI en jaune.

Les anomalies des EVI et des précipitations après detrending et lissage des données ont ensuite été examinées. Pour chaque date (tous les seize jours pour l'EVI et tous les dix jours pour les précipitations), une valeur moyenne a été calculée, et la différence entre la valeur de chaque date et la valeur moyenne associée a été réalisée. Ensuite, afin de pouvoir lire le résultat plus aisément, deux lissages des données, avec des facteurs de lissage différents, ont été réalisés grâce à une régression polynomiale de type loess. En fonction du facteur de lissage, les résultats obtenus permettent de savoir si :

- Un signal évolue au cours du temps grâce au lissage élevé (Figure 12, traits pleins);
- Des signaux réagissent de la même manière aux perturbations grâce au lissage modéré (Figure 12, traits pointillés).

Concernant l'évolution du signal entre 2000 et 2018, une tendance à l'augmentation de l'EVI est perceptible en savane (Figure 12b, trait plein). En effet, l'anomalie d'EVI en savane démarre à -0.018 et arrive à 0.008 fin 2018. Elle passe par 0 en août 2008 et atteint 0.01, son maximal, en septembre 2014. Dans le même temps, les anomalies d'EVI en forêt et des précipitations oscillent autour de 0 entre 2000 et 2018 (Figure 12a et c, traits pleins). Par conséquent, aucune tendance n'est remarquable pour les forêts et les précipitations. D'un point de vue statistique, toutes les *p-valeurs* des régressions sont significatives.

En ce qui concerne le comportement de la série temporelle entre 2000 et 2018, la réponse de la végétation face aux anomalies est relativement similaire en forêt et en savane (Figure 12a et b, traits pointillés). En effet, les deux courbes d'anomalies suivent à plusieurs reprises la même allure comme entre autres, début 2004 et en mai 2012 où des pics négatifs d'anomalies sont enregistrés ou bien encore en mars 2009 et fin 2014 où des pics positifs sont enregistrés. D'autre part, les relations entre les anomalies de la végétation et des précipitations sont difficilement identifiables. De ce fait aucune relation avec la végétation ne peut être tirée visuellement de la courbe relative aux précipitations (Figure 12c, trait pointillé). D'un point de vue statistique, toutes les *p-valeurs* des lissages sont significatives.

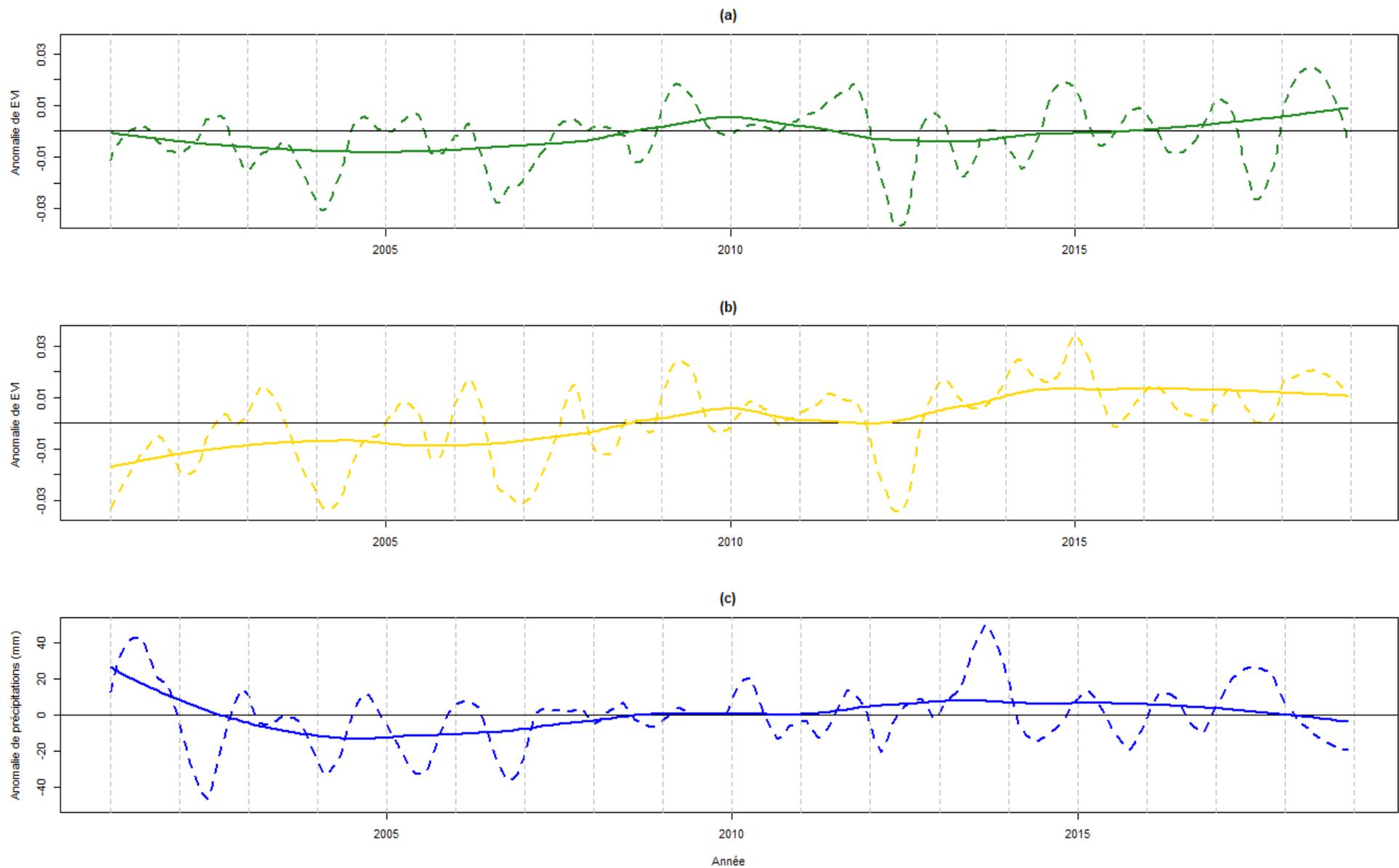


Figure 12. **Anomalies dans les valeurs d'EVI en savane sur le long terme et comportement similaire de la forêt et la savane.** Séries temporelles détendancées et lissées de l'indice de végétation en (a) forêt et en (b) savane et des (c) précipitations. Les lignes pleines ont subi un lissage élevé afin d'observer l'évolution du signal au cours du temps. Les lignes pointillées ont subi un lissage modéré afin de comparer les comportements des signaux. Toutes les *p-valeurs* des régressions sont significatives.

3. Onset de la végétation et des précipitations

Les valeurs annuelles des onset obtenus correspondent aux démarrages de la végétation et de la saison humide. Ces onset sont représentés sous forme du jour julien (nombre de jour depuis le 1^{er} janvier) auquel ils sont détectés, et seront notés SOS_F pour la forêt, SOS_S pour la savane et SOR pour les précipitations. Les termes SOS et SOR font référence au démarrage de la végétation et au début des précipitations, « Start of Season » et « Start of Rain » en anglais.

3.1 Approche par occupation du sol

Les résultats obtenus sont relativement différents en fonction de la méthode utilisée pour détecter les SOS (Archibald & Scholes, 2007 ou TIMESAT). Les SOR sont obtenus grâce à la formule proposée par Tadross et al. (2005).

La méthode proposée par Archibald & Scholes (2007) appliquée aux savanes d'Afrique du Sud, et reprise par Ryan et al. (2017) pour les savanes et forêts claires d'Afrique australe, détecte l'onset lorsque la valeur de l'EVI dépasse la moyenne mobile des quatre valeurs précédentes. Selon cette méthode, le SOS précède le SOR en examinant les séries temporelles (Annexe 1) ainsi qu'en étudiant les relations entre les SOS en forêt et en savane et les SOR (Figure 13a). Les onset varient de 1 à 41 pour la forêt, de 9 à 41 en savane et de 4 à 90 pour les précipitations. Toutes les valeurs (points), ainsi que les deux régressions (lignes), se situent en dessous de la première bissectrice (droite d'équation « $x = y$ »), en pointillés noirs sur la figure, excepté en 2006 (Annexe 1). La valeur de 2006 a été considérée comme un point marginal (« outlier » en anglais) et n'a pas été prise en compte dans la construction des régressions, car la méthode utilisée (Tadross et al., 2005) a détecté une pluie exceptionnelle et non pas le réel onset de la saison des pluies (Annexe 2). De plus, les équations de ces régressions en forêt et en savane sont respectivement « $SOS_F = 0.11 * SOR + 16.62$ » et « $SOS_S = 0.21 * SOR + 12.19$ » (Tableau 2). Leur pente étant inférieure à 1, la végétation est en avance sur les précipitations. Cependant, la signification statistique de ces régressions n'est pas confirmée. Leur *p-valeur* valant respectivement 0.6 et 0.19, la relation ne peut être certifiée. De plus les performances de la détermination de ces deux dernières régressions sont relativement faibles, avec des valeurs de r^2 de 0.02 et 0.11.

La méthode implémentée dans TIMESAT détecte l'onset lorsque la valeur d'EVI atteint vingt pourcent de l'amplitude saisonnière. Grâce à cette méthode, le SOS_F est généralement antérieur au SOR , mais les SOS_S et les SOR surviennent sensiblement aux mêmes dates (Figure 13b). Les onset varient de 25 à 81 pour la forêt, de 46 à 87 en savane et

toujours de 4 à 90 pour les précipitations. Les équations des régressions en forêt et en savane sont respectivement « $SOS_F = 0.5 * SOR + 23.82$ » et « $SOS_R = 0.5 * SOR + 33.56$ » (Tableau 2), grâce à la valeur de leur pente (m) et de leur interception avec l'axe des ordonnées (p) permet de conclure que :

- En forêt, si le SOR survient avant le 16 février (47^{ème} jour julien), la végétation est en avance sur les précipitations, et l'inverse à partir du 17 février (48^{ème} jour julien);
- En savane, si le SOR survient avant le 8 mars (67^{ème} jour julien), la végétation est en avance sur les précipitations, et l'inverse à partir du 9 mars (68^{ème} jour julien).

Les deux régressions effectuées sur les données obtenues via TIMESAT sont statistiquement significatives avec des *p-valeurs* valant 0.04 et 0.001. Les performances de la détermination de ces deux dernières régressions sont plus élevées que celles obtenues via Archibald & Scholes (2007), avec des valeurs de coefficients r^2 de 0.26 et 0.58.

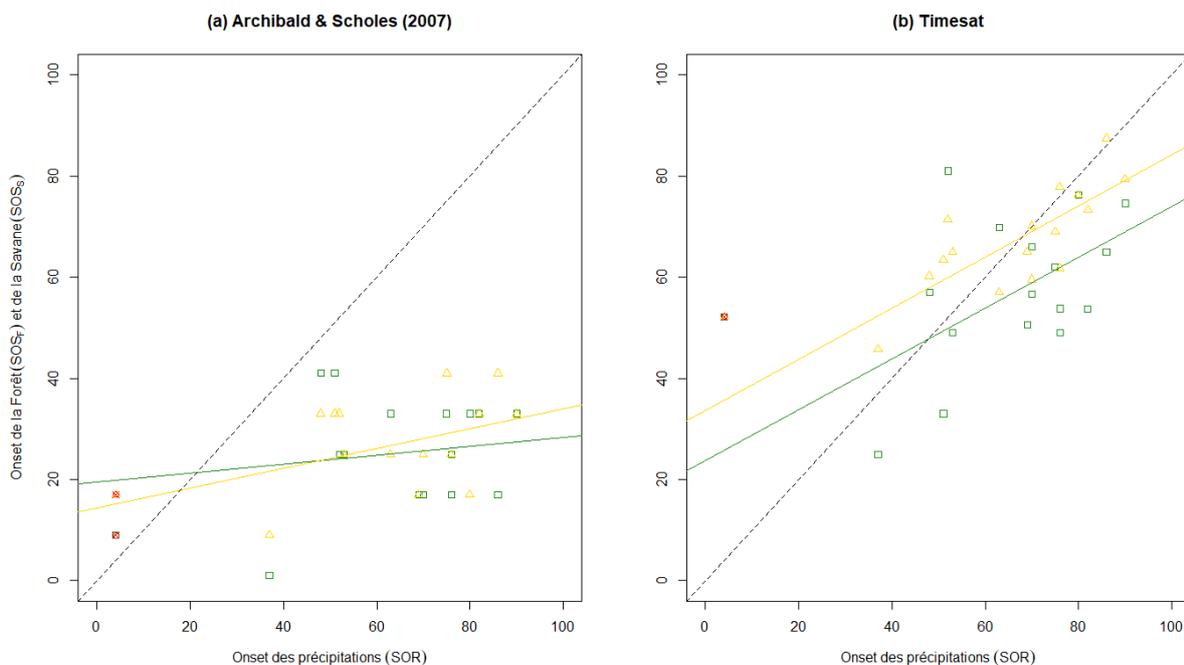


Figure 13. **Lien entre l'onset de la végétation (SOS, Start of Season) et l'onset des précipitations (SOR, Start of Rain) à travers des régressions linéaires de différentes méthodes.** Méthode du calcul des onset de la végétation : (a) Archibald & Scholes (2007) ; (b) TIMESAT. En vert : onset de la forêt en fonction des onset des précipitations (points), et régression linéaire associée (ligne). En jaune : onset de la savane en fonction des onset des précipitations (points), et régression linéaire associée (ligne). La régression linéaire est représentée en trait plein si elle est significative et en pointillés si elle est non-significative. La ligne en pointillés noir est la droite d'équation $x=y$, elle permet de détecter si la végétation est en avance ou non sur les pluies. L'outlier, correspondant aux valeurs de l'année 2006, est représenté en rouge et n'a pas été pris en compte dans les régressions linéaires. Les coefficients des régressions linéaires sont renseignés au Tableau 2.

Tableau 2. Coefficients des régressions linéaires de la Figure 13. Pour chaque régression linéaire d'équation « SOS = a*SOR + b », la pente (a) et l'ordonnée à l'origine (b) ainsi que leurs intervalles de confiance (IC) sont renseignés, ainsi que leur p-valeur et leur coefficient de détermination (r²).

Méthode		Régression linéaire (SOS = a*SOR + b)		p-valeur	r ²
		Pente (a) [IC]	Ordonnée à l'origine (b) [IC]		
Archibald & Scholes (2007)	Forêt	0.11 [-0.33 ; 0.55]	16.62 [-13.68 ; 46.93]	0.6	0.02
	Savane	0.21 [-0.12 ; 0.54]	12.19 [-10.7 ; 35.08]	0.19	0.11
TIMESAT	Forêt	0.5 [0.017 ; 0.99]	23.82 [-9.63 ; 57.26]	0.04	0.26
	Savane	0.5 [0.26 ; 0.75]	33.56 [16.58 ; 50.73]	0.001	0.58

3.2 Approche par pixel

Cette approche a été réalisée avec les deux méthodes déjà employées pour détecter les onsets de la végétation (Archibald & Scholes, 2007 et TIMESAT). Les onsets des précipitations sont obtenus grâce à la formule proposée par Tadross et al. (2005).

Sur la zone d'étude, qu'importe la méthode employée pour détecter l'onset de la végétation, un déphasage entre l'onset de la végétation et des précipitations est constaté, avec majoritairement des SOS en avance sur les SOR (Figure 14). Ce déphasage est visuellement constatable en observant les distributions de probabilité moyennes de la végétation (en vert) et des précipitations (en bleu). En plus d'être généralement en retard sur la végétation, les onsets des précipitations se répartissent sur une plus longue période. En effet, tous deux peuvent se produire dès le début de l'année, mais l'onset des précipitations peut survenir jusqu'au 15 avril (105^{ème} jour julien), alors que l'onset de la végétation apparaît au plus tard le 22 mars (81^{ème} jour julien).

En utilisant la méthode proposée par Archibald & Scholes (2007), en moyenne, la végétation est en avance sur les précipitations dans 79% des cas et est en retard dans 21% des cas (Figure 14b). L'allure de la distribution de probabilité des différences moyennes (en trait noir plein) présente un palier valant approximativement 8% entre -10 et 10 jours, avant d'atteindre 25%, son maximum, au jour 20, et de redescendre progressivement jusqu'au jour 70.

En utilisant le logiciel TIMESAT, en moyenne, la végétation est en avance sur les précipitations dans 73% des cas et est en retard dans 27% des cas (Figure 14d). L'allure de la distribution de probabilité des différences moyennes (en trait noir plein) augmente linéairement jusqu'à atteindre 20%, son maximum, au jour 30, et de redescendre progressivement jusqu'au jour 70.

Dans l'ensemble, les deux distributions (Figure 14b et d) sont sensiblement similaires et les méthodes donnent des résultats analogues.

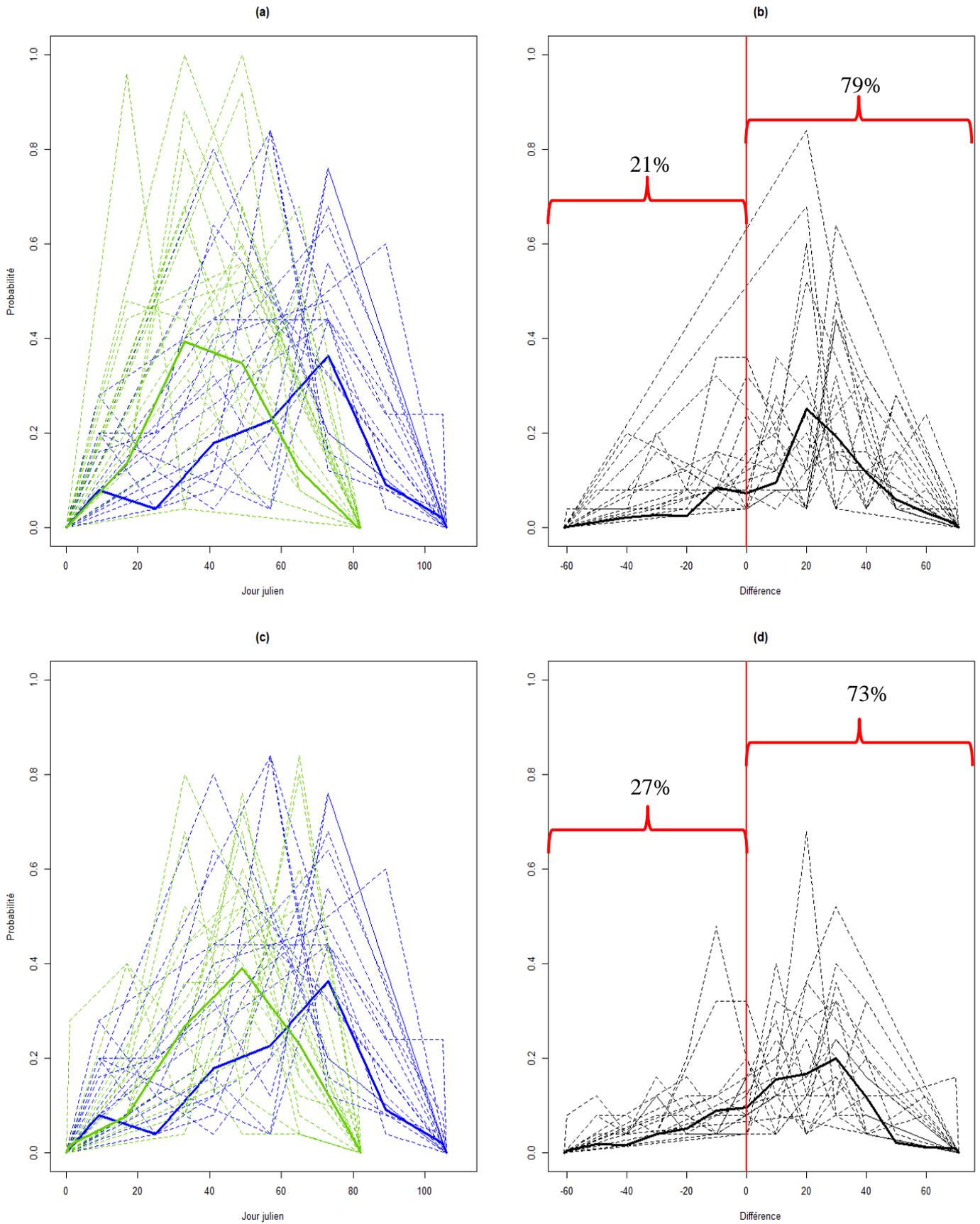


Figure 14. Déphasage de l'onset de la végétation et des précipitations en employant (a et b) Archibald & Scholes (2007) et (c et d) TIMESAT. (a et c) Distributions de probabilité du jour de l'année de l'onset de la végétation (en vert) et de l'onset des précipitations (en bleu). (b et d) Distributions de probabilité des différences entre les onsets de précipitations et de la végétation. A gauche de la ligne rouge, les précipitations sont en avance sur la végétation ; A droite de la ligne rouge, la végétation est en avance sur les précipitations. Au-dessus de la figure, la répartition de probabilité de la valeur moyenne est renseignée. Les lignes pointillées représentent chacune des 18 années d'observations et la ligne pleine correspond à la moyenne.

Discussion et Perspectives

L'objectif principal de ce travail était de caractériser la phénologie d'une zone de transition forêt-savane d'Afrique centrale à partir des données de télédétection, et de déterminer le rôle des précipitations sur la phénologie, en tant que déterminant ultimal (l'adaptation à long terme de la végétation à la saisonnalité du climat) ou proximal (l'impact direct du climat sur la végétation).

Les principaux résultats mis en évidence sont :

1. La zone de transition forêt-savane est instable et la déforestation due aux activités humaines y est fort présente (Megevand et al., 2013; Schure et al., 2010);
2. Une forte saisonnalité de l'EVI en forêt et en savane et une forte saisonnalité des précipitations confirment la dominance des cycles annuels déjà reportés en Afrique centrale et à M'Baïki pour la phénologie reproductive (Adamescu, 2018) ;
3. A priori, l'hypothèse de « pre-rain green-up » (Ryan et al. 2017) est confirmée mais les résultats obtenus dépendent de la méthode de détection du démarrage de la végétation.

Pour arriver à ces résultats, différents sous-objectifs ont été établis. Le premier sous-objectif de cette étude a été de définir les occupations du sol et d'étudier la dynamique de la zone d'étude entre 2000 et 2018.

Ce travail a permis de détecter une diminution des zones forestières, dans la zone de transition forêt-savane proche de M'Baïki, entre 2000 et 2018. Parallèlement, une fermeture relative des zones ouvertes des bordures de savane a également été détectée.

Pour obtenir ce résultat, le seuil de couverture arborée employé afin de détecter la forêt a été déterminé par photo-interprétation. Bien que ce seuil de 50% ait été déterminé empiriquement, les seuils utilisés pour détecter la forêt à partir d'image MODIS sont généralement légèrement plus important, et se situent entre 55 et 65% (Aleman et al., 2016; Staver et al., 2011). Par ailleurs, la même valeur seuil de 50% a été employée dans le paysage Maringa–Lopori–Wamba en République démocratique du Congo (RDC) et a permis de détecter correctement la forêt sur 98% de la surface d'étude (Hansen, Roy, et al., 2008). En outre, le choix du seuil est conforté par la bimodalité de la distribution de la couverture arborée (Favier et al., 2012; Hirota et al., 2011). Cependant, pour les études à grandes

échelles, les types d'occupation du sol (« Land Cover ») obtenus par télédétection sont plus communément utilisés (Agossou & Kang, 2019; Guan et al., 2015; Zhang & Yu, 2014).

La fermeture des zones ouvertes au profit des forêts qui se produit en bordure de savane est un phénomène déjà connu et étudié. Ce phénomène, nommé « woody encroachment » se traduisant littéralement par « envahissant ligneux », est de plus en plus répandu à travers l'ensemble de la zone tropicale et subtropicale (Buitenwerf et al., 2012; Mitchard et al., 2009; Stevens et al., 2017).

Parallèlement à la fermeture des savanes, l'intensification de la diminution des zones forestières est observable à proximité des zones urbaines, qui se développent et mangent la forêt.

En effet, le taux de déforestation annuel estimé dans le cas présent est 0.48%. Il est à noter que la valeur de ce taux sur toutes les forêts tropicales du globe entre 1990 et 2010 vaut 0.49% (Achard et al., 2014). Cela dit, ce chiffre est nettement supérieur aux chiffres habituellement cités dans la zone étudiée :

- 0.06% de 1990 à 2005 en RCA (Ernst et al., 2013);
- 0.15% de 2000 à 2005 en Afrique centrale (Hansen, Stehman, et al., 2008).

Cette différence est expliquée par la forte anthropisation de la région étudiée. En effet, la zone comprend M'Baïki (22.000 habitants en 2003⁵), une des villes principales de la RCA (4.500.000 habitants en 2015⁶), mais elle est surtout bordée par la capitale, Bangui, et ses 1.150.000 habitants (en 2015⁶). La région de Kinshasa est essentiellement touchée par l'anthropisation avec ses 13 millions d'habitants (ONU, 2018). En effet, la perte des forêts liée à l'anthropisation s'est révélée être la cause de la diminution de 30% du stock de carbone de la région (Gond et al., 2016). Les conséquences humaines de ce déclin des zones forestières sont majoritairement liées à l'agriculture sur abattis-brûlis (Megevand et al., 2013) et à l'exploitation du bois-énergie (Molinario et al., 2015; Schure et al., 2010).

⁵ <http://www.citypopulation.de/Centralafrica.html>

⁶ <https://www.populationdata.net/pays/republique-centrafricaine/>

Le deuxième sous-objectif de cette étude était d'étudier la saisonnalité de la végétation en forêt et en savane, ainsi que celle des précipitations.

Sur la période 2000-2018, la série temporelle d'EVI met en évidence une saisonnalité des forêts et des savanes très marquée ainsi qu'un fonctionnement annuel régi par la succession des saisons sèches et des saisons humides. Le comportement de la végétation en forêt et en savane au cours d'une année est toutefois bien distinct quand on regarde plus en détail les profils annuels d'EVI.

Les caractères saisonniers annuels de la savane et de la forêt, régis par les alternances des saisons sèches et des saisons humides, sont typiques des forêts tropicales d'Afrique centrale (White, 1983). Cette relation a déjà été étudiée via des observations in-situ (Borchert, 1994; Reich, 1995), ainsi que via la télédétection (Xiao et al., 2006) dans les forêts tropicales d'Amérique du sud. Le résultat de cette étude concorde avec cette hypothèse, ce qui permet d'aboutir à la conclusion que dans la zone étudiée, les cycles végétatifs sont influencés par la disponibilité en eau au cours d'une année. Une autre hypothèse, également testée en Amérique du sud, expliquant la saisonnalité des cycles végétatifs est la disponibilité en lumière (Wright & van Schaik, 1994). Il pourrait être intéressant de se pencher sur cette hypothèse, et de comparer les résultats obtenus afin de tenter de comprendre quels facteurs climatiques régissent les cycles végétatifs. En effet, Philippon et al. (2016) qui ont étudiés l'EVI, les précipitations, la nébulosité, le rayonnement et les températures en Afrique centrale ont démontré que :

- La saison des pluies de mars à mai est caractérisée par des conditions de luminosité et une disponibilité en eau favorables. Elle régulerait le début du cycle végétatif ;
- A partir de l'intensification des précipitations en juillet, la disponibilité en lumière serait le facteur limitant.

Le profil bimodal obtenu en forêt concorde avec l'hypothèse de Philippon et al. (2016). Par ailleurs, Gond et al. (2013) ont étudiés les profils annuels de différents types de végétation de la région étudiée, et ont mis en évidence que plus la forêt se densifie, plus la bimodalité est marquée. Cela est expliqué par le gradient climatique de la région qui passe du climat guinéen humide au sud, au climat soudanien sec au nord (Andrieu, 2017). La frontière de cette transition climatique se situe à proximité de la zone d'étude, ce qui pourrait expliquer la différence entre l'allure annuelle de la forêt et de la savane.

Dans l'optique d'amener de nouvelles pistes de recherches dans l'analyse des cycles de la végétation et des précipitations, une analyse par ondelettes a été réalisée. Les ondelettes permettent l'analyse de signaux, à la fois sur leur composante « temps » et sur leur composante « périodicité ». Deux méthodes d'applications des ondelettes ont été employées. Premièrement, les séries temporelles des précipitations, de l'EVI en forêt et de l'EVI en savane ont été étudiées à travers une transformation en ondelettes simple (« Continuous wavelet approach » en anglais). Cette première analyse a permis de confirmer la dominance des cycles annuels des précipitations et de la végétation en savane, ainsi que d'observer une alternance entre cycles annuels et biannuels de la végétation en forêt (Annexe 3). Deuxièmement, les relations précipitations/forêts et précipitations/savanes des séries temporelles ont été étudiées à travers une cohérence en ondelettes (« Wavelet coherency » en anglais). Cette seconde analyse permet de mettre en évidence des fortes cohérences entre les précipitations et les deux types de végétation. Cependant et bien que les cohérences soient centrée sur une période de douze mois, la grande variabilité de ce résultat confirme que la réaction de la végétation n'est pas systématique. L'ensemble de ces résultats obtenus à partir de l'analyse par ondelettes confirment à nouveau les conclusions de Philippon et al. (2016), et amènent de nouvelles perspectives d'analyse des séries temporelles en écologie (Cazelles et al., 2008).

Concernant l'évolution du signal entre 2000 et 2018, une tendance à l'augmentation de l'EVI est perceptible en savane.

Cette observation n'a encore jamais été mise en évidence. Dès lors, quelques pistes de réflexion peuvent être établies.

Tout d'abord, bien que l'impact anthropique sur les forêts ait déjà été souligné auparavant, la pression exercée sur les espèces animales et végétales des savanes est également un facteur important. Les espèces animales sont impactées directement à travers la chasse et le braconnage (Wright, 2005) tandis que les espèces végétales sont impactées directement et indirectement par la présence humaine. En effet, les grands herbivores régulent l'équilibre entre les espèces ligneuses et herbacées des savanes et, la chasse et le braconnage empêchent les herbivores de réguler les espèces ligneuses (Wright, 2003). Les espèces végétales sont également influencées directement par l'homme à travers l'agriculture. En effet dans les régions tropicales, les agriculteurs profitent des feux de savane dans le but d'exploiter les terres (Atangana et al., 2019). Dans la zone d'étude la culture principale est le manioc (A. Fayolle, commentaire personnel), qui au cours de son cycle végétatif, atteint des hautes

valeurs de LAI (Veltkamp, 1985). La contamination des données de savanes par les plantations de manioc est une éventualité.

Parallèlement, bien que la méthode employée pour détecter les forêts soit performante, il est probable que la méthode utilisée pour isoler les savanes ne le soit pas autant, à cause de la proximité de zones urbaines. Cependant, appliquer des techniques de télédétection dans le but de différencier les savanes des forêts est compliqué à mettre en place, en raison de la couverture clairsemée, de la difficulté de différencier le sol et la végétation sèche ainsi qu'à cause du signal très élevé des sols nus (Tsalyuk et al., 2017).

Néanmoins, dans le cadre spécifique de cette étude, les zones considérées comme « savanes » sont potentiellement contaminées par des villes et des zones agricoles. Notamment dans la région nord-est de la zone d'étude qui est particulièrement proche de la capitale Bangui. Le taux de déforestation élevé de cette région atteste d'ailleurs de la présence de zone urbaine susceptible de biaiser les résultats. Eliminer ces zones permettrait de clarifier ce résultat, bien que la détermination rigoureuse des savanes dépasse le cadre de ce travail.

Sur le comportement de chaque série temporelle entre 2000 et 2018, la réponse de la végétation face aux anomalies est relativement similaire en forêt et en savane.

Bien que les végétations des forêts tropicales et des savanes soient composées d'espèces différentes (White, 1983), cela n'intervient pas dans la réponse de la végétation vis-à-vis des anomalies. Cette réaction analogique entre les espèces végétales de forêt et de savane a déjà été mise en évidence. Elle indique que les caractères interspécifiques ont évolué dans le même sens au sein de biomes différents mais géographiquement adjacents, et que cette évolution a été régie par le climat (Favier et al., 2012; Hirota et al., 2011; Hoffmann & Franco, 2003; Staver et al., 2011). Les faibles concordances entre les signaux de végétation et des précipitations révèlent la complexité de ces écosystèmes, qui sont également régis par d'autres facteurs climatiques tels que la nébulosité, le rayonnement et les températures (Philippon et al., 2016; Reich, 1995).

Le troisième sous-objectif de ce travail a été d'étudier la relation entre le SOS et le SOR en utilisant différentes méthodes et approches, afin d'expérimenter l'hypothèse de « pre-rain green-up ». Deux méthodes différentes ont été testées afin de calculer les SOS.

En employant la méthode proposée par Archibald & Scholes (2007) pour détecter l'onset de la végétation, l'hypothèse de pre-rain green-up est confirmée, mais aucune relation significative n'a été trouvée entre les SOS et les SOR.

Les résultats acquis renforcent l'hypothèse de « pre-rain green-up » déjà largement établie dans les forêts claires et les savanes d'Afrique australe (Childes, 1988; Richer, 2008; Ryan et al., 2017). Ce travail démontre que cette hypothèse est également confirmée dans les forêts semi-décidues et les savanes mésiques du domaine guinéo-congolais. En outre, puisqu'aucune relation n'a été trouvée entre les SOS et les SOR sur les 18 années d'études, les précipitations n'ont pas un rôle proximal sur la phénologie foliaire. Le rôle ultime des précipitations est donc mis en avant par cette étude, ce qui renforce les conclusions énoncées par Ryan et al. (2017) dans les forêts claires d'Afrique Australe.

Par ailleurs, la méthode proposée par Archibald & Scholes (2007) a été établie pour les savanes d'Afrique du Sud. Elle a été reprise par Ryan et al. (2017) pour les savanes et forêts claires d'Afrique australe. La zone étudiée est composée de savanes mésiques et de forêts semi-décidues (Fayolle et al., 2014; Fayolle et al., 2019), adaptées à un climat plus humide. Il est donc judicieux de s'interroger sur les paramètres de cette méthode, et de tenter de l'adapter plus rigoureusement à la région étudiée. Les paramètres de base qui ont été utilisés sont un pas de temps de huit jours et une moyenne mobile effectuée sur les quatre observations précédentes. Ces deux paramètres détectent donc le SOS sur base des valeurs du mois précédent (quatre observations espacées de huit jours reviennent à un mois). En observant les profils d'EVI de cette étude, déterminer le SOS sur base des observations d'un mois semble néanmoins être une bonne approche.

En employant TIMESAT, l'onset de la forêt est généralement antérieur à l'onset des précipitations, et les onsets de la savane et des précipitations surviennent sensiblement aux mêmes dates. En outre, il existe une relation significative entre les SOS et les SOR.

Les travaux de Land Surface Phenology qui emploient TIMESAT en Afrique centrale n'étant pas encore répandus, cette étude a permis d'exposer les avantages et inconvénients de l'application de cette méthode sur les forêts et savanes mésiques d'Afrique centrale. Tout d'abord le critère phénologique exploité est le SOS (Start of Season), or il n'existe pas de

définition universelle de ce critère (Schwartz, 2003). Il est important de le rappeler car ce travail a employé deux définitions différentes, illustrées par les deux méthodes employées. La méthode employée par TIMESAT tient compte de deux facteurs : l'amplitude de l'EVI au cours de la saison et le seuil de l'amplitude à sélectionner afin de détecter le SOS. Pour le calcul du premier facteur (amplitude), elle est déjà établie par Jönsson & Eklundh (2002), les concepteurs du logiciel. Cependant le seuil qui doit être sélectionné n'est pas encore établi, et différentes valeurs sont proposées :

- Entre 0 et 0.65 (Eklundh & Jönsson, 2012) ;
- 0.1 (Jönsson & Eklundh, 2002) ;
- 0.2 (Jönsson & Eklundh, 2006; Schwartz, 2003) ;

Par conséquent, par manque de consensus, il n'est pas aisé de déterminer les SOS à partir de la télédétection. De plus, le travail de White et al. (2009) en Amérique du nord concluent qu'il est plus facile de déterminer le SOS aux hautes latitudes qu'aux basses latitudes. En effet, leurs résultats démontrent que dans les hautes latitudes les méthodes sont correctement paramétrées et stables, tandis que dans les basses latitudes les méthodes ne sont pas aussi efficaces. Cependant, toujours selon White et al. (2009), la méthode de TIMESAT serait moins sujette aux erreurs que la méthode de la moyenne mobile d'Archibald & Scholes (2007). Il est à noter que le travail de White et al. (2009) n'a pas étudié le même biome que celui de cette étude. Cependant, des conclusions similaires ont été faites par Vrieling et al. (2013) dans les forêts et savanes d'Afrique. En conclusion, un paramétrage de TIMESAT adapté aux basses latitudes semble être solution intéressante à l'étude de la Land Surface Phenology en Afrique centrale, cependant ce travail dépasse le cadre de cette étude.

Conclusion

L'objectif principal de ce travail était de caractériser la phénologie d'une zone de transition forêt-savane d'Afrique centrale, à partir des données de télédétection et une approche de Land Surface Phenology, et de déterminer le rôle des précipitations sur la phénologie foliaire.

Ce travail contribue à l'amélioration des connaissances du fonctionnement de ces écosystèmes complexes. L'intensité de l'impact de la pression anthropique depuis 2000 a pu être quantifiée, et cet impact s'est surtout révélé très intense dans la périphérie de Bangui. Ce travail a également permis de renforcer les connaissances déjà établies concernant la forte relation annuelle entre la végétation, de la forêt et de la savane, et les précipitations. L'étude menée a aussi mis en évidence la difficulté à identifier les savanes à partir de données de télédétection sur des zones si précises. De plus, l'hypothèse de « pre-rain green-up » et la dominance des effets ultimes des précipitations (l'adaptation à long terme de la végétation à la saisonnalité du climat) ont été confirmés dans les forêts tropicales humides et les savanes mésiques d'Afrique centrale. Une discussion de la méthode utilisée dans le contexte de cette étude a permis d'exposer quelques perspectives pour les prochaines études.

Bibliographie

- Abernethy K. et al., 2018. Current issues in tropical phenology: a synthesis. *Biotropica*, **50**(3), 477–482.
- Achard F. et al., 2014. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Glob. Chang. Biol.*, **20**(8), 2540–2554.
- Adamescu G.S., 2018. Annual cycles are the most common reproductive strategy in African tropical tree communities. , **50**(3), 418–430.
- Agossou C. & Kang S., 2019. Climatic factors controlling interannual variability of the onset of vegetation phenology in the northern Sub - Saharan Africa from 1988 to 2013. , (September), 1–10.
- Ahas R. et al., 2002. Changes in european spring phenology. , **1738**, 1727–1738.
- Aleman J.C., Blarquez O. & Staver C.A., 2016. Land-use change outweighs projected effects of changing rainfall on tree cover in sub-Saharan Africa. *Glob. Chang. Biol.*, **22**(9), 3013–3025.
- Andrieu J., 2017. Phenological analysis of the savanna – forest transition from 1981 to 2006 from Côte d ’ Ivoire to Benin with NDVI NOAA time series. *Eur. J. Remote Sens.*, **50**(1), 588–600. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1377051>.
- Archibald S. et al., 2010. Seasonality, the latitudinal gradient of diversity, and Eocene insects. *Paleobiology*, **36**(3), 374–398.
- Archibald S. & Scholes R.J., 2007. Leaf green-up in a semi-arid African savanna –separating tree and grass responses to environmental cues. *J. Veg. Sci.*, **18**(4), 583.
- Atangana A. et al., 2019. Tropical Biomes: Their Classification, Description and Importance. *J. Chem. Inf. Model.*, **53**(9), 1689–1699.
- Borchert R., 1994. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, **75**(5), 1437–1449.
- Boulvert Y., 1986. Carte Phytogéographique République Centrafricaine. *Ostrom*, N°**104**(9), 1–138.
- Bouvet A. et al., 2018. An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR. *Remote Sens. Environ.*, **206**(November 2017), 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.030>.
- Buitenwerf R. et al., 2012. Increased tree densities in South African savannas : > 50 years of data suggests CO 2 as a driver. , **2**, 675–684.
- Bush E.R. et al., 2016. Fourier analysis to detect phenological cycles using long-term tropical field data and simulations. *Methods Ecol. Evol.*, **8**(5), 530–540.
- Butt N. et al., 2015. Cascading effects of climate extremes on vertebrate fauna through changes to low-latitude tree flowering and fruiting phenology. *Glob. Chang. Biol.*, **21**(9), 3267–3277.

- Butt N., De Oliveira P.A. & Costa M.H., 2011. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**(11).
- de Camargo M.G.G. et al., 2018. Leafing patterns and leaf exchange strategies of a cerrado woody community. *Biotropica*, **50**(3), 442–454.
- Cazelles B. et al., 2008. Wavelet analysis of ecological time series. , (April).
- Chapin F.S. et al., 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, **405**(6783), 234–242.
- Chevet J.M., Lecocq S. & Visser M., 2011. Climate, grapevine phenology, wine production, and prices: Pauillac (1800-2009). *Am. Econ. Rev.*, **101**(3), 142–146.
- Childes S.L., 1988. Phenology of Nine Common Woody Species in Semi-Arid, Deciduous Kalahari Sand Vegetation. , **79**(3), 151–163.
- Chuine I. et al., 2004. Grape ripening as a past climate indicator. *Rev. Geophys.*, **42**(2).
- Chuine I. & Beaubien E.G., 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecol. Lett.*, **4**(5), 500–510.
- Dexter K.G. et al., 2018. Inserting Tropical Dry Forests Into the Discussion on Biome Transitions in the Tropics. *Front. Ecol. Evol.*, **6**(July), 1–7.
- Dunham A.E. et al., 2018. Fruiting phenology is linked to rainfall variability in a tropical rain forest. *Biotropica*, **50**(3), 396–404.
- Eklundh L. & Jönsson P., 2012. TIMESAT 3.1 Software Manual. , 1–82.
- Ernst C. et al., 2013. National forest cover change in Congo Basin: deforestation , reforestation , degradation and regeneration for the years 1990 , 2000 and 2005. , 1173–1187.
- Favier C. et al., 2012. Abrupt shifts in African savanna tree cover along a climatic gradient. , 787–797.
- Fayolle A. et al., 2014. A new insight in the structure, composition and functioning of central African moist forests. *For. Ecol. Manage.*
- Fayolle A. et al., 2019. A sharp floristic discontinuity revealed by the biogeographic regionalization of African savannas. *J. Biogeogr.*, **46**(2), 454–465.
- Fayolle A. et al., 2012. Geological substrates shape tree species and trait distributions in African moist forests. *PLoS One*, **7**(8), 12–14.
- Fayolle A. et al., 2014. Patterns of tree species composition across tropical African forests. *J. Biogeogr.*, **41**(12), 2320–2331.
- Fenner M., 1998. The phenology of growth and reproduction in plants. *CriMiCo 2002 - 12th Int. Conf. "Microwave Telecommun. Technol. Conf. Proc.*, **1**, 490–491.
- Gao X. et al., 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.*, **74**(3), 609–620.
- Gond V. et al., 2016. Dynamics of forest cover and carbon stock change in the democratic

- republic of Congo: Case of wood-fuel supply basin for Kinshasa. *Bois Forets des Trop.*, **327**(327), 19–28.
- Gond V. et al., 2013. Vegetation structure and greenness in Central Africa from Modis multi-temporal data. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, **368**(1625).
- Gourlet-fleury S. et al., 2013. Forest Ecology and Management Silvicultural disturbance has little impact on tree species diversity in a Central African moist forest. *For. Ecol. Manage.*, **304**, 322–332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.021>.
- Groover A. & Cronk Q., 2017. Plant Genetics and Genomics: Crops and Models 21 Comparative and Evolutionary Genomics of Angiosperm Trees.
- Guan K. et al., 2015. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. *Nat. Geosci.*, **8**(4), 284–289.
- Guan K. et al., 2014. Terrestrial hydrological controls on land surface phenology of African savannas and woodlands. , 1652–1669.
- Hansen M.C., Roy D.P., et al., 2008. A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. , **112**, 2495–2513.
- Hansen M.C., Stehman S. V, et al., 2008. Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data SCIENCE.
- Harris D.J., 2002. The vascular plants of the Dzanga-Sangha Reserve. *In: 23*. 1–274.
- Higgins S.I., Buitenwerf R. & Moncrieff G.R., 2016. Defining functional biomes and monitoring their change globally. *Glob. Chang. Biol.*, **22**(11), 3583–3593.
- Hirota M. et al., 2011. Global Resilience of Tropical Forest and Savanna to Critical Transitions. , (October), 232–235.
- Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2003. Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts. *J. Ecol.*, **91**(3), 475–484.
- Hubálek Z., 2004. Global weather variability affects avian phenology: A long-term analysis, 1881-2001. *Folia Zool.*, **53**(3), 227–236.
- Huete A. et al., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. , **83**, 195–213.
- Huete A.R. et al., 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophys. Res. Lett.*, **33**(6), 2–5.
- Huffman G.J. & Bolvin D.T., 2018. TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation. *Am. Thyroid Assoc.*, **35**(4), 290–291.
- Humphrey et al., 1997. UK birds are laying eggs earlier CO 2 increases oceanic primary production Structural biology and phylogenetic estimation. *Nature*, **388**, 526–527.
- Jiang Z. et al., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.*, **112**(10), 3833–3845.
- Jönsson P. & Eklundh L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of

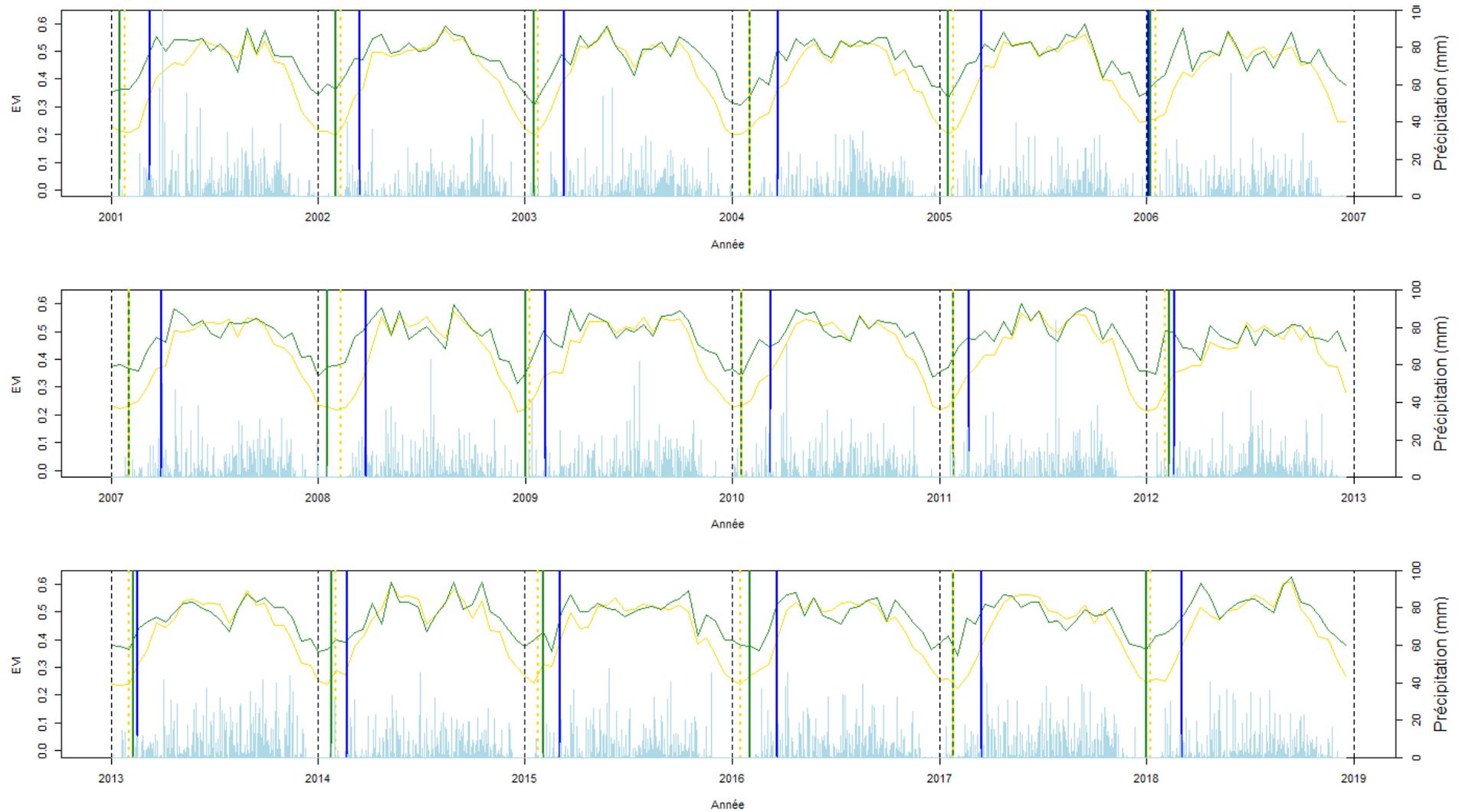
- satellite sensor data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **40**(8), 1824–1832.
- Jönsson P. & Eklundh L., 2006. TIMESAT - a Program for Analyzing Time-Series of Satellite Sensor Data. , (October), 39.
- Koen H., 2019. Package ‘MODISTools.’ , 1–10.
- Köppen, 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Bezielungen zur Pflanzenwelt.
- Kummerow C. et al., 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **15**(3), 809–817.
- Kurten E.L., Bunyavejchewin S. & Davies S.J., 2018. Phenology of a dipterocarp forest with seasonal drought: Insights into the origin of general flowering. *J. Ecol.*, **106**(1), 126–136.
- Lechowicz M.J. & Koike T., 1995. Phenology and seasonality of woody plants: An unappreciated element in global change research? *Can. J. Bot.*, **73**(2), 147–148.
- Lehmann C.E.R. et al., 2014. Savanna vegetation-fire-climate relationships differ among continents. *Science (80-.)*, **343**(6170), 548–552.
- Leite-Filho A.T., de Sousa Pontes V.Y. & Costa M.H., 2019. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**(10), 5268–5281.
- Lewis S.L. et al., 2009. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, **457**(7232), 1003–1006.
- Lewis S.L. & Maslin M.A., 2015. Defining the Anthropocene. *Nature*, **519**(7542), 171–180.
- Lyon J.G. et al., 1998. A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices. , **64**(2), 143–150.
- Mccormack M.L. et al., 2014. Variability in root production , phenology , and turnover rate among 12 temperate tree species Published by: Wiley on behalf of the Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/43494728> Variability in root production , phenology. , **95**(8), 2224–2235.
- MEA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment Board. *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, **7**(10), 5939–5946.
- Megevand C. et al., 2013. Dynamiques de déforestation dans le bassin du Congo : Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt. *In*: 1–179.
- Menzel A. & Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, **397**(6721), 659.
- Miller-Rushing A.J. et al., 2008. Bird migration times, climate change, and changing population sizes. *Glob. Chang. Biol.*, **14**(9), 1959–1972.
- Miller J.B., 1967. A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot.*, **15**(1), 141–144.
- Mitchard E.T.A. et al., 2009. Measuring woody encroachment along a forest-savanna boundary in Central Africa. *Earth Interact.*, **13**(8).
- Mitchard E.T.A., 2018. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*,

- 559**(7715), 527–534. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0300-2>.
- Molinario G., Hansen M.C. & Potapov P. V., 2015. Forest cover dynamics of shifting cultivation in the Democratic Republic of Congo: a remote sensing- based assessment for 2000 – 2010 OPEN ACCESS Forest cover dynamics of shifting cultivation in the Democratic Republic of the Congo 2000 – 2010.
- Morin X., Augspurger C. & Chuine I., 2007. Process-Based Modeling of Species ' Distributions : What Limits Temperate Tree Species ' Range Boundaries? Author (s): Xavier Morin , Carol Augspurger and Isabelle Chuine Reviewed work (s): Published by : Ecological Society of America content in a tr. , **88**(9), 2280–2291.
- Myneni R.B. et al., 2006. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **104**(12), 4820–4823.
- Noormets A., 2009. *Phenology of Ecosystem Processes Applications*, <http://eprints.utas.edu.au/4774/%5Cnhttp://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009>.
- Norden N. et al., 2007. Mast fruiting is a frequent strategy in woody species of eastern South America. *PLoS One*, **2**(10).
- Norton D.A. & Kelly D., 1988. Mast Seeding Over 33 Years by *Dacrydium cupressinum* Lamb. (rimu) (Podocarpaceae) in New Zealand: The Importance of Economies of Scale. *Funct. Ecol.*, **2**(3), 399.
- ONU, 2018. The World ' s Cities in 2018.
- Ouédraogo D.Y. et al., 2016. The determinants of tropical forest deciduousness: disentangling the effects of rainfall and geology in central Africa. *J. Ecol.*, **104**(4), 924–935.
- Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11**(5), 1633–1644.
- Pennec A., Gond V.R. & Sabatier D., 2011. Tropical forest phenology in French Guiana from MODIS time series. *Remote Sens. Lett.*, **2**(4), 337–345.
- Peñuelas J., Filella I. & Comas P., 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Glob. Chang. Biol.*, **8**(6), 531–544.
- Pereira H. et al., 2013. Essential Biodiversity Variables. , **2013**(December), 277–278.
- Philippon N. et al., 2016. Analysis of the diurnal cycles for a better understanding of the mean annual cycle of forests greenness in Central Africa. *Agric. For. Meteorol.*, **223**, 81–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.005>.
- Philippon N. et al., 2019. The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. *Environ. Res. Lett.*, **14**(3).
- Regniere J. & Jesse L., 2003. Animal Life Cycle Models. , (DECEMBER 2002), 137–153. <http://www.amazon.com/Phenology-Integrative-Environmental-Vegetation-ebook/dp/B00193SODC>.
- Régnière J. & Nealis V., 2002. Modelling seasonality of gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae), to evaluate probability of its persistence in novel

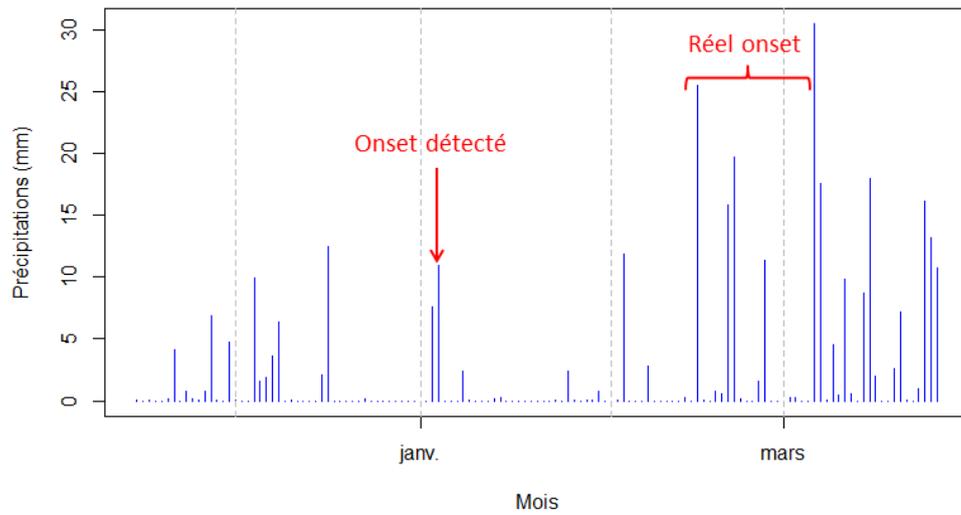
- environments. *Can. Entomol.*, **134**(6), 805–824.
- Reich P.B., 1995. Phenology of tropical forests: patterns, causes, and consequences. *Can. J. Bot.*, **73**(2), 164–174.
- Richardson A.D. et al., 2012. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agric. For. Meteorol.*, **169**, 156–173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>.
- Richer R.A., 2008. Leaf phenology and carbon dynamics in six leguminous trees. , 88–95.
- Rouse J.W. et al., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resour. Technol. Satell. Symp.*, **1**, 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>.
- Ruml M. & Vulic T., 2005. Importance of phenological observations and predictions in agriculture. *J. Agric. Sci. Belgrade*, **50**(2), 217–225.
- Ryan C.M. et al., 2017. Pre-rain green-up is ubiquitous across southern tropical Africa: implications for temporal niche separation and model representation. *New Phytol.*, **213**(2), 625–633.
- Sakai S., 2001. Phenological diversity in tropical forests. *Popul. Ecol.*, **43**(1), 77–86.
- Schure J. et al., 2010. L'état de l'art du bois énergie en RDC : Analyse institutionnelle et socio économique de la filière bois énergie. *Proj. Makala*, (December 2013), 103.
- Schwartz M., 2003. Phenology : An Integrative Environmental Science.
- Schwartz M.D., 1999. Advancing to full bloom: Planning phenological research for the 21st century. *Int. J. Biometeorol.*, **42**(3), 113–118.
- Slik J.W.F. et al., 2015. An estimate of the number of tropical tree species. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **112**(24), 7472–7477.
- Sparks T.H. & Jeffree C.E., 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *Int. J. Biometeorol.*, **44**(2), 82–87.
- Staver A.C., Archibald S. & Levin S.A., 2011. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science (80-.)*, **334**(6053), 230–232.
- Stern R.D. & Coe R., 1982. The use of rainfall models in agricultural planning. *Agric. Meteorol.*, **26**(1), 35–50.
- Stevens N. et al., 2017. Savanna woody encroachment is widespread across three continents. *Glob. Chang. Biol.*, **23**(1), 235–244.
- Stevenson P.R. et al., 2008. Flowering patterns in a seasonal tropical lowland forest in western Amazonia. *Biotropica*, **40**(5), 559–567.
- Suepa T. et al., 2016. Understanding spatio-temporal variation of vegetation phenology and rainfall seasonality in the monsoon Southeast Asia. *Environ. Res.*, **147**, 621–629. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.005>.
- Sullivan M.J.P. et al., 2017. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Sci.*

- Rep., 7(July 2016), 1–12. <http://dx.doi.org/10.1038/srep39102>.
- Tadross M.A., Hewitson B.C. & Usman M.T., 2005. The interannual variability on the onset of the maize growing season over South Africa and Zimbabwe. *J. Clim.*, **18**(16), 3356–3372.
- Tsalyuk M., Kelly M. & Getz W.M., 2017. Improving the prediction of African savanna vegetation variables using time series of MODIS products. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **131**, 77–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.012>.
- Veltkamp H., 1985. Physiological causes of yield variation in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). In: *Agric. Univ. Wageningen Pap.* 1–98.
- Vié J.-C., Hilton-Taylor C. & Stuart S.N., 2009. WILDLIFE IN A CHANGING WORLD. An analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species. *Mar. Ecol.*, **31**(2), 388–389.
- Vitousek P.M. et al., 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Urban Ecol. An Int. Perspect. Interact. Between Humans Nat.*, **277**(July), 3–13.
- Vrieling A., Leeuw J. De & Said M.Y., 2013. Length of Growing Period over Africa : Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. , 982–1000.
- White F., 1983. The vegetation of Africa.
- White M.A. et al., 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Glob. Chang. Biol.*, **15**(10), 2335–2359.
- World Reference Base for Soil Resources, 2014. *Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification systems for naming soils and creating legends for soil maps*, <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/world-reference-base/en/>.
- Wright S.J., 2003. The myriad consequences of hunting for vertebrates and plants in tropical forests. , **6**(June 1992).
- Wright S.J., 2005. Tropical forests in a changing environment. *Trends Ecol. Evol.*, **20**(10), 553–560.
- Wright S.J. & van Schaik C.P., 1994. Light and the phenology of tropical trees. *Am. Nat.*, **143**(1), 192–199.
- Xiao X. et al., 2006. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.*, **103**(4), 465–473.
- Xiao X. et al., 2005. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. , **94**, 105–122.
- Yu H., Luedeling E. & Xu J., 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **107**(51), 22151–22156.
- Zhang X., Tan B. & Yu Y., 2014. Interannual variations and trends in global land surface phenology derived from enhanced vegetation index during 1982–2010. *Int. J. Biometeorol.*, **58**(4), 547–564.

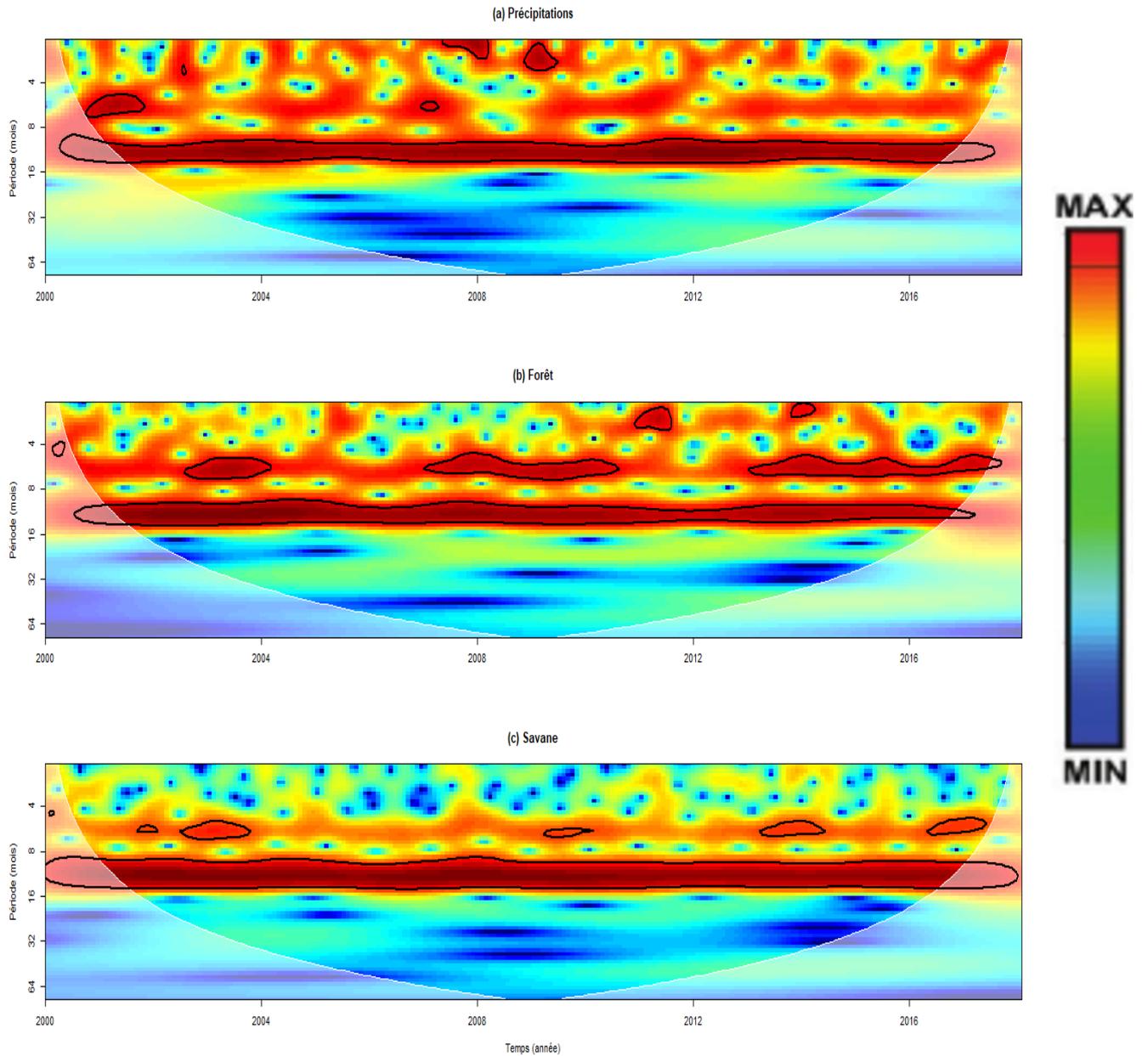
Annexes



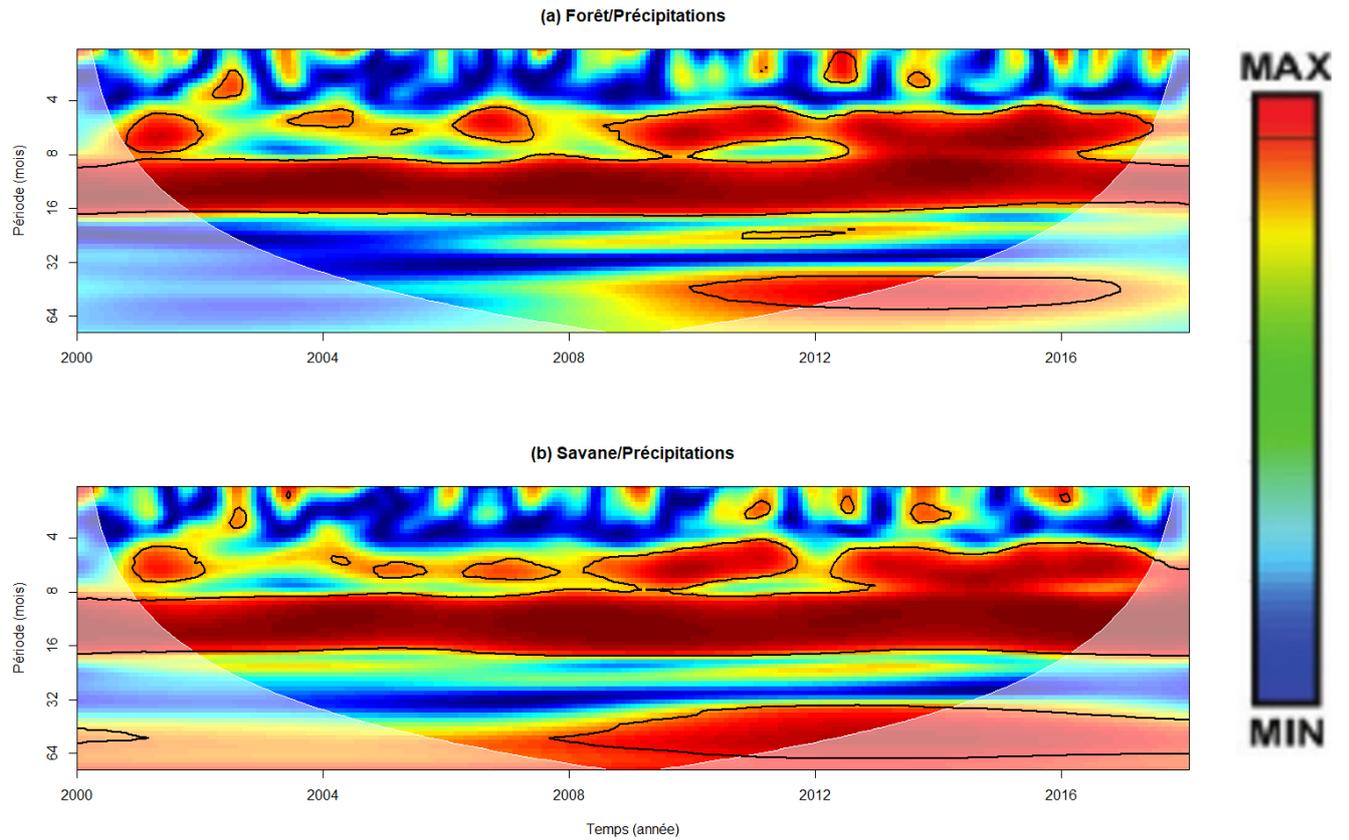
Annexe 1. **Précocité de la croissance de la végétation sur l'arrivée des pluies à travers les séries temporelles.** Séries temporelles : En vert : le profil d'EVI en forêt ; En jaune: le profil d'EVI en savane ; En bleu clair : les histogrammes journaliers des précipitations. Lignes verticales : En vert : onset de la forêt ; En jaune: onset de la savane ; En bleu foncé : onset des précipitations. Onset de la végétation calculés à partir de l'équation de Archibald & Scholes (2007).



Annexe 2. **Détection de l'origine de l'outlier.** Précipitations journalières entre 2005 et 2006. La méthode utilisée (Tadross et al., 2005) a détecté le 04/01/2016 comme onset des précipitations. L'onset exact est situé dans la zone nommé « Réel onset ».



Annexe 3. Scalogramme de la transformée par ondelettes des séries temporelles des (a) précipitations, (b) de l'EVI en forêt et (c) de l'EVI en savane. Les zones de significations statistiques sont entourées en noir. Les zones en dehors de cône d'influence (traits blancs) n'ont pas de signification statistique. L'échelle des variations de puissance est renseignée à droite des graphiques.



Annexe 4. Scalogramme de la cohérence en ondelettes entre les séries temporelles (a) des précipitations et de l'EVI en forêt, et (b) des précipitations et de l'EVI en savane. Les zones de significations statistiques sont entourées en noir. Les zones en dehors de cône d'influence (traits blancs) n'ont pas de signification statistique. L'échelle de cohérence est renseignée à droite des graphiques.