



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Cécile DARDEL

le mercredi 29 janvier 2014

Titre :

Entre désertification et reverdissement du Sahel :
Diagnostic des observations spatiales et in situ

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de recherche :

GET - UMR 5563 (CNRS/UPS/IRD)

Directeur(s) de Thèse :

Laurent KERGOAT, Chargé de Recherche CNRS (GET) : Directeur
Éric MOUGIN, Directeur de Recherche CNRS (GET) : co-Directeur

Jury :

Agnès BÉGUÉ, Chercheur CIRAD (MTD, UMR TETIS) : Rapporteur
Nicolas VIOVY, Ingénieur-Chercheur CEA (LSCE) : Rapporteur
Pierre DEFOURNY, Professeur (UCL) : Examineur
Thierry LEBEL, Directeur de Recherche IRD (LTHE) : Examineur
David LABAT, Professeur (UPS) : Examineur
Pierre HIERNAUX, Chargé de Recherche CNRS (GET) : Invité

REMERCIEMENTS

Bon, ben ça y est... Ma thèse est terminée, déjà. Trois ans qui ont passé très vite, presque trop vite ! Et ce grâce à tous ceux que j'ai eu la chance de côtoyer, qui m'ont entourée, et avec qui j'ai pu tour à tour m'instruire, échanger, voyager, ou simplement partager le café hebdomadaire du "Café Pierrot", souvent accompagné de douceurs culinaires d'Afrique, du Viêt-Nam, de Guyane et d'ailleurs.

Donc par où commencer la liste des personnes à remercier ? La question ne se pose pas tellement : par mon directeur de thèse, bien sûr ! Laurent, tu le sais déjà, mais je te le redis quand même : merci pour tout. Je n'aurais pas pu imaginer meilleur directeur de thèse que toi. Bon, j'avoue, je ne sais toujours pas différencier une pie d'un rouge-gorge (je persiste, un toucan, si !), mais j'ai appris à fièrement piétiner de la paille avec un pied de vache en fer forgé, ce qui n'est quand même pas négligeable (même si tu le fais mieux que moi !). J'espère surtout que cette étape qu'est la thèse n'est que le début d'une longue, très longue collaboration. Je crois bien que j'ai trouvé ma voie, et je te remercie de m'avoir guidée jusque là.

Monsieur Pierre Hiernaux, mon cher collègue, compagnon de bureau, ou plus familièrement mon cher "gourou", merci pour ces trois années passées en ta compagnie, dans notre bureau toulousain, à vélo, ou sur les pistes du Ferlo. Ma thèse n'aurait pas été la même sans toi et sans tes connaissances inépuisables du terrain. Grâce à tes récits et aux séances quasi quotidiennes sur Google Earth (sous le joug des 15 minutes autorisées par Mr Kergoat), j'ai pu me faire une idée des paysages du Gourma et du Fakara, que j'espère tout de même pouvoir arpenter un jour et en ta compagnie bien sûr. Je crois qu'il y a encore quelques vaches que tu n'as pas prises en photo... et moi, j'ai encore quelques noms d'espèces à apprendre, ou, pire, à ré-apprendre : entre "Tricératops" et "Balantines", y a encore du boulot !

Éric, merci pour tes conseils avisés, ta confiance, les conférences partagées, les leçons de "comment avoir son avion même au dernier moment"... Merci surtout pour avoir eu la patience, comme Pierre, de me donner quelques leçons de botanique (*Adenium Obesum* : trop facile !). Cette première mission dans le Ferlo a été un régal, et j'ai été particulièrement bien lotie de découvrir le terrain avec toi, Pierre, et Mamadou.

Manuela, merci beaucoup à toi pour tes conseils toujours appropriés, que ce soit pour toutes nos réunions de travail, pour l'écriture des articles, ou pour comparer des jeux de données acquis sur des périodes pas tout à fait identiques ! De toutes façons, il va falloir que je revienne très vite pour te convertir une fois pour toutes à Matlab, parce que IDL, vraiment, c'est pas possible...

Je voudrais également remercier très chaleureusement les rapporteurs de mon manuscrit, Agnès Bégué et Nicolas Viovy, qui ont alimenté les réflexions post-manuscrit et pré-soutenance (et post-soutenance également !). Merci à tous les deux pour votre intérêt pour mes travaux et pour m'avoir fait profiter de votre expertise, mais aussi pour votre gentillesse, et pour avoir contribué à faire du jour de la soutenance un jour très particulier pour moi. Merci aussi à vous, Pierre Defourny, pour avoir trouvé un petit moment entre le Congo, Washington et Rome pour être examinateur de ma thèse. Merci pour la justesse de vos remarques et pour votre bienveillance. Merci également à Thierry Lebel pour ses remarques constructives lors de la soutenance. J'espère avoir répondu à une de tes attentes exprimées lors des réunions AMMA-Catch, à savoir la mise en valeurs des données du S.O. pour des objectifs à l'échelle régionale. Enfin, merci à David Labat pour avoir accepté de présider mon jury.

Le long de ces trois ans, j'ai aussi eu la chance de bénéficier des conseils précieux de Jérôme Chave, Olivier Hagolle, et Philippe Ciais, qui ont pris de leur temps pour constituer mon comité de thèse. Merci à tous les trois pour ces réunions très constructives qui ont considérablement aidé à faire évoluer mes réflexions et a fortiori mes travaux. Un merci particulier à Philippe, grâce à qui nous avons pu bénéficier du jeu de NDVI GIMMS-3g, avantage non négligeable pour tirer profit au mieux des données terrain acquises sur les 3 dernières décennies. Ce qui m'amène à remercier Compton Jim Tucker et ses acolytes, Ranga Myneni et Jorge Pinzon, pour avoir partagé avec nous ce nouveau jeu de données. Merci pour votre confiance et pour votre intérêt dans nos travaux, j'espère que notre collaboration continuera.

Je voudrais également profiter de cette page pour rendre hommage à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la collecte des données terrain, dans le Gourma et dans le Fakara. Après deux missions sur le terrain, au Sénégal seulement et dans des conditions très faciles (je n'ai pas couvert 40 sites de 1 km, mais seulement 5 de 500 m...), je comprends beaucoup mieux l'ampleur de la tâche. Merci aux initiateurs des programmes, aux financeurs, aux ramasseurs, aux coupeurs, aux chauffeurs, aux compteurs d'arbres... Sans toutes ces petites (ou grandes) mains, ma thèse n'aurait simplement pas pu voir le jour, en tout cas pas sous cette forme. Nogmana, j'attends tout de même de voir ce que c'est que d'aller sur le terrain avec toi !

Je tiens également à remercier le CNES et la région Midi-Pyrénées pour avoir financé ces trois ans de recherches. Un merci particulier à Joëlle Guinle du CNES, pour le soutien logistique sans failles, même lorsque je lui demande l'impression urgente de mon manuscrit tout en étant injoignable au Sénégal pour les 10 jours suivants. Je remercie aussi l'ANR ESCAPE pour le financement de mes derniers mois de contrat, et aussi pour les financements "complémentaires" au quotidien du chercheur (conférences, déplacements, terrain...).

Côté GET, merci à tous ceux qui m'ont aidée à surmonter les diverses tracasseries administratives, logistiques ou informatiques, que ce soit pour commander des crayons (quel casse-tête !!), prendre un billet d'avion, faire un avenant de contrat, organiser une visioconf, imprimer sans souci... Un merci spécial à Valérie Ceccarel, d'une bonne humeur constante et épatante : c'est quoi ton secret ? Je suis très touchée que tu sois venue à ma soutenance.

Un peu dans le désordre, je pense aussi au chaleureux accueil qui nous a été réservé à l'auberge de Dahra, dans le village de Bowdi, ainsi qu'à nos chauffeurs IRD : l'inoubliable "Feu", Amadou Kane, et Aliou Diallo. Merci pour les échanges que l'on a pu avoir autour d'un carré de paille ou en mangeant notre (merveilleuse) ration quotidienne de sardines, et pour votre intérêt dans nos manip étranges.

D'un point de vue plus personnel, je voudrais remercier tous ceux qui m'ont soutenue au quotidien (ou supportée parfois !) et encore plus les derniers mois de rush, tous ceux qui ont pu être là pour ma soutenance, et tous ceux qui étaient avec moi en pensée.

Merci à toute l'équipe "AMMA" du GET, et ils sont nombreux ! Merci à Caroline et Elodie pour vos conseils de post-doctorantes affûtées, à Claire et Laetitia pour avoir comploté derrière mon dos, à Clément pour tes histoires japonaises farfelues, à Chi pour tes nombreuses attentions (et tes fameux nems !), à Christophe pour laisser des bonbons sans surveillance pendant tes séjours à l'ONERA, à Fabrice pour être toujours si mignon (j'ai pas dit grognon !), à Matias pour ton flegme argentin, à Marielle pour m'avoir fait découvrir ce qu'est un vrai ananas bien mûr, à Modeste pour ta grande générosité, à Mamadou pour ne pas m'avoir troquée contre un poste-radio dans le Ferlo, et enfin à Yves pour tes conseils inimitables en statistiques et logiciels libres (mais je préfère Matlab !).

Merci aussi à ceux qui étaient là et qui sont aujourd'hui ailleurs : à Bibi pour m'avoir ouvert la voie dans l'équipe, à Nathalie pour avoir galéré avec moi en IDL avant que je ne l'abandonne lâchement pour Matlab, à Clémentine pour ton mémorable accent chinois, à Malik pour ta gentillesse et aussi pour les galettes (même si tu l'accompagnes de café bizarre!). Merci à Valérie Le Dantec (pro de la gym !), à Emilie Delogu, et Claire Delon, pour votre compagnie dans nos voyages viennois ou italiens et pour vos connaissances culinaires locales. Un merci spécial à toi Françoise, pour nos soirées sénégalaises et toulousaines, et peut-être aussi pour avoir coaché ton mari pour qu'il prenne sur lui mon stress à moi (mais oui, ça a marché !) ! Merci aux collègues doctorants des autres disciplines, Angela, Guillaume, Jean-Louis, Adrien, pour le serrage de coudes dans les virages un peu plus serrés, et pour les dernières soirées. Merci au "Professeur "Damien Jacques, pour ta brillante proposition pour finir ce manuscrit plus vite. Bizarrement je ne l'ai pas retenue.

Merci à mes amis, qui se sont toujours montrés très présents et très encourageants. Merci à ceux qui ont pu venir le jour de la soutenance, ça m'a beaucoup touchée que vous soyez là. Je penserai à vous quand j'aurai des poissons entre les orteils, mais j'avoue, je ne sais pas encore en quels termes ! Merci à Mélina pour le test du resto du soir de soutenance, à Soso pour avoir été présente avec bébé Ludivine, à Julie E. pour ton soutien ces derniers mois et tes précieux conseils de nouvelle docteure, à Sylvain pour le gentil mot porte-chance d'avant soutenance, à Julie M. pour avoir lu mon article en entier (!), à Lola pour être venue malgré une invitation de dernière minute, à Sandrine pour le soutien de longue date. Merci à Chacao et Noah, Julia, Nico, Cyril, Caro, Marie-Laure, Jérôme pour votre présence. Merci à ceux qui n'ont pas pu être là mais qui, je le sais, ont pensé à moi très fort : ma Ninja (comme un poisson dans l'eau !), les Ju's Cammarata (et Léo !), Christophe le Docteur (malgré tes blagues pourries), Sboulie (et Colin Raymond Alain !), à Flavie la nouvelle Toulonnaise et Brice (bientôt ton tour !), à Sandra la parisienne... Un merci archi spécial à mon Elo, pour ces trois ans de soutien mais pas que, pour cette amitié sans failles surtout. Même si tu passes tes week-ends dans un lagon et tes vacances à l'île Maurice, je t'aime quand même. Ça vaut aussi pour toi Valou !

Et bien sûr, un très grand merci à ma famille, à commencer par mes parents, qui n'auraient pas pu m'aider plus ces derniers mois. Un merci spécial à ma maman, qui a assuré pour la préparation du pot, comme une chef. Merci à mes frères, Popo mon conseiller personnel en édition (stresse plus, j'ai fini !), Vince mon conseiller en logiciels libres (même si je ne suis pas très bonne élève). Merci à Gabi (j'attends tes questions !), à ma mamie qui est venue à ma soutenance (et qui a tout compris), à mon Oya pour avoir fait l'aller-retour de Marseille, à André pour vouloir maintenant vendre des tondeuses au Sahel, à Anneline et Mathias (le premier arrivé !), à Lionel pour ses photos... Merci à mon grand-père, Papillon, qui a déjà relu une partie de ce manuscrit, qui veut toujours tout comprendre, et qui je le sais, me réserve une deuxième séance de questions. J'arrête là parce que la liste est trop longue, mais merci à tous d'avoir pris le temps de penser à moi et de me le faire savoir (oncles, tantes, cousins, cousines...). Merci aussi à la famille Sarr pour m'avoir requinquée entre le manuscrit et la soutenance ! Quelques siestes par jour et un entourage de médecins n'étaient pas de trop... Maintenant, moi aussi je suis "docteur" !

Et enfin, merci à toi, Raymond Stephan Birame Sarr, pour tout ce que tu sais, et pour le reste aussi :)

Je voudrais terminer par une pensée particulière pour Yves Ménard, qui lors de mon stage de fin d'études avait très habilement et très discrètement réussi à insérer une petite pensée dans mon esprit : "pourquoi ne fais-tu pas une thèse ? pourquoi ne fais-tu pas une thèse ? ".

Yves, je le sais aujourd'hui, tu avais raison : je devais faire cette thèse.

RÉSUMÉ

Le Sahel est une région semi-aride caractérisée par un fort gradient bioclimatique et qui est particulièrement sensible à la variabilité des précipitations. Les périodes de très forte sécheresse qui ont sévi sur l'ensemble du Sahel entre les années 1970 et 1980 ont eu des effets dévastateurs sur les écosystèmes, les populations et leurs ressources. La théorie d'une désertification du Sahel a été ravivée, ainsi que celle prédisant une avancée rapide du Sahara sur le reste du continent. Dès les années 1990, l'analyse des premiers indices de végétation satellitaires (NDVI) acquises à l'échelle du globe à une fréquence temporelle journalière a mis en évidence une nette augmentation du NDVI depuis les années 1980. On parle alors de reverdissement du Sahel.

L'objectif de cette thèse est de faire la part de ce reverdissement et d'une éventuelle dégradation des écosystèmes sahéliens, sur les 30 dernières années.

Les indices de végétation satellitaires basés sur les propriétés optiques de la végétation verte sont de "simples estimateurs" de la production annuelle : la validation des tendances de NDVI sur le long-terme nécessite une vérité terrain. De telles données sont très difficiles à acquérir sur des échelles spatiales compatibles avec la résolution des satellites d'observation de la Terre et sur une période de temps permettant l'analyse de tendances temporelles. Dans le cadre du projet AMMA et de projets antérieurs, nous bénéficions de séries longues de masse de la strate herbacée pour deux régions : le Gourma au Mali (1984-2011) et le Fakara au Niger (1994-2011). La confrontation des deux sources de données (NDVI GIMMS-3g et productivité végétale mesurée sur le terrain) montre que le Sahel pastoral du Gourma est marqué par un reverdissement ainsi que par une augmentation de la productivité végétale mesurée in situ. En revanche, le Sud-ouest Nigérien montre une tendance à la baisse de ces deux variables. La cohérence des données de terrain avec les observations satellitaires confirme que le NDVI peut être utilisé comme outil de détection de l'évolution des écosystèmes semi-arides sur de longues périodes de temps. A l'échelle du Sahel, des tendances au reverdissement sont mises en évidence sur la plus grande partie de la région, sur la période 1981-2011.

L'analyse du RUE, le rapport de la production par le cumul de pluie, a montré que le reverdissement du Gourma est majoritairement expliqué par le rétablissement des précipitations, et que les écosystèmes sahéliens sont particulièrement résilients aux événements climatiques extrêmes. Cette résilience, cependant, est surtout mise en évidence pour les sols profonds sableux. Des changements contradictoires sont en effet observés sur la partie du paysage constituée de sols superficiels qui connaissent une augmentation des coefficients de ruissellement et de l'érosion, provoquant parfois une dégradation du couvert végétal. Le reverdissement observé à l'échelle du Gourma doit donc être nuancé par des changements des écosystèmes pouvant toucher une petite portion du paysage (les sols superficiels). Sur le Fakara nigérien, des tendances à la dégradation du couvert herbacé sont mises en

évidence par les deux sources de données et ne sont pas expliquées par les précipitations. Les changements d'occupation du sol (augmentation des superficies cultivées, raccourcissement des temps de jachère) peuvent expliquer une diminution de la fertilité du sol et donc de la capacité de production de la région.

Nous n'observons donc pas de désertification du Sahel sur les 30 dernières années mais bien une reprise généralisée de la végétation qui suit globalement le rétablissement des précipitations. Cela n'exclut pas que dans certaines régions, ou à l'échelle locale, une dégradation du couvert puisse aussi être observée, comme par exemple sur les sols soumis à une forte érosion ou sur quelques terroirs agricoles, ce qui tend à réconcilier les deux théories.

Mots-clés : Afrique, Sahel, désertification, reverdissement, NDVI, végétation, productivité, télédétection, satellite, RUE, GIMMS-3g, MODIS.

ABSTRACT

The Sahel region is characterized by a strong bioclimatic gradient and is very sensitive to climatic fluctuations and especially to rainfall variability. Two successive and particularly severe droughts occurred in the 1970's and in the 1980's over the whole Sahel region, which had dramatic impact on the populations and their resources. The theory of a Sahel suffering from desertification was then refueled, as well as the view of a Sahara desert marching rapidly through the rest of the African continent. The analysis of the first remote sensing observations suitable for vegetation monitoring (available since the 1980's) proved to be at odds with these desertification assessments. Indeed, the satellite vegetation indices and particularly the NDVI evidenced strong positive trends, meaning that a significant increase in vegetation productivity occurred at the regional scale. This phenomenon was called "re-greening".

However, no regional validation of such trends was possible due to the scarcity of field observations of vegetation. The objective of this work is to evaluate whether re-greening is actually happening over the Sahel or if some degradation trends of Sahelian ecosystems can be detected as well, using both field observations of vegetation and long-term NDVI data (GIMMS-3g NDVI).

Within the framework of the AMMA-Catch observatory and of previous field programs, we now have almost 30 years of field observations in the Gourma region in Mali (1984-2011) and almost 20 years in the Fakara region in south-western Niger (1994-2011). The comparison of these two data sources (GIMMS-3g NDVI and vegetation productivity measured on the field) evidences strong re-greening patterns over the pastoral Gourma as well as an increase in vegetation productivity measured on the field. In contrast, the Fakara region in south-western Niger reveals decreasing trends for both variables. The consistency of satellite and field data confirms that NDVI can be used as a reliable tool for monitoring vegetation changes in semi-arid ecosystems and over long periods of time. At the Sahel scale, a strong re-greening pattern is found over the major part of the region over the 1981-2011 period.

By analyzing the RUE index (the ratio of production to rainfall) we show that the re-greening observed over the Gourma is mainly explained by the rainfall recovery over the same period, thus showing the ecosystems' resilience to extreme climatic events. This resilience nature, however, is mainly found for the deep sandy soils of the area. Contrasted changes are observed over a small part of the landscape composed of shallow soils which experienced an increase in soil erosion and run-off coefficients, sometimes leading to vegetation decay. The re-greening observed at the Gourma scale should thus consider changes in the ecosystem functioning that may occur in a small portion of the landscape (the shallow soils).

The decreasing trend observed over the Fakara region is not explained by rainfall. Changes in land use (strong increase in cultivated areas, shortening of the fallow duration) may lead to a decline in soil fertility which could explain the loss in vegetation productivity over the past 20 years.

Thus, we do not observe any extensive desertification of the Sahel region over the past 30 years, but we do observe a global recovery of vegetation which mainly follows the precipitation recovery. It does not exclude though that some degradation may occur in a few regions or at the local scale, for instance over the surfaces under strong erosion or over some agricultural lands, which tends to reconcile both theories.

Key-words: Africa, Sahel, desertification, re-greening, NDVI, vegetation, productivity, remote sensing, satellite, RUE, GIMMS-3g, MODIS.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
ANPP	Aboveground Net Primary Production
CILSS	Comité Inter-états de Lute contre la Sécheresse au Sahel
DNM	Direction Nationale de la Météorologie (Mali, Niger)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIT	Front Inter-Tropical
fPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies
GIMMS-3g	GIMMS Third Generation
GLASOD	Global Assessment of Human-induced Soil Degradation
HAPEX	Hydrological and Atmospheric Pilot EXperiment in the Sahel
IER	Institut d'Économie Rurale (Mali)
ILRI	International Livestock Research Institute
ITD	Inter-Tropical Discontinuity
JEA	Jet d'Est Africain
JET	Jet d'Est Tropical
LTDR	Land Long Term Data Record
MAO	Mousson d'Afrique de l'Ouest
MODIS	MODERate resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	Net Primary Production
PAR	Photosynthetically Absorbed Radiation
PMR	Precipitation Marginal Response
POES	Polar-orbiting Operational Environmental Satellites
RUE	Rain Use Efficiency
SST	Sea Surface Temperature
UNCOD	United Nations Conference On Desertification
UNEP	United Nations Environment Programme
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
RÉSUMÉ.....	7
ABSTRACT	9
Liste des abréviations et acronymes	11
SOMMAIRE	12
INTRODUCTION.....	15
CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL	19
1. SAHEL ET CLIMAT.....	19
1.1. Présentation générale	19
1.2. La mousson africaine	21
1.3. Paléoclimat	23
2. LES ÉCOSYSTÈMES SAHÉLIENS	27
2.1. Description du "paysage sahélien"	27
2.1.1. La végétation : entre steppe et savane.....	27
2.1.2. Le réseau hydrographique	28
2.1.3. Les principaux types de substrat.....	28
2.2. Les principaux facteurs qui expliquent la variabilité du couvert végétal	30
2.2.1. La pluviométrie	30
2.2.2. Les sols	30
2.3. Quelques caractéristiques spécifiques de la végétation sahélienne	31
2.3.1. Composition du tapis herbacé.....	31
2.3.2. Les types de photosynthèse	32
2.3.3. Les différentes étapes de la croissance des herbacées.....	32
2.3.4. La strate ligneuse	34
2.4. Pression de l'agriculture sur le milieu naturel.....	35
2.4.1. L'agriculture, moyen de subsistance	35
2.4.2. Description des principaux modes de culture.....	36
2.4.3. La dynamique récente des surfaces cultivées.....	36
3. LA DÉSSERTIFICATION, UNE PRÉOCCUPATION ANCIENNE	38
3.1. Définition.....	38
3.2. L'institutionnalisation	41
3.3. Processus physiques et causes potentielles	43
4. LA DÉSSERTIFICATION CONTROVERSÉE DU SAHEL	44
4.1. Les premiers témoignages	44
4.2. L'avancée du désert.....	45
4.3. La théorie de rétroaction climatique (albédo).....	48
CHAPITRE 2. LA TÉLÉDÉTECTION AU SERVICE DU SUIVI DE LA VÉGÉTATION	50
1. LES INDICES DE VÉGÉTATION SATELLITAIRES.....	50
1.1. Propriétés optiques de la végétation.....	50
1.2. A bord des satellites.....	52
1.2.1. Principe de la mesure.....	52
1.2.2. Sources d'erreur et d'incertitude	52

2. L'INDICE DE VÉGÉTATION NORMALISÉ (NDVI).....	54
2.1. Historique.....	54
2.2. Caractéristiques et limitations du NDVI.....	55
2.3. Autres indices	57
2.4. Estimation de la productivité à partir du NDVI.....	58
3. LES PRINCIPAUX JEUX DE NDVI	59
3.1. Les capteurs AVHRR.....	59
3.1.1. <i>Caractéristiques des instruments</i>	59
3.1.2. <i>Jeux de NDVI issus des données AVHRR</i>	61
3.1.3. <i>Évaluation de la qualité des données AVHRR</i>	64
3.2. Les capteurs récents.....	65
3.2.1. <i>Le NDVI MODIS</i>	66
3.2.2. <i>Autre capteurs</i>	68
CHAPITRE 3. LE SAHEL REVERDIT-IL ?	69
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	69
1.1. Définition du reverdissement.....	69
1.2. Comment valider les tendances observées par satellite	70
1.2.1. <i>Les données terrain</i>	70
1.2.2. <i>Programmes internationaux initiateurs de la collecte des données</i>	71
1.3. Objectifs de l'étude	73
1.4. Méthodes	74
1.4.1. <i>Approche temporelle</i>	74
1.4.2. <i>Approche spatiale</i>	74
2. PUBLICATION DANS LA REVUE <i>REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT</i>	76
3. LES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET LEUR INTERPRÉTATION	92
3.1. Validation du produit NDVI GIMMS-3g.....	92
3.2. Étude des tendances.....	92
3.2.1. <i>A l'échelle du Sahel</i>	92
3.2.2. <i>Comparaison avec les données terrain</i>	93
3.2.3. <i>Sensibilité des tendances à la période considérée</i>	93
3.2.4. <i>Phénologie</i>	93
3.3. Interprétation des tendances	94
3.3.1. <i>Le Gourma et l'importance du type de sol</i>	94
3.3.2. <i>Le Fakara et la dynamique de l'occupation du sol</i>	95
3.3.3. <i>La dynamique du couvert ligneux</i>	96
CHAPITRE 4. COMMENT EXPLIQUER LE REVERDISSEMENT DU GOURMA ?	98
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	98
1.1. Le RUE, un indicateur de dégradation	98
1.2. Les limitations du RUE.....	99
1.3. Le paradoxe Sahélien.....	100
1.4. Objectifs de notre étude	101
2. PUBLICATION DANS LA REVUE <i>REMOTE SENSING</i>	101
3. PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONCLUSIONS.....	127
3.1. Relation entre ANPP, NDVI et précipitations.....	127
3.2. RUE et résidus d'ANPP	127
3.3. Stabilité du RUE et paradoxe sahélien : en contradiction ?.....	128

CHAPITRE 5. PEUT-ON EXPLIQUER LA VARIABILITÉ DU RUE À L'ÉCHELLE LOCALE (GOURMA)?	130
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	130
2. RETOUR SUR LES DONNÉES TERRAIN : LES SOURCES D'INCERTITUDES.....	132
2.1. Incertitudes sur l'estimation de la masse à chaque ligne	133
2.2. Incertitudes liées à la date de mesure	133
2.2.1. <i>Le maximum de masse comme estimateur de l'ANPP</i>	133
2.2.2. <i>Correction de la variabilité dans la date de mesure du maximum de masse</i>	134
2.3. Incertitudes liées à la "sélection" des sites.....	136
2.4. Incertitudes liées aux feux de brousse et à l'herbivorie.....	138
3. RELATION INDVI/ANPP À L'ÉCHELLE DU SITE	138
4. ANPP, RUE ET PRÉCIPITATIONS.....	142
4.1. Relation ANPP / précipitations	142
4.2. Relation RUE / précipitations	144
5. PEUT-ON EXPLIQUER LA VARIABILITÉ DU RUE ?.....	145
5.1. Influence de la distribution des pluies ?	145
5.2. Influence de la composition floristique sur la variabilité interannuelle ?	147
5.2.1. <i>Évolution de la composition floristique sur la période</i>	148
5.2.2. <i>Lien avec la production herbacée et les résidus d'ANPP/précipitations</i>	150
6. PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONCLUSIONS.....	151
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	152
LISTE DES FIGURES	162
LISTE DES TABLEAUX.....	164
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	165
ANNEXES	181

INTRODUCTION

La connaissance du monde dans lequel nous vivons et de son évolution représente un enjeu central pour appréhender l'avenir, dans un contexte de pression démographique grandissante, d'évolution des usages des terres, et de changement global. Les ressources en eau et les ressources agro-alimentaires en particulier revêtent une grande importance dans de nombreuses régions du monde. Pour mieux prévoir l'avenir (via des modèles par exemple), il faut comprendre les mécanismes impliqués dans l'évolution de ces ressources mais aussi être en mesure de connaître l'état actuel des choses. Ainsi, une étape importante réside dans la surveillance de l'environnement qui nous entoure.

Dans cette thèse nous nous intéresserons plus particulièrement à l'évolution de la végétation, qui est un des éléments principaux des surfaces continentales, en interaction continue avec les autres composantes du climat. La végétation constitue une ressource majeure pour la population humaine en tant que ressource alimentaire pour l'homme et pour le bétail, comme ressource pour l'énergie (biomasse), et pour plusieurs aspects que l'on regroupe maintenant sous le terme de "services écosystémiques". L'évolution de la végétation a ainsi été suivie avec grande attention par de nombreux acteurs (scientifiques, institutionnels, médias, société civile...) depuis des décennies. Les zones arides et semi-arides ont reçu un intérêt tout particulier en raison de leur grande sensibilité aux variations climatiques : ces écosystèmes ont été sujets à d'impressionnants changements suivant les fluctuations du climat. Or ces régions représentent une grande partie des terres émergées de la planète (plus d'un tiers), abritent une très grande partie de la population totale de la Terre, qui dépend souvent fortement des ressources liées à la végétation.

Le Sahel, qui peut être défini comme la région d'Afrique de l'Ouest qui s'étend de l'extrémité sud du désert du Sahara aux régions plus humides des forêts guinéennes, et d'ouest en est de Dakar à Djibouti, a été l'objet de préoccupations particulières. C'est d'abord une zone de transition bioclimatique caractérisée par un très fort gradient des pluies et de la végétation, ce qui la rend très sensible aux variations du climat, et particulièrement à la variabilité de la pluie. Dans son passé récent, l'ensemble de la région a connu un épisode de sécheresse très long et très sévère qui a duré du début des années 1970 jusqu'au milieu des années 1980. Ces sécheresses, qui ont eu des impacts dramatiques sur les populations locales et leurs ressources (famines, migrations des populations, décès d'une partie du bétail...), ont contribué à raviver un débat qui existait déjà de longue date : **le Sahel est-il en train de se désertifier ?** Depuis le début du XX^e siècle, plusieurs études scientifiques, par ailleurs de plus en plus relayées par les médias, ont par exemple régulièrement avancé que le désert du Sahara était en train d'envahir le reste du continent africain, et que ce phénomène semblait être irréversible. Dans les années 1970 et 1980, suite aux sécheresses, cette théorie a retrouvé de l'éclat, tandis que le fossé se creusait entre les "partisans" de la théorie de la désertification et ses "opposants". La désertification est ainsi un phénomène qui menace et qui effraie, mais qui est aussi difficile à définir et à décrypter. Des

polémiques existent ne serait-ce que pour décider de la définition à adopter (qu'entend-on exactement par "désertification" ?) et les processus impliqués. Les institutions internationales tentent depuis les années 1960 d'évaluer l'étendue des dégâts et menaces attribués à la désertification à l'échelle de la planète, et aussi d'en comprendre les mécanismes afin de pouvoir proposer des solutions concrètes. Le rôle des activités humaines dans les changements de son environnement fait bien sûr l'objet d'une attention toute particulière. Cependant, la difficulté de disposer d'observations échantillonnées sur des échelles de temps et d'espace adaptées à la problématique rend les conclusions fragiles, et facilement critiquables.

L'apparition des premiers satellites d'observation de la Terre, dans les années 1970, a alors constitué une véritable révolution dans la manière d'aborder ces problématiques de dégradation des écosystèmes. Les satellites de télédétection mesurent la partie du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface de la Terre. Or, chaque type de surface a une "façon particulière" de réfléchir le rayonnement électromagnétique solaire. La végétation verte a pour particularité de fortement absorber les longueurs d'onde dans le rayonnement visible (et spécialement dans le rouge) mais de fortement réfléchir celles du proche infrarouge. Ainsi, les indices de végétation satellitaires basés sur les réflectances mesurées dans ces deux gammes de longueur d'onde permettent de différencier la végétation verte des autres types de surface, et donc d'en effectuer le suivi au cours du temps : grâce aux indices de végétation satellitaires, un suivi global et continu de la végétation est devenu possible sur l'ensemble de la planète, chose inaccessible jusqu'alors. Parmi ces indices, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est particulièrement utilisé, d'une part car il est facile à obtenir (il est calculé comme la différence des réflectances dans le proche infrarouge et dans le rouge, normalisée par leur somme), et d'autre part car il est un bon estimateur de la production primaire nette de la végétation. Les capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), installés à bord des satellites météorologiques de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) depuis 1981, fournissent des données particulièrement adaptées au suivi du couvert végétal sur le long-terme et à l'échelle globale, puisqu'elles sont fournies à une résolution spatiale de 1 km et une résolution temporelle journalière.

Les premières analyses des tendances temporelles de l'indice NDVI sur la région sahélienne mettent alors en évidence une augmentation significative de la couverture végétale sur l'ensemble de la région depuis les années 1980, contrairement à ce qui était attendu par les partisans de la théorie de la désertification. Cette augmentation observée par satellite, nommée "reverdissement", a été confirmée au fur et à mesure que les séries temporelles de NDVI s'enrichissaient d'années d'observations supplémentaires (les premières études se basaient sur une dizaine d'années de données ; aujourd'hui, plus de trente années d'observations sont disponibles). Cela reste néanmoins une observation "spatiale" des écosystèmes sahéliens, dont il est difficile de connaître la précision ou même la justesse.

Dans le même temps et de manière contradictoire, des études ont observé sur la même région des indications de dégradation exprimées par l'augmentation de l'érosion et des coefficients de ruissellement sur les sols superficiels. Cette augmentation des coefficients de ruissellement a induit entre autres une augmentation du nombre de mares et de leur superficie depuis les années 50, des écoulements accrus des rivières sahéliennes, et ce malgré des niveaux de pluie plus faibles que le niveau historique : c'est le "paradoxe sahélien".

La contradiction entre le reverdissement global observé sur la bande sahélienne et les indications de dégradation relevées sur les sols superficiels dans plusieurs zones de la région, associées aux changements de fonctionnement des éco-hydrosystèmes, pose donc question. Même en l'absence de changements du fonctionnement hydrologique, des travaux mentionnent régulièrement une dégradation des couverts végétaux, à une échelle locale cependant.

Il existe une difficulté majeure pour essayer de résoudre ces différentes contradictions: les données de NDVI ne sont qu'une estimation indirecte de la production primaire nette. Il est avéré que la relation entre NDVI et production végétale est forte, mais aussi qu'elle peut être mise à mal par diverses sources d'erreur. Par exemple, la présence d'une couverture nuageuse, ou encore la traversée de l'atmosphère par le rayonnement vont modifier la quantité de rayonnement reçue par le capteur satellitaire et donc impacter le lien entre l'indice NDVI et la production végétale. D'autre part, l'analyse des tendances au cours du temps demande une grande vigilance. En effet, des changements dans la composition atmosphérique au cours du temps, la conjugaison de données acquises par différents capteurs (la durée de vie des satellites étant limitée, il faut utiliser plusieurs satellites à la suite les uns des autres pour obtenir des données sur le long-terme), la dérive des satellites au cours du temps, ou encore la dégradation des capteurs des satellites sur la période étudiée peuvent provoquer des fausses interprétations, si l'on interprète des tendances qui sont dues à ces causes externes comme une évolution de la couverture végétale. Pour toutes ces raisons, les tendances observées par satellite doivent être validées par des observations de terrain, qui constituent une référence mesurable. Cette référence est bien sûr soumise à ses propres sources d'incertitude, mais elle n'en constitue pas moins un outil indispensable pour mieux comprendre ce que l'on observe depuis l'espace, et donc pour valider les indices satellitaires.

Cependant, il est très difficile d'acquérir des données terrain de la végétation à des échelles spatiales compatibles avec les satellites, et sur une période de temps aussi longue que plusieurs décennies : les données acquises dans les réseaux du monde entier sont généralement échantillonnées sur un petit nombre de sites et un petit nombre d'années. Dans les régions sahéliennes ces difficultés sont exacerbées, les infrastructures de suivi environnemental n'étant pas toujours développées, ou durables.

Or dans notre étude, nous bénéficions d'observations de terrain dans deux régions du Sahel qui sont la région du Gourma au Mali et la région du Fakara au Niger. Ces données sont disponibles depuis

plusieurs décennies (depuis 1984 pour le Gourma, 1994 pour le Fakara). Nous avons donc une occasion unique de comparer une "vérité terrain" aux données de NDVI, qui sont, elles, disponibles sans interruption de 1981 jusqu'à aujourd'hui (jeu GIMMS-3g).

Les différentes questions abordées dans cette thèse sont donc les suivantes :

- Peut-on utiliser les observations satellitaires pour détecter les changements du couvert végétal dans les régions semi-arides ? Les données terrain de productivité valident-elles les tendances observées par satellite ?
- Quelles sont les tendances de la production végétale à l'échelle du Sahel sur la période 1981-2011, et sur les régions du Gourma et du Fakara ?
- Comment peut-on expliquer ces tendances ? Quel est le lien avec les précipitations, et quelle est la part de changement que l'on peut attribuer aux facteurs d'origine anthropique ?
- Comment peut-on réconcilier les observations contradictoires d'un reverdissement du Sahel et d'une augmentation de l'érosion et du ruissellement sur les sols peu profonds ?

Afin de répondre à ces questions, ce manuscrit s'articule en 5 chapitres. Après cette courte introduction, qui expose la problématique générale de cette thèse, les deux premiers chapitres présenteront plus en détails les éléments de contexte nécessaires à sa compréhension. Dans le premier chapitre nous allons tout d'abord revenir sur les caractéristiques du climat et du couvert végétal sahéliens, ainsi que sur la thématique de la désertification. Dans le second chapitre nous décrirons comment le suivi de la végétation est possible grâce aux satellites de télédétection, puis nous définirons l'indice du NDVI tout en décrivant les biais qui sont indissociables de cet indicateur. Le troisième chapitre abordera directement la question du reverdissement du Sahel, en s'articulant autour d'une première publication. Le quatrième chapitre, construit autour d'une seconde publication, s'intéressera à l'indicateur du RUE (le ratio de la production primaire nette et des précipitations) dans la région du Gourma, ainsi qu'au paradoxe sahélien, c'est-à-dire la contradiction entre reverdissement et augmentation des coefficients de ruissellement de surface. Enfin, le cinquième et dernier chapitre s'intéressera au fonctionnement propre des différents sites de suivi du réseau du Gourma, et plus particulièrement à la variabilité de la production et du RUE sur les sites sableux du Gourma, pour essayer d'affiner et d'enrichir les résultats de l'étude du Gourma dans son ensemble.

Chapitre 1. Contexte général

1. Sahel et climat

1.1. Présentation générale

L'Afrique subsaharienne est habituellement décrite en quatre sous-régions qui sont les domaines dits saharien, sahélien, soudanien, guinéen, et qui pour l'hémisphère nord s'étendent du nord au sud (Trochain 1940, Monod 1957, Boudet 1974, Le Houerou 1976). Ces domaines s'étagent suivant le gradient éco-climatique et biogéographique nord-sud et sont notamment différenciés par leur régime pluviométrique et les principales caractéristiques de la couverture végétale (Aubreville 1949, Le Houerou 1989). Le Sahel est ainsi une zone de transition éco-climatique qui s'étend du désert du Sahara au nord aux régions soudaniennes plus humides au sud, et d'est en ouest de l'Atlantique jusqu'à la mer Rouge (Figure 1). Le climat y est dit semi-aride. Le régime des précipitations est soumis à une très forte variabilité spatiale et temporelle et est également caractérisé par un fort gradient nord-sud en moyenne climatique (Le Barbé & Lebel 1997). La majorité des précipitations sont concentrées en une seule saison des pluies (régime pluviométrique unimodal) à la différence des régions guinéennes où le régime peut être bimodal. La saison des pluies s'étend ainsi globalement de début juillet à fin septembre, le maximum des précipitations ayant lieu au mois d'août. La saison des pluies dure de 1 à 2 mois au nord du Sahel et de 4 à 5 mois au sud.

Mais pour commencer, la définition même du Sahel est sujette à controverse. Le terme "Sahel" vient du mot arabe qui signifie "côte" ou "frontière", et fait donc explicitement référence à un milieu de transition écologique et climatique. Nous ne considérerons pas ici le Sahel "du Nord", aux marges nord du Sahara.

Une définition communément utilisée s'appuie sur les pluviométries moyennées sur plusieurs décennies, mais les seuils varient selon les auteurs. Généralement les isohyètes utilisées sont celles de 100 à 200 mm/an pour la limite nord et de 500 à 700 mm/an pour la limite sud (Aubreville 1949, Le Houerou & Popov 1981). De plus, la forte variabilité pluviométrique (interannuelle, décennale) implique que la position latitudinale des isohyètes moyennes varie fortement en fonction de la période de référence. Les frontières du Sahel sont par exemple significativement différentes selon qu'elles sont définies par les isohyètes moyennes sur la période 1940-1967, période relativement humide, ou sur la période 1968-2000, beaucoup plus sèche (Figure 1). D'autres auteurs suggèrent toutefois qu'une meilleure définition du Sahel s'appuierait sur les coefficients de variation des précipitations annuelles. En s'appuyant sur le gradient nord-sud, Le Houerou (1976) propose ainsi les définitions suivantes: la

zone guinéenne correspond à des coefficients de variation entre 12 et 15% ; les zones soudano-sahélienne à des coefficients autour de 25%; la zone saharo-sahélienne entre 40 et 45% ; et des coefficients jusqu'à 80% délimitent la frontière sud du Sahara. Enfin, le Sahel est parfois simplement défini comme la région s'étendant entre les latitude 12° et 18°N. De manière générale, les conditions climatiques sont relativement uniformes d'Est en Ouest, mis à part à l'extrême Est de la région (Est du Soudan, Ethiopie) où la forte topographie impacte climat et végétation. Ces régions ne sont donc généralement pas considérées comme faisant partie de la région sahélienne.

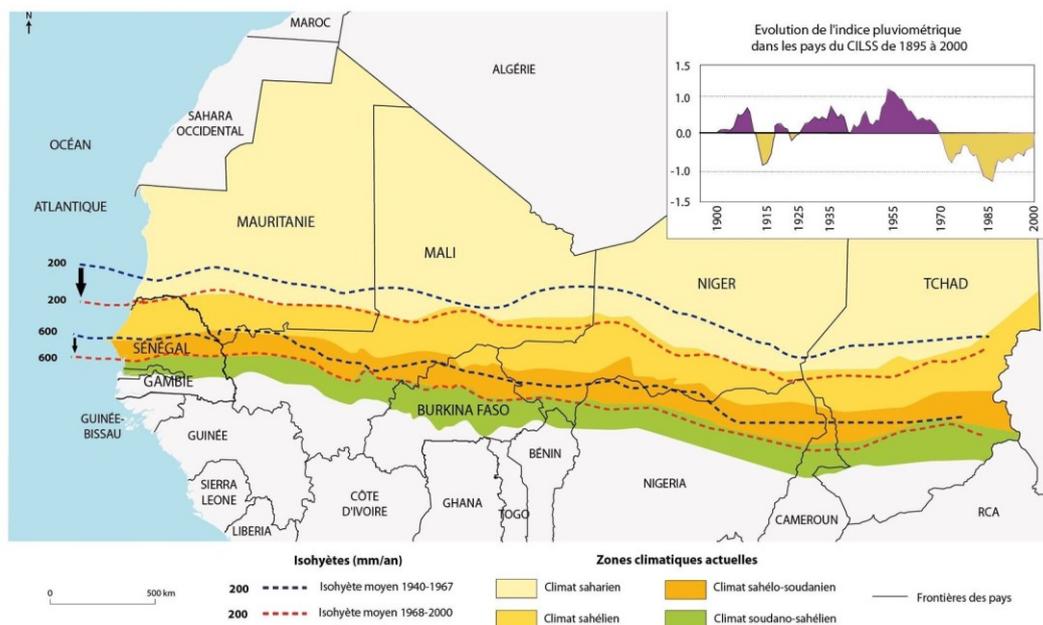


Figure 1. Schématisation des différentes régions éco-climatiques de la zone sahélienne (source : Centre Régional Agrhytmet 2007).

Le Sahel peut encore être décrit en considérant deux sous-régions où, en raison du gradient climatique, des différences fortes existent en termes de densités de population et d'usage des sols. Au nord (Sahel stricto sensu et transition saharo-sahélienne) les populations rurales sont souvent pastorales et nomades. Les précipitations annuelles sont insuffisantes et les sols trop peu fertiles pour permettre de développer une activité agricole conséquente (Cissé 1986, Ag Mahmoud 1992). Les superficies cultivées représentent moins de 3% sur la commune de Hombori au Mali (15.3°N), par exemple (Hiernaux *et al.* 2009c). Plus au sud (transition sahélo-soudanienne), les conditions climatiques étant plus favorables, la pression démographique est plus importante et des cultures (de rente et vivrières) subviennent à une partie des besoins nutritionnels et économiques des populations. Les cultures sont pluviales, l'usage de l'irrigation très limité mais localement importante (par exemple les périmètres irrigués de l'office du Niger ou dans la vallée du fleuve Sénégal), et les pratiques culturales peu intensifiées (il y a par exemple peu de mécanisation de l'agriculture). Le pastoralisme est également très présent: l'usage des terres est souvent agro-pastoral (l'importance relative de l'élevage étant cependant très variable, parfois inexistante). Les terres non cultivables sont réservées au passage des

troupeaux ("parcours pastoraux"), tandis que les terres cultivées le sont en un système de rotation culture/jachère.

1.2. La mousson africaine

La saison des pluies sahélienne est directement liée au régime de mousson africaine. Ce phénomène est complexe et de nombreuses études ont récemment porté sur le sujet, en particulier lors du projet AMMA (Redelsperger *et al.* 2006), projet international alliant observations et modélisation.

Le principe de base du phénomène de mousson réside dans le déplacement saisonnier de vents dû à des contrastes thermodynamiques importants entre le continent (le Sahara) et l'océan (l'Atlantique Équatorial) (Figure 2). Nicholson (2013) oppose une version simplifiée classique de la mousson à un schéma un peu plus complexe. La version classique repose principalement sur les migrations saisonnières de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT ou ITCZ en anglais), qui peut être définie comme la zone de convergence des vents chauds et secs venant du Sahara (l'Harmattan) et des vents plus frais et humides venant de l'océan Atlantique, et qui suit peu ou prou l'équateur solaire dans ses déplacements. La rencontre de ces deux circulations atmosphériques (Harmattan et flux de mousson), conjuguée au maximum de flux solaire incident, crée des conditions thermodynamiques instables qui vont induire des fortes précipitations convectives. Dans ce schéma, les précipitations sont donc essentiellement liées à des déséquilibres thermodynamiques méridiens.

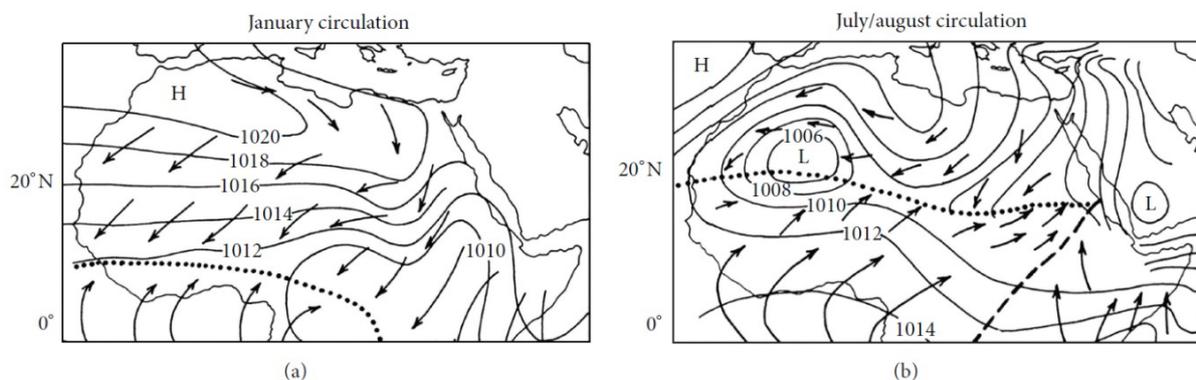


Figure 2. Schématisation des vents de surface (flèches) et des pressions atmosphériques (en mb) en Afrique de l'Ouest en a) hiver boréal et b) durant le pic de mousson (juillet-août) (source : Nicholson (2013)).

Ce schéma simplifié de la mousson correspond en fait aux circulations de Hadley, qui expliquent la redistribution de l'énergie des tropiques vers les moyennes latitudes à l'échelle globale, mais qui peuvent être largement déformées à l'échelle régionale et particulièrement sur les continents, justement là où existent les véritables moussons. Si l'on regarde un peu plus en détails la mousson africaine, on s'éloigne significativement de ce schéma simplifié. Par exemple, les précipitations sur l'Afrique de l'ouest se déclenchent sur une bande de latitude large, et le front de convergence des vents (FIT pour

Front Intertropical ou ITD pour Intertropical Discontinuity) est observé à 1000 km au nord de la zone de précipitations maximales.

Dans une vision méridienne un peu plus complexe que propose Nicholson (2009), plusieurs autres éléments entrent en ligne de compte, comme le Jet d'Est Africain (JEA), le Jet d'Est Tropical (JET), la dépression Saharienne, et les ondes d'Est. Le principe général de migration saisonnière des vents de basse couche de l'océan vers le continent dans une direction sud-ouest nord-est reste inchangé, mais les flux atmosphériques montrent une circulation plus complexe, comme illustré dans la Figure 3.

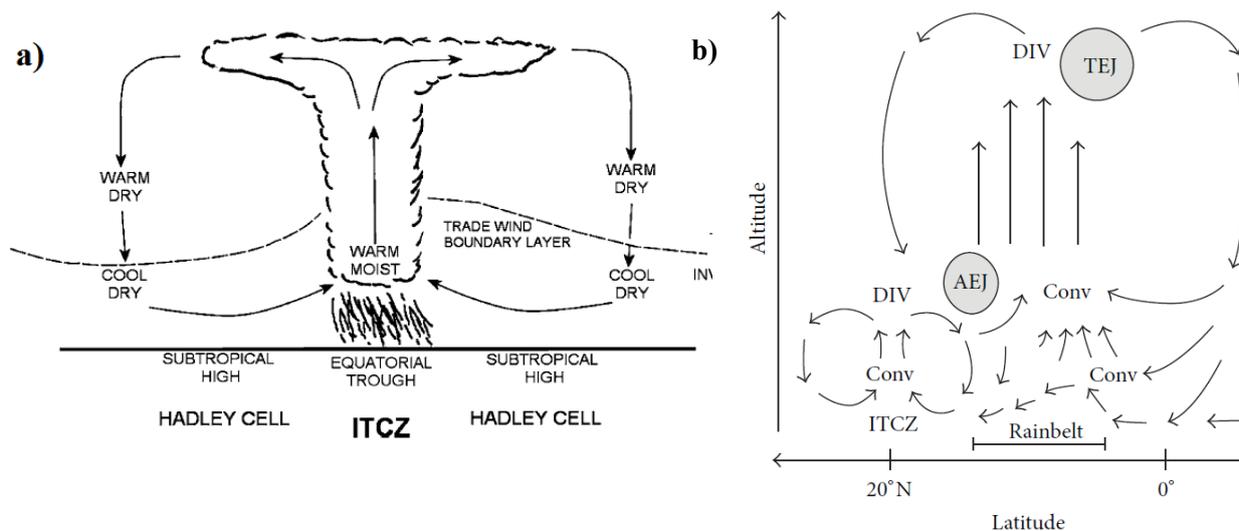


Figure 3. Schématisation a) de la ZCIT "classique" simplifiée et b) du fonctionnement de la mousson africaine moins simplifiée (AEJ et TEJ = acronymes anglais pour JEA et JET ; source : Nicholson (2009)). Notons que Nicholson nomme ZCIT ce que l'on nomme plus communément ITD.

D'un point de vue chronologique, Thorncroft *et al.* (2011) distinguent 4 phases dans la MAO : les phases océanique, côtière, transitoire et sahélienne. La phase océanique a lieu de novembre à mi-avril et induit une large ceinture des précipitations juste au nord de l'Équateur. La phase côtière a lieu aux environs de la mi-juin et induit un pic des précipitations au-dessus de l'océan aux environs de 5°N. Cette phase est à l'origine de la première saison des pluies en région guinéenne. La phase transitoire est caractérisée par une baisse des précipitations et a lieu début juillet. Enfin, la phase sahélienne a lieu de mi-juillet à fin septembre aux environs de 10°N et présente les pics de précipitations les plus intenses. De la phase transitoire à la phase sahélienne (dite "continentale" par Lebel & Ali (2009)), il y a donc un déplacement très rapide du front de mousson entre les latitudes 5°N et 10°N que l'on appelle "saut de mousson" et qui est typique de la mousson africaine (Sultan & Janicot 2000, Janicot & Sultan 2001). Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce saut de mousson, mais aucun consensus n'a pour l'instant été adopté. Le saut de mousson a lieu autour du 24 juin mais est très inégal temporellement et spatialement, ce qui rend délicate la prévision du phénomène par les modèles. Le retrait de la mousson a lieu au contraire de manière très abrupte et uniformément sur toute la région sahélienne.

En ce qui concerne la MAO en général et la mousson sahélienne en particulier, on peut noter que la structure spatiale 3D, et non plus 2D (coupe méridienne) reçoit une attention grandissante ; cela se traduit par exemple par l'importance de la dépression thermique saharienne, qui se déplace en latitude et en longitude. Plusieurs études récentes (Pu & Cook 2012) mettent en évidence l'importance du flux venant de l'ouest (et non pas du sud) au travers d'un jet de basse couche. Ce mécanisme a l'avantage d'expliquer l'influence de l'Atlantique tropical sur la mousson sahélienne à des échelles interannuelle, multi-décennales et même paléoclimatique, et d'être compatible avec une forte influence des températures de l'Atlantique tropical sur les pluies sahéliennes.

On voit ici que le climat ouest africain est complexe. La plupart de ces considérations n'ont pas forcément de lien direct avec le sujet traité dans notre thèse, mais il est important de garder en tête les échelles de temps et d'espace de la variabilité climatique, importantes pour les écosystèmes, ainsi que d'éventuelles rétroactions des surfaces sur la mousson. De nombreuses études ont cherché à déterminer les interactions entre la mousson et les processus océaniques à plus grande échelle, comme le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation), ou la MJO (Madden-Julian Oscillation). Bien que les résultats ne soient pas tranchés, il est généralement admis que la température de surface des océans (SST) joue un rôle primordial dans l'établissement du régime de mousson. Il apparaît de plus en plus clairement que l'AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) exerce un contrôle majeur sur la mousson sahélienne (Knight *et al.* 2006). De manière générale, les interactions entre les différentes composantes du système demeurent un vaste sujet d'étude. Un consensus donnant aux SST le rôle de forçage de la mousson et aux surfaces continentales le rôle d'amplificateur a émergé au début des années 2000 (Giannini *et al.* 2003). Le rôle des feedbacks et des couplages est cependant loin d'être bien déterminé (Taylor *et al.* 2011).

En ce qui concerne les précipitations sahéliennes, les systèmes convectifs méso-échelle induisent la plus grande part des précipitations annuelles : les systèmes convectifs les plus intenses représentent 3 à 4% des événements pluvieux totaux, mais 80% du cumul des précipitations (Nesbitt & Zipser 2003). Ces systèmes convectifs provoquent de violents orages régulièrement organisés en lignes de grains. Les caractéristiques des précipitations ont été largement étudiées, notamment dans le cadre du Service d'Observation AMMA-Catch (Lebel *et al.* 2009).

1.3. Paléoclimat

Pour mieux comprendre les variations du climat aujourd'hui et se permettre d'analyser et d'interpréter des tendances sur les dernières décennies, il est important de considérer que le climat connaît des fluctuations à des échelles de temps bien plus grandes. Nous reprenons ici des éléments synthétisés par Brender *et al.* (2010). Nous n'allons décrire que les variations de la pluviométrie, mais cela va sans dire que cela s'applique à tous les compartiments du climat (sol, végétation, océan, atmosphère). Le climat sahélien a donc été marqué par des fluctuations spatio-temporelles très importantes des

précipitations, avec une alternance de phases très arides et de phases très humides. Il est également intéressant de noter que les anomalies sèches et humides sur plusieurs années semblent être bien plus fortes au Sahel que dans d'autres régions ayant des climats similaires (Nicholson & Palao 1993, Nicholson 2000).

Les changements à très long-terme (de plusieurs millénaires à plusieurs dizaines, voire centaines de millénaires) sont principalement liés aux fluctuations des paramètres orbitaux de la Terre, qui impactent directement la distribution saisonnière du rayonnement solaire, qui influe à son tour sur l'intensité et le positionnement de la mousson africaine. La réponse du système végétation-atmosphère à ces changements de forçage radiatif n'est cependant pas forcément linéaire (Rial *et al.* 2004) : parfois les hypothèses les plus probables reposent sur des effets d'hystérésis (Pielke *et al.* 1998), alors que parfois au contraire les changements sont supposés abrupts (Claussen *et al.* 1999). Durant la période glaciaire (de 120 000 ans à 10 000 ans avant notre ère), le Sahel et le Sahara ont connu des périodes d'extrême aridité (Le Houerou 1997). Il y a 21 000 ans, durant le dernier maximum glaciaire, la surface recouverte par le Sahara était ainsi bien plus importante que de nos jours (Jolly *et al.* 1998) (Figure 4). Des dunes fossiles exhumées à 5° plus au sud que leur limite actuelle témoignent de cette période (Talbot 1985).

Au contraire, durant l'Holocène (les 10 000 dernières années) les conditions ont été beaucoup plus favorables et le Sahara a connu une "période verte" où le climat était bien plus humide qu'aujourd'hui. Cela s'explique principalement par le renforcement de la saisonnalité du forçage radiatif solaire dû à l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la Terre autour de son axe. Ce renforcement a connu un maximum aux environs de 11 000 ans avant notre ère. En réponse à ces changements de saisonnalité, l'amplitude thermique entre océan et continent augmente alors significativement (l'océan ayant une plus grande inertie thermique que le continent, et une redistribution par la circulation océanique) ce qui crée un fort gradient de température et donc un renforcement du système de mousson (Braconnot *et al.* 1999, Joussaume *et al.* 1999, Zhao *et al.* 2005b, Braconnot *et al.* 2007). Entre -10 000 et -5 000 ans (la première moitié de l'Holocène), la mousson Africaine était donc beaucoup plus forte qu'aujourd'hui et le climat au Sahel et au Sahara beaucoup plus humide (Jolly *et al.* 1998). De nombreuses preuves de cette période existent, comme par exemple des oasis fossiles. Après -5 000 ans, le système de mousson s'est affaibli et a mené vers une aridification du Sahel et du Sahara (Jolly *et al.* 1998, Brooks 2004). La nature de ce changement n'est pas bien connue aujourd'hui. Certains auteurs penchent pour un affaiblissement abrupt du système de mousson (Claussen *et al.* 1999, Renssen *et al.* 2003), d'autres pour un changement beaucoup plus progressif (Kropelin *et al.* 2008a, Kropelin *et al.* 2008b). Durant les 2-3 derniers millénaires, par manque de données les fluctuations des précipitations en Afrique subsaharienne n'ont pas pu être reconstruites. A l'échelle de l'Holocène il apparaît donc que les précipitations dans la région saharienne et Subsaharienne ont connu des

fluctuations importantes à l'échelle de plusieurs millénaires, tout en tendant vers une aridification progressive sur le long-terme (Vernet 2002).

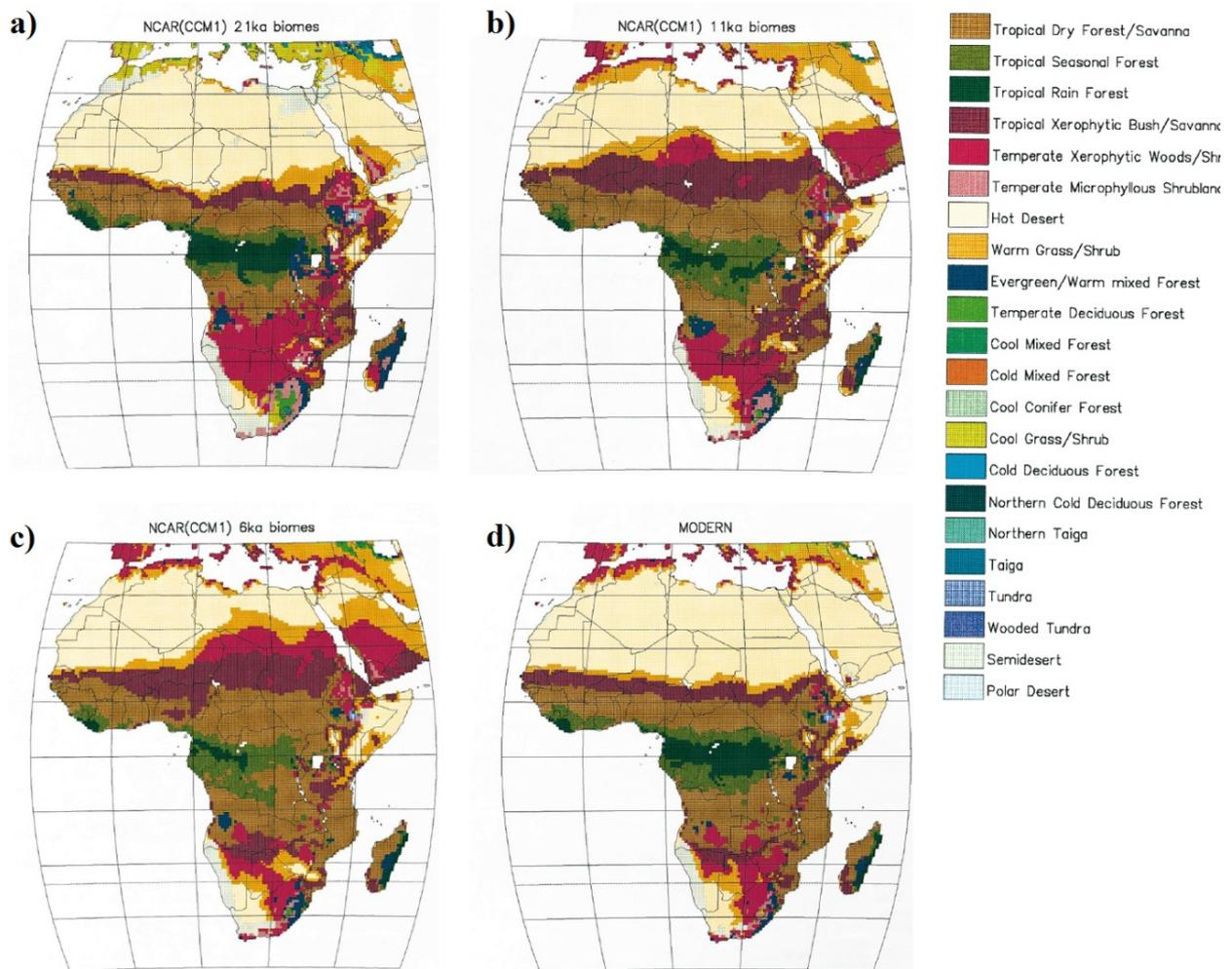


Figure 4. Résultats de simulations présentant la distribution des biomes il y a a) 21 000 ans, b) 11 000 ans, c) 6000 ans et d) aujourd'hui (source : Jolly *et al.* (1998)).

Si l'on se place sur les 1000 dernières années seulement, encore une fois il y eut une importante alternance de phases sèches et humides. Un épisode très aride eut lieu entre 300 av. J-C et 300 ap. J-C, suivi d'une période plus humide entre 300 et 1100 ap. J-C et à nouveau d'une période sèche entre 1100 et 1500 ap. J-C.. Selon Brooks (2004) une augmentation significative des précipitations a également eu lieu après 1500, suivie d'une diminution entre 1630 et 1660 qui fut à l'origine d'importantes sécheresses et famines au Sénégal et au Niger dans les années 1640 et 1660. Des méthodes et outils différents et indépendants (dépôts sédimentaires pour Shanahan *et al.* (2009) ; simulations numériques pour Kutzbach & Liu (1997) ; reconstruction paléoclimatique pour Gasse (2000), Jolly *et al.* (1998), deMenocal *et al.* (2000), Weldeab *et al.* (2007)) ont ainsi permis de mettre en évidence une tendance progressive à la diminution des pluies sur les 1000 dernières années, marquée épisodiquement par des épisodes de sécheresse dont la plus récente eut lieu entre 1400 et 1750 ap. J.C..

Plus récemment enfin, le siècle dernier a été caractérisé par un cycle très humide pendant les années 1950, suivi par deux sécheresses extrêmement sévères et persistantes (on parle souvent de 25 années de sécheresse) qui ont marqué le début des années 1970 et 1980 avec un pic très marqué en 1983 et 1984 (Figure 5, Figure 6). Ces sécheresses ont eu des conséquences extrêmement graves pour les populations et leurs ressources (décimation et vente des troupeaux, réduction très importante du couvert végétal, échec des cultures pluviales), ce qui a alimenté un débat déjà existant portant sur la désertification de la bande sahélienne (voir Chapitre 1.4.).

Depuis, plusieurs études (Nicholson & Palao 1993, Nicholson *et al.* 2000, Lebel & Ali 2009) ont pu montrer que les tendances étaient à l'augmentation des précipitations depuis les années 1990, en soulignant toutefois des différences entre l'ouest, le centre et l'est du Sahel: l'est a connu un retour des précipitations plus rapide (début des années 1990) que le centre et l'ouest du Sahel (milieu, voire fin des années 1990) (Figure 6). L'importance de la modulation par l'AMO a été également démontrée, la phase actuelle de l'AMO étant favorable à une bonne mousson Sahélienne. Pour quelques années encore, mais après ?

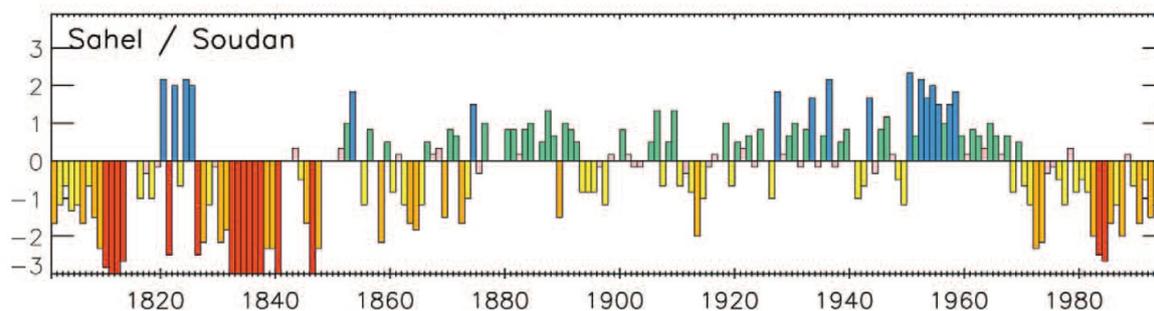


Figure 5. Indice d'humidité construit par Nicholson *et al.* (2012) à partir de relevés pluviométriques et de témoignages historiques. L'indice variant de -3 à +3 indique des conditions allant d'extrêmement sèches (-3) à extrêmement humides (+3) (source : Nicholson *et al.* (2012))

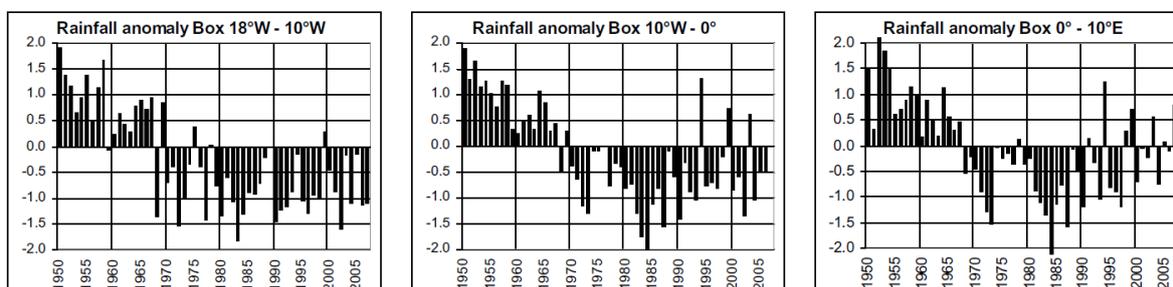


Figure 6. Anomalies annuelles des précipitations moyennées latitudinalement entre 11°N et 16°N, pour trois boîtes représentant l'Ouest (18°W-10°W), le centre (10°W-0°) et l'Est (0°-10°E) du Sahel (source : Lebel & Ali (2009)).

Lorsque l'on s'intéresse aux tendances des précipitations, il est donc très important de considérer que ces changements sont une partie intégrante de fluctuations climatiques qui ont lieu à des échelles de temps très diverses et parfois très longues. Les fluctuations à très-long terme liées aux changements de paramètres orbitaux de la Terre se superposent à des fluctuations dues à des modifications de la circulation de l'énergie entre l'atmosphère et l'océan, allant de l'échelle centennale à intra-saisonnière. Depuis des millénaires, le Sahara et le Sahel ont connu une alternance de phases très sèches et très humides. Les mécanismes à l'origine ne sont pas toujours bien identifiés, mais sont principalement associés à des fluctuations dans l'intensité et le positionnement du front de mousson. Sur la période qui concerne plus précisément notre étude, une longue phase de sécheresse a marqué les années 1970 et 1980, suivie par une reprise des précipitations depuis les années 1990 toutefois inégale entre l'ouest et l'est de la région sahélienne, l'ouest ayant connu des déficits pluviométriques plus tardivement.

2. Les écosystèmes sahéliens

Il est difficile de donner une description simple des écosystèmes et agrosystèmes occupant une si vaste zone. Nous allons néanmoins essayer de fournir ici les éléments essentiels à la compréhension de la structure et de la composition de la végétation sahélienne, afin d'avoir en tête les notions nécessaires pour interpréter les mesures effectuées sur le terrain et depuis l'espace. Cette description ne se veut pas exhaustive, mais elle s'applique cependant bien aux zones particulièrement étudiées par la suite du Gourma (Mali) et du Fakara (Niger). Les éléments généraux repris ici sont principalement issus des ouvrages de Penning de Vries & Djitéye (1982), de Cissé (1986), de Hiernaux & Le Houerou (2006), ainsi que des travaux de thèse de Yann Tracol (2004). Chacun de ces ouvrages fait également la synthèse des travaux de nombreux auteurs.

2.1. Description du "paysage sahélien"

2.1.1. La végétation : entre steppe et savane

La végétation sahélienne est généralement décrite comme une steppe à épineux constituée d'un couvert de plantes herbacées dominant et d'une strate ligneuse ouverte dont la densité augmente en allant vers le sud. La strate herbacée est majoritairement constituée de graminées annuelles de petite taille, tandis que le couvert ligneux est globalement très faible (moins de 5% du couvert total en moyenne, s'il faut donner une estimation chiffrée). Plus au sud (dans les régions soudano-sahélienne et sahélienne), le terme de "savane" est généralement utilisé à la place du terme "steppe", et fait référence à un paysage constitué d'une strate herbacée plus haute (supérieure à 80 cm) et à une strate ligneuse plus dense et

plus touffue. La hauteur des plantes ligneuses et leur densité détermine la dénomination en steppe ou savane herbeuse, buissonnante ou arborée.

2.1.2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de quelques grands fleuves (les fleuves Sénégal, Niger, Logone-Chari, Nil) et de petits cours d'eau éphémères qui prennent naissance à chaque saison des pluies. Dans les zones endoréiques, l'eau de pluie et de ruissellement est stockée dans des mares, quelquefois permanentes, souvent temporaires. Ces mares ont une grande importance pour la subsistance des populations locales et pour leurs troupeaux, les réserves en eau souterraines étant réduites par endroit, mais importantes sur certaines zones sédimentaires comme celles du continental terminal (Le Houerou 1980).

2.1.3. Les principaux types de substrat

La végétation sahéenne est très fortement contrainte par le type de substrat et notamment par la texture du sol (taille des particules qui le composent) qui, combinés à la topographie, déterminent en grande partie la variabilité spatiale du couvert végétal (en plus de l'influence de la pluviométrie, voir 2.2.1.). Le relief joue notamment dans la redistribution latérale de l'eau de pluie et détermine ainsi les coefficients de ruissellement, qui sont primordiaux pour les bilans d'eau du sol. La texture des sols est un paramètre important en cela qu'elle détermine la capacité d'infiltration de l'eau, la disponibilité en eau, l'évaporation, le colmatage (ou encroûtement) ou encore la fertilité des sols. Nous nous intéresserons ici à la couche superficielle des sols uniquement, puisque c'est celle qui a la plus grande influence sur la végétation sahéenne, caractérisée par des systèmes racinaires peu développés en profondeur (c'est surtout vrai pour les herbacées annuelles qui constituent la majorité du couvert). En termes de texture, nous distinguerons essentiellement les textures sableuse, limoneuse et argileuse, bien que toutes les nuances entre ces trois grands types soient représentées en réalité.

Le paysage sahéen est ainsi constitué de trois ensembles majeurs, qui sont les surfaces sableuses, les sols peu profonds (surfaces latéritiques ou affleurements rocheux, essentiellement composés de sols limoneux) et les zones argileuses de bas-fond, que l'on nommera par la suite les "dépressions argileuses". La production végétale est forte dans ces dépressions, qui reçoivent beaucoup d'eau de ruissellement, elle est de moyenne à forte sur les sols sableux, et en général faible sur les sols peu profonds.

Les sols sableux ont une texture relativement grossière et ont donc une importante capacité d'infiltration de l'eau et, à l'inverse, des taux de ruissellement relativement faibles. Les sols sableux au Sahel sont généralement organisés en systèmes dunaires et interdunaires, sont soumis à érosion éolienne, et représentent la plus grande partie du paysage (environ 50% des paysages sahéens selon Penning de Vries & Djitéye (1982)). Ces sols sont généralement homogènes. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la végétation pousse facilement sur les zones sableuses grâce à cette forte capacité

de rétention de l'eau, et ce malgré une faible teneur en matière organique (Figure 7, a et b). Des encroûtements de surface (résultat du "collage" des particules fines avec des particules plus grossières à l'action de la pluie) peuvent néanmoins modifier le fonctionnement de sols sableux ou sablo-limoneux, en réduisant fortement l'infiltration au profit du ruissellement de surface.

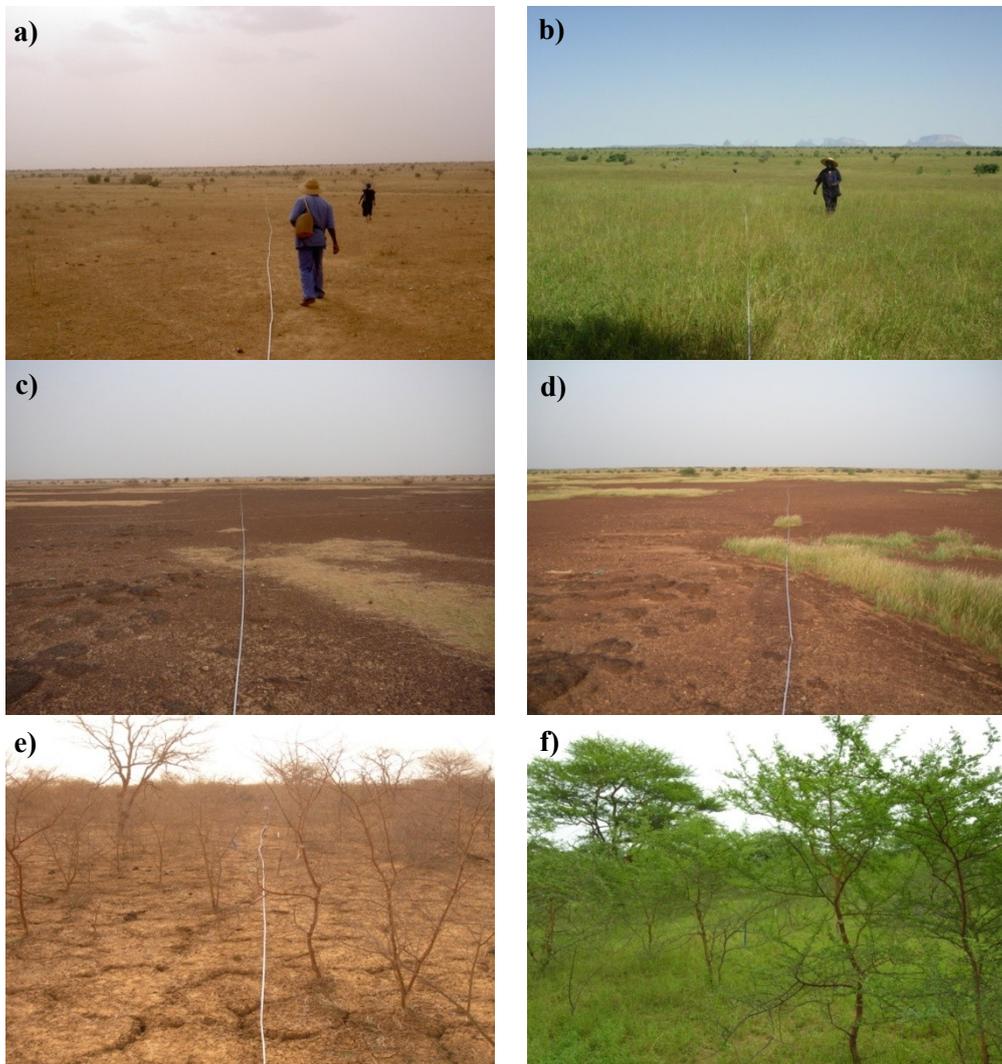


Figure 7. Illustration du couvert végétal sur les trois types de sols principaux au Sahel, ici sur des sites de mesure de la région du Gourma au Mali. Les photos a) et b) ont été prises sur le site sableux Louguere Kiliki (site n°25), les a) 09 juin et b) 15 septembre 2006. Les photos c) et d) ont été prises sur le site d'Eguerit (n°40), site sur sol latéritique, les c) 28 mai et d) 20 septembre 2008. Enfin, les figures e) et f) illustrent le type de couvert d'une dépression argileuse, ici le site de Kelma (n°21) les e) 15 juillet et d) 1er octobre 2006. Photos : P. Hiernaux

Les sols superficiels (surfaces latéritiques ou affleurements rocheux) sont des surfaces lessivées qui contiennent peu d'éléments nutritifs pour la végétation (matières organiques, azote, phosphore). Le couvert végétal y est généralement clairsemé, organisé en fourrés, avec des plages importantes de sol nu (Figure 7, c et d). On peut y trouver également des sols limoneux, à la structure plus fine, qui vont ainsi se compacter plus vite et provoquer des taux de ruissellement importants. Au sud du Sahel la proportion de sols limoneux est plus importante. Leur capacité de stockage de l'eau étant relativement

réduite, les eaux de pluie et de drainage vont ruisseler vers ce qu'on l'on nomme des grandes "plaines d'inondation". Les affleurements rocheux et cuirasses latéritiques montrent des coefficients de ruissellement élevés et sont parfois sujets aux phénomènes d'érosion.

Enfin, les zones de bas-fond, qui reçoivent l'eau de ruissellement, sont beaucoup plus riches en argile. Le couvert végétal peut y être très dense (Figure 7, e et f), la strate ligneuse peut même parfois être décrite comme "forêt". On y trouve également une plus grande proportion de plantes pérennes (Penning de Vries & Djitéye 1982). Durant et après la saison des pluies, ces zones de bas-fond peuvent être "transformées" en mares temporaires. Toutefois, ces dépression argileuses ne constituent qu'une petite partie du paysage.

2.2. Les principaux facteurs qui expliquent la variabilité du couvert végétal

2.2.1. La pluviométrie

A l'échelle régionale, les précipitations expliquent la majorité de la variabilité de la production végétale (Penning de Vries & Djitéye 1982, Hiernaux & Le Houerou 2006). Les années sèches sont synonymes de mauvais rendements et de faibles réserves pastorales, ce qui sert de base aux systèmes d'alerte précoce.

À l'échelle locale, la distribution temporelle des précipitations pendant une saison des pluies est susceptible de jouer un rôle : pour le même cumul annuel, la production peut être différente selon qu'il y ait des événements pluvieux extrêmement forts mais peu fréquents, ou au contraire une multitude d'événements pluvieux mais à une fréquence régulière. Dans le premier cas, les phases de germination se révéleront inefficaces, les plantules ne disposant pas des ressources nécessaires pour atteindre leur stade adulte (croissance avortée), ce qui engendre une production très réduite à l'échelle du site. Dans le deuxième cas au contraire, la croissance des plantes s'avérera efficace, les plantules n'étant pas limités par la disponibilité de l'eau pendant leur phase de croissance.

La réalité cependant n'est pas aussi simple. Il y a en effet une corrélation entre le cumul annuel et l'occurrence d'événements importants. De plus, l'impact des précipitations intenses est mal connu. L'effet peut-être le plus flagrant est celui des "dry spell" (ou épisodes secs), amenant parfois une mortalité des plantes. On observe cependant une capacité impressionnante des herbacées à "rattraper" par exemple une mousson tardive.

2.2.2. Les sols

A l'échelle locale, la redistribution spatiale des pluies via la topographie, le type de sol et les états de surface, l'occupation ou encore la fertilité des sols, expliquent, une fois conjugués à la variabilité spatiale des précipitations, la grande variabilité spatiale de la production typique des paysages sahéliens (voir 2.1.3.). Cela est d'autant plus vrai en début de saison où le couvert est quasiment

inexistant. Mais ce sont là des principes relativement généraux, nous verrons plus en détail comment ils se vérifient sur les terroirs du Gourma et du Fakara dans les chapitres suivants.

2.3. Quelques caractéristiques spécifiques de la végétation sahélienne

2.3.1. Composition du tapis herbacé

Le couvert herbacé est majoritairement constitué de graminées annuelles qui ont une dynamique extrêmement marquée entre la saison sèche et la saison humide (Figure 8). Les herbacées pérennes sont relativement peu nombreuses, et sont localisées aux extrémités nord (frontière saharo-sahélienne) et sud (zone soudano-sahélienne). Elles sont de plus en plus abondantes au fur et à mesure qu'augmente la pluviosité annuelle. De manière générale, on les trouve plus particulièrement dans des zones qui reçoivent plus d'eau que la pluviosité annuelle, comme par exemple dans les plaines d'inondation. La différence principale entre les plantes pérennes et annuelles réside dans leur capacité respective à survivre pendant la longue saison sèche: les plantes annuelles "survivent" sous forme de graines, tandis que les plantes pérennes survivent sous forme végétative. Les herbacées pérennes peuvent éventuellement mettre leur feuillage en place plus tôt dans la saison. Les plantes annuelles sont généralement caractérisées par la production d'un stock semencier important (Grouzis 1992).

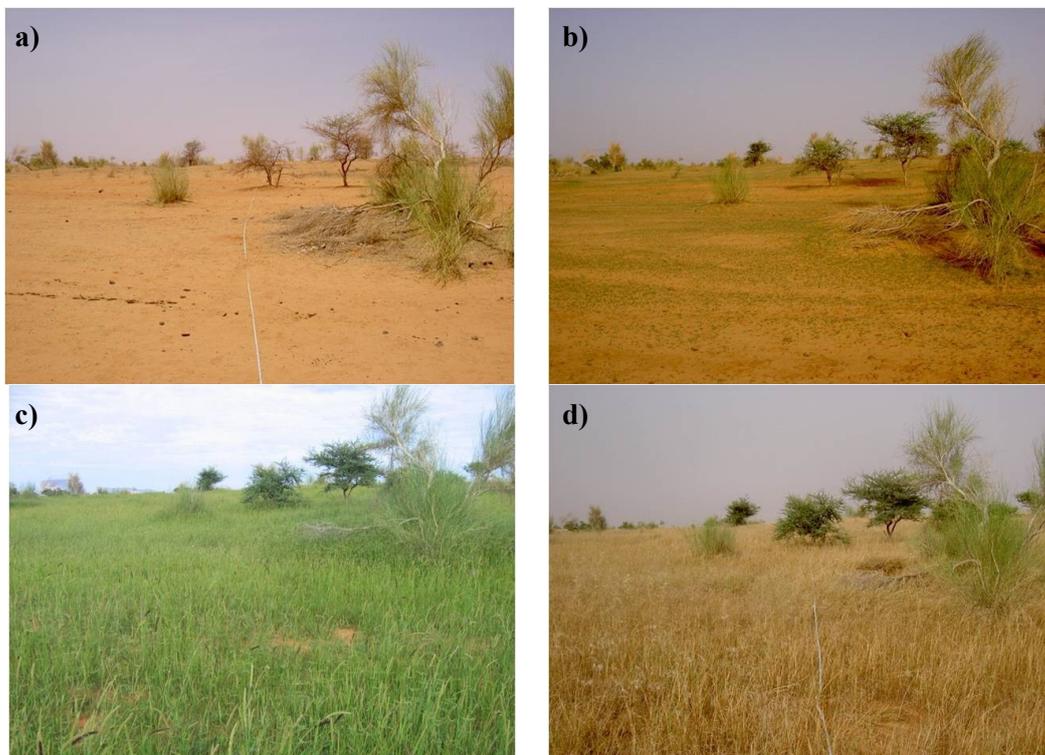


Figure 8. Illustration de la dynamique annuelle du couvert végétal sur le site d'Agoufou (Mali) en 2005, a) le 8 avril, b) le 17 juin, c) le 19 août, et d) le 28 septembre. Photos : P.Hiernaux

2.3.2. Les types de photosynthèse

Les herbacées annuelles sahéliennes sont largement dominées par les graminées qui ont majoritairement une photosynthèse en C₄ (mécanisme appelé ainsi car la première molécule formée lors la photosynthèse par la fixation du CO₂ présente 4 atomes de carbone, contre 3 atomes pour les plantes en C₃). Les plantes en C₄ sont caractérisées par une plus grande efficacité de la photosynthèse que les plantes en C₃, c'est-à-dire qu'elles ont un potentiel de croissance plus élevé et une meilleure utilisation de l'eau, ce qui se traduit par une plus grande quantité de matière produite par unité d'azote et de phosphore (Tracol 2004). Les plantes en C₄ sont également plus résistantes aux hautes températures : leur température optimale peut être supérieure à 32°C, alors que la température optimale des plantes en C₃ est généralement inférieure, de l'ordre de 27°C par exemple. Au Sahel, il y a donc une conjonction de caractéristiques favorables à la dominance des plantes en C₄ par rapport aux plantes en C₃ (Jones 1992, Sage *et al.* 1999, Ghannoum *et al.* 2000), qui sont toutefois plus présentes au sud de la région.

La situation sur le terrain n'est pas aussi tranchée, loin s'en faut, car de nombreux facteurs entrent en ligne de compte si l'on veut expliquer la domination des différents groupes d'espèces, ne serait-ce que pour les herbacées annuelles. Hiernaux *et al.* (2009c) mentionnent la phénologie (cycle long ou court), la palatabilité, la fixation azotée, le type (graminées, légumineuses), le mode de dispersion des diaspores, entre autres facteurs. Quant à la photosynthèse elle-même, des mesures de terrain (Damesin *et al.*, non publiées) montrent que les C₃ et les C₄ forment plutôt un continuum, en termes de photosynthèse à saturation de l'éclairement, avec cependant les plus forts taux pour les C₄ (Figure 9).

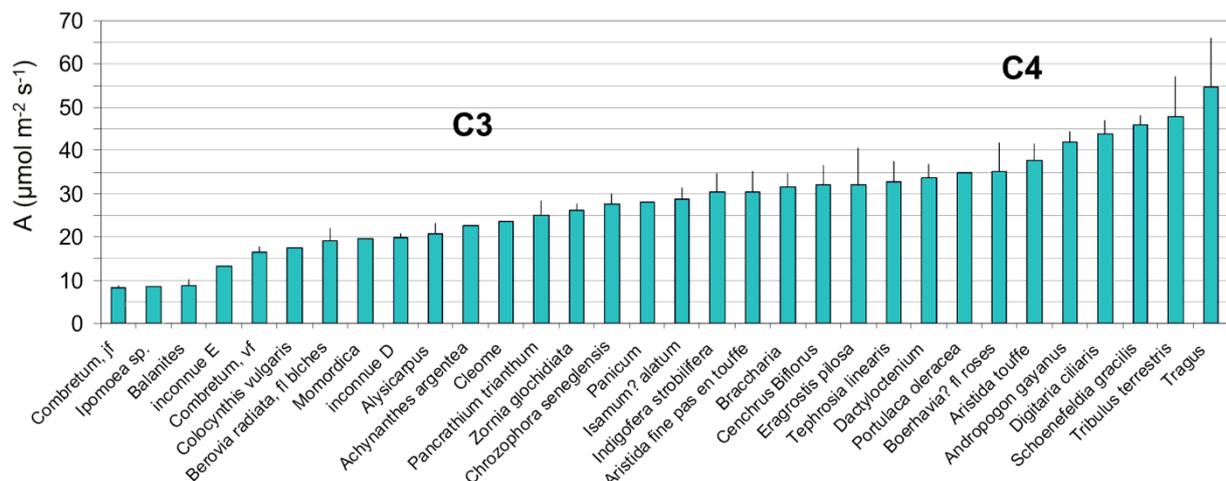


Figure 9. Taux de photosynthèse foliaire à plein éclairage exprimé par unité de surface de feuille pour différentes espèces en C₃ et C₄ typiques des régions sahéliennes (mesures effectuées dans le Gourma au Mali ; Damesin *et al.* non publié).

2.3.3. Les différentes étapes de la croissance des herbacées

Les herbacées annuelles sont caractérisées par une phase de croissance rapide (Figure 10) pendant laquelle la quasi-totalité de la biomasse est produite. Précédant cette phase, on trouve les phases de

germination et d'installation. La phase de germination débute à partir des premières pluies et survient par vagues successives ou par "cohortes" (Penning de Vries & Djitéye 1982). Sa réussite est déterminée par plusieurs facteurs dont le premier est la pluviosité. La germination est variable selon les espèces et selon les années, en conséquence de quoi la composition floristique d'un même site peut considérablement varier d'une année à l'autre. La phase d'installation concrétise la phase de germination avec l'installation du système racinaire. La croissance végétative est alors déterminée par les propriétés de la plante mais aussi celles du milieu. La quantité de biomasse produite par la plante dépend évidemment de la quantité d'eau reçue, mais aussi de la quantité disponible en éléments nutritifs (essentiellement azote et phosphore) ainsi que des propriétés intrinsèques des différentes plantes. Au sud du Sahel en particulier, on peut penser que les pluies peuvent ne plus être le facteur limitant la production ; la disponibilité en éléments nutritifs est alors déterminante pour la production. L'occurrence d'épisodes secs importants (10 jours, 20 jours) peut entraîner une mortalité des plantes, surtout lors des premières phases de la croissance. La phase de reproduction concrétise la phase végétative par la floraison puis la chute des diaspores (les graines). La phase de sénescence clôtur le cycle lorsque la croissance de la plante est terminée, ce qui est contrôlé par la photopériode et non pas par la fin des pluies (Penning de Vries & Djitéye 1982). Les plantes herbacées se dessèchent alors (ce sont les "pailles"), fournissant de la pâture pour le bétail. La longueur du cycle varie du nord au sud ; pour la même espèce, le cycle est plus court au nord qu'au sud (Cissé 1986).

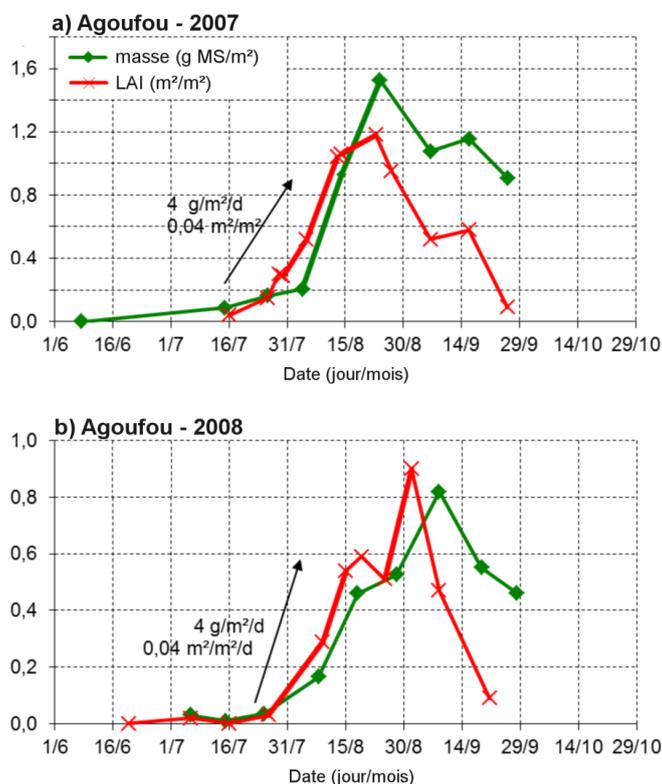


Figure 10. Dynamique saisonnière de la strate herbacée sur le site d'Agoufou au Mali pour a) l'année 2007 et b) l'année 2008. La phase de croissance rapide est marquée d'un trait plus épais (source: Hiernaux *et al.*, article en préparation).

2.3.4. La strate ligneuse

La strate ligneuse est en général très clairsemée, sauf dans les zones de bas-fond (dépressions argileuses) où elle peut représenter 70% du couvert. La densité des ligneux augmente également en allant vers le sud du Sahel, sans toutefois atteindre la densité des forêts soudaniennes ou guinéennes, le couvert ligneux maximum étant contraint par le cumul annuel des précipitations (Sankaran et al. 2005). Comme nous l'avons dit plus haut, on différencie généralement la strate buissonnante (fourrés, buissons) de la strate arborée (petits arbres, arbres).



Figure 11. Passage d'un troupeau de bovins dans un paysage typique de la région du Ferlo au Sénégal (photo prise lors d'une mission effectuée en Novembre 2012). Le couvert ligneux est peu dense, et constitué d'une alternance d'arbustes et d'arbres plus grands (photos : C. Dardel)

Les espèces ligneuses adaptées aux régions sahéliennes sont caractérisées par un système racinaire qui est surtout développé dans les 30 premiers centimètres du sol, ce qui permet aux ligneux d'avoir accès aux réserves en eau superficielles essentiellement. Ces espèces sont aussi souvent dotées d'un système de "racines pivot" qui leur permet d'accéder également aux éventuelles nappes ou réservoirs souterrains peu profonds. Elles sont également caractérisées par d'autres particularités traduisant leur adaptation au milieu, comme la petite taille de leurs feuilles et leur caractère très "coriace" (les épineux sont particulièrement abondants au Sahel, par exemple les diverses espèces d'*Acacia*), ou la chute des feuilles et des appareils végétatifs pendant la saison sèche (pour réduire les pertes en eau via l'évapotranspiration et assurer la survie des organes durs comme le tronc, les racines...) (Penning de Vries & Djitéye 1982).

La strate ligneuse est caractérisée par une saison de croissance souvent plus longue que celle des herbacées : beaucoup d'arbres restent en feuille bien après la phase de senescence des herbacées,

certains sont sempervirents, mais d'autres ont une phénologie foliaire très proche de celle des herbacées.



Figure 12. Mesures du peuplement ligneux dans le Ferlo au Sénégal (mission Novembre 2012). À gauche, Mamadou Diawara se dirige vers un baobab (*Adansonia digitata*) le long de la ligne de mesure. À droite, le "baobab du chacal" (*Adenium obesum*) et ses fleurs roses caractéristiques (cet arbuste n'est sûrement pas représentatif de tout le peuplement ligneux, mais ses fleurs sont certainement parmi les plus belles) (photos : C. Dardel).

2.4. Pression de l'agriculture sur le milieu naturel

2.4.1. L'agriculture, moyen de subsistance

L'agriculture en Afrique subsaharienne représente le moyen de subsistance de la plus grande partie de la population. À l'échelle nationale la production annuelle n'est généralement pas suffisante pour subvenir aux besoins de tous, et les populations sahéliennes sont donc régulièrement affectées par l'insécurité alimentaire (Kidane *et al.* 2006). La vulnérabilité des modes de culture aux aléas climatiques, la faible fertilité des terres, les faibles taux de mécanisation et d'utilisation d'intrants, le

relatif manque d'infrastructures adéquates (pour le transport, le stockage des denrées, l'irrigation...), ainsi que l'occurrence de problèmes politiques, voire de conflits armés, sont autant de facteurs qui ne facilitent pas une production agricole régulière importante (Vintrou 2012). Ainsi, les pays sahéliens doivent généralement compléter leurs propres productions annuelles par des importations extérieures et éventuellement par l'aide alimentaire internationale en cas de forte crise. L'agriculture subsaharienne et son évolution représentent donc des enjeux importants pour les années à venir dans le but de réduire l'insécurité alimentaire, par exemple par l'augmentation des rendements agricoles (Vintrou 2012).

2.4.2. Description des principaux modes de culture

Nous allons maintenant décrire rapidement les principales cultures et les principaux modes de culture utilisés dans la région. Une fois encore, le gradient climatique nord-sud se retrouve dans l'intensité d'exploitation des terres pour l'agriculture : schématiquement, au nord de la région l'utilisation des terres est essentiellement pastorale, tandis que la présence de terroirs agricoles augmente avec l'intensité des précipitations. Le choix des espèces cultivées dépend également de ce gradient bioclimatique. L'agriculture vivrière repose essentiellement sur les cultures des céréales (mil, sorgho, maïs, riz, fonio...), parfois en association avec des légumineuses ou d'autres cultures. Le maraîchage et la culture des oléagineux (principalement l'arachide) représentent par exemple une part conséquente de la production (environ 20% selon la FAO).

L'agriculture est essentiellement pluviale, la pratique de l'irrigation étant souvent limitée aux plaines d'inondation des grands fleuves de la région. Les systèmes agricoles sont généralement peu intensifiés et consistent en une rotation entre la mise en culture et la mise en jachère d'une parcelle, souvent conjuguée au pastoralisme (Figure 13). Les taux de mécanisation restent très faibles, et beaucoup de travaux sont réalisés à la main (défrichage, sarclage). L'utilisation d'engrais minéraux est limitée. Vintrou (2012) cite par exemple, en se basant sur des chiffres de la FAO datant de 2003, des chiffres de 10kg par hectare et par an pour l'Afrique subsaharienne contre 90kg en moyenne à l'échelle mondiale. Ce sont les déjections du cheptel qui permettent la fumure de certaines parcelles, mais cet usage est limité à une portion du territoire.

2.4.3. La dynamique récente des surfaces cultivées

L'occupation du sol en Afrique subsaharienne a beaucoup évolué au cours du siècle dernier. Le continent a connu et connaît toujours une très forte augmentation de la démographie, les zones rurales tendant à être de plus en plus habitées malgré le fort développement urbain (Vintrou 2012). L'augmentation des besoins alimentaires s'est alors traduite par une augmentation conséquente de la mise en culture des terres. Cette augmentation des superficies cultivées est de l'ordre de 50% dans la région du Fagara au sud-ouest du Niger entre les années 1950 et aujourd'hui, par exemple (voir le Chapitre 3). Elle s'est également accompagnée d'un changement dans les pratiques agricoles, avec notamment une mise en culture de certaines terres qui ne l'étaient pas auparavant (par exemple des

parcours pastoraux) dans des régions où toutes les terres cultivables étaient déjà exploitées. Une autre modification majeure réside dans la modification de la rotation jachère/mise en culture, la durée de mise en jachère étant considérablement raccourcie aujourd'hui. Cela pourrait amener dans certains cas à une réduction de la fertilité des sols.

Cependant, l'augmentation des superficies cultivées n'est vraisemblablement pas généralisable à l'ensemble de la région sahélienne. Tappan *et al.* (2004) ont par exemple étudié les changements d'occupation du sol au Sénégal depuis les années 1980, et n'ont pas trouvé de modification majeure dans la proportion culture/savane à l'échelle nationale : la mise en culture d'une partie du territoire a été contrebalancée par l'abandon de la culture dans l'ancien bassin arachidier.

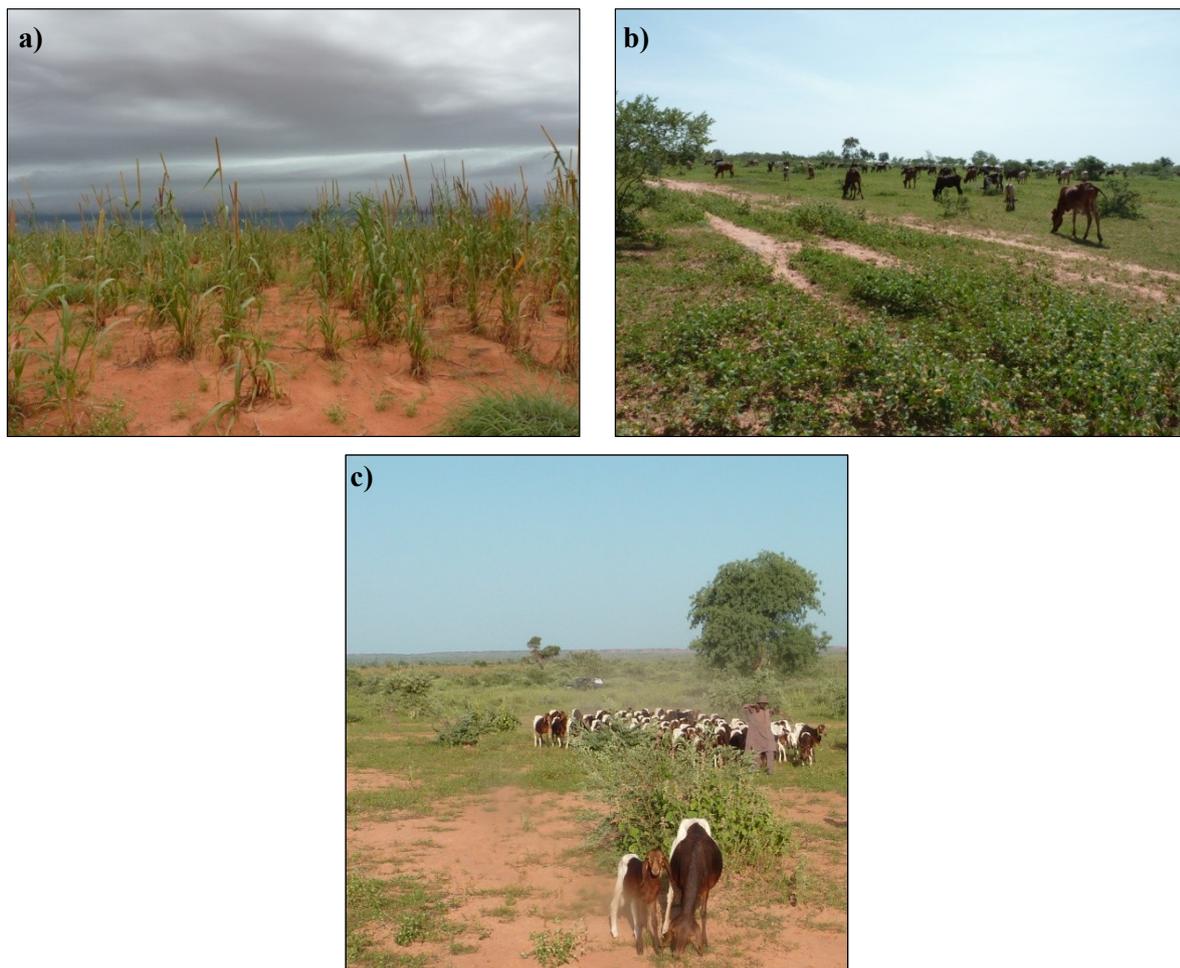


Figure 13. Région agro-pastorale du Fakara au sud-ouest du Niger : a) culture de mil, b) site en jachère, c) parcours pastoral. Photos : P. Hiernaux.

Établir un diagnostic de l'étendue de l'augmentation des superficies cultivées à l'échelle du Sahel n'est donc pas évident. Par ailleurs, l'impact de la mise en culture sur le paysage est complexe et comporte plusieurs aspects. Par exemple, en premier lieu il en résulte une modification du paysage, avec notamment les pratiques de défrichement qui accompagnent la mise en culture d'une parcelle. La strate ligneuse en particulier s'en trouve impactée (et ce pour plusieurs années), cela ne veut pas forcément

dire réduite, les systèmes d'agro-foresterie par exemple favorisent des strates arborées assez développées tout en sélectionnant quelques espèces. La mise en culture peut aussi permettre une diversification du paysage, avec l'apport de nouvelles espèces caractérisées par des cycles de croissance de longueur et de phénologie différentes. La sensibilité de l'écosystème à l'érosion éolienne et hydrique est ainsi modifiée, notamment par les pratiques de sarclage qui laissent un sol dénudé sur une plus grande partie de l'année que pour un milieu naturel.

La végétation sahélienne est constituée d'une strate herbacée dominante et d'un faible couvert ligneux. La strate herbacée est majoritairement constituée de graminées annuelles en C₄ qui sont caractérisées par une croissance très rapide et qui présentent une forte adaptation aux conditions d'aridité. La distribution temporelle et spatiale de la végétation dépend principalement de deux facteurs qui sont les précipitations annuelles et la redistribution latérale des pluies, elle-même imposée par les caractéristiques des surfaces (relief, substrat). L'usage des sols est agro-pastoral, le nord du Sahel étant principalement pastoral et la présence de l'agriculture augmentant selon le gradient bioclimatique. Sur les dernières décennies, la forte démographie s'est traduite par une augmentation des superficies cultivées sur l'ensemble de la région, accompagnée de changements dans les pratiques agricoles.

3. La désertification, une préoccupation ancienne

La désertification est un sujet qui est étudié depuis de longues années et qui a déjà fait l'objet de nombreux articles de synthèse traitant de tout ou partie de la problématique (tout d'abord sa définition, puis les causes, processus, conséquences, l'évaluation de l'étendue du phénomène, ou encore les possibilités d'action). On peut citer par exemple les travaux de Hellden (1991), Thomas (1993), Dodd (1994), Le Houerou (1996), Darkoh (1998), Ozer & Ozer (2005), ou encore de Veron *et al.* (2006), parmi beaucoup d'autres. Les paragraphes qui suivent vont tenter de reprendre, en se basant sur ces travaux, les principaux éléments à avoir en tête lorsque l'on parle de désertification, à l'échelle de la planète et à l'échelle du Sahel.

3.1. Définition

Les Nations Unies ont adopté en 1992, à la Conférence sur l'Environnement et le Développement (UNCED, Agenda 21) tenue à Rio de Janeiro, la définition suivante: "*la désertification est une dégradation des terres arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines*". Le degré d'aridité des terres (aride, semi-aride, etc.) est défini selon le ratio des précipitations annuelles sur l'évapotranspiration potentielle

(P/PET). Cet indicateur utilise ainsi le flux entrant d'eau vers les écosystèmes (les précipitations annuelles), tandis que l'évapotranspiration (qui regroupe l'évaporation des sols et la transpiration des plantes) représente les pertes en eau du milieu (Le Houerou 1996). Selon l'UNEP (1992), les terres potentiellement touchées par la désertification (terres arides, semi-arides et subhumides sèches) représentent donc environ 40% de la superficie totale des terres de notre planète (Tableau 1 et Figure 14), tandis que les terres hyperarides (les déserts) ne sont pas considérées, partant du principe qu'elles ne peuvent pas être "désertifiées plus".

Bioclimatic Zones	Area (10 ³ km ²)	%	P/PET ratio
Hyperarid	9781	7.5	< P/PET < 0.05
Arid	15692	12.1	0.05 < P/PET < 0.20
Semi-arid	23053	17.7	0.20 < P/PET < 0.45
Dry sub-humid	12947	9.9	0.45 < P/PET < 0.65
Sub-humid	25843	19.9	0.65 < P/PET < 0.75
Humid and hyper-humid	42811	32.9	0.75 < P/PET

Tableau 1. Classification bioclimatique des zones arides du monde entier, basée sur le ratio des précipitations (P) et de l'évapotranspiration potentielle (PET). (source : Le Houerou (1996) ; tableau basé sur les chiffres du rapport de l'UNEP (1992)).

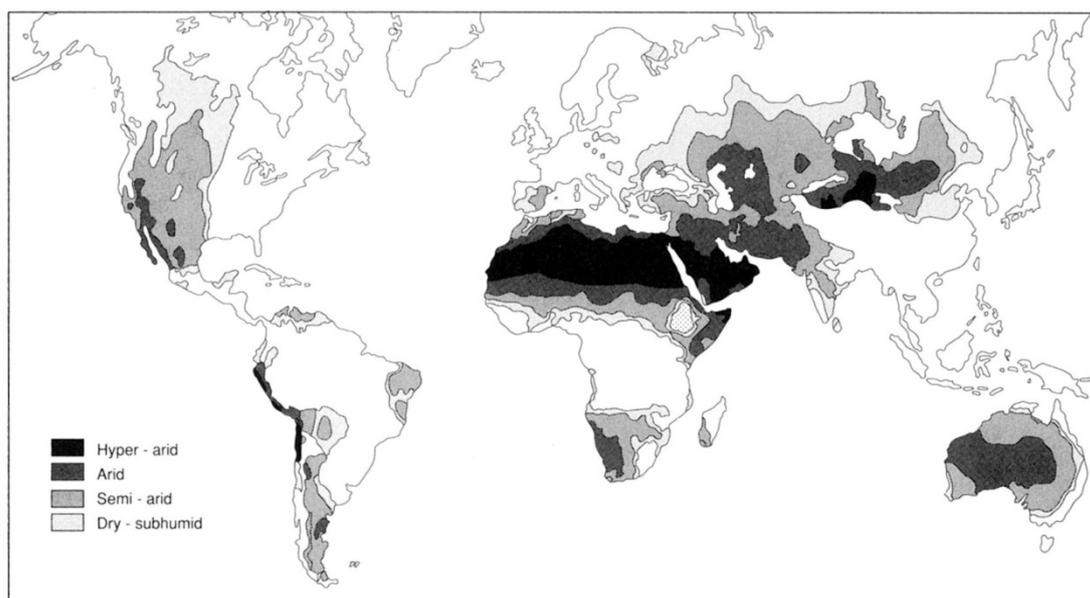


Figure 14. Étendue des terres arides et semi-arides (source : Thomas (1993), d'après l'UNEP (1992)).

Cette définition de la désertification n'a pourtant pas été adoptée du jour au lendemain. Le phénomène menaçant une grande partie des terres de la planète et donc des populations vivant dans ces régions, l'intérêt des divers acteurs concernés (les sphères scientifique, médiatique, politique...) a grandi au cours du temps, et la perception de la désertification a ainsi considérablement évolué au cours des dernières décennies (Thomas 1993). Avant que la définition actuelle ne soit adoptée par l'UNEP, la désertification était généralement entendue comme un changement du milieu vers des "conditions désertiques" (UNCOD 1977). Ce phénomène était attribué à une invasion des dunes sableuses vers les

terres arables, transformant de ce fait des terres potentiellement cultivables en de "nouveaux déserts" (Stebbing 1935, Thomas 1993) (voir 4.2.). Ce changement était souvent considéré irréversible et attribué à l'action de l'homme. Plusieurs études, et notamment les travaux de l'UNEP, prévoyaient ainsi une disparition rapide des terres arables des régions considérées comme vulnérables à la désertification (Stebbing 1935, Lamprey 1975, Dregne 1983) (Figure 15).

Cependant, la distinction n'est pas aisée entre les termes de sécheresse, dégradation, et désertification (on pourrait également citer d'autres termes qui ont été proposés dans la littérature, comme "desiccation", "desertization", "sandification" ; voir Dodd (1994) pour plus de détails sur ces termes). De plus, chacun de ces termes peut être défini de plusieurs façons, selon les sciences concernées (hydrologie, géologie, écologie...) et l'échelle considérée (la feuille, la plante, la parcelle, le paysage) (Thomas 1993).

Le phénomène de sécheresse peut par exemple être décrit d'un point de vue :

- *climatologique*, lorsque les précipitations sont en-dessous de la moyenne pendant une période prolongée.
- *agronomique*, lorsque l'humidité du sol ne répond pas aux besoins hydriques des cultures, c'est-à-dire lorsque les quantités d'eau évaporées sont supérieures aux quantités d'eau reçues (ce cas de figure peut survenir même lorsque la pluviosité annuelle a un niveau au-dessus de la normale, lorsque par exemple les espèces de plantes mises en culture ou les pratiques agricoles sont inadaptées au milieu et à son climat).
- ou encore d'un point de vue *hydrologique*, lorsque ce sont les réserves en eau (nappes souterraines, réserves de surface, rivières et fleuves) et les débits qui présentent des niveaux extrêmement bas par rapport au niveau normal.

De même, le concept de dégradation peut être défini d'un point de vue :

- *hydrologique* : par exemple lorsqu'il y a une augmentation significative des débits et des fréquences des crues, liée à une augmentation de l'érosion des sols et du ruissellement de surface comme ce fut le cas pour le fleuve Niger à Niamey ces dernières années (Descroix et al. 2012).
- *pédologique* : avec une modification des propriétés chimiques des sols, et notamment une diminution du contenu en nutriments, comme l'azote et le phosphore qui sont nécessaires à la croissance des plantes (Le Houerou 1996).
- *écologique* : avec une diminution de la capacité de production du couvert végétal, ou encore un appauvrissement de la diversité du milieu.

Dans la suite de ce manuscrit, nous ferons référence aux sécheresses selon la définition climatologique, et à la dégradation des écosystèmes selon la définition écologique. Quant à la désertification, nous adopterons la définition des Nations Unies.

Les échelles de temps associées à la désertification sont ainsi bien plus longues que celles associées aux périodes de sécheresses ou à la dégradation du couvert. Ce dernier peut par exemple se rétablir d'une année à l'autre, si les conditions redeviennent favorables à la croissance de la végétation. Lorsque l'on parle de désertification, on fait donc référence à une perte de la productivité des écosystèmes sur le long-terme. Il est toutefois intéressant de remarquer que la notion d'irréversibilité, souvent sujette à controverse (Binns 1990, Mainguet 1991), n'apparaît pas explicitement dans cette définition.

3.2. L'institutionnalisation

La désertification ne menace cependant pas que l'Afrique subsaharienne (Dodd 1994). Au début du siècle par exemple, l'ouest des États-Unis et en particulier les Grandes plaines centrales étaient au cœur des préoccupations, suite aux sécheresses qui avaient sévi dans la région dans les années 1930 (Dodd 1994). La désertification menace également une partie non négligeable du continent asiatique, de l'Australie, et de l'Amérique du Nord et du Sud (Figure 15 et Tableau 2). Ce caractère universel de la désertification en a fait une préoccupation internationale, qui a donné lieu à la création de plusieurs organismes internationaux et de plusieurs conventions consacrées à son combat.

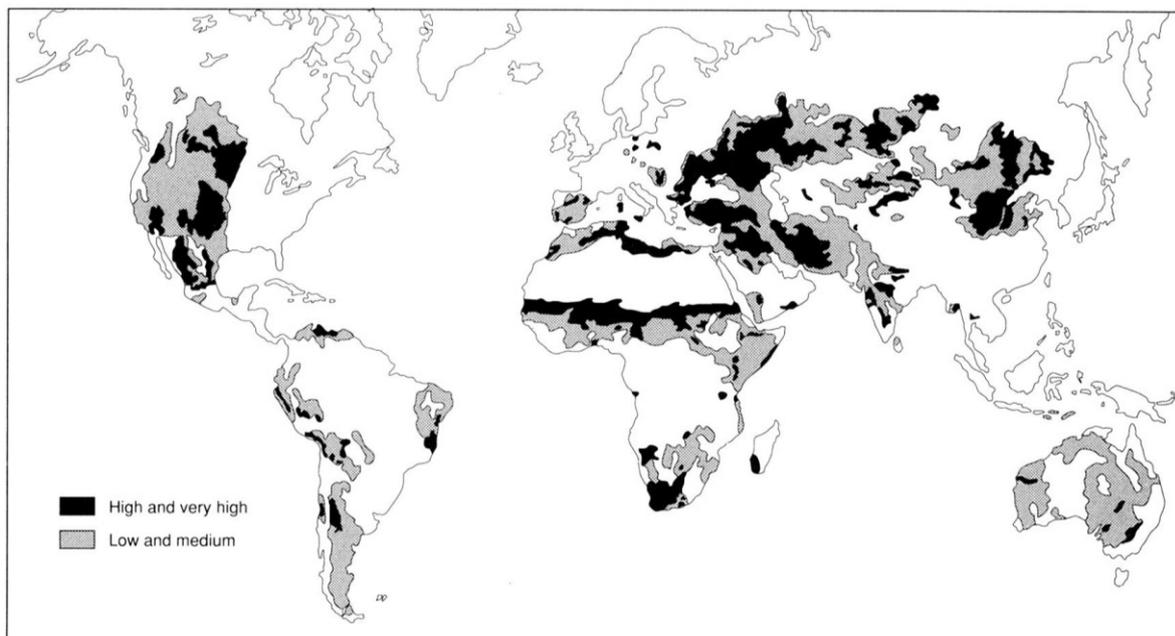


Figure 15. Vulnérabilité à la désertification (source : Thomas (1993), d'après l'UNEP (1992))

Region	Light*		Moderate		Strong		Severe		Total**	
	S	%	S	%	S	%	S	%	S	%
Africa	1180	9	1272	10	707	5	35	0.2	12860	56
Asia	1567	9	1701	10	430	3	5	0.1	16718	42
Australasia	836	13	24	4	11	0.2	4	0.1	6633	32
North America	134	2	588	8	73	0.1	0	0	7324	50
South America	418	8	311	6	62	1.2	0	0	5160	29
Total	4273	8	4703	9	1301	2.5	75	0.1	51691	39.7

*S = Area desertified in 10³km²; % = area desertified in percent of total dry-lands (dry-lands = arid + semi-arid + dry).

**S = Total dry-lands; % = percent of desertified areas in the non-hyperarid dry-lands, i.e. excluding the true climatic deserts, below 50 mm year⁻¹ of mean annual rainfall.

Tableau 2. Estimation de l'étendue et de la sévérité de la désertification par continent (en 108 km² et en %) (source : Le Houerou (1996))

Dès 1956, la création de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN) a promu la protection de l'environnement au rang de préoccupation majeure pour les institutions internationales, au même titre que les droits de l'homme, le maintien de la paix, ou de la santé. En 1972, les Nations Unies ont créé le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). En 1977 les Nations Unies ont tenu une Conférence sur la Désertification (UNCOD) à Nairobi au Kenya ; cette conférence est souvent citée comme date-clé pour attester de la prise en compte des phénomènes de désertification à l'échelle internationale.

De manière générale, la thématique de la désertification concerne tous les continents, a été très médiatisée, et elle concentre donc beaucoup d'inquiétudes relatives à l'avenir de notre planète. Cependant, concrètement, il est difficile d'établir avec rigueur l'étendue et la sévérité des terres dégradées ou en phase de l'être. En plus des difficultés mentionnées précédemment pour définir les concepts en question, il est extrêmement difficile d'accéder à des données fiables aux échelles spatiales et temporelles dont les organismes internationaux ont besoin pour établir leurs diagnostics.

Les premières estimations de l'étendue des zones désertifiées ou menacées par la désertification parlaient de 4500 millions d'hectares, soit environ 35% de la totalité de la surface de la Terre, ce qui concernait environ 20% (850 millions) de la population totale (UNEP 1977). Mais ces chiffres ont été considérablement remis en cause par la suite, notamment en regard de la qualité des données et des méthodes employées (Mabbutt 1984, Mabbutt 1987, Veron *et al.* 2006). Mabbutt (1984) souligne par exemple que les données utilisées par l'UNEP s'appuient sur des questionnaires construits pour être renseignés à l'échelle nationale, alors que les pays concernés n'étaient généralement pas en mesure de fournir des réponses fiables, complètes, documentées. Ainsi, beaucoup des données collectées sont qualitatives plutôt que quantitatives, donc très subjectives et difficiles à comparer. De plus, les méthodes adoptées pour fournir des estimations à l'échelle globale à partir de ces données sont obscures, très peu documentées (Veron *et al.* 2006).

Un peu plus tard, en 1987, l'UNEP estime que la perte annuelle de terres productives s'élève à 27 millions d'hectares : on parle alors de la désertification comme d'une "bombe à retardement" (UNEP

1987). Mais là encore ces chiffres sont vivement remis en cause (Mabbutt 1987, Rozanov 1990), toujours en raison du manque de fiabilité des données et de l'inexistence de dispositifs de terrain permettant un suivi de la végétation sur le long-terme, et sur des espaces suffisamment grands.

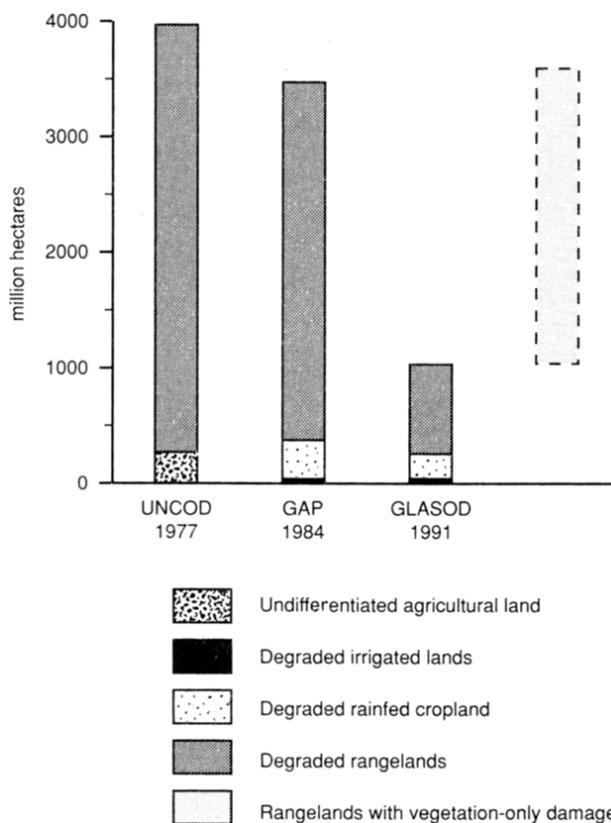


Figure 16. Évolution des chiffres officiels des Nations Unies concernant l'étendue des terres arides et semi-arides souffrant de désertification (*source* : Thomas (1993)).

En 1991, les estimations sont revues à la baisse par le GLASOD (Global Assessment of Human-induced Soil Degradation, projet financé par l'UNEP dont le but était de quantifier l'étendue de la désertification à l'échelle mondiale), qui estime à son tour qu'environ 20% des terres arides et semi-arides sont susceptibles d'avoir subi des processus de dégradation. Sur ces 20%, "seulement" 13% (soit 4% de la superficie totale des terres semi-arides) sont considérés comme sévèrement ou très sévèrement dégradés (Figure 16) (Thomas 1993).

3.3. Processus physiques et causes potentielles

En parallèle des recherches portant sur la quantification du phénomène (étendue, nature et dynamique) à l'échelle globale ou régionale, de nombreuses études se sont intéressées à identifier et comprendre les processus physiques mis en jeu ainsi que leurs causes (Dodd 1994, Le Houerou 1996, Darkoh 1998, Ozer & Ozer 2005).

Un des processus majeurs identifié est l'érosion des sols, qui peut être d'origine hydrique ou éolienne. Cette érosion découle généralement d'une réduction drastique du couvert végétal et d'une simplification de la structure de la végétation. La surface qui n'est plus protégée par la végétation peut

alors être érodée par les écoulements (par exemple après des événements pluvieux intenses) ou par les vents (Le Houerou 1996). Un autre des aspects importants est l'altération des propriétés chimiques et physiques des sols (Le Houerou 1996). Par exemple, la réduction du couvert végétal peut induire une diminution de la décomposition des litières, ce qui va amener moins de matières organiques dans le sol. A terme, le sol peut donc s'appauvrir et être plus fragile, et ses propriétés physiques et chimiques être altérées (densité, porosité, perméabilité à l'air et à l'eau, capacité de stockage et oxygénation) (Le Houerou 1996). La diminution du contenu en matières organiques et la fragilisation de la structure du sol peuvent également engendrer des phénomènes d'encroûtement ainsi que l'augmentation du ruissellement de surface, ce qui pourra provoquer une augmentation de l'aridité du sol (définie par le ratio entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle). Cette altération peut à son tour engendrer une baisse de productivité et de fertilité des sols (Le Houerou 1996).

Les facteurs de ces changements le plus souvent mis en cause sont liés à des modifications d'origine anthropique. La surexploitation des terres pour l'agriculture, le surpâturage, le déboisement intensif (majoritairement pour combler les besoins énergétiques des populations rurales) sont ainsi les trois facteurs majoritairement cités (Le Houerou 1996).

Il est intéressant de noter que les périodes de sécheresse peuvent être des catalyseurs de la désertification, mais pas nécessairement. Autrement dit, il peut y avoir désertification sans qu'il y ait de facteur climatique.

4. La désertification controversée du Sahel

Nous allons nous intéresser maintenant spécifiquement à la désertification de la région sahélienne. Le sujet est polémique, et a vu naître de nombreux débats au cours des dernières décennies, entre partisans et opposants à la théorie de la désertification du Sahel.

4.1. Les premiers témoignages

Dans un cours sur la désertification dispensé à l'université de Stuttgart (comm. pers.), Pierre Hiernaux a dressé la liste des différents écrits que l'on a pu trouver au cours des siècles derniers traitant de la désertification des régions sahéliennes. Nous avons repris ici des éléments de ses recherches, notamment en qui concerne les différentes sources et les différents acteurs cités.

Ainsi, les premiers témoignages écrits sur les paysages sahéliens ont traversé les siècles grâce aux récits de voyageurs arabes (Ibn Battouta, Léon l'Africain) et d'érudits n'ayant pas voyagé eux-mêmes, mais ayant recueilli les observations de marchands nomades (El-Bekry, Al-Omari). Un peu plus tard, de nombreux manuscrits ont été écrits en langue arabe mais dans les dialectes locaux (à l'aide d'une écriture "phonétique") ; les plus connus sont les Tarik Es Sudan et Tarik El Fetakh. Ces manuscrits contiennent des informations et des observations précieuses pour de nombreux domaines, mais leur contenu n'est encore que partiellement connu et reste donc en grande partie à explorer.

Ce n'est qu'à partir du XVII^e siècle que des voyageurs européens ont commencé à parcourir l'Afrique et à rapporter leurs propres observations (Park, Caillé, Ravaisson-Mollien). Enfin, la colonisation a apporté son lot de témoignages par la forte présence de l'armée et de l'administration coloniale (Tilho, Foureau, Binger, Monnier, Chevalier, Mangin).

Parmi tous ces témoignages, il est souvent fait état de la nature aride et semi-aride du climat et notamment de la forte variabilité inter-annuelle de la végétation, mais il est intéressant de noter que l'impact de l'homme sur l'environnement n'est généralement pas mentionné comme problématique. Au contraire, les pratiques culturelles locales sont le plus souvent perçues comme étant bien adaptées à leur environnement (Chevalier 1900).

4.2. L'avancée du désert

Les premiers échanges "musclés" entre scientifiques européens à propos de la désertification des régions sahéennes ont eu lieu au début du siècle, à partir des années 20 (Hubert 1920, Stebbing 1935, Jones 1938). Ainsi, en 1920 Hubert faisait état d'un dessèchement progressif de l'Afrique de l'Ouest, selon lui datant d'une soixantaine d'années, et surtout indépendant des fluctuations des précipitations. Dans son étude, il mentionne la migration de la frontière du Sahara vers le sud du continent, phénomène qui restera sujet à controverse pendant plusieurs décennies (Jones 1938, Lamprey 1975, Tucker & Nicholson 1999). Les principales causes de cette migration sont, selon Hubert (1920), une diminution des précipitations conjuguée à des phénomènes d'érosion, d'ensablement sous l'influence des vents, le déboisement, le "pompage intensif des eaux souterraines", l'ensablement des gués par le passage des troupeaux, ou encore la destruction des arbres par les insectes.

Quelques années plus tard, Stebbing (1935) publie à son tour une étude dans laquelle, à partir d'observations personnelles de voyage et d'entretiens effectués avec quelques administrateurs coloniaux, il conclut que l'avancée du désert menace dangereusement les régions sahéennes, et que cette avancée doit être contrée par l'action de l'homme sous peine que les dégâts soient irréversibles. Il estime par exemple que le désert a avancé avec une vitesse de 1km par an sur les 300 dernières années (Dodd 1994). Selon lui, les terres cultivables du nord du Nigéria sont très fortement menacées par l'ensablement venant du Sahara, les milieux s'aridifient et les savanes arbustives disparaissent. Il rapporte que les populations auraient déjà commencé à désertifier le nord du Nigéria. Pour contrer ce phénomène, il propose de mettre en place des barrières d'arbres au sud de la région, sur plus de 2000 km de long et 20 km de large (Figure 17). Ce concept de "barrière arbustive" avait également été proposé dans les Grandes plaines centrales américaines suite aux sécheresses des années 1930, sans grand succès toutefois, le retour de la végétation ayant été liée à un retour des précipitations (Dodd 1994).

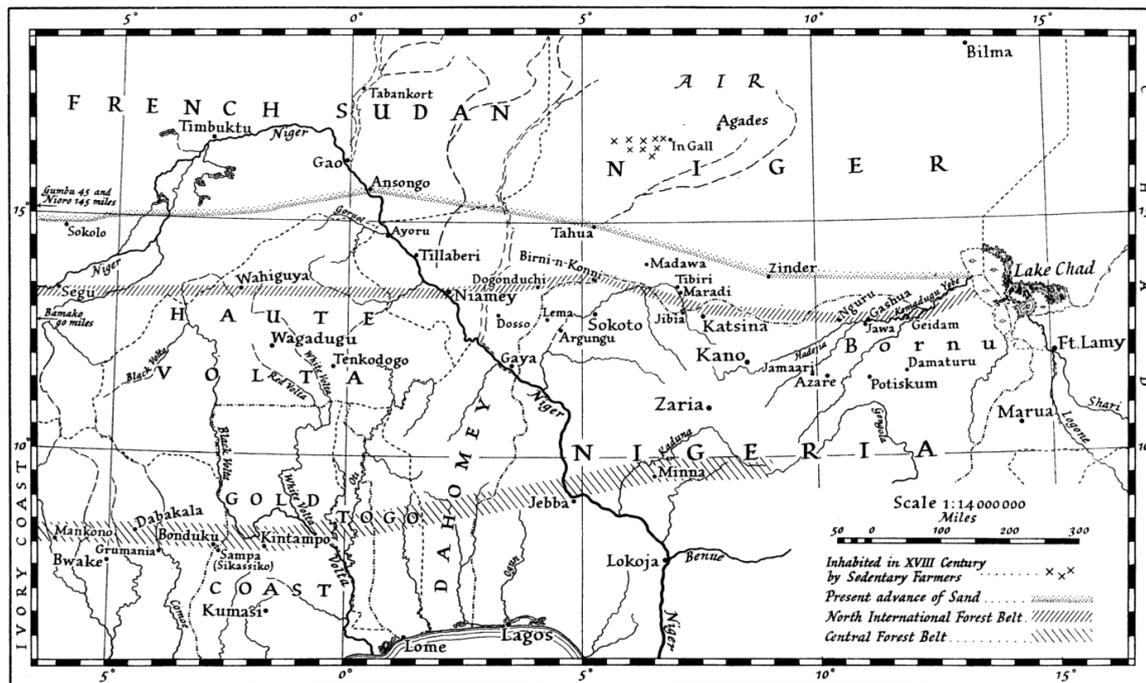


Figure 17. Représentation de l'avancée du Sahara et proposition de "barrières de protection arbustives" (représentées ici en trait hachuré) au nord et au centre de la région (source : Stebbing (1935)).

Peu après la publication de Stebbing (1935), une mission d'observation des écosystèmes nigériens et nigériens a été menée par la Commission Forestière Franco-Anglaise, de décembre 1936 à février 1937 (Jones 1938). Un des objectifs de cette mission était clairement de vérifier l'état des lieux alarmiste porté par Stebbing (1935) sur le Nigéria. Leurs observations se sont alors avérées totalement opposées à celles de Stebbing : il n'a été relevé ni migration du désert, ni ensablement généralisé des superficies cultivées, ni abandon des terres par les populations. Au contraire, les dunes sableuses du nord du Nigeria sont estimées très stables grâce à un couvert végétal fermement installé ; les phénomènes d'ensablement n'ont pu être observés que localement, et ne nécessitent donc aucun schéma d'aménagement régional comme ceux proposés par Stebbing (les barrières arbustives). Toutefois, les pratiques de rotation des cultures sont mentionnées comme pouvant potentiellement impacter la fertilité des sols dans les décennies suivantes, si des mesures de précaution ne sont pas suivies. Jones (1938) préconise ainsi d'encourager l'agriculture fixe (avec fertilisation) en réservant les zones arbustives du paysage pour le pâturage du bétail.

Suite aux sécheresses des années 1970 et 1980, la théorie de la désertification du Sahel fut encore une fois ravivée. Le débat fut également institutionnalisé, avec la création de comités internationaux de lutte contre la désertification au Sahel comme le CILSS (Comité Inter-état de Lutte contre la Sécheresse au Sahel), fondé en 1973. L'avancée du désert est alors une théorie qui revient en force. Lamprey (1975) compare par exemple des relevés de terrain effectués en 1975 au Soudan à des photos aériennes de 1958, et conclut à la migration de la frontière sud du Sahara : il estime que le désert avance à une vitesse de 5.5 km par an. De nombreux autres études ont suivi cet exemple et ont tenté de

fournir des estimations quantifiées de la vitesse d'expansion du Sahara, de la superficie des terres "détruites", ou encore du temps restant avant que la totalité des terres arables d'Afrique ne soient désertifiées, en l'occurrence 200 ans (Dregne 1983, Dregne & Tucker 1988, Hellden 1991).

L'analyse des premières données satellitaires a cependant permis de démentir cette idée de plus en plus colportée. A l'aide de données Landsat MSS, de relevés de terrain et de photographies aériennes, Hellden (1988) a pu démontrer que la frontière du désert au Soudan n'avait pas migré comme le soutenait Lamprey (1975). A l'échelle du Sahel, Tucker *et al.* (1991) ont utilisé les données NDVI AVHRR (voir Chapitre 2.2.) sur une période de 10 ans pour mettre en évidence les fluctuations interannuelles de la frontière sud du Sahara, en insistant surtout sur le fait que ces variations sont fonction des variations interannuelles des précipitations. La même étude a été répétée sur une période plus longue (Tucker & Nicholson 1999) et a abouti aux mêmes résultats. Plus localement (et à l'aide de données satellitaires haute résolution), Hanan *et al.* (1991) ont montré sur la région du Ferlo au Sénégal que le couvert végétal n'était pas non plus en train de disparaître au profit de zones désertiques. Ces études satellitaires ont ainsi rappelé une caractéristique très importante des milieux arides et semi-arides qui a été souvent oubliée dans les études parlant d'avancée du désert : ces milieux ont des fluctuations interannuelles très fortes qui sont fonction de la variabilité des précipitations. De plus, la végétation de ces milieux arides est caractérisée par une capacité de résilience (Walker 1981) très forte aux événements climatiques extrêmes, capacité qui a été certainement sous-estimée dans les études précédemment citées.

Enfin, le fait que la plupart des études effectuées sur la désertification du Sahel soient d'origine occidentale (européenne ou américaine pour la plupart) peut avoir induit des erreurs d'interprétation en raison d'un manque de connaissance des systèmes locaux. Les façons de vivre et les méthodes agricoles des populations sahéniennes ont pu parfois être considérées comme un "danger" pour les écosystèmes environnants (le pastoralisme par exemple), alors qu'en général ces systèmes sont habilement adaptés aux capacités du milieu (Mortimore 1989, Livingstone 1977).

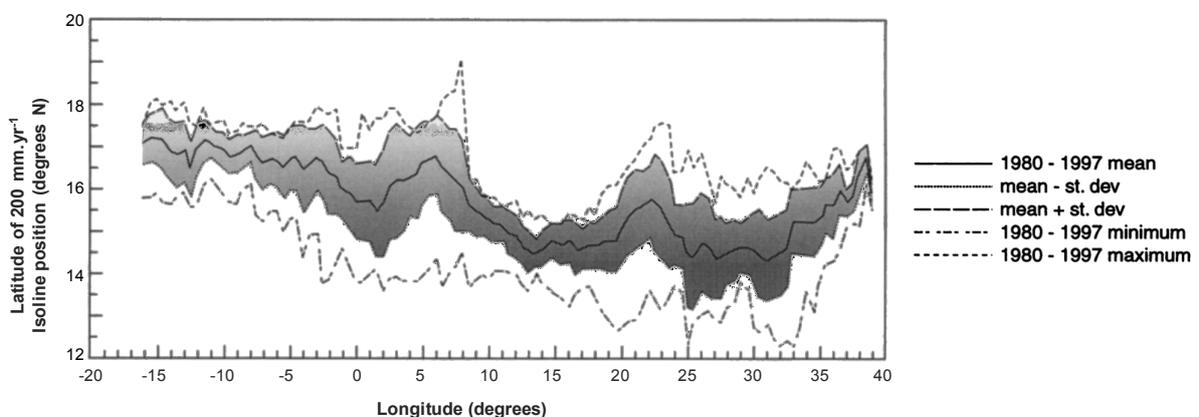


Figure 18. Expansion et contraction du Sahara sur la période 1980-1997 (source : Tucker & Nicholson (1999))

4.3. La théorie de rétroaction climatique (albédo)

Une autre théorie ayant été largement plébiscitée durant les années 1980 s'intéresse plus particulièrement aux rétroactions du système surface-végétation sur le climat, c'est-à-dire la mousson africaine dans notre cas. Otterman (1974) et Charney (1975) ont été les premiers à défendre l'hypothèse qu'une surface dénudée, après avoir subi une forte dégradation du couvert végétal (surpâturage dans le cas d'Otterman (1974), sécheresses dans le cas de Charney (1975)), induisait une augmentation significative de l'albédo, provoquant à son tour une diminution des précipitations par effet de rétroaction : moins d'énergie absorbée par la surface se traduit par une subsidence sur la zone (l'air a tendance à descendre), ce qui empêche la convection et les orages de se développer. Cette théorie présente donc un caractère d'irréversibilité, ou tout au moins un fort feedback positif, puisque la diminution des précipitations conduit à son tour à une réduction supplémentaire de la couverture végétale.

Au fil du temps l'idée a été complétée, en incluant par exemple le bilan du rayonnement thermique, le bilan d'eau et le flux d'évapotranspiration, ainsi que des bilans d'énergie statique humide (Eltahir & Gong 1996), toujours avec l'idée d'un feedback positif. Plutôt qu'un moteur de la sécheresse sahélienne, ces théories correspondent, d'après le relatif consensus actuel, à un rôle d'amplificateur des surfaces continentales, capables de démultiplier l'impact des variations de température des océans (Zeng *et al.* 1999, Giannini *et al.* 2003). Notons aussi que l'étude des feedbacks par modélisation est dépendante de la qualité de cette modélisation.

Pour ce qui est du déclenchement de la convection, Taylor *et al.* (2011) et Taylor *et al.* (2012) montrent que les gradients de flux de surface, entre zones sèches et zones ayant reçu des précipitations auparavant, sont des éléments très favorables, la convection se développant plutôt sur zones sèches, alors que les modèles de circulation générale ont tendance à faire l'inverse. Cela ne remet pas forcément en cause l'existence de feedbacks positifs, mais cela illustre la difficulté à les identifier et à les quantifier.

Cependant, malgré la popularité de la théorie originelle de Charney (1975) et de ses déclinaisons plus récentes (Sud & Fennessy 1982, Xue & Shukla 1993, Taylor *et al.* 2002), leur validité n'a pas pu être véritablement établie, ni par les modèles ni par les observations de terrain. Dans le cas du Sahel, le retour des précipitations dans des zones où les surfaces étaient restées dénudées pendant plusieurs années est en contradiction avec la théorie. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les changements de surface et l'action anthropique étaient à l'origine des sécheresses des années 70 et 80 reste invalidée.

La désertification du Sahel est un sujet qui a prêté à de nombreuses controverses, qui a suscité une large institutionnalisation du débat, ainsi que l'intérêt de nombreux acteurs scientifiques et politiques. La théorie d'un désert du Sahara menaçant le reste du continent a eu un franc succès pendant de longues années. Cependant, la difficulté d'accéder à des observations fiables sur de grandes échelles de temps et d'espace rendait tout diagnostic global hasardeux, comme en témoignent les différentes tentatives orchestrées par les Nations Unies de cartographier les zones menacées par la désertification. Dans ce contexte, l'arrivée de la télédétection a offert un outil extrêmement précieux, notamment grâce aux indices de végétation disponibles depuis le début des années 1980, qui ont permis d'effectuer les premières études de suivi de la végétation à l'échelle globale.

Chapitre 2. La télédétection au service du suivi de la végétation

1. Les indices de végétation satellitaires

1.1. Propriétés optiques de la végétation

L'interaction du rayonnement avec les tissus végétaux est étudiée depuis plusieurs décennies maintenant. On trouve communément les bases physiques et les principales applications dans des ouvrages comme Gates (1980), Bonn & Rochon (1996), Bonn (1996), Lunetta & Elvidge (1999). Nous rappellerons ici brièvement les grands lignes des propriétés spectrales des végétaux et les indices et méthodes qui en découlent (plus de détails pourront être trouvés dans Guyot (1989), Bonn & Rochon (1996), ou sur le site web <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/>).

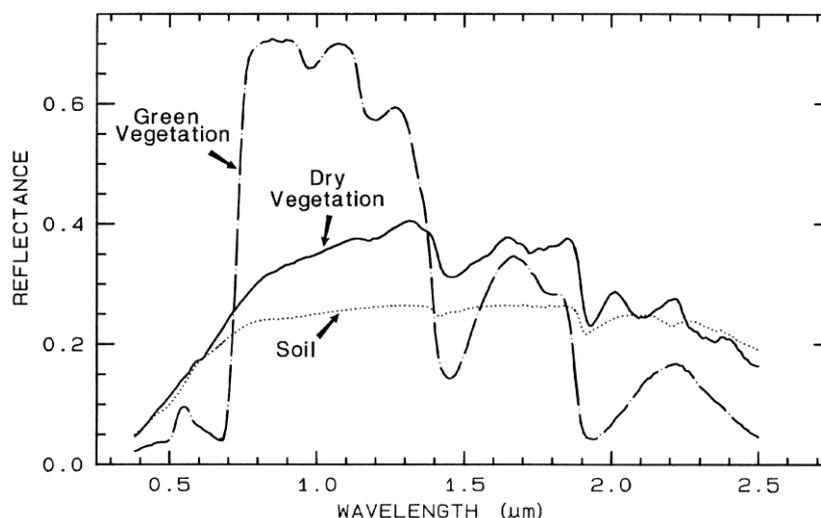


Figure 19. Signatures spectrales (réflectances) caractéristiques de la végétation verte, de la végétation sèche, et d'un sol nu (source <http://speclab.cr.usgs.gov/>).

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est réfléchi par la surface de la Terre et est ensuite mesuré par les capteurs (radiomètres) installés à bord des satellites de télédétection. Or, chaque type de surface est caractérisé par une signature spectrale bien spécifique : la végétation, l'eau, la neige, ou encore un sol nu ne réfléchissent pas le rayonnement solaire de la même façon. La signature spectrale est une propriété physique du matériau qui est indépendante du rayonnement électromagnétique incident. Les indices de végétation satellitaires sont ainsi basés sur les propriétés optiques de la végétation, et en particulier sur la forte absorption de la végétation verte dans les

longueurs d'onde du rouge (625-780nm) et sur sa forte réflectivité dans le domaine du proche-infrarouge ou IR (780 nm-3 μ m) (Gates 1980) (Figure 19).

Les propriétés optiques du couvert végétal dépendent à la fois de la nature des plantes qui les composent (les résineux ont par exemple une réflectance plus faible que les feuillus dans le proche IR), de leur état de santé (Figure 20), mais également de la structure du couvert (densité, organisation spatiale, angle d'inclinaison des feuilles, taux de recouvrement du sol...).

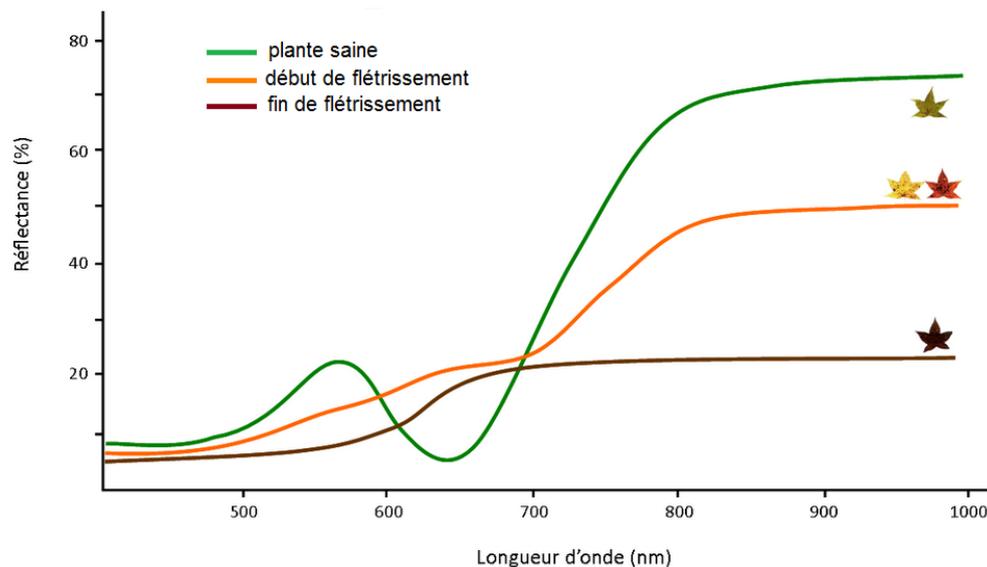


Figure 20. Signature spectrale d'une plante en fonction de son état physiologique (source : <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvcd/envcal/html/>)

Les feuilles sont les surfaces principales diffusant et absorbant le rayonnement solaire dans un couvert végétal. Leurs propriétés optiques dépendent de leurs caractéristiques biochimiques et en particulier de la teneur en pigments, de l'anatomie des feuilles (structure cellulaire), de la teneur en eau ou encore de leur état physiologique, tout autant de variables qui varient au cours du temps. Tous les végétaux contiennent des pigments dont les principaux sont la chlorophylle (pigments verts), les carotènes (pigments orangés) et les anthocyanes (pigments bleu rouge). Les pigments chlorophylliens sont largement majoritaires. Or, la chlorophylle présente deux pics d'absorption dans le bleu (480 nm) et le rouge (660 nm), provoquant un maximum relatif de réflectance autour du vert (550 nm), ce qui explique qu'à nos yeux les feuilles aient une couleur verte. C'est donc la forte teneur en chlorophylle des plantes vivantes qui induit la forte absorption d'un couvert végétal dans les longueurs d'onde du rouge ; cette énergie absorbée est utilisée par la plante pour les processus de photosynthèse.

En revanche, ces mêmes pigments chlorophylliens sont totalement transparents aux plus grandes longueurs d'onde du rayonnement solaire. Le rayonnement proche-IR traverse donc la feuille, mais il est fortement réfléchi lorsqu'il atteint la couche où ont lieu les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère.

1.2. A bord des satellites

1.2.1. Principe de la mesure

La réflectance désigne le rapport entre l'énergie réfléchiée par une surface et l'énergie incidente reçue par cette même surface pour une longueur d'onde donnée. C'est donc une variable sans dimension qui varie de 0 à 1, souvent exprimée en pourcentage. Toutefois, le capteur optique à bord d'un satellite ne mesure pas directement une réflectance. Il mesure une luminance spectrale (parfois appelée radiance, selon le terme anglophone), qui représente la puissance émise par une source par unité de surface et par unité d'angle solide dans une direction donnée (en $W/sr/m^2$). La luminance dépend donc de la superficie de la source qui réfléchit le rayonnement, de la géométrie d'acquisition (géométrie source/cible/capteur), et des caractéristiques de la bande spectrale du capteur. Surtout, la luminance dépend de l'éclairement reçu par une surface : on ne peut pas comparer directement les luminances acquises par un même capteur à deux instants différents ; il faut d'abord convertir la luminance en réflectance.

En télédétection optique, le principe de base consiste donc à mesurer le rayonnement solaire réfléchi par une surface donnée et à en déduire des informations sur cette surface. Les satellites de télédétection mesurent une portion du rayonnement électromagnétique qui a été réfléchi par une surface particulière (avec ses caractéristiques propres, notamment la rugosité et la topographie qui déterminent la/les direction(s) dans laquelle le rayonnement incident est réfléchi), a traversé l'atmosphère, et a enfin été mesurée par un capteur à bord d'un satellite donné, qui imposent des caractéristiques techniques spécifiques (orbite du satellite, géométrie d'acquisition, propriétés spectrales du capteur). On différencie ainsi les réflectances TOA (Top of the Atmosphere) des réflectances TOC (Top of Canopy). Pour passer des luminances mesurées par le capteur au sommet de l'atmosphère à une estimation des réflectances au sommet de la canopée, il faut donc tenir compte de plusieurs sources d'erreur, ou tout au moins d'incertitude, qui sont principalement la couverture nuageuse, la composition atmosphérique, la géométrie d'acquisition, la dégradation des capteurs optiques, et la dérive orbitale. C'est ce que nous allons détailler dans le paragraphe suivante.

1.2.2. Sources d'erreur et d'incertitude

- La couverture nuageuse :

Les nuages empêchent le capteur de "voir" la cible (la surface de la Terre) : les nuages réfléchissent fortement le rayonnement incident, ne permettant pas au rayonnement d'arriver de la surface jusqu'au capteur. Une image prise avec une forte couverture nuageuse ne peut pas être corrigée : il faut filtrer les images "contaminées". Une technique facilement réalisable repose sur des observations satellitaires de température, la température des nuages étant plus basse que celle de la surface (d'autant plus basse que les nuages sont dans les hautes couches de l'atmosphère et que l'on observe des régions chaudes

comme les tropiques). Cependant, cette méthode est limitée et permet essentiellement de filtrer les nuages profonds mais pas les nuages les plus fins. Pour compléter cette approche, on applique alors la composition temporelle des images (sélection d'une image parmi une série de plusieurs images, le nombre variant en fonction de la région observée) (Holben 1986). De plus, les nuages induisent également des effets d'ombre qui peuvent amener à des fausses interprétations.

- Les effets atmosphériques :

Le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les molécules gazeuses et les particules contenues dans l'atmosphère (aérosols, poussières, gouttelettes d'eau). De plus, ce contenu varie dans le temps. Deux phénomènes principaux surviennent : l'absorption et la diffusion atmosphériques. Les molécules gazeuses et les particules vont arrêter une partie du rayonnement électromagnétique et en dévier une autre portion, diminuant ainsi l'énergie totale arrivant de la surface terrestre et mesurée par le capteur. La réflectance mesurée par le capteur satellitaire ne provient donc pas uniquement de la cible au sol. La correction de ces effets est complexe, puisqu'elle nécessite la connaissance de nombreux paramètres atmosphériques (contenu en humidité relative, en aérosols, en poussières, qui sont mal connus sur les périodes longues).

- Variations de la géométrie d'acquisition

Pour déterminer la réflectance de la surface, il faut connaître la position du soleil (la source), du satellite (capteur) par rapport à la surface (la cible). Il faut donc connaître avec précision l'orbite du satellite et son heure de passage au-dessus de la cible, qui définissent l'angle zénithal solaire et déterminent la quantité de rayonnement électromagnétique incident. Les variations dans l'angle de visée du capteur ont également leur importance, notamment sur la part d'ombre (au nadir, aucune ombre n'est portée par le couvert) et sur la portion de sol nu vus par le capteur.

- Dégradation des capteurs

Pour que les réflectances mesurées par un capteur correspondent aux réflectances réelles mesurées sur la Terre, il faut que le capteur soit correctement étalonné dans chaque longueur d'onde. Ces calibrations sont effectuées avant le décollage du satellite, et pour les satellites récents à bord des satellites également. Pour les capteurs AVHRR (voir 3.1.1.), la méthode de calibration est différente et s'effectue au cours de la phase de vol, via des cibles radiométriquement stables au cours du temps (comme les déserts).

Toutefois, au cours du temps les capteurs peuvent se dégrader, et leur réponse spectrale être modifiée. Pour disposer d'estimations correctes de la réflectance au sommet de la canopée, il faut donc que la calibration des capteurs soit assurée au cours du temps, ou tout au moins que cela soit pris en compte et corrigé dans les jeux de données produits.

- Dérive orbitale

Au cours du temps également, les satellites peuvent subir une dérive de leur altitude, que l'on nomme dérive orbitale. Si le satellite n'est pas équipé pour rétablir son orbite lors de la phase de vol (par des mécanismes de propulsion), ou bien si ce mécanisme n'est plus opérationnel, alors le satellite va dériver lentement, ce qui va provoquer un décalage progressif de l'heure de passage du satellite au-dessus de la même zone géographique. Ce décalage progressif induit des modifications dans la géométrie d'acquisition, caractérisées par un angle zénithal solaire plus important. Il complique aussi les corrections atmosphériques quand le satellite passe plus tard dans la journée, et que l'épaisseur de l'atmosphère à traverser augmente. Ces effets doivent être pris en compte et corrigés.

Tous ces effets sont très marqués lorsque l'on utilise directement les réflectances, mais certains d'entre eux diminuent considérablement lorsque les réflectances sont combinées entre elles. C'est pourquoi de nombreux auteurs se sont attachés à mettre au point des indices de végétation, qui sont des combinaisons (linéaires ou non) des réflectances dans les bandes du rouge et du proche infrarouge.

2. L'indice de Végétation Normalisé (NDVI)

2.1. Historique

Lors d'une étude portant sur l'estimation du couvert végétal sur un site de forêt tropicale, Jordan (1969) est le premier à montrer l'intérêt du ratio des réflectances dans le proche infrarouge et dans le rouge pour la détection de la végétation (Huete & Jackson 1987, Jackson & Huete 1991). L'indice du ratio a de suite été repris par plusieurs auteurs, notamment par Pearson & Miller (1972) et Colwell (1973), qui ont à leur tour étudié un couvert herbacé à l'aide de radiomètres manuels.

Un peu plus tôt (en 1957), le premier satellite artificiel était lancé dans l'espace par l'ex-URSS : c'est le satellite Spoutnik. D'autres missions spatiales ont rapidement suivi, notamment du côté soviétique (série des Spoutnik, Cosmos) et du côté américain (Explorer, TIROS-N). En 1972, la NASA initiait la série des Landsat, initialement nommée ERT (pour *Earth Resources Technology Satellites*). Le premier satellite de la série (Landsat-1) embarquait à son bord le capteur multi-spectral MSS (MultiSpectral Scanner) dont les 4 bandes spectrales avaient été définies pour capter le rayonnement solaire émis dans le visible et le proche-IR, avec une résolution spatiale de 80 m. A cette époque, plusieurs études se penchent alors sur l'utilisation des données Landsat pour la détection du couvert végétal, notamment dans les Grandes plaines centrales américaines, qui échantillonnent une large gamme de latitudes, et donc d'angles solaires (Carnegie *et al.* 1974, Rouse *et al.* 1974b, Deering 1978). Ces auteurs ont pu montrer l'efficacité du ratio proche-IR/rouge, notamment pour la détection

des variations saisonnières du couvert végétal, mais ils ont également démontré la grande sensibilité du simple ratio aux variations de composition atmosphérique ainsi qu'à la réponse spectrale des sols.

Rouse *et al.* (1974a) ont alors proposé d'utiliser un indice de végétation normalisé construit à partir de la différence entre les bandes proche-IR et rouge et normalisé par leur somme (Tableau 4). D'abord simplement baptisé "Vegetation Index", cet indice a très vite été renommé NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et est devenu un indice phare de l'observation de la végétation, de par sa simplicité de calcul et sa relative robustesse aux biais liés aux mesures de réflectance. Cependant, il reste sensible à un certain nombre de facteurs que nous allons détailler maintenant.

2.2. Caractéristiques et limitations du NDVI

Par construction, le NDVI s'étend de -1 à 1 (si l'on suppose que les réflectances sont comprises entre 0 et 1, ce qui est le cas sauf en cas de difficulté dans l'estimation de l'éclairement en configuration complexe, ou bien en cas de sur-corrrection des effets atmosphériques par exemple). Les surfaces végétalisées ont des valeurs positives avec un NDVI d'autant plus fort que la couverture végétale est dense (typiquement 0.8 pour les couverts les plus denses). De nombreuses études ont montré que le NDVI est directement corrélé à la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par les plantes, notée "fPAR" (Asrar *et al.* 1985, Sellers 1985, Myneni *et al.* 1995, Hanan *et al.* 1997a). Il est également relié à d'autres variables (tout autant reliées entre elles), comme le taux de couvert (surface projetée des feuilles vues à la verticale au-dessus du couvert, noté "fcover"), ou l'indice foliaire ("LAI" pour Leaf Area Index), c'est-à-dire la surface de feuilles par unité de surface au sol. Cependant, le NDVI connaît un phénomène de saturation vis-à-vis de certaines variables pour des couvertures végétales denses à très denses, problématique pour l'étude de biomes ayant un indice foliaire supérieur à 2 ou 3 (Sellers 1985) (Figure 21).

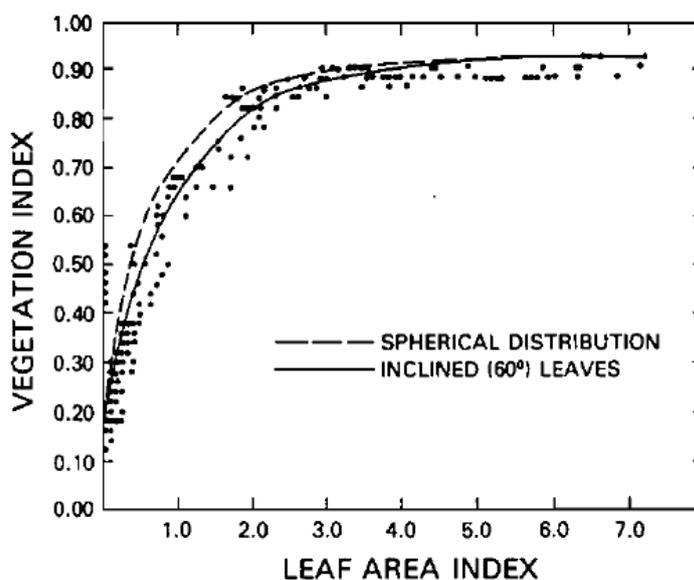


Figure 21. Relation entre NDVI et LAI (source : Sellers (1985))

Les sols nus quant à eux ont une signature spectrale qui varie en fonction de leur couleur et de leur contenu en eau (humidité superficielle du sol), mais ils ont en général un NDVI légèrement positif. L'arrière-plan sol modifie le NDVI (Huete & Jackson 1987, Huete 1988, Huete & Tucker 1991, Jackson & Huete 1991, Kammerud 1996), et il a un effet particulièrement important dans les régions les plus arides où la couverture végétale est très clairsemée, ou au cours des premières étapes de croissance des plantes (Huete *et al.* 1984). Cependant, leurs effets sont souvent difficiles à prendre en compte, à moins de bien connaître les propriétés du sol (par exemple quand il y a une saison où le sol est complètement dénudé).

Les nuages épais peuvent être identifiés par leur NDVI négatif, mais ce n'est pas le cas pour les nuages plus ténus de type cirrus, ou ceux dont la taille est inférieure à la résolution du capteur. Puisque la couverture nuageuse atténue les valeurs du NDVI, la méthode adoptée usuellement est la combinaison d'un masque basé sur les températures avec une composition temporelle des images. La méthode la plus courante de composition temporelle est le *Maximum Value Compositing* (MVC) où, dans une période de temps donnée (habituellement de 7 à 30 jours), l'image où le NDVI est maximum est retenue parmi toutes les images disponibles. Le MVC permet également d'atténuer l'effet d'autres sources d'erreur atténuant le signal comme les effets atmosphériques et les changements de géométrie d'acquisition (Figure 22), bien que des biais résiduels persistent (Holben 1986).

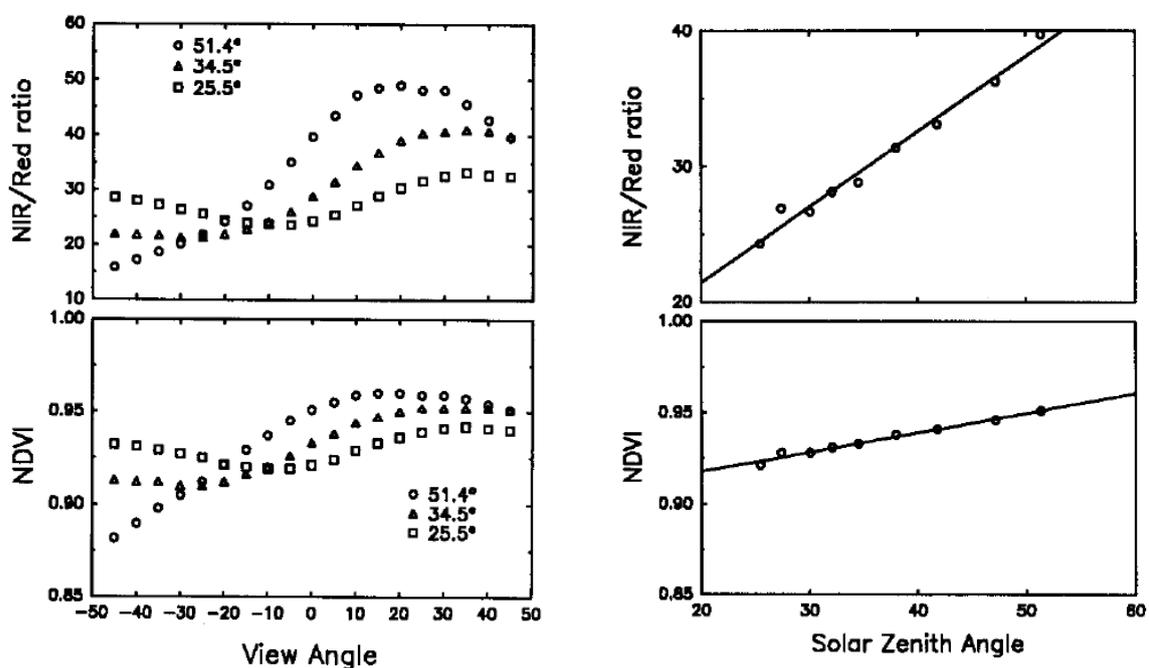


Figure 22. Effet de a) l'angle de visée et b) l'angle zénithal solaire sur le ratio proche IR/rouge (figures du haut) et sur le NDVI (figures du bas) (source : Jackson & Huete (1991))

Les effets de la variation de la composition atmosphérique sur le NDVI sont variables : alors qu'une augmentation du contenu en vapeur d'eau ou en aérosols tend à diminuer le NDVI, une augmentation de la concentration en ozone tend à l'augmenter (Tableau 3). Le MVC représente donc une méthode

appropriée pour réduire les effets des premiers, mais une correction spéciale est nécessaire pour prendre en compte les variations du contenu en ozone.

Tout comme pour les réflectances, le NDVI va également dépendre de l'anisotropie particulière de la cible (rugosités), de la géométrie d'illumination et d'observation, de la dérive orbitale du satellite, de la dégradation des capteurs. Enfin, chaque capteur est unique et induit un NDVI différent : les bandes spectrales d'acquisition sont définies en fonction des objectifs scientifiques de la mission, des contraintes techniques, et de la technologie disponible. Deux NDVI issus de capteurs satellitaires différents ne sont donc pas directement comparables.

	Ozone 0.247–0.48 (cm atm ⁻¹)	Water vapour 0.5–4.1 (g cm ⁻²)	Rayleigh 1013 mb	Aerosol V: 60 km–10 km Continental
Channel 1	↘ 4.2% to 12%	↘ 0.7% to 4.4%	↗ 0.02 to 0.06	↗ 0.005 to 0.12
Channel 2	—	↘ 7.7% to 25%	↗ 0.006 to 0.02	↗ 0.003 to 0.083
NDVI (bare soil) $r_1 = 0.19$, $r_2 = 0.22$	↗ 0.02 to 0.06	↘ 0.011 to 0.12	↘ 0.036 to 0.094	↘ 0.006 to 0.085
NDVI (deciduous forest) $r_1 = 0.03$, $r_2 = 0.36$	↗ 0.006 to 0.017	↘ 0.036 to 0.038	↘ 0.086 to 0.23	↘ 0.022 to 0.035

Tableau 3. Effets des variations de la composition atmosphérique sur les données AVHRR ([source](#) : El Saleous *et al.* (2000), tiré de Vermote *et al.* (1996))

2.3. Autres indices

Au fil des années et notamment avec l'arrivée de nouveaux capteurs plus adaptés au suivi de la végétation, qui sont caractérisés par des résolutions spectrales et spatio-temporelles plus fines et plus adaptées (voir section 3.2.), de nombreux auteurs se sont attachés à construire d'autres indices de végétation que le NDVI, afin de minimiser les biais dus aux effets atmosphériques, topographiques, à l'arrière-plan sol, à la géométrie d'acquisition. Certains indices reposent sur des formulations mathématiques plus complexes, d'autres s'appuient sur des données acquises dans d'autres bandes spectrales que le rouge et le proche-IR (voir Tableau 4). Par exemple, des indices de végétation comme le SAVI (Huete 1988) et ses dérivés ont été construits pour atténuer l'influence de l'arrière-plan sol dans la détection de la végétation, mais ces indices nécessitent de faire des hypothèses sur la distribution spatiale de la réponse spectrale de l'arrière-plan sol, ce qui reste compliqué pour de plus grandes échelles spatiales que l'échelle locale. Le NDVI reste donc encore aujourd'hui largement utilisé dans la littérature pour la détection des changements de la couverture végétale au cours du temps.

Indice	Formule	Référence
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R}$	Rouse <i>et al.</i> (1974a)
TVI (Transformed Vegetation Index)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$	Rouse <i>et al.</i> (1974a)
PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$PVI = \sqrt{(\rho_{R_{soil}} - \rho_{R_{veg}})^2 + (\rho_{IR_{soil}} - \rho_{IR_{veg}})^2}$	Richardson & Wiegand (1977)
SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)	$SAVI = (1+L) \frac{(\rho_{IR} - \rho_R)}{(\rho_{IR} + \rho_R + L)}$	Huete (1988)
TSAVI (Transformed SAVI)	$TSAVI = \frac{a \cdot (\rho_R - a \cdot \rho_{IR} - b)}{(\rho_R + a \cdot \rho_{IR} - a \cdot b)}$	Major <i>et al.</i> (1990)
GNDVI (Green NDVI)	$NDVI_g = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{green})}{(\rho_{NIR} + \rho_{green})}$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
GEMI	$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) \frac{(\rho_R - 0.125)}{(1 - \rho_R)}$	Pinty & Verstraete (1992)
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L}$	Huete <i>et al.</i> (2002)

Tableau 4. Exemples d'indices de végétation satellitaires (liste non exhaustive).

2.4. Estimation de la productivité à partir du NDVI

Une des utilisations les plus répandues du NDVI pour le suivi des couverts végétaux est l'estimation de la production primaire nette, c'est-à-dire la production de tissus végétaux, en poids sec, sur une période donnée. Une telle estimation repose sur l'estimation du fPAR, qui est multiplié par le PAR (Photosynthetically Active Radiation) incident pour donner le rayonnement PAR absorbé par la végétation et intégré sur la période considérée. Ce rayonnement absorbé est converti en tissus formés (ou en produit de la photosynthèse dans le cas de l'estimation de la production primaire brute) par un coefficient appelé LUE (pour Light Use Efficiency). Ce modèle tient son origine dans les travaux de Monteith (1972). Il a été abondamment utilisé depuis, de l'échelle de la parcelle à l'échelle globale (Prince 1991, Ruimy *et al.* 1994, Field *et al.* 1995, Hanan *et al.* 1997b, Ruimy *et al.* 1999), grâce justement à l'estimation du fPAR à partir des satellites, au point d'être considéré aujourd'hui comme un produit distribué en routine à partir de plusieurs jeux de données (Zhao *et al.* 2005a). Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'incertitudes importantes, en particulier sur le LUE (voir Sjöström *et al.* (2013) pour un exemple africain).

Un second aspect du suivi de la végétation qui a été à la fois très utilisé et également couronné d'un succès certain est le suivi des rythmes, de la saisonnalité des couverts végétaux, appelée alors phénologie foliaire. On utilise ici le lien entre NDVI et LAI, et des paramètres comme le début et la fin du cycle de NDVI, son maximum, ou sa forme. Ces informations servent à détecter des changements comme par exemple les évolutions climatiques, à caractériser le fonctionnement des couverts végétaux, ou encore à établir des classifications et des cartes sur la base de différences phénologiques (Justice *et al.* 1985, DeFries *et al.* 1995, Moulin *et al.* 1997, Myneni *et al.* 1997a, Zhang *et al.* 2003, Heumann *et al.* 2007, Delbart *et al.* 2008, Vintrou *et al.* 2012).

Malgré l'existence de certaines limitations dans l'usage et l'interprétation du NDVI dues sa sensibilité à des facteurs comme l'arrière-plan sol, les effets atmosphériques, la géométrie d'acquisition, le NDVI reste encore aujourd'hui l'indice le plus largement utilisé par la communauté scientifique pour la détection et l'étude de l'évolution de la couverture végétale grâce à sa simplicité de calcul et à ses bonnes performances. Les séries temporelles de NDVI, en particulier, se sont avérées très efficaces pour estimer la productivité des couverts végétaux ainsi que leurs rythmes phénologiques.

3. Les principaux jeux de NDVI

3.1. Les capteurs AVHRR

3.1.1. Caractéristiques des instruments

Nous allons donner ici quelques informations concernant les capteurs AVHRR, utiles pour une meilleure compréhension et interprétation des données de NDVI qui en découlent. Ces éléments sont explicités plus en détails dans les ouvrages de Cracknell (1997), de Kidwell (1998), ou dans les récents travaux de thèse de Nagol (2011), entre autres ouvrages.

Les capteurs AVHRR ont été embarqués à bord des satellites météorologiques POES (*Polar Operational Environmental Satellites*) de la NOAA dès 1978, à bord de TIROS-N, puis à bord de la série des satellites NOAA-7 à NOAA-19. Initialement, l'instrument AVHRR était destiné à des applications météorologiques d'observation de la couverture nuageuse et des émissions thermiques de la Terre. Depuis 1978, trois versions de ce capteur ont vu le jour (Kidwell 1998). La première version (AVHRR-1) embarquée sur le satellite TIROS-N en 1978 ne comprenait que 4 bandes spectrales. La seconde version (AVHRR-2), sensiblement améliorée avec ses 5 bandes spectrales, fut embarquée pour la première fois sur NOAA-7, lancé en juin 1981. La troisième version (AVHRR-3) est utilisée depuis Mai 1998 (à partir de NOAA-15) et comporte 6 bandes spectrales. Généralement, seules les

données issues des capteurs AVHRR-2 et -3 sont utilisées dans la fabrication des produits de NDVI AVHRR. Les bandes spectrales correspondant aux longueurs d'onde du rouge et du proche-IR sont respectivement définies entre 580 et 680 nm et entre 725 et 1000 nm. Les instruments comportent également des bandes spectrales dans les longueurs d'onde du moyen-IR et du thermique.

Les données NDVI issues de ces capteurs sont donc disponibles depuis maintenant plus de 30 ans à une résolution spatio-temporelle adéquate pour le suivi de la végétation. Les données brutes de réflectance ont en effet une fréquence temporelle journalière et une résolution spatiale kilométrique. Les satellites NOAA occupent une orbite héliosynchrone à une altitude d'environ 833 kilomètres : ils font le tour de la Terre toutes les 102 minutes environ et survolent la même région à la même heure locale tous les jours. Le champ de vision du capteur est de 110°, soit une fauchée au sol de 2400 km. Le champ de vision instantané est donc considérablement variable selon que la mesure de réflectance est effectuée au nadir (pixels d'1 km²) ou aux extrémités de la fauchée (pixels d'environ 16 km²).

Avec l'apparition quasi contemporaine des premiers indices de végétation satellitaires et en particulier celle du NDVI (Rouse *et al.* 1974a), les bandes spectrales AVHRR dans le rouge et le proche-IR se sont révélées très intéressantes pour d'autres finalités que les objectifs initiaux d'ordre météorologique. Les données AVHRR ont ainsi rapidement inspiré de nombreuses études démontrant leur potentiel pour le suivi de la couverture végétale et de sa phénologie (Townshend & Tucker 1981, Tucker *et al.* 1984, Tucker *et al.* 1985, Tucker *et al.* 1986).

Depuis cette époque, le NDVI issu des données AVHRR a été très utilisé pour étudier l'évolution du couvert végétal dans de nombreuses parties du globe pour des biomes variés (Tucker *et al.* 1991, Myneni *et al.* 1997a, Tucker *et al.* 2001, Lee *et al.* 2002, Lucht *et al.* 2002, Jia *et al.* 2003, Piao *et al.* 2003, Slayback *et al.* 2003, Delbart *et al.* 2006, Piao *et al.* 2006b, Fensholt *et al.* 2012), mais également dans des études plus globales visant à mettre en relation le NDVI à d'autres composantes du climat (Bounoua *et al.* 2000, Ichii *et al.* 2002, Yu *et al.* 2003, Zhou *et al.* 2003, Paruelo *et al.* 2004, Piao *et al.* 2004), comme par exemple les températures océaniques (Myneni *et al.* 1996, Jarlan *et al.* 2005, Huber & Fensholt 2011), les températures de surface (Piao *et al.* 2006c), le phénomène El Niño (Anyamba & Eastman 1996), la production primaire nette (Field *et al.* 1995, Prince & Goward 1995, Cao *et al.* 2004, Piao *et al.* 2006a), ou encore l'occupation du sol (Lambin & Ehrlich 1997, Tappan *et al.* 2004). Enfin, les données NDVI AVHRR ont également été très utilisés comme principale source de produits dérivés tels que des estimations globales de la production primaire nette (Prince & Goward 1995), du fPAR et du LAI (Myneni & Williams 1994, Myneni *et al.* 1997b), des superficies brûlées (Barbosa *et al.* 1999), de la température de surface (Jin 2004), de la température de l'air (Prihodko & Goward 1997) ou encore de cartes globales d'occupation du sol (DeFries *et al.* 1995)

3.1.2. Jeux de NDVI issus des données AVHRR

Depuis le début de l'acquisition des données AVHRR, plusieurs jeux de NDVI différents ont été élaborés à partir des mêmes données initiales, en améliorant petit à petit les chaînes de traitement. On trouve ainsi notamment les jeux PAL (*Pathfinder Land Dataset*), GVI (*Global Vegetation Index*), FASIR (*Fourier-Adjusted, Sensor and Solar zenith angle corrected, Interpolated, Reconstructed*), GIMMS (*Global Inventory Modeling and Mapping Studies*), LTDR (*Long Term Data Record*), et le tout récent GIMMS-3g (GIMMS "3^e génération").

Tous ces jeux de données sont issus des mêmes données brutes LAC (*Local Area Coverage*) échantillonnées à une échelle d'environ 1.1 km et à une résolution temporelle journalière (Kidwell 1998). Ces données haute résolution sont transmises et récupérées en temps-réel à des stations localisées : les données LAC sont disponibles sur demande et pour certaines régions du monde uniquement. Parce qu'elles nécessitent une très grande capacité de mémoire, elles ne peuvent pas être stockées à bord des satellites ; elles sont transformées en données GAC (*Global Area Coverage*) à bord même des plateformes (James & Kalluri 1994). L'algorithme effectue la moyenne des 4 premiers pixels LAC de trois rangées de cinq pixels (Figure 23) ; c'est-à-dire qu'après lecture des données des 4 premiers pixels, ni le pixel d'après ni les deux lignes suivantes ne sont considérés (Kidwell 1998). Les pixels GAC sont ensuite attribués à une grille de sortie en coordonnées géographiques d'une résolution d'environ 8 x 8 km par la technique du "forward mapping": chaque pixel GAC est attribué au pixel de la grille de sortie auquel son centre appartient. Ainsi, plusieurs pixels GAC peuvent être associés au même pixel de la grille finale ; c'est alors la valeur maximale du NDVI qui est retenue.

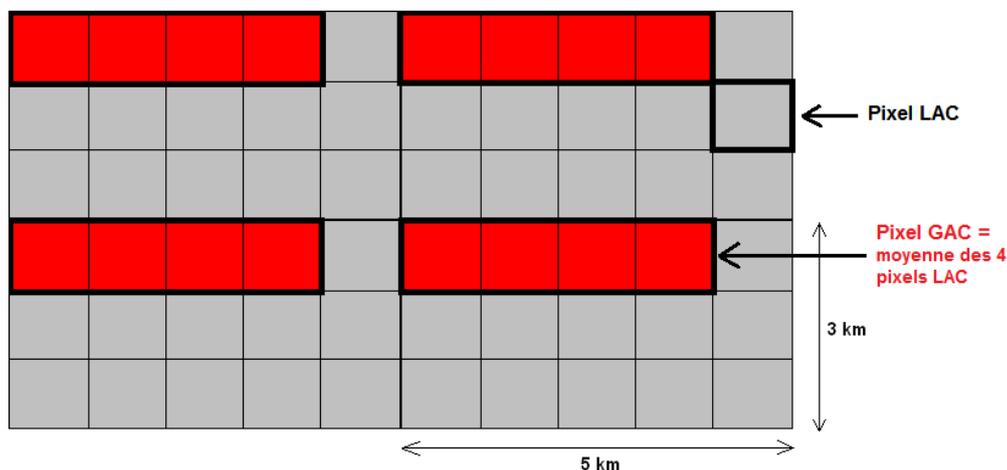


Figure 23. Construction des pixels GAC à partir des pixels LAC à bord des satellites NOAA-AVHRR.

Bien que le choix de la méthode d'échantillonnage des données LAC aux données GAC ait été peu documenté pendant la phase de conception des capteurs et soit critiquée (Justice *et al.* 1989), les données GAC constituent la base de quasiment tous les jeux de NDVI AVHRR produits à l'échelle globale (Tableau 5). Les utilisateurs doivent cependant garder en tête que la méthode employée peut

engendrer une réduction de la représentativité des surfaces observées, surtout si ces surfaces sont radiométriquement hétérogènes (selon la topographie, le type de sol...). Justice *et al.* (1989) ont ainsi démontré que les données GAC sont caractérisées par une variance plus faible et une moindre occurrence des valeurs extrêmes par rapport aux données LAC.

Name of dataset	LTDR V3	PAL	GIMMS-G	GVI	USGS	USGS global
Spatial Extent	Global	Global	Global	Global	Conterminous USA and Alaska	Global
Spatial Resolution	0.05 degree (5km)	8 km	8 km	16 km	1km	1, 2, 4, 8, 16 km
Temporal Compositing period	Daily	10 day & monthly	bimonthly	weekly & monthly	weekly & biweekly	10day
Availability	1981- 2006	1981-2000	1981-2006	1985-2000	1989-present	06/1992 to 09/1993 and 02/1995 to 05/1996
Calibration	(Vermote and Kaufman 1995; Vermote and Saleous 2006b)	(Rao and Chen 1996)	(Los 1998; Rao and Chen 1996)	(Rao and Chen 1996)	(Heidinger et al. 2002; Teillet and Holben 1994; Vermote and Kaufman 1995)	(Teillet et al. 1990; Vermote and Kaufman 1995)
Cloud Screening	Red thresholds from MODIS global surface reflectance database	CLAVR (Stowe et al. 1995)	Temperature thresholds for channel 5	No	CLAVR (Stowe et al. 1995)	no
Raleigh correction	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
Ozone correction	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
Water Vapor correction	Yes	No	No	No	Yes	No
Atmospheric Aerosol correction	Expected in next version	No	No (corrected for volcanic aerosols) (Vermote and Saleous 1997)	No	No	No
Data Input	GAC (Global Area Coverage)	GAC	GAC	GAC	LAC (Local Area Coverage)	LAC
Orbital Drift	Yes BRDF correction (Vermote et. 2009)	No	Yes Statistical time-series adjustment (Pinzon et al. 2002)	No	No	No
Key Citation	(Pedelty et al. 2007)	(James and Kalluri 1994)	(Tucker et al. 2005)	(Kidwell 1994, 1997)	(Eidenshink 2006; Eidenshink 1992)	(Eidenshink and Faundeen 1994; Teillet et al. 2000)

Tableau 5. Résumé des caractéristiques des principaux jeux de NDVI issus des données AVHRR (source : Nagol (2011))

Nous n'allons pas détailler ici les traitements appliqués pour chaque jeu de NDVI AVHRR (voir le Tableau 5 pour un résumé des caractéristiques des principaux produits globaux), mais nous allons rapidement expliciter les différentes étapes appliquées pour le jeu GIMMS, qui est très utilisé dans la littérature. C'est aussi celui qui est disponible sur la plus longue période, surtout dans sa dernière version (GIMMS-3g) qui vient récemment d'être produite et qui est disponible de 1981 jusqu'à aujourd'hui (à une résolution spatiale de $1/12^\circ$, soit environ 9 km). Nous ne disposons pas encore d'informations détaillées sur les traitements utilisés pour produire GIMMS-3g, mais nous pouvons penser que les méthodes utilisées sont similaires à celles mises en place pour la production des

données GIMMS : nous nous contenterons donc de décrire ici les principales caractéristiques de l'"ancienne version" de GIMMS, disponible de 1981 à 2006.

Un des objectifs principaux dans l'élaboration du jeu GIMMS était de construire des données robustes aux changements de satellites inhérents à une mission entreprise sur le long terme. Depuis 1981 les capteurs AVHRR ont ainsi été embarqués sur neuf satellites NOAA différents. Nous avons vu que la dérive orbitale était une source d'erreur importante pour l'estimation des réflectances au sommet de la canopée et donc pour le calcul du NDVI (voir section 1.2.2.). Les satellites de la NOAA n'étant pas équipés pour rectifier leur orbite pendant la phase de vol, la dérive orbitale subie au cours du temps est importante (Figure 24).

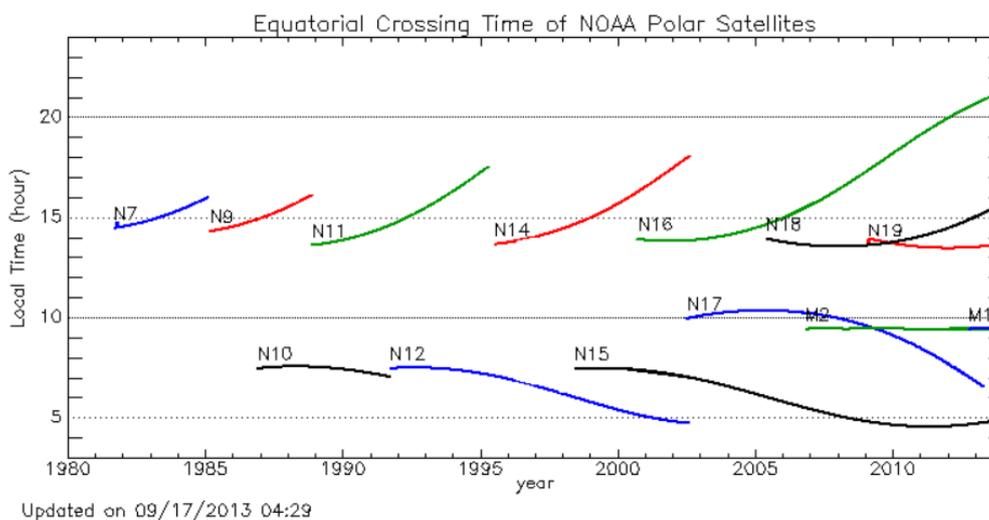


Figure 24. Heure de passage à l'Equateur des satellites NOAA, de 1981 à aujourd'hui. (source : http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_avhrr_ect.php)

Pour assurer une cohérence du suivi de la végétation sur le long-terme et une indépendance vis-à-vis de l'utilisation de différents capteurs, la calibration du jeu GIMMS s'effectue en plusieurs étapes. Pour les premiers satellites (de NOAA-7 à -14), les bandes spectrales rouge et proche-IR (canaux 1 et 2) sont d'abord calibrées indépendamment selon la technique de Vermote & Kaufman (1995), puis le NDVI est lui-même calibré en appliquant la technique de Los (1998) qui utilise des surfaces désertiques homogènes et radiométriquement stables comme cibles de calibration. Enfin le NDVI est décomposé et reconstruit, pixel par pixel, selon la technique de l'EMD (*Empirical Mode Decomposition*, Pinzon *et al.* (2005)) afin de séparer les tendances artificielles dues à la dérive des satellites (et donc aux variations de l'angle zénithal solaire) des tendances réellement liées à la production végétale. Depuis NOAA-16, les bandes 1 et 2 sont calibrées grâce à des coefficients déterminés avant le décollage, puis le NDVI est calculé et la composition temporelle ainsi que la décomposition/reconstruction du signal (EMD) effectuées. L'inter-calibration entre NOAA-14 et NOAA-16 est réalisée par l'intermédiaire de données SPOT-Végétation (VGT).

Les données AVHRR au sens large et les données GIMMS en particulier ne sont pas corrigées des effets atmosphériques par manque de disponibilité de données sur la composition atmosphérique. Le jeu LTDR l'est toutefois partiellement (H₂O, ozone) et pourrait l'être plus complètement un jour, avec la prise en compte des aérosols (Vermote, comm. pers.).

L'équipe GIMMS a cependant implémenté des corrections pour les fortes émissions d'aérosols dues aux éruptions volcaniques du volcan El Chinchon en 1982 et du Mont Pinatubo en 1991. Le jeu GIMMS ne souffre d'aucune discontinuité temporelle malgré la défaillance de NOAA-13 en 1992. Le satellite NOAA-11 a ainsi été utilisé à la place de NOAA-13 jusqu'en 1994, puis, quand son horaire de passage est devenu trop tardif (17h00), la trajectoire descendante de NOAA-9 a été utilisée jusqu'à ce que NOAA-14 soit opérationnel (du mois d'août 1994 à la fin du mois de janvier 1995). Enfin, le jeu GIMMS a été construit pour être compatible avec la dynamique des données SPOT Vegetation et des données MODIS. Les données GIMMS constituent donc un outil extrêmement précieux pour effectuer un suivi de la végétation sur le long-terme, et c'est encore plus vrai pour le jeu GIMMS-3g, disponible sur une plus longue période encore.

3.1.3. Évaluation de la qualité des données AVHRR

Plusieurs auteurs se sont attachés à comparer la qualité des différents jeux de NDVI, et notamment la qualité des données AVHRR en comparaison avec les capteurs récents. Beck *et al.* (2011) ont notamment évalué la qualité des jeux AVHRR PAL, FASIR, GIMMS, LTDR par rapport à des données Landsat à l'échelle du globe. Ils ont établi que le jeu GIMMS était le plus indiqué pour des analyses de tendances sur le long-terme grâce à la bonne inter-calibration des capteurs, alors qu'il est recommandé d'utiliser les données LTDR (visant à coupler les données AVHRR sur 1981-1999 aux données MODIS sur la dernière décennie) pour des études où des valeurs absolues de NDVI sont nécessaires. De manière générale, les données GIMMS sont estimées être bien corrélées aux autres jeux de données issus des capteurs AVHRR mais aussi aux capteurs récents comme SPOT-VGT, MODIS, MERIS (Gallo *et al.* 2005, Fensholt *et al.* 2006a, Fensholt *et al.* 2006b, Swinnen & Veroustraete 2008, Fensholt *et al.* 2009, Song *et al.* 2010, Fensholt & Proud 2012). Certaines de ces études ont plus précisément visé à estimer l'incertitude des données AVHRR, en se basant sur des données locales mesurées au sol ou acquises à l'aide de satellites à très haute résolution spatiale (Goward *et al.* 1993, Eklundh 1995, Cihlar *et al.* 1998, Fensholt *et al.* 2006a, Fensholt *et al.* 2006b, Nagol *et al.* 2009). Dans le cadre de sa thèse de doctorat spécifiquement consacrée à l'estimation de l'incertitude dans les données AVHRR, Nagol (2011) conclut que pour beaucoup de régions, effectuer une agrégation spatiale minimale améliore sensiblement la précision du NDVI AVHRR.

Le jeu GIMMS-3g étant extrêmement récent, très peu d'études de validation sont actuellement disponibles (un numéro spécial de la revue Remote Sensing consacré à ce nouveau jeu de données est encore en préparation ; c'est dans ce numéro spécial que nous avons soumis la deuxième publication

de cette thèse, présentée dans le Chapitre 4). Un des objectifs de ces travaux sera donc d'évaluer la cohérence du jeu GIMMS-3g par rapport aux autres jeux de données de NDVI, et par rapport aux observations de terrain dont nous disposons dans les régions du Gourma au Mali et du Fakara au Niger (voir le Chapitre 3).

3.2. Les capteurs récents

Les capteurs succédant aux instruments AVHRR ont été dimensionnés pour améliorer la qualité du suivi de la couverture végétale tant d'un point de vue radiométrique (bandes spectrales plus fines, mieux séparées, voir Figure 25) que d'un point de vue spatio-temporel. Les techniques d'étalonnage et de correction ont également été pu être améliorées, avec notamment la prise en compte des effets atmosphériques, des effets directionnels de la réflectance, la calibration radiométrique pré- et post-décollage, ou encore un contrôle de l'orbite du satellite pendant la phase de vol. Il existe ainsi aujourd'hui, ou jusqu'à une date récente, plusieurs missions satellites servant à la détection de la végétation, comme par exemple MODIS, MERIS (à bord d'Envisat), SPOT-Vegetation (VGT), Meteosat Seconde Generation (MSG). Les capteurs à haute ou très haute résolution se sont aussi répandus, depuis Landsat: Ikonos, Quickbird, Pleiades parmi d'autres.

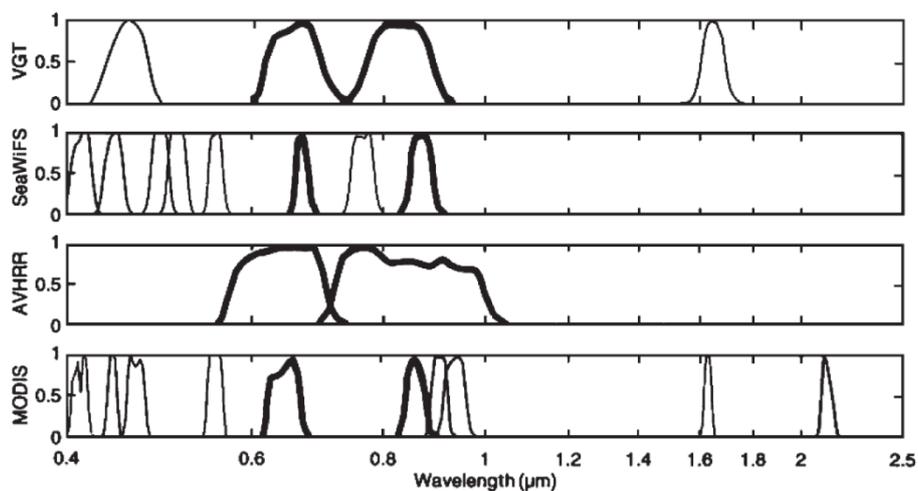


Figure 25. Comparaison des bandes spectrales des capteurs AVHRR avec celles de SPOT Vegetation (VGT), SeaWiFS et MODIS. Les bandes surlignées sont les bandes spectrales du rouge et du proche-IR (source : Tucker *et al.* (2005))

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser les données AVHRR pour bénéficier de la plus longue couverture temporelle possible, mais nous avons également utilisé les données MODIS sur la dernière décennie pour valider la qualité des données GIMMS-3g. Ponctuellement, des données à très haute résolution spatiale (SPOT, Landsat) ont également été intégrées à notre étude, afin d'apporter des informations précises à quelques dates clés (classifications supervisées pour établir des statistiques sur le type de sol dans notre région d'étude au Mali, et sur l'occupation du sol dans notre région d'étude au Niger).

3.2.1. Le NDVI MODIS

Les données MODIS sont disponibles depuis les années 2000 jusqu'à aujourd'hui (Justice *et al.* 1998, Justice *et al.* 2002). Elles offrent un compromis très intéressant entre une résolution spatiale relativement fine (250 m pour les bandes spectrales rouge et proche-IR) et une forte répétitivité temporelle (fréquence journalière). Les données MODIS sont acquises via deux plateformes : le satellite Terra, lancé en 1999, et le satellite Aqua, lancé en 2002. Les deux satellites ont une orbite héliosynchrone, à une altitude d'environ 705 km, la fauchée de l'instrument étant d'environ 2330 km. Le radiomètre MODIS capte le rayonnement électromagnétique réfléchi dans 36 bandes spectrales échantillonnant les longueurs d'onde entre 400 nm et 14.4 μm , avec des résolutions spatiales allant de 250 m à 1 km.

Comme explicité par Justice *et al.* (1998) et Justice *et al.* (2002), les données MODIS représentent une amélioration sensible de la mesure satellitaire de la réponse spectrale de la surface de la Terre. Les améliorations les plus importantes résident dans l'intégration d'un schéma de correction atmosphérique, dans l'amélioration des caractéristiques spectrales des capteurs avec notamment leur étalonnage à bord des satellites, et la prise en compte de l'effet de l'anisotropie des surfaces sur les réflectances via la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). La présence de canaux spectraux dans le moyen-IR et dans les plus grandes longueurs d'onde permet d'effectuer des observations de la composition atmosphérique ainsi qu'une meilleure détection des nuages fins. L'algorithme utilise des informations sur le contenu en aérosol et en vapeur d'eau de l'atmosphère issues de données MODIS ainsi que d'autres sources de données pour modéliser les effets atmosphériques et en corriger sur les mesures de réflectance (Figure 26). L'anisotropie des surfaces est prise en compte via le couplage des BRDF de la surface et de l'atmosphère.

Le NDVI MODIS est alors obtenu par composition temporelle des réflectances bidirectionnelles journalières, préalablement corrigées de la couverture nuageuse et des effets atmosphériques. Pour effectuer cette composition temporelle, l'algorithme sélectionne pixel par pixel les images dont l'angle de prise de vue est le plus proche du nadir. Cette méthode consiste en fait à effectuer une normalisation des réflectances anisotropes par un angle zénithal solaire particulier. Le nadir est choisi comme direction préférentielle car la résolution spatiale des pixels y est la plus fine, les distorsions géométriques minimales, et les corrections atmosphériques plus précises et plus fiables. Un modèle empirique est utilisé pour estimer, pour chaque pixel, la réflectance "équivalente" qui serait mesurée au nadir. Un minimum de 5 images par pixel est nécessaire pour appliquer ce modèle ; si ce minimum n'est pas rempli, alors la technique du MVC (Holben 1986) est appliquée dans une certaine gamme de l'angle de visée.

En bout de chaîne, les données NDVI MODIS sont disponibles à une résolution spatiale de 250 m, 1 km et 25 km, avec des résolutions temporelles bimensuelles (composites à 16 jours) et mensuelles.

En dehors du NDVI, de nombreux produits relatifs à la détection des surfaces et plus particulièrement de la végétation sont fournis, comme la température de surface, l'albédo, le LAI, le fPAR, la NPP, l'occupation du sol, ou encore la photosynthèse nette journalière (Justice *et al.* 2002). Des indicateurs de qualité (*Quality Assessment*) sont également fournis, renseignant de manière exhaustive sur la qualité des données pour chaque pixel et sur les hypothèses de calculs adoptées.

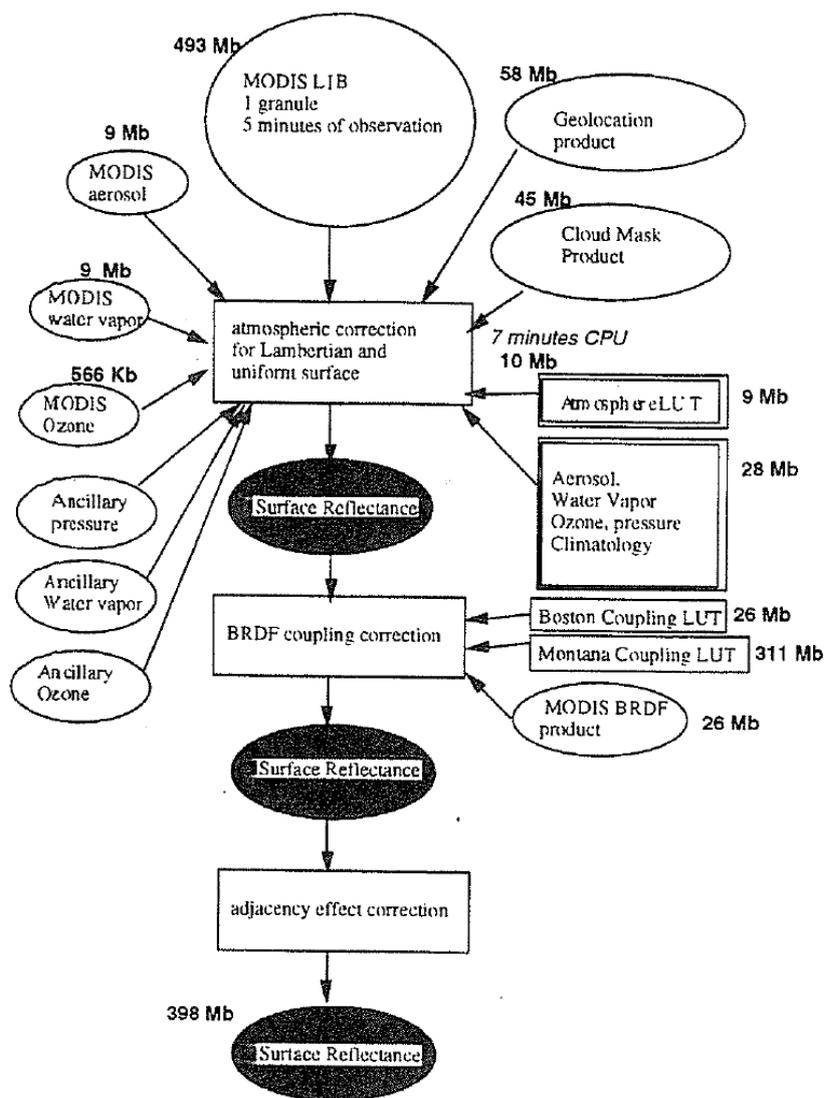


Figure 26. Schématisation des différentes étapes du processus de calcul des réflectances de la surface des données MODIS (source : Justice *et al.* (1998)).

3.2.2. *Autre capteurs*

D'autres jeux de données offrent une résolution spatiale bien plus fine que les données AVHRR ou MODIS, comme par exemple les données Landsat, ou les données SPOT, toutes deux très utilisées. Cependant, obtenir des images à très haute résolution spatiale à une fréquence temporelle satisfaisante sur une même zone d'étude peut s'avérer compliqué en raison des compromis techniques que cela demande (résolution du capteur, orbite...). Techniquement, il est possible de collecter des données très haute résolution spatiale à une haute fréquence temporelle, mais la couverture spatiale ne peut alors pas être globale. Les satellites doivent être programmés pour passer au-dessus de certaines régions cibles, ce qui demande des moyens scientifiques et économiques conséquents (c'est par exemple possible avec les capteurs récents Pléiades).

Les satellites à couverture globale comme Landsat permettent d'avoir accès à quelques images par année pour la même zone cible. Mais pour que ces quelques images soient exploitables, aucune couverture nuageuse (totale ou partielle) ne doit altérer les données. Ainsi, il est difficile d'effectuer des analyses de tendance du couvert végétal ou des études sur la phénologie de la végétation à partir de ce type d'images. En revanche, elles peuvent être utilisées pour des études requérant des informations spatiales détaillées mais avec une acquisition temporelle ponctuelle, comme par exemple pour étudier des changements des surfaces entre deux dates (suivi des zones cultivées et non-cultivées, suivi des surfaces en eau...).

Les données de NDVI issues des capteurs AVHRR, maintenant disponibles sur plus de 30 ans, représentent donc une source de données inégalée pour le suivi de la végétation sur le long-terme. Les données GIMMS-3g en particulier sont disponibles de 1981 jusqu'à aujourd'hui. Leur résolution temporelle bimensuelle permet un suivi de la végétation dans des régions où la saison de croissance est rapide, comme les régions sahéliennes.

Chapitre 3. Le Sahel reverdit-il ?

1. Contexte et objectifs

1.1. Définition du reverdissement

Nous avons décrit dans le Chapitre 1 la grande variabilité climatique caractéristique des régions sahéliennes et ses différentes temporalités. Nous avons rappelé l'intérêt grandissant des communautés scientifiques, médiatiques ainsi que politiques envers la thématique de la désertification du Sahel, notamment suite aux importantes sécheresses des années 1970 et 1980. Dans ce contexte, la mise à disposition de données satellitaires permettant une observation continue de la couverture végétale à l'échelle du globe a représenté une révolution certaine dans l'approche de la problématique : étudier l'étendue du phénomène de désertification sur l'ensemble de la région est devenu possible.

Les données NDVI des capteurs AVHRR ont alors beaucoup été utilisées à cette fin. La théorie d'une avancée irréversible du désert du Sahara sur le reste du continent africain (voir Chapitre 1.4.2.) a ainsi été infirmée par l'analyse des tendances du NDVI AVHRR dès les années 1990 (Tucker *et al.* 1994, Tucker & Nicholson 1999). Puis, dans les années 2000, des analyses de tendances portant sur plus de 20 années d'observations ont mis en évidence non pas une diminution généralisée du couvert végétal, mais au contraire une augmentation significative du NDVI depuis le début des années 1980 sur la quasi totalité du Sahel (Anyamba & Tucker 2005, Herrmann *et al.* 2005, Hickler *et al.* 2005, Hutchinson *et al.* 2005, Olsson *et al.* 2005, Seaquist *et al.* 2006, Heumann *et al.* 2007) (Figure 27).

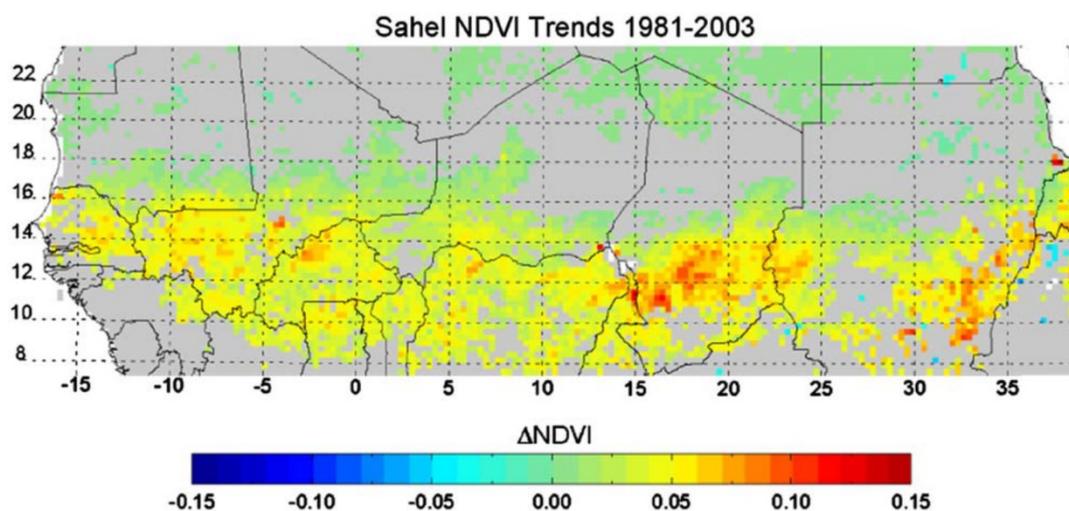


Figure 27. Tendances du NDVI GIMMS entre 1981 et 2003. Les tendances non significatives à 90% sont masquées en gris (source : Anyamba & Tucker (2005)).

Le "reverdissement" est donc un concept directement issu de la télédétection et qui est défini par une augmentation d'un indice de végétation satellitaire, le NDVI étant l'indice de végétation le plus largement utilisé (voir Chapitre 2.2.). Les nombreuses études mettant en évidence ce reverdissement du Sahel à partir des données de télédétection ont ainsi grandement réalimenté le débat portant sur la désertification supposée de la région Sahélienne. D'autres auteurs ont plus spécifiquement cherché à caractériser cette tendance au reverdissement en regard de la phénologie de la végétation (Eklundh & Olsson 2003, Heumann *et al.* 2007). Les données NDVI AVHRR peuvent en effet être utilisées pour en dériver des indicateurs de la phénologie comme le début et la fin de la saison de croissance, et donc la longueur de la saison. Deux types de reverdissement ont ainsi été différenciés : un reverdissement lié à l'augmentation de l'amplitude du signal et un autre lié à l'augmentation de la durée de la saison de croissance, essentiellement due à un décalage dans la date de fin de saison. Ces changements sont essentiellement observés en dehors de la région sahélienne stricto-sensu (Figure 28).

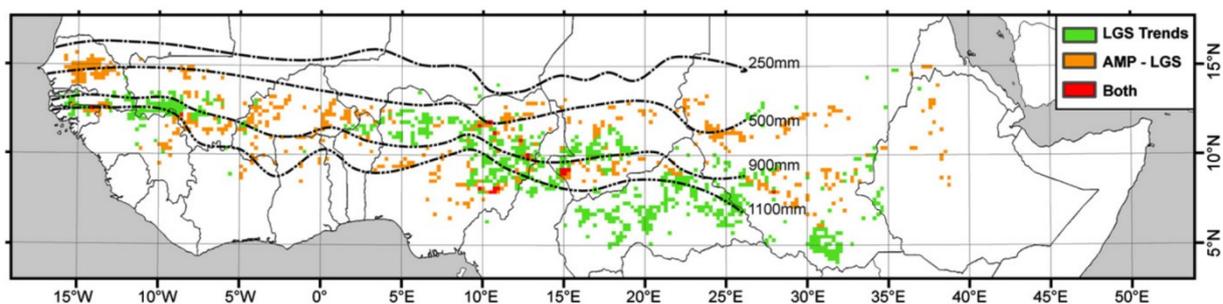


Figure 28. Carte des tendances des indicateurs phénologiques issus du NDVI GIMMS sur la période 1982-2005 : augmentation de la longueur du cycle en vert ; augmentation de l'amplitude du signal en orange ; augmentation de la longueur du cycle et de l'amplitude du signal en rouge (source : Heumann *et al.* (2007)).

1.2. Comment valider les tendances observées par satellite

1.2.1. Les données terrain

Beaucoup d'études se sont attachées à valider les tendances observées avec les données NDVI AVHRR par comparaison avec des données satellitaires issues de capteurs plus récents et mieux adaptés au suivi de la végétation (Fensholt *et al.* 2006a, Hountondji *et al.* 2006, Fensholt *et al.* 2007, Fensholt *et al.* 2009, Beck *et al.* 2011, Fensholt & Proud 2012). Les données AVHRR, en particulier le jeu GIMMS, sont globalement évaluées cohérentes avec les données issues des capteurs récents, et particulièrement en termes de tendances temporelles. Mais toutes les données satellitaires sont soumises à des biais communs inhérents à l'observation depuis l'espace (voir Chapitre 2.1.2.2.). Une phase cruciale de la validation repose donc sur la comparaison avec une source de données totalement indépendante. Les observations de terrain sont souvent considérées comme une "vérité", une référence fiable pour valider les observations effectuées à partir des satellites. Cependant, il est très difficile d'obtenir des observations de terrain compatibles avec l'échelle spatiale des données issues des capteurs AVHRR (dont les pixels ont une taille de 8 x 8 km pour les données GAC) et sur une période

suffisamment longue pour permettre des analyses de tendances. De tels réseaux d'observations sont en effet compliqués à mettre en place et à maintenir au cours du temps, et c'est encore plus vrai en région sahélienne où l'accès peut être compliqué pour des raisons d'ordre matériel ou d'instabilité politique. On trouve toutefois quelques études présentant des validations ponctuelles, généralement sur un site et sur une courte période (Fensholt *et al.* 2004, Fensholt *et al.* 2006b, Fensholt *et al.* 2009) (Figure 29).

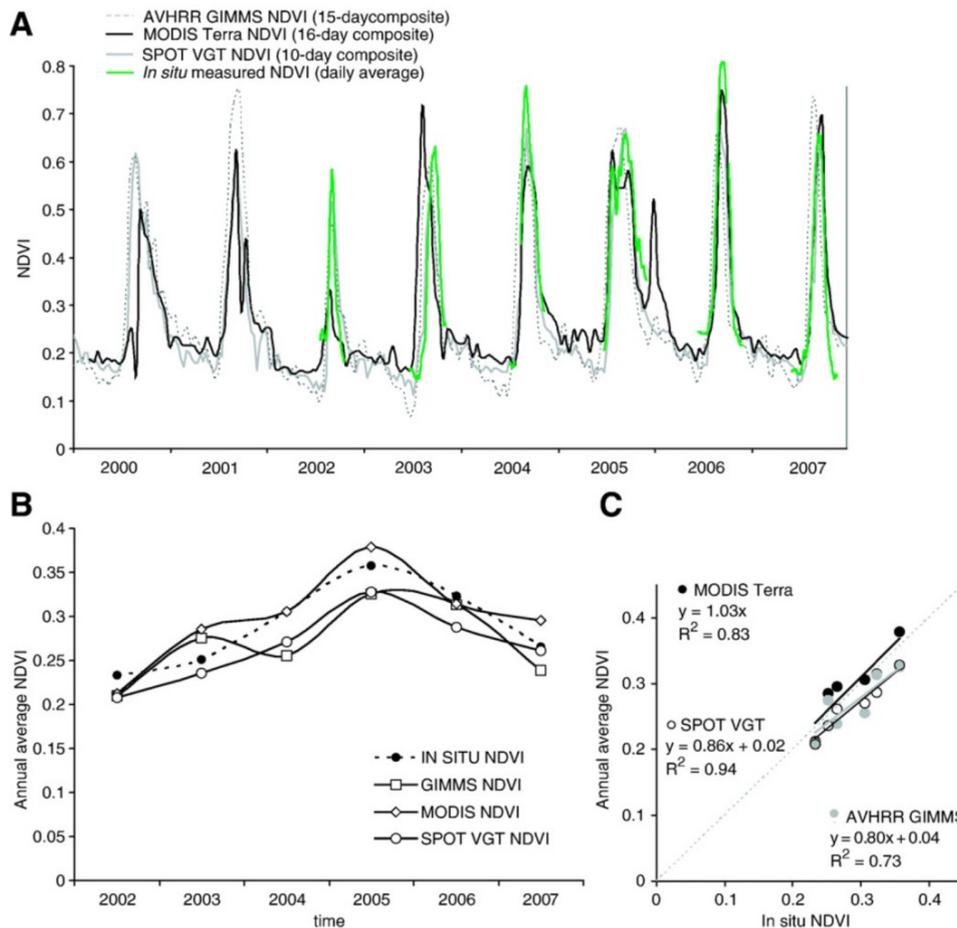


Figure 29. Comparaison du NDVI GIMMS, MODIS Terra, SPOT Vegetation (VGT) avec des mesures radiométriques *in situ* collectées sur le site de Dahra dans le nord du Sénégal ([source](#) : Fensholt *et al.* (2009)).

1.2.2. Programmes internationaux initiateurs de la collecte des données

Pour mieux comprendre le climat et son évolution en Afrique subsaharienne, les programmes internationaux HAPEX-Sahel (Goutorbe *et al.* 1994) et AMMA (Redelsperger *et al.* 2006, Lebel *et al.* 2009) ont été mis en place respectivement dans les années 1990 et 2000. Ces programmes se sont tous deux attachés à développer des réseaux d'observations de terrain, le programme HAPEX pour mieux comprendre le cycle hydrologique à méso-échelle, et le programme AMMA la mousson africaine dans sa globalité. AMMA, dans sa composante CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) a mis en place et entretenu des réseaux d'observation complets (données météorologiques, hydrologiques, écologiques, observations des surfaces, flux de surface, cycles

biogéochimiques...) pour des études long-terme, sur trois grands sites d'étude (sites méso-échelle): le degré-carré de Niamey au Niger, le bassin du Ouémé au Bénin, et la région du Gourma au Mali (Figure 30). Ainsi, le programme AMMA a permis d'avoir accès à des données terrain dans plusieurs pays du Sahel, des années 2000 à aujourd'hui, en adoptant une approche multidisciplinaire (océan/atmosphère/végétation) et en diversifiant les outils d'analyse (données terrain/modèles numériques/observations satellitaires). Cette thèse s'inscrit dans la suite du programme AMMA et a bénéficié des données d'observation collectées sur les sites du Gourma au Mali (données pluviométriques et observations de la couverture végétale) et du Degré Carré de Niamey au Niger (données pluviométriques).

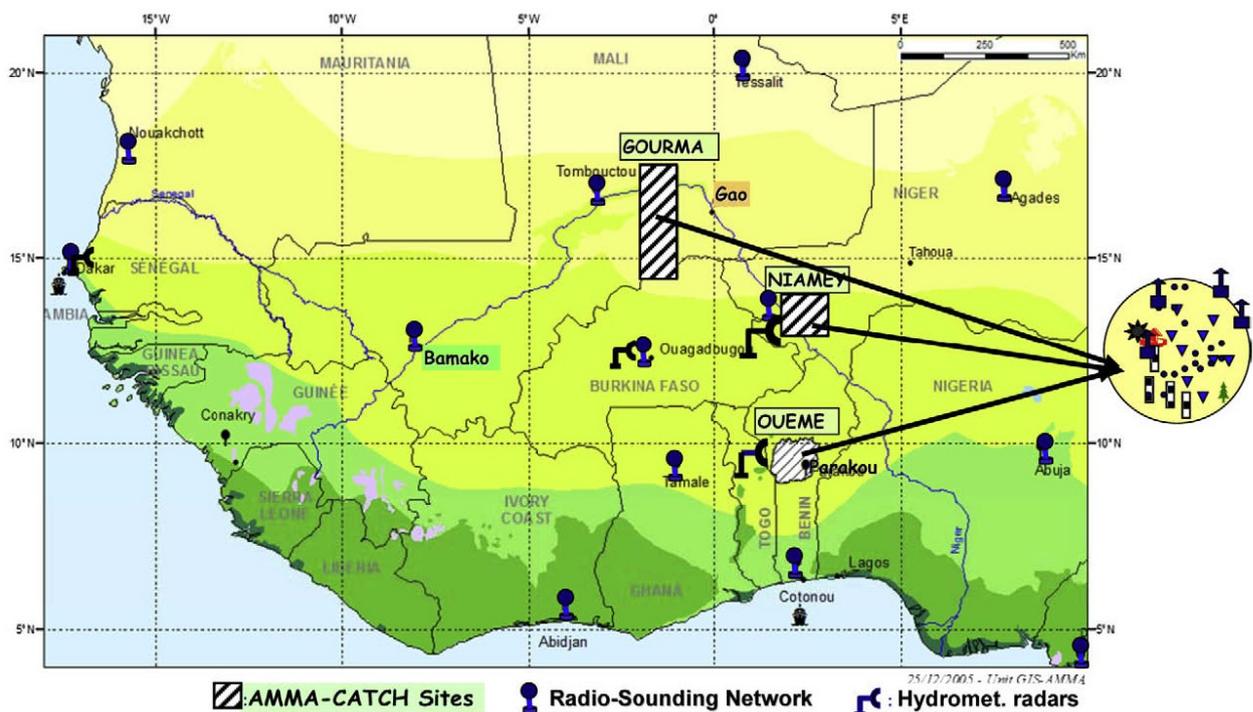


Figure 30. Méso-sites d'observation long-terme du programme AMMA-CATCH au Bénin (Ouémé), Mali (Gourma) et Niger (Niamey) (source : Lebel *et al.* (2009)).

Cependant, il n'a été possible d'atteindre une profondeur historique similaire aux données satellites (début des années 1980) que grâce à des projets antérieurs au programme AMMA. Ces projets ont été menés par l'ILRI (International Livestock Research Institute) dans le Gourma de 1984 à 1999 (Hiernaux & Turner 1996) et dans la région du Fakara au Niger de 1994 à aujourd'hui (Hiernaux & Ayantunde 2004). En effet, le programme AMMA-CATCH s'est attaché à reprendre le suivi des mêmes sites de mesure que le programme ILRI dans le Gourma (travaux Hiernaux et Diarra), assurant aujourd'hui une archive longue de 28 années (1984-2011). Dans la région du Fakara au Niger, située à l'est de Niamey, les données de végétation sont disponibles sur 17 ans (1994-2011) et échantillonnent aussi bien les surfaces cultivées que les surfaces en jachère et les parcours pastoraux. Ces deux jeux d'observation portant sur l'évolution du couvert végétal sur les dernières décennies constituent donc un outil unique pour comparaison avec les données satellitaires à une échelle spatiale compatible. En

effectuant une recherche bibliographique, nous n'avons pu trouver qu'une seule étude s'appuyant sur des observations de la production végétale collectées sur du long-terme (> 10ans), en l'occurrence sur 17 ans ; mais cette étude ne porte que sur un seul site situé dans les Grandes Plaines américaines, qui a une superficie inférieure à 5km² (An *et al.* 2013).

1.3. Objectifs de l'étude

Grâce au travail et à la persévérance de tous les collaborateurs impliqués dans les projets ILRI/ILCA puis dans le Service d'Observation AMMA-CATCH, notre équipe dispose aujourd'hui de deux bases de données conséquentes portant sur les régions du Gourma au Mali et du Fakara au Niger. Ces bases de données débutent en 1984 pour le Gourma, en 1994 pour le Fakara, et s'étendent jusqu'à aujourd'hui. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux relevés de la masse sur pied de la strate herbacée. Les bases de données contiennent cependant de nombreuses autres variables, à commencer par des données météorologiques, des informations complémentaires sur la strate herbacée (couvert, hauteur, densité, composition floristique, masse des pailles, masse des systèmes racinaires...), mais également des informations sur les surfaces, la strate ligneuse, ou encore l'intensité de la pression de pâture (Hiernaux *et al.* 2009c). Pour le Gourma comme pour le Fakara, les mesures sont effectuées sur un échantillon de sites représentatif de l'hétérogénéité du paysage. Ces deux régions sont sensiblement différentes, notamment en matière d'usage des sols. Le Gourma est en effet une zone essentiellement pastorale, alors que le Fakara est une région agro-pastorale caractérisée par une plus forte exploitation agricole et surtout par une occupation du sol très dynamique (Hiernaux *et al.* 2009a).

Grâce à ces observations de production de la végétation acquises sur le long-terme et à l'échelle régionale, nous avons ici une occasion exceptionnelle d'explorer le débat portant sur le reverdissement du Sahel en confrontant les données terrain aux données satellites sur deux régions distinctes. Afin d'effectuer cette comparaison sur la plus longue période possible, nous avons utilisé les données de NDVI du jeu GIMMS-3g, qui est le dernier jeu produit par le groupe GIMMS. Ces données ne sont pas encore publiquement disponibles, nous en disposons grâce à une collaboration avec l'équipe du Dr C.J. Tucker. Elles sont fournies de 1981 à aujourd'hui à une échelle spatiale de 1/12° (soit environ 9 km) et à une fréquence temporelle bimensuelle.

Dans cette étude, nous avons donc plusieurs objectifs :

- Le premier était de valider la qualité des données NDVI GIMMS-3g par comparaison avec d'autres produits satellitaires de NDVI (les jeux GIMMS, LTDR, et MODIS), afin d'être en mesure de produire et d'interpréter une carte des tendances du NDVI GIMMS-3g sur les trois dernières décennies à l'échelle du Sahel.

Nous avons également cherché à caractériser la sensibilité des tendances à la période temporelle considérée et à détecter des changements dans la phénologie de la végétation pour les régions du Gourma et du Fakara.

- Le second objectif était de vérifier si les tendances calculées avec le NDVI GIMMS-3g étaient en accord avec les tendances calculées à partir des données terrain de masse de la strate herbacée sur les régions du Gourma et du Fakara.
- Enfin, nous avons cherché à interpréter les changements du couvert herbacé mis en évidence sur nos deux régions d'étude.

1.4. Méthodes

Avant toute chose, nous avons effectué un important travail préliminaire visant à choisir et valider les méthodes adoptées pour notre étude.

1.4.1. Approche temporelle

Pour effectuer les calculs de tendances temporelles, nous nous sommes basés sur des valeurs "annuelles" de la production. L'estimation de ces valeurs "annuelles" se fait différemment pour les données de NDVI et pour les données terrain. En effet, les données NDVI sont disponibles à un pas de temps régulier durant toute l'année mais comportent des biais, notamment en saison sèche où la signature du sol nu vient altérer le signal dû à la végétation (voir Chapitre 2.2.2.). Les données de terrain, quant à elles, ne sont généralement pas collectées tout au long de l'année. Les mesures sont effectuées pendant et à la fin de la saison de croissance, le but étant de se rapprocher le plus possible de la date où peut être observé le maximum de masse sur pied.

En ce qui concerne le NDVI, nous avons testé différentes approches : maximum annuel, moyenne sur la période de croissance (plusieurs périodes ont également été testées), intégrale du signal (sur toute la période, sur la saison de croissance, intégrale totale ou intégrale à partir d'un niveau de base...). Quelques exemples caractéristiques des résultats obtenus par ces différentes méthodes peuvent être trouvés en annexe (voir ANNEXE 1). Pour cette étude, nous avons finalement choisi d'utiliser des estimations annuelles basées sur la moyenne du NDVI pour les mois d'août et septembre, car cette méthode a été beaucoup utilisée dans la littérature, car elle est facile à reproduire, et enfin car les différentes méthodes que nous avons testées fournissent des résultats similaires et cohérents. Pour les observations de terrain, nous avons considéré que le maximum annuel mesuré à la fin de la saison de croissance sur chaque site était un bon estimateur de la production annuelle du site (Sala & Austin 2000).

1.4.2. Approche spatiale

Les données terrain ont initialement été pensées pour être compatibles avec des données satellitaires acquises à l'échelle du kilomètre. Les données GIMMS-3g étant fournies à une résolution spatiale de $1/12^\circ$, la comparaison pixel/site est difficilement réalisable, et ce d'autant plus que les surfaces observées sont hétérogènes (Figure 31).

Pour comparer les profils temporels et les tendances issus de nos deux sources de données, nous avons donc effectué des moyennes spatiales. Nous avons ainsi directement moyenné les données de NDVI sur des "fenêtres" spatiales représentant les régions du Gourma et du Fakara. Bien que les données terrain aient été échantillonnées pour représenter l'hétérogénéité du paysage, nous avons dû nous assurer que leur moyenne demeure représentative du paysage à l'échelle des "fenêtres satellites". Pour cela, nous avons regroupé les sites en fonction des trois types de sol dominants dans le Gourma (sols sableux, argileux, superficiels) et en fonction des grands types d'occupation du sol dans le Fakara (surfaces cultivées, en jachère, parcours pastoraux). A l'aide de classifications supervisées basées sur des images satellite à très haute résolution spatiale (voir ANNEXE 5 pour la région du Fakara, la carte utilisée pour le Gourma étant montrée dans la publication), nous avons déterminé les proportions surfaciques de chacune de ces grandes classes, et calculé en conséquence les moyennes pondérées représentatives de la production herbacée de chaque région. Les coefficients utilisés pour le Gourma sont constants au cours du temps (car les types de sol n'ont pas changé), tandis que ceux utilisés pour le Fakara tiennent compte de la dynamique de l'occupation du sol tout au long de la période (Hiernaux *et al.* 2009a). De cette façon, nous disposons de séries temporelles issues de télédétection et d'observations de terrain qui sont compatibles spatialement et temporellement.

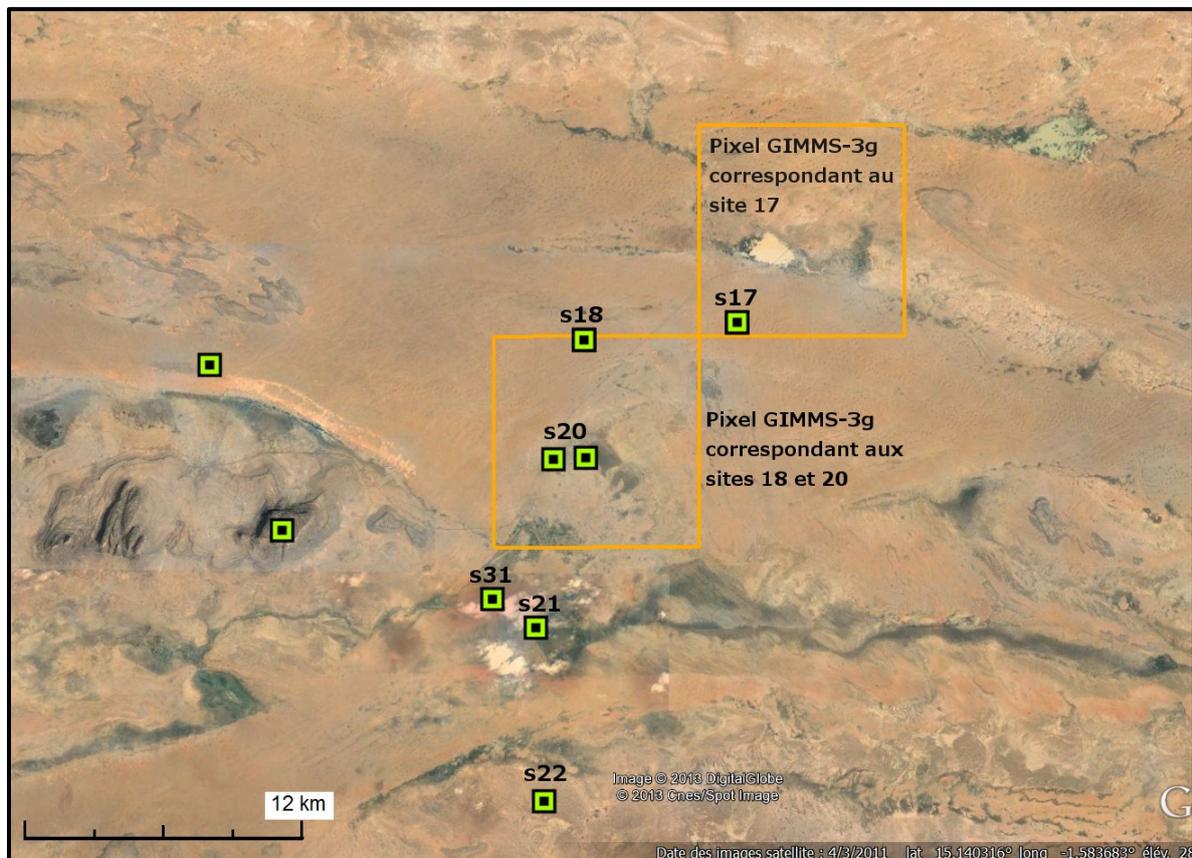


Figure 31. Exemple d'emprise des pixels GIMMS-3g (en orange) pour quelques sites de mesure du Gourma (image *Google Earth*).

2. Publication dans la revue *Remote Sensing of Environment*

Ces travaux ont été publiés dans la revue internationale à comité de lecture de rang A *Remote Sensing of Environment*, dans le volume 140 qui paraîtra en janvier 2014. L'article est d'ores et déjà disponible sous sa version électronique (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>). Nous avons inclus la version publiée dans ce manuscrit (voir ci-après). Puis, dans le paragraphe faisant suite à la publication, nous rappellerons les principaux résultats et apports de notre étude.





Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse

Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger)

C. Dardel^{a,*}, L. Kergoat^a, P. Hiernaux^a, E. Mougin^a, M. Grippa^a, C.J. Tucker^b^a Geosciences Environnement Toulouse (GET), Observatoire Midi-Pyrénées, UMR 5563 (CNRS/UPS/IRD/CNRS), 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France^b NASA Goddard Space Flight Center, Mail Code 610.9, Greenbelt, MD 20771, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 June 2013

Received in revised form 5 September 2013

Accepted 12 September 2013

Available online 5 October 2013

Keywords:

Sahel

Desertification

Re-greening

Trend analysis

Herbaceous production

NDVI

AVHRR

Field measurements

Mali

Niger

ABSTRACT

Desertification of the Sahel region has been debated for decades, while the concept of a “re-greening” Sahel appeared with satellite remote sensing data that allowed vegetation monitoring across wide regions and over increasingly long series of years (nowadays 30 years with the GIMMS-3g dataset). However, the scarcity of long-term field observations of vegetation in the Sahel prevents ground validation and deeper analysis of such trends. After assessing the consistency of the new GIMMS-3g NDVI product by comparison to three other AVHRR-NDVI datasets and MODIS NDVI, regional GIMMS-3g NDVI trends over 1981–2011 are analyzed. Trends are found positive and statistically significant almost everywhere in Sahel over the 1981–2011 period. Long-term field observations of the aboveground herbaceous layer mass have been collected within the Gourma region in Mali (1984–2011) and within the Fakara region in western Niger (1994–2011). These observations sample ecosystem and soil diversity, thus enabling estimation of averaged values representative of the Gourma and Fakara regions where re-greening and negative trends are observed respectively. A linear regression analysis performed between spatially averaged seasonal NDVI and a weighted average of field measurements explains 59% of the variability for the Gourma region over 1984–2011, and 38% for the Fakara region over 1994–2011. In the Gourma, which is a pastoral region, the re-greening trend is mainly observed over sandy soils, and attests for the ecosystem’s resilience to the 1980s’ drought, able to react to the more favorable rainfall of the 1990s and 2000s. However, contrasted changes in the landscape’s functioning have occurred locally. An increase in erosion and run-off processes in association with decreasing or stable vegetation cover was observed over shallow soils, which occupy 30% of the area. In the agro-pastoral Fakara, the decreasing trends observed both from satellite NDVI and field assessments of herbaceous mass are hardly explained by rainfall. These results give confidence in the dominant positive trends in Sahelian greenness, but indicate that degradation trends can also be observed, both in situ and from satellite time series.

© 2013 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Desertification of the Sahel has been debated for a long time within the scientific community (Aubreville & Chevalier, 1949; Hubert, 1920; Jones, 1938; Stebbing, 1935). The debates were refueled by the severe and regional droughts of the early 1970s (Boudet, 1972, 1977; Charney, 1975) and mid 1980s (Hein & de Ridder, 2006; Hellden, 1991; Hellden & Tottrup, 2008; Hulme, 2001; Le Houerou, 1996; Lindqvist & Tengberg, 1993; Nicholson, Tucker, & Ba, 1998; Prince, De Colstoun, & Kravitz, 1998; Prince, Wessels, Tucker, & Nicholson, 2007).

Desertification is defined by the United Nations as land degradation occurring in dry land caused by a range of factors including climate variations and human management. At the southern edge of the Sahara desert, the Sahel is particularly exposed to climatic fluctuations, and extreme events such as droughts or floods have severe consequences

for the populations and their resources. In recent past the Sahel belt went through 25 years of below-average precipitations, starting in the early 1970s. Within this period, two particularly severe and regional scale droughts occurred in 1972–73 and in 1983–84 (Le Barbé & Lebel, 1997; Lebel & Ali, 2009; Nicholson, 2013; Nicholson & Palao, 1993). The impact of these droughts on the ecosystem was dramatic, however it should be distinguished from a desertification process in which impact on the ecosystem functioning has to be long-term. Furthermore, scaling issues rapidly emerge when local soil degradation has to be put in the broader perspective of a potential widespread desertification.

With the arrival of spaceborne remote sensing data in the 1970s, global monitoring of vegetation has become possible. Various vegetation indices and statistical methods have been used to monitor vegetation “greenness” in time and space. The GIMMS dataset, produced by the NASA Global Inventory Modeling and Mapping Studies group from the series of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensors (Tucker et al., 2005) is widely used. Although these sensors were not initially designed to capture vegetation signature, a vegetation

* Corresponding author. Tel.: +33 5 61 33 29 32.

E-mail address: cecile.dardel@get.obs-mip.fr (C. Dardel).

index based on the red and infrared spectral bands proved very efficient for vegetation monitoring and is particularly used for analyzing global and regional trends and variability. The first analyses of NDVI trends over the west African region indicated a general increase of the vegetation index, which was interpreted as a “re-greening” of the region (Anyamba & Tucker, 2005; Eklundh & Olsson, 2003; Fensholt, Rasmussen, Nielsen, & Mbow, 2009; Herrmann, Anyamba, & Tucker, 2005; Heumann, Seaquist, Eklundh, & Jonsson, 2007; Olsson, Eklundh, & Ardo, 2005). These results fed the controversy between a Sahel suffering from desertification and a “re-greening” Sahel (Hutchinson, Herrmann, Maukonen, & Weber, 2005). It was also argued, according to satellite data, that the Sahara desert was in fact not expanding southwards (Tucker, Dregne, & Newcomb, 1991; Tucker, Newcomb, & Dregne, 1994; Tucker & Nicholson, 1999).

A number of studies first characterized the “re-greening” trends and then attempted to analyze possible factors such as rainfall distribution, soil type and soil cover, or plant phenology (de Jong, de Bruin, de Wit, Schaepman, & Dent, 2011; Fensholt & Rasmussen, 2010; Fensholt et al., 2012; Herrmann et al., 2005; Heumann et al., 2007; Huber, Fensholt, & Rasmussen, 2011; Olsson et al., 2005; Seaquist, Hickler, Eklundh, Ardo, & Heumann, 2009; Townshend & Justice, 1995). Two types of greening were evidenced: in northern Sahel re-greening trends were attributed to an increase of the NDVI amplitude (annual cycle), while in southern Sahel they were related to an increase of the growing season duration (Eklundh & Olsson, 2003; Fensholt et al., 2009; Olsson et al., 2005).

As new satellites directly designed for vegetation monitoring were launched, more datasets have become available with finer spatial and spectral resolutions providing very valuable tools, but they cannot substitute the 30 year-long archive needed in long-term trends analysis. Several versions of the same original AVHRR data have been produced: the PAL (James & Kalluri, 1994), GIMMS (Tucker et al., 2005), LTDR (Pedelty et al., 2007), and now GIMMS-3g datasets differ in terms of calibration, atmospheric corrections and compensation for orbital drifts. The differences between these datasets in terms of NDVI trends over West Africa were analyzed (Beck et al., 2011; Fensholt, Sandholt, & Stisen, 2006; Fensholt, Sandholt, Stisen, & Tucker, 2006), and it was shown that the GIMMS NDVI dataset was the most suitable for temporal changes analysis, while the LTDR V3 dataset performed best in terms of absolute values despite residual calibration issues, as demonstrated by the presence of consistent trends of NDVI over desert areas (Beck et al., 2011). Because the GIMMS-3g NDVI dataset has just been released, studies assessing its consistency with the other NDVI datasets are not available yet, but it is increasingly used (Zhu et al., 2012 and other articles in the special issue).

However, because of difficulties to obtain high-quality data with sensors not originally designed to monitor vegetation, but also because of the uncertain relationship between spectral radiance measured from space and ecosystem structure and functions, the Sahel desertification/re-greening debate is not solved yet. To our knowledge none of these studies could refer to long-term vegetation ground observations to validate or help interpreting satellite observations. Very few long-term networks exist worldwide, and field observation networks in Sahelian regions proved very difficult to install and manage throughout long time periods. This is precisely the main contribution of the present study: analyzing NDVI data together with field observations of vegetation collected over a network of sites in the Gourma region in Mali over 28 years, from 1984 to 2011 (Hiernaux, Mougin, et al., 2009; Mougin et al., 2009), and in the Fakara region in western Niger over 17 years, from 1994 to 2011 (Hiernaux, Ayantunde, et al., 2009). While the Gourma region is located in pastoral Sahel, the Fakara is an agro-pastoral region with about half of the landscape being under shifting cultivation with a dynamic land use history. The Gourma and Fakara regions thus provide particularly contrasted study areas.

The questions this study aims to answer are the following:

- i. What are the NDVI trends observed over the Sahel over the last three decades? Are the different NDVI datasets in agreement? How sensitive are the computed NDVI trends to the time period considered?
- ii. What trends are observed with field observations of herbaceous vegetation in Gourma and Fakara?
- iii. Are NDVI and field observations trends in agreement?
- iv. How can these NDVI trends be interpreted?

2. Data and methods

2.1. NDVI datasets

Three of the NDVI datasets analyzed in this study were produced from data collected with the AVHRR sensors onboard the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiting meteorological satellite series: LTDR, GIMMS and GIMMS-3g. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is calculated from the AVHRR channel 1 (red, 550–700 nm) and channel 2 (near-infrared, 730–1000 nm). The MODIS NDVI products from Terra and Aqua (MOD13C2 and MYD13C2) were also used for comparison over the recent 2000–2011 period.

The GIMMS-3g dataset has the longest period of observation and is increasingly used (Zhu et al., 2012, and other articles in the special issue). Therefore, after assessing its overall consistency by comparison to the other NDVI datasets, it is the basis of the present trend analysis.

2.1.1. GIMMS NDVI dataset

The GIMMS NDVI dataset is available from 1981 to 2006 with a spatial resolution of 8 km. Channel 1 and channel 2 LAC (Local Area Coverage, 1 km) reflectances are processed into GAC (Global Area Coverage, 4 km) data by averaging four out of five LAC pixels in a first line, then skipping the two next lines (Kidwell, 1998). The GAC pixels are assigned to the output grid (8 × 8 km) by a forward transform mapping using the satellite pixel center to determine the corresponding output cell. NDVI maximum value composites are then computed to compensate for the lack of cloud screening (Holben, 1986). The calibration happens in two steps. First, channel 1 and channel 2 reflectances are calibrated by the Vermote and Kaufman technique (Vermote & Kaufman, 1995). Then the NDVI is adjusted with the technique of Los (1998) using desert areas as calibration targets. To compensate for the sensors orbital drift and produce a consistent long-term NDVI record despite the use of several AVHRR sensors (Table 1), artificial trends have to be removed from the surface signature. The empirical mode decomposition technique (Pinzon, Brown, & Tucker, 2005) is applied, which minimizes solar zenith angle effects by removing the bias due to variable solar zenith angles as a function of sensor drift. The GIMMS NDVI has no atmospheric corrections, except for the volcanic eruptions of El Chichon (1982) and Mt Pinatubo (1991): stratospheric aerosol corrections are made for 1982–1984 and 1991–1994. Aggregated SPOT Vegetation data are used to perform the intercalibration between the NOAA-14 and NOAA-16/17 sensors, and the GIMMS NDVI is produced to be consistent with the dynamical range of SPOT-VGT and MODIS data.

The navigation accuracy obtained by coastal border check is about ±1 pixel, which is good as far as global and regional analysis are concerned but may be insufficient when a pixel by pixel analysis is considered in continental areas. In the present study, navigation corrections were applied using tie-points on several sites in West Africa with invariant NDVI over time such as some lakes and rocky areas. A correction of +0.057° in longitude and –0.068° in latitude was applied regionally.

2.1.2. GIMMS-3g NDVI dataset

The GIMMS-3g NDVI dataset is the latest version of the GIMMS NDVI produced by the NASA Global Inventory Modeling and Mapping Studies

Table 1
NOAA satellites used to produce the GIMMS and GIMMS-3g NDVI datasets.

Instrument	NOAA-7	NOAA-9	NOAA-11	NOAA 9-d	NOAA-14	NOAA-16	NOAA-17	NOAA-18	NOAA-19
Dates of coverage	Jul. 1981–Feb. 1985	Feb. 1985–Sept. 1988	Sept. 1988–Aug. 1994	Aug. 1994–Jan. 1995	Jan. 1995–Nov. 2000	Nov. 2000–Dec. 2003	Dec. 2003–Jul. 2005	Jul. 2005–Apr. 2009	Apr. 2009–present

group. It is available from July 1981 to December 2011, with a spatial resolution of $1/12^\circ$ and bimonthly composite images. This version was processed to provide better quality data for the high latitudes than the previous dataset. Calibration was performed using SeaWiFS data instead of SPOT Vegetation data (Zhu et al., 2012). As for the GIMMS dataset, navigation precision was checked out in our study area. No systematic shift was observed and no navigation correction was applied.

2.1.3. LTDR NDVI dataset

The Long-Term Land Data Record project is conducted by NASA Goddard Flight Space Center and was designed to produce land climate related datasets by merging data from the AVHRR sensors from 1981 to 1999 with MODIS data from 2000 up to today (Pedelty et al., 2007). Daily reflectance, NDVI, and quality assessments are produced with a spatial resolution of 0.05° which matches the MODIS Climate Modeling Grid (CMG). LTDR version 3 was used in this study with reprocessed AVHRR GAC data over the 1981–1999 period. The GAC reprocessing includes pre-processing improvements (channels 1 and 2 in-flight calibration, inverse navigation to improve navigation) and atmospheric corrections used in the MODIS processing. Rayleigh scattering and water vapor content are corrected for using NCEP (NOAA Center for Environmental Prediction) outputs, ozone content is obtained from TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) and aerosol correction is applied. LTDR consistency is monitored over several AERONET sites as well as over “golden tiles” constituted of $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ subsets distributed over sites characterized by different vegetation types.

2.1.4. MODIS NDVI datasets

The MODIS NDVI product MOD13C2 is based on data from the Terra satellite, while the MYD13C2 NDVI product is based on data from the Aqua satellite. Aqua has an equatorial crossing time in the afternoon (1:30 pm) while Terra has an equatorial crossing time in the morning (10:30 am).

The MOD13C2 product is available from 2000 onwards at a 5.6 km (0.05°) spatial resolution and a monthly temporal resolution (Justice et al., 1998, 2002). It is obtained from temporal and spatial averages of the MOD13A2 NDVI product (1 km , 16 days), which is in turn based on the daily surface reflectance product (MOD09). The MOD09 red and infrared surface reflectances are corrected for the effect of atmospheric gases and aerosols. The MYD13C2 product has the same spatial and temporal characteristics. It is computed through the same scheme, and is available from 2002 onwards.

2.2. Field observations of vegetation

2.2.1. Mali (Gourma region)

The Gourma region is located in north-eastern Mali and covers approximately $90,000 \text{ km}^2$ to the south of the Niger River. The region considered in this study and referred to as the “Gourma window” covers $30,000 \text{ km}^2$ and extends from latitude North 14.5° to 17.5° and from longitude West 0.8° to 2.2° (Fig. 1). Field observations of vegetation were collected from 1984 to 1999 by Hiernaux & Diarra (ILRI, International Livestock Research Institute; Hiernaux & Turner, 1996) and from 1999 to 2011 within the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA)—Couplage de l’Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique (CATCH) observatory (Hiernaux, Mougouin, et al., 2009; Mougouin et al., 2009). The Gourma region covers a bioclimatic gradient where precipitations range from 150 mm/year in the northern edge to 400 mm/year in the southern edge. The landscape is composed of

about 65% deep sandy soils, 30% shallow soils and 5% loamy-clay soils. The Gourma is a pastoral region where less than 5% of the surface is cultivated. The vegetation cover mainly consists of annual herbaceous plants, while woody plants occupy on average less than 3% of the surface. Therefore, the vegetation variable used in this study is the aboveground standing mass of the herbaceous layer as a proxy for vegetation aboveground production. However, the database also provides meteorological data, complementary data on herbaceous vegetation (cover, height, plant density, standing litter, root mass, species composition), soil type (texture profile, organic matter and nutrient contents), grazing pressure intensity, and woody plant population (Hiernaux, Diarra, et al., 2009; Hiernaux, Mougouin, et al., 2009).

The sampling strategy was designed to be representative at the landscape scale, the objective being to build a dataset compatible with the 1 km resolution of the LAC AVHRR remote sensing data. Therefore, observations and measurements were made on 30 homogeneous sites of 1 km^2 (1 m wide by 1 km long lines) distributed along the bioclimatic gradient in the main landscape units as defined by topography, water system, soil types, land use and grazing pressure intensity (Fig. 1).

In order to account for spatial heterogeneity, the sampling of herbaceous vegetation with site is performed through a two level stratified random sampling (Hiernaux, Mougouin, et al., 2009). Major heterogeneity related to topography or soils is dealt with distinguishing facieses, while local heterogeneity in herbage masses is dealt with distinguishing four strata within each facies: bare soil (nil or close to nil vegetation cover), low, medium and high density. The frequency of the facieses and strata is read, meter per meter, along the 1 km -long transect. Measurements of herbaceous mass are performed by destructive cutting, drying and weighing on a set of plots randomly selected within each stratum: 6, 6 and 12 plots for the low, high and medium density strata respectively. The total herbaceous mass of the site is then computed by weighting the mass measured for each stratum by the stratum frequency. Several measurements per year are generally available, but for this study the maximum value for each year has been employed. End of season observations of annual plants is considered a good proxy for annual aboveground productivity in this biome (Le Houerou, 1984; Sala & Austin, 2000). Rainfall data from the Hombori Synoptic Meteorological station are used to interpret vegetation trends.

2.2.2. Niger (Fakara region)

The Fakara region is located in southwestern Niger and covers approximately 6000 km^2 between the Niger River and the Dallol Bosso valley. The region considered in this study and referred to as the “Fakara window” covers 500 km^2 and is centered on the district of Dantiandou (latitude North $13^\circ 24' 57''$, longitude East $2^\circ 45' 2''$, Fig. 2). The climate is semi-arid with a mean annual precipitation of about 500 mm with high spatial and temporal variability (Le Barbé & Lebel, 1997). The Fakara landscape is a highly fragmented agro pastoral land with a very dynamic land use. Indeed, a large increase in land area under cultivation occurred over the last decades (Hiernaux & Turner, 2002) and frequent shifts happen between fallowing and cropping. Woody plants cover about 5% of the landscape in average and are mostly composed of sparse trees and diversely dense shrubs (Hiernaux & Ayantunde, 2004). As for the Gourma region, this study mostly focuses on the herbaceous vegetation mass variable.

Field observations of vegetation began in 1994 with an ILRI project aiming to assess fodder resources (Hiernaux & Ayantunde, 2004), and continued since 1999 within the AMMA-CATCH observatory (Cappelaere et al., 2009). The end of season herbaceous mass

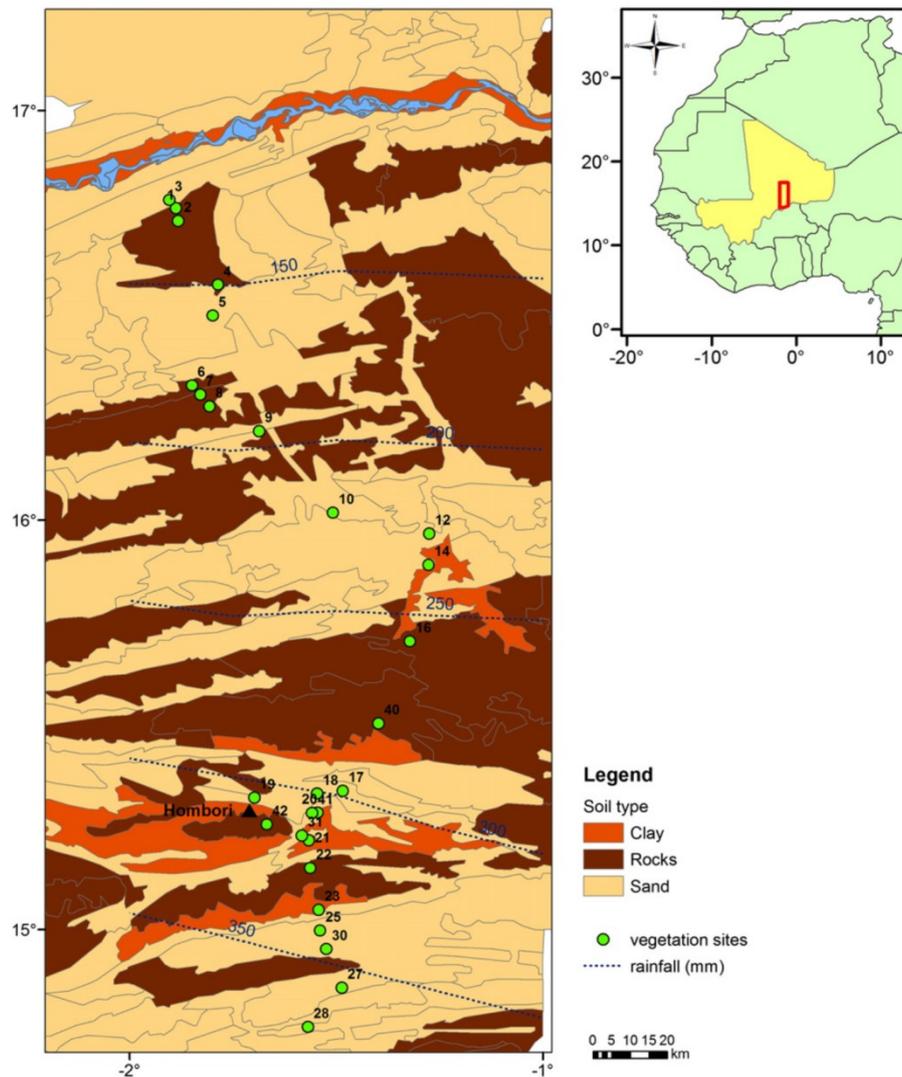


Fig. 1. Study area in Gourma (Mali) with vegetation survey sites and dominant soil type.

(October) is used as the estimate of herbaceous annual production. The vegetation dataset aims at sampling the main topographic situations, soil types, and land use types, based on a set of 24 sites (12 crops, 12 fallows–rangelands) monitored over years. Because of the frequent shifts between cropping and fallowing and to ensure equilibrium between the numbers of cropped and fallowed/rangeland sites, sites were continuously added to the initial dataset, so that since 2006, the 24 sites are selected every year in a pool of 72 historical sites (Hiernaux, Ayantunde, et al., 2009). Production is estimated for rangelands, fallows (old, recent, new) and cropped fields (low, medium, high density, and manured fields) in the main landscape units (plateau, sandy soil slopes, valleys).

In fallow and rangeland sites, the sampling strategy applied is the same two level stratified random sampling and destructive measurement used for the Gourma observations (see Section 2.2.1), except that measurements are made along 200 m-long transects, to account for the size of fields.

In cropped fields, the mass of weeds is determined by following the same destructive method, the only difference being that 10 plots are selected every 10 m along a 100 m-long transect and no stratification is performed. Indeed, crops are regularly weeded so that the weeds density can be considered randomly distributed. The mass of cropped plants is estimated by determining their density by a distance method named Point Centered Quadrant method (PCQ) applied every 10 m along the 100 m-long transect. The PCQ method consists in measuring the distance

of the nearest crop plant to the sampling point within four quadrants defined as the intersection of the transect and its perpendicular. These four distances are averaged at each sampling point, and plant density is computed based on the average of these distances using the density algorithm (Cottam & Curtis, 1956). At each of the sampling points, a millet plant is sub sampled and its mass measured. Finally, grain mass is indirectly estimated using a harvest index and added to the total mass of the millet crop. Rainfall data from the Niamey Square degree (average of 29 Synoptic Meteorological stations located in the Niamey super site, see Lebel & Ali, 2009) are used to interpret vegetation trends.

2.3. Methods

2.3.1. NDVI temporal average

NDVI is related to the quantity of photosynthetically active plants and is known to be a good estimator of vegetation properties such as green leaf area index (LAI), green vegetation cover fraction (fCover), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR), and primary production (Myneni, Hall, Sellers, & Marshak, 1995; Myneni & Williams, 1994; Tucker, 1979). NDVI is commonly used to monitor herbaceous vegetation changes in Sahel (Tucker, Justice, & Prince, 1986; Tucker, Vanpraet, Sharman, & Van Ittersum, 1985). Net primary production is estimated by averaging the 15 day NDVI composites over August and September, equivalent to integrating the NDVI curve over that period of main growth.

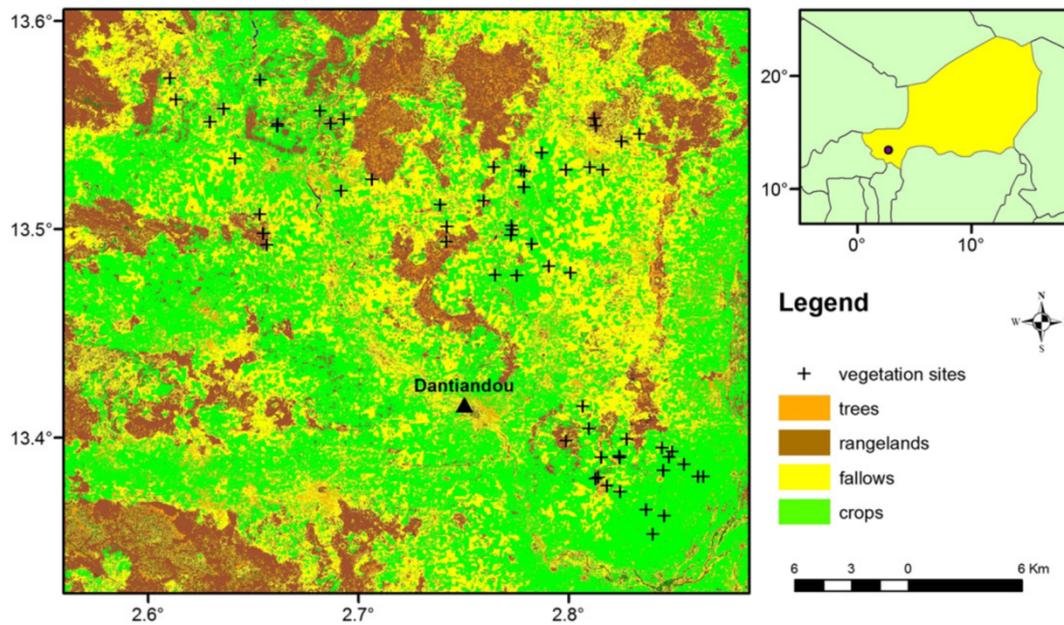


Fig. 2. Study area in Fakara (Niger). Vegetation survey sites are plotted onto the land cover map. The supervised classification was performed from a LANDSAT image from October 2007.

Preliminary work was performed to determine the method and time period to use for computing “annual” NDVI values: averaging different months, or integrating after removing the dry season NDVI value, see Mbaw, Fensholt, Rasmussen, and Diop (2013) for instance. The results obtained with each method were fairly close in terms of trends maps, interannual variability and comparison to field observations. We selected the simple “average method” for the August and September months, which catch most of the herbaceous vegetation dynamics both in rangelands and croplands in our study regions, is widely used in literature (Anyamba & Tucker, 2005; Fensholt et al., 2009; Hellden & Tottrup, 2008; Tucker et al., 2005) and is easily reproducible.

2.3.2. NDVI datasets intercomparison

In order to test the consistency of GIMMS-3g with the other datasets, maps of correlation over time were computed for GIMMS-3g/GIMMS (1981–2006), GIMMS-3g/LTDR (1981–1999) and GIMMS-3g/MOD13C2 (2000–2011). Maps of correlation were also computed for GIMMS-3g/MYD13C2 and MOD13C2/MYD13C2 over 2002–2011 (not shown).

Linear regressions were computed on a per pixel basis over the Sahel region. The spatial resolution being different among products, the coordinates of the pixel center of the dataset with the finer resolution were used to select the closest pixel of the other dataset. Areas where the correlation is not significant at the 95% level are masked out (in light gray on maps). Similarly, areas where NDVI standard deviation over time is below 0.015 NDVI units are masked out (in dark gray on maps), the NDVI signal being too low to enable interpretation (these areas are mainly located in the Sahara desert).

To assess the interannual variability consistency of the GIMMS-3g dataset, temporal profiles were examined as well. Spatial averages were performed over the Gourma and Fakara windows (see Sections 2.2.1 and 2.2.2).

2.3.3. NDVI trend computation

Linear regressions were computed on a per pixel basis to produce regional maps of GIMMS-3g NDVI trends over 30 years (1981–2011) over the Sahel region and over the Gourma and Fakara windows. Slope values multiplied by the number of years are subsequently referred to as the “linear increment”. Significance threshold is set at 95%. Areas where this threshold is not reached are masked out as well as areas where NDVI standard deviation is below 0.015 NDVI units.

When studying trends over time, a key question remains the sensitivity of trends to the time period considered within the 30 year-long series: the start and end years can have tremendous impacts on the sign or strength of the computed trend. Thus, linear increments and associated p-values were computed systematically, for every possible time period between 1981 and 2011.

2.3.4. NDVI comparison to field observations

2.3.4.1. Trend comparison and correlation analysis. Because of the scale differences between field data and the $1/12^\circ$ satellite pixels, NDVI data and field measured herbaceous masses were spatially aggregated. GIMMS-3g NDVI seasonal mean values were spatially averaged over the windows described in Sections 2.2.1 and 2.2.2. A weighted average of in-situ measurements was computed to provide one time series per study area representative of the Gourma and Fakara windows, as described in Sections 2.3.4.2 and 2.3.4.3. Linear trends were computed for each dataset with time as the independent variable. A linear correlation analysis and a Spearman rank correlation were performed between the spatially aggregated time series of NDVI and herbaceous layer mass.

2.3.4.2. Weighted average of field observations, Gourma (Mali). The landscape of the Gourma region is composed of three main units: deep sandy soils, shallow soils on hardpan or rock outcrops, and fine textured soils (clayed) in low lands. The respective proportions of each of the main landscape units within the Gourma window were estimated as 65.1% of sandy surfaces, 30.8% of shallow soils, and 4.1% of clayed depressions (see Fig. 1). These proportions were used to weighted average herbaceous mass values of sites grouped by soil type, in order to obtain a unique time series directly comparable with satellite data. Comparison was made to a raw average of field observations over all sites and results were similar (not shown).

Although it is not the best method due to the size of the GIMMS-3g pixels, NDVI was extracted for the nearest pixel of each field site (consistency was checked out by analyzing temporal profiles for the 8 surrounding pixels, not shown) and averaged following the soil type attribution. Linear correlations between the three classes of NDVI and field data (sandy, shallow and clayed soils) were computed and shown for information.

2.3.4.3. *Weighted average of field observations, Fakara (Niger)*. The 48 sites observed each year in the Fakara region sample the landscape heterogeneity but disregard the proportions of the landscape units. Thus, to perform the comparison with spatially aggregated NDVI data within the window previously described, field data were averaged using two successive weightings.

First, the relative extent of rangelands, fallows and cultivated areas estimated through supervised classification performed on high resolution imagery (Table 3) are used to weight mean herbaceous masses per land use type. Land use being very dynamic in Fakara, this weighting evolved over time: fallows and cropland changed significantly, whereas area of rangelands was considered constant. The overall accuracy was found to be 84.5% for the 1986 classification (Kappa coefficient = 0.76), 91% for the 2008 classification (Kappa coefficient = 0.86) and 84.4% for the 2011 classification (Kappa coefficient = 0.78). The crop class is particularly well distinguished from the other classes.

Then further weighting was performed for croplands as four categories of cropland were sampled, based on crop density: low, medium, high and very high in manured crop fields. From previous field surveys and mapping the relative extent of the categories is estimated at 60% low density, 24% medium density, 8% high density and 8% manured crops respectively all along the period (no significant changes were observed). These proportions were used as weights to estimate the overall (crops plus weeds) herbaceous mass of croplands.

3. Results

3.1. NDVI datasets comparison

3.1.1. Regional analysis

Good overall agreement is found among all datasets over the Sahelian belt (Fig. 3). Results over the Sahara region were masked out (light gray) because of a too sparse or nil vegetation cover (NDVI under the 0.015 threshold). Correlation values are also low over the sub-humid Sudanian belt where the NDVI signal may be saturated at peak growth and may be contaminated by frequent clouds. The higher correlation coefficients over the Sahel belt are found between the LTDR and GIMMS-3g NDVI datasets (and also between the two MODIS NDVI products, not shown). GIMMS and GIMMS-3g are also significantly correlated (over 1981–2006 as shown on Fig. 3b and over 1981–1999, not shown), while the correlation is weaker for GIMMS-3g/MODIS MOD13C2 (11 years only). A slightly higher correlation is found between GIMMS-3g and MYD13C2 (Aqua) over 2002–2011 (not shown), most probably due to the similar equatorial crossing time (during the afternoon both for MODIS Aqua and the AVHRR sensor).

Such an overall agreement, when focusing over the Sahel belt, allows the use of GIMMS-3g NDVI data to compare with field measurements over the longest possible time period.

Table 2

Linear regressions between the different NDVI datasets over the Gourma and Fakara regions. The correlation is computed with the first indicated dataset as the dependant variable (e.g. GIMMS-3g/LTDR means $GIMMS-3g = f(LTDR)$). Correlations over 1981–1999 were added for the 3 longest datasets for comparison purposes.

NDVI datasets	Time period	Linear regression	Gourma (Mali)	Fakara (Niger)
GIMMS-3g/GIMMS	1981–2006	r ²	0.88	0.9
		Slope value	0.59	0.64
	1981–1999	r ²	0.99	0.94
		Slope value	0.65	0.64
GIMMS-3g/LTDR	1981–1999	r ²	0.92	0.73
		Slope value	0.68	0.65
	1981–1999	r ²	0.89	0.75
		Slope value	1.02	1
GIMMS-3g/MOD13C2	2000–2011	r ²	0.88	0.7
		Slope value	1.22	0.75

Table 3

Relative extent of crops and fallows over the Fakara region estimated from supervised classifications performed on high resolution imagery.

Year	1986	2007	2008	2011
Crops (%)	25.3	37.4	42.5	48.9
Fallows (%)	52.1	36.7	35	31.2

3.1.2. Temporal profiles

The five NDVI temporal profiles averaged over the Gourma and Fakara windows display a good consistency, especially in terms of trends and interannual variability (Fig. 4 and Table 2). Processing differences (atmospheric effects correction, sensors intercalibration...) and also band width differences with MODIS explain the shift in NDVI absolute values. The GIMMS dataset in particular displays absolute values lower than the three other products. GIMMS-3g is in good agreement with the LTDR product over 1981–1999 and with the MODIS MOD13C2 and MYD13C2 products over 2000–2011 and 2002–2011 respectively. All products show below-average NDVI values during the 1983–84 drought, and above-average peaks in 1994 and 1999, two years which correspond to higher than average rainfall (Lebel & Ali, 2009).

A linear correlation shows that MOD13C2 explains 88% of the variability in the GIMMS-3g dataset for the Gourma region (Fig. 5a) and 70% for the Fakara region (Fig. 5b). The correlation coefficients found for the regression between GIMMS-3g and MODIS MYD13C2 over 2002–2011 are lower (79% for the Gourma and 66% for the Fakara; not shown).

3.1.3. Phenology

Over the Gourma window and over the whole 1981–2011 period, GIMMS-3g NDVI trends computed for each month are positive and significant for August, September and October, i.e. during the growing season peak (Fig. 6a). This implies that, in this region, positive NDVI trends can be mostly interpreted as an increase in NDVI amplitude (Heumann et al., 2007). Negative significant trends are observed during the dry season, and even at the beginning of the rainy season (April to July), which is most probably due to artifacts. Indeed, GIMMS-3g NDVI trends over 1981–2000 do not show such negative trends for these months (Fig. 6b), while they appear when trends are computed over 2000–2011 (Fig. 6c), but not for the MODIS MOD13C2 dataset (Fig. 6d). The same patterns were found over the Fakara region (not shown). Given that we compute annual values of NDVI by averaging NDVI from August to September, this does not impair the following results.

3.2. NDVI trends analysis

3.2.1. Regional GIMMS-3g NDVI linear trends

GIMMS-3g NDVI trends over the Sahel are widely positive and significant except in a few spots, the larger negative patterns being found over western Niger, central and eastern Sudan (Fig. 7a). Anywhere else, positive trends i.e. re-greening trends are observed. Highly contrasted patterns, strongly positive and negative, are found over the Gourma and Fakara windows respectively (Fig. 7b).

3.2.2. Sensitivity of trends to the time period

In the two-dimensional parameter diagram (Fig. 8), years with above average NDVI are characterized by particular patterns: a strong green vertical line meaning that the aforementioned year has greater NDVI values than the previous ones, and a strong red horizontal line meaning that the following years are characterized by lower NDVI values. Similarly, years with below average NDVI are clearly identifiable in the diagram: the impact of the 1983–84 drought is obvious with a red patch for the years of the droughts and strong positive trends for all time periods starting in 1983 or 1984.

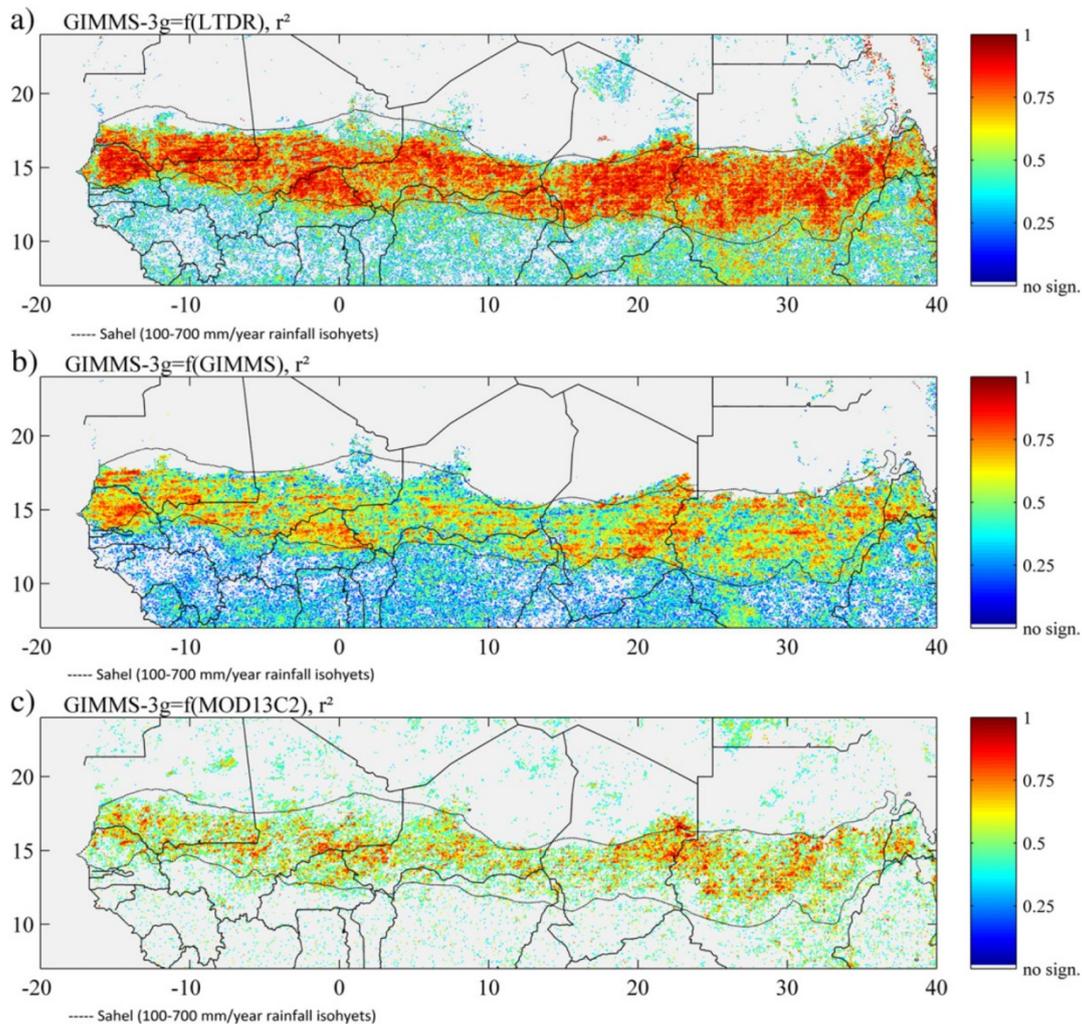


Fig. 3. Maps of square correlation coefficient of the linear regression between: a) LTDR/GIMMS (1981–1999), b) GIMMS/GIMMS-3g (1981–2006), and c) MOD13C2/GIMMS-3g (2000–2011). Significance threshold is set at 95% (areas masked out in gray).

In the Gourma window, trends beginning in the mid 1980s are positive and statistically significant for all time periods (Fig. 8a and b). Negative trends are found for time periods starting in the late 1990s, but few of them are statistically significant. On the contrary 1994 and 1999 appear to favor strong positive NDVI trends as well as 2010 and 2011. Thus, the NDVI trends computed over the Gourma window are mostly significant re-greening trends for almost every time period following the 1983–84 drought.

In the Fagara window, first the same re-greening trends after the 1983–84 drought are observed (Fig. 8c and d): trends are positive for time segments starting in the mid 1980s and going up to the mid 1990s, but the associated significance levels are rather low. After that period, negative trends become widely dominant and more significant: a very strong negative pattern is found for time segments starting around 1994 and ending in 2011. Similar patterns are observed for time periods ending in the last three years, suggesting that NDVI was still decreasing in 2009, 2010 and 2011. Therefore, according to satellite data, vegetation cover in Fagara seems to have constantly and strongly decreased after a short recovery stage following the 1983–84 drought.

3.3. NDVI comparison to field observations

3.3.1. Gourma region

Annual herbaceous vegetation masses measured in the field show a positive and significant linear trend over the 1984–2011 period, both the raw (not shown) and weighted averages (Fig. 9a). The linear

increment reaches 589 kg DM ha⁻¹ for the weighted average (p-value < 0.002) and 686 kg DM ha⁻¹ for the raw average (p-value < 0.001). The NDVI trends, computed considering all years or only years when field observations are available, are both positive and significant (Fig. 9b). The slightly lower linear increment of the longest series (0.032 instead of 0.05) is mainly due to 1981 and 1982, the two years preceding the drought.

Both the field and satellite datasets show low values in 1984, 1985–1987, 1992–1993, 1995, 2004, and 2008 and high values in 1999, 2010 and 2011. However, some disagreement is found for 1988 and 1989, where herbaceous mass values stand higher than what the NDVI values would suggest.

A linear correlation between the NDVI series and the weighted average of field observations shows that GIMMS-3g explains 59% of the interannual variability in in-situ measurements (Fig. 9c). The Spearman rank correlation is 0.74.

3.3.2. Trend analysis by soil type

The GIMMS-3g NDVI trends as a function of soil types over the Gourma window (compare Figs. 1 and 7b) indicate positive significant NDVI trends over the large sandy soil areas and over the clay-dominated areas, while no significant trends are observed over shallow soils. In fact, the larger shallow soil units even display negative trends, but these are masked out (gray shading) because they are not significant.

Temporal profiles of field observations classified into the three categories (sandy, shallow, clay) (Fig. 10a) confirm that re-greening trends

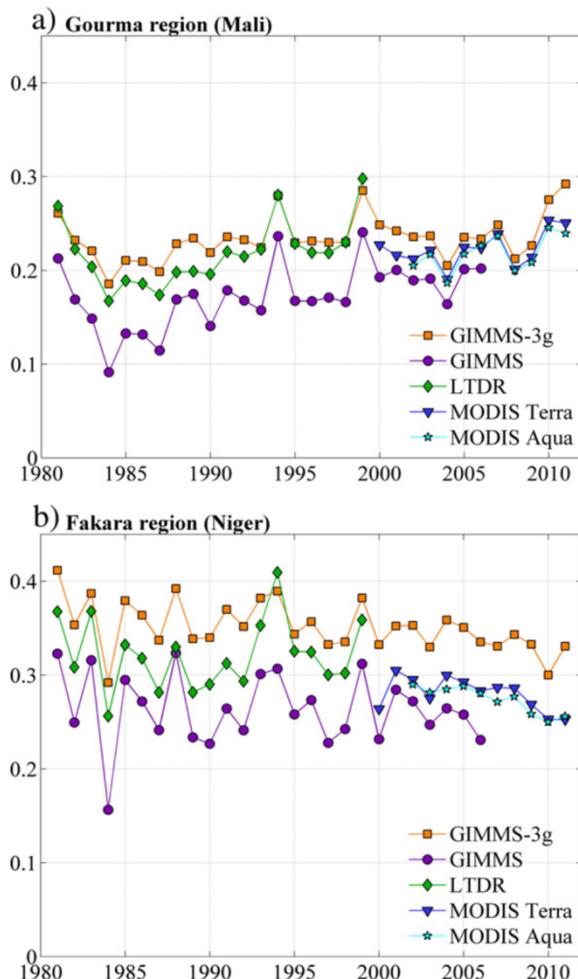


Fig. 4. NDVI temporal profiles over a) the Gourma region and b) the Fakara region.

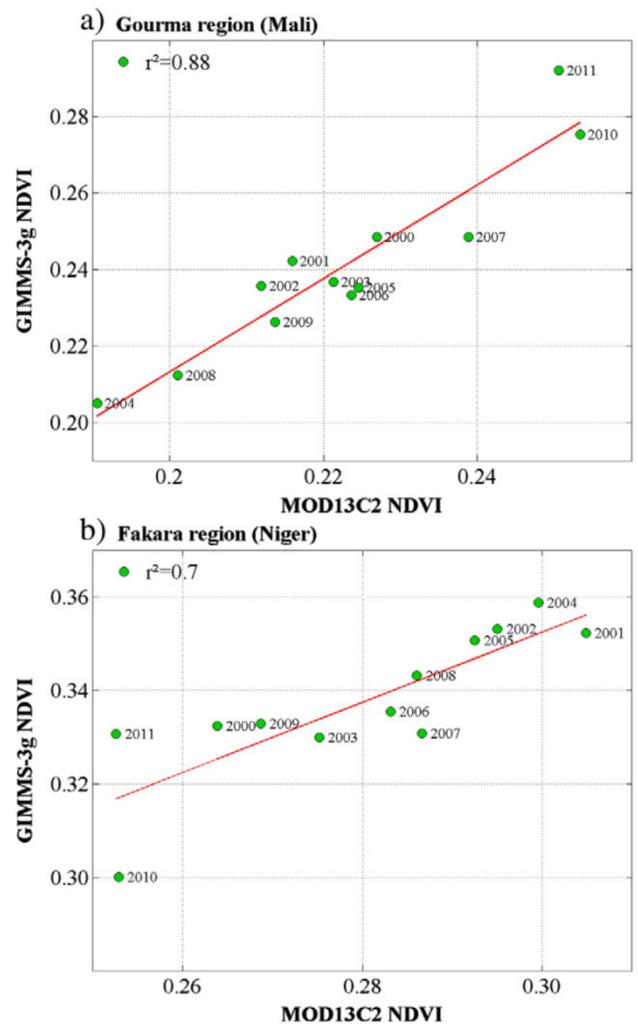


Fig. 5. Linear regression between GIMMS-3g and MODIS Terra NDVI over a) the Gourma region and b) the Fakara region.

are observed on sandy soils: the linear increment of field measurements reaches $769 \text{ kg DM ha}^{-1}$ over the whole period (1984–2011) with a p-value of 0.017. These sandy soil sites are most of the time homogeneous at the GIMMS-3g pixel scale. The correlation at the pixel scale is good ($r^2 = 0.68$ with a p-value > 0.001 , Fig. 10b) and the trends over time are comparable.

In low land sites with clayed soils, field observations show a very high positive trend of herbaceous mass (linear increment of $1372 \text{ kg DM ha}^{-1}$, p-value of 0.005), which is in part due to an increase in run-on over the period (Gardelle, Hiemaux, Kergoat, & Grippa, 2010; Timouk et al., 2009). Correlation with NDVI is poor ($r^2 = 0.24$, p-value = 0.014) due to the small size of clayed units: the satellite pixels covering a larger area than the typical scale of a clayed soil site, vegetation is observed over a mixed pixel including other soil types, which have changed differently over time.

Field observations over shallow soil sites show a positive slope value which is low ($210 \text{ kg DM ha}^{-1}$ over the period with a p-value of 0.048) and is in fact mainly due to 2010 and 2011. Without these two years, the trend is not significant anymore and is much lower (linear increment of 89 kg DM ha^{-1} with a p-value of 0.37). As shown before, vegetation yield was particularly high in 2010 and 2011 over the entire Gourma. Thus, small sandy or loamy patches encountered among wide rocky or hardpan outcrops bore higher vegetation cover. Correlation with NDVI is poor ($r^2 = 0.25$, p-value = 0.014) due to low vegetation yields at the pixel scale, which are difficult to assess with accuracy with satellite data.

3.3.3. Fakara region

NDVI and field observations trends in Fakara over the overlapping period (1994–2011) are both negative and statistically significant (Fig. 11a and b). The field observations linear increment reaches -336 kg DM/ha (p-value of 0.1), while the GIMMS-3g NDVI linear increment equals -0.04 NDVI units. When computing a linear correlation between field herbaceous mass values (weighted average) and seasonal GIMMS-3g NDVI averaged over the Fakara window, GIMMS-3g explains 17% of the variability in in-situ observations. However, the year 2010 is found to significantly differ from the regression line as well as from the regression between MODIS and GIMMS-3g (Fig. 5b). As similar uncertainties regarding the end of the GIMMS-3g dataset were reported (Zhu et al., 2012), we chose to analyze the relationship between NDVI and field measurements over Fakara with and without considering 2010. When not considering 2010, GIMMS-3g explains 38% of the variability in in-situ observations (Fig. 11c). The Spearman rho coefficient (rank correlation) is 0.41 when considering all years and 0.59 without 2010.

4. Discussion

4.1. NDVI trends over Sahel and comparison to field observations of the herbaceous layer mass

The positive and significant GIMMS-3g NDVI trends observed over most parts of the Sahel reinforce the hypothesis of a global Sahelian

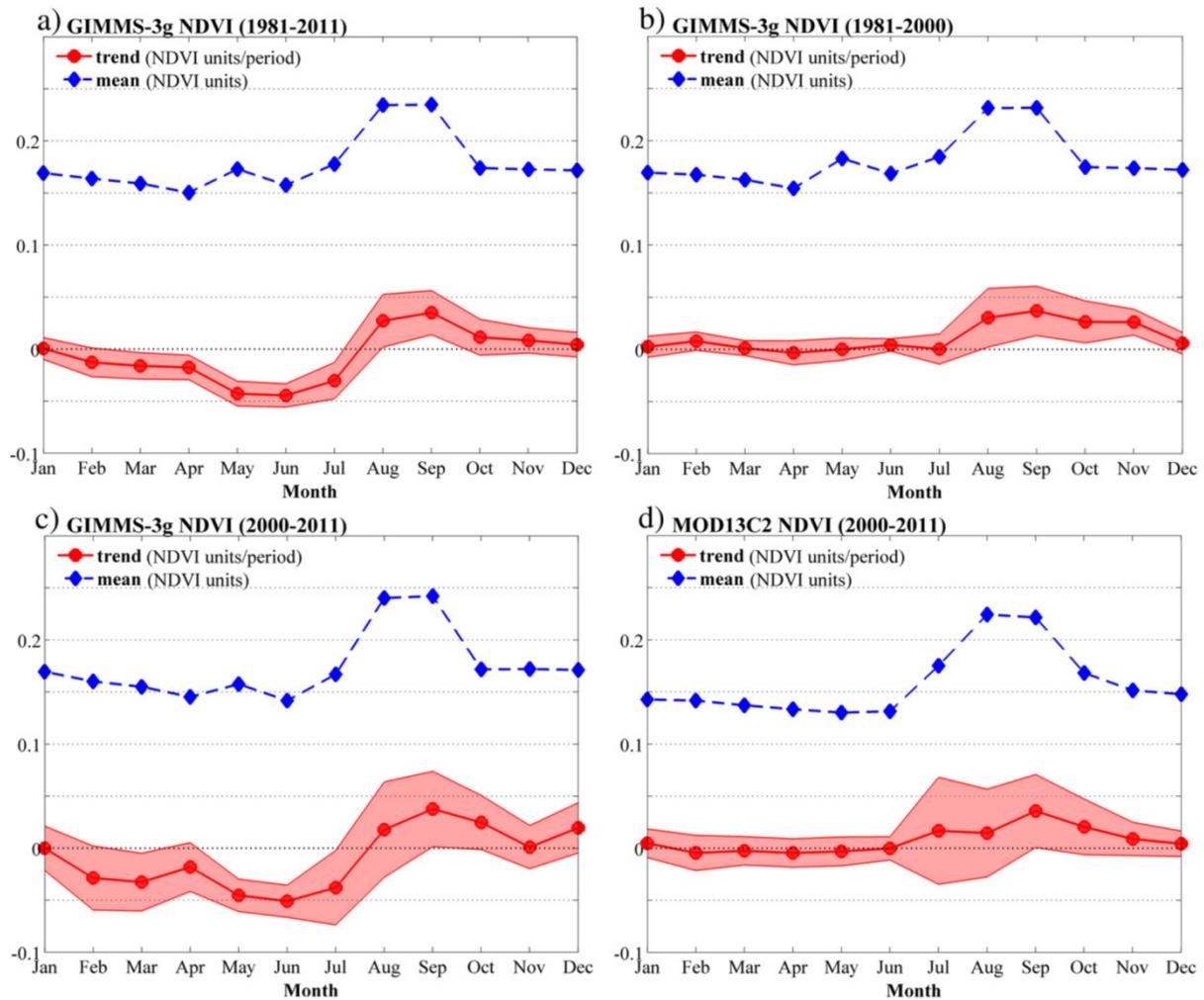


Fig. 6. NDVI averaged over the Gourma window: seasonal cycle is displayed in blue (dotted line) while the linear increments for each month of the year (for instance, the trend for January NDVI over the whole period) are shown in red (plain line). The pink shadow is the 95% confidence interval. a), b), c) show the GIMMS-3g NDVI trends for 1981–2011, 1981–2000 and 2000–2011 respectively, while d) shows the results for MODIS Terra NDVI over 2000–2011.

re-greening occurring since the 1980s (Anyamba & Tucker, 2005; Eklundh & Olsson, 2003; Fensholt et al., 2009; Herrmann et al., 2005; Heumann et al., 2007; Hickler et al., 2005; Olsson et al., 2005) and further establish that the trends are maintained even when a longer period is considered. Only a few spots in the Sahel show significant negative NDVI trends, the more important negative patterns being found in western Niger, central and eastern Sudan.

In the Gourma region, the strong re-greening pattern, strengthened by the sensitivity analysis to time period, suggests a high resilience of the ecosystems after the 1980s' drought. In the Fakara region, a recovery behavior similar to the one observed over the Gourma region is found in the years following the drought, but a significant and constant decline in NDVI is observed since the mid 1990s that is not explained by rainfall, as shown by the above-average rainfall recorded on the same time period (Fig. 12). Not surprisingly, the period considered for the trend analysis is therefore critical, and multi-decadal time series of ground and satellite data are very valuable to outline and interpret significant trends.

There is ample literature on the accuracy of the relation between NDVI and Aboveground Net Primary Production (ANPP) or end-of-season biomass, including studies in the Sahel starting as early as 1985 (Tucker et al., 1985). Typically, when several years and several sites are considered, correlation coefficients range from $r^2 = 0.6$ to 0.7 (Diallo, Diouf, Hanan, Ndiaye, & Prevost, 1991; Hiernaux, 1988; Prince, 1991; Tucker et al., 1985). Few studies, however, evaluate such

relationships over decades, because long-term productivity series are scarce and also because the comparison to NDVI requires demanding sampling or upscaling strategies. In front of such a lack of data, studies tend to use proxies such as tree rings or crop yield statistics. A notable exception (An, Price, & Blair, 2013) found remarkably similar statistics ($r^2 = 0.53$) for NDVI/ANPP linear relation over 17 years in central US tall grass prairie.

Let alone the issues encountered in the NDVI dataset itself, the relationship between NDVI (either integral, average or maximum over a period) and ground-measured vegetation mass is limited by uncertainty in the relationship between NDVI and absorbed radiation, in the conversion of absorbed radiation in net primary production, and in the links between production and end of season biomass. Soil effects on NDVI (background color, texture), grazing pressure (lowering end-of-season measured standing herbaceous mass but not necessarily annual production), floristic composition, or land use and farming methods are potential sources of variability, and may have changed when several decades are considered.

As an example, field sampling and upscaling are more complex in the case of agro-pastoral Fakara than pastoral Gourma. As land use is very dynamic, interannual variations of the respective proportions of each land use class should be followed. A small part of the landscape is constituted of manured crops, which have much higher productivity than the other cropped fields. Thus, small variations from year to year

in the proportions of manured crops can affect the overall herbaceous production and the correlation between NDVI and field measurements if not accounted for.

In this study we have shown that variability and trends in NDVI time series are well explained by the trend in herbaceous mass in the Gourma, and consistent with the same trend in the Fakara. The good relationship found between NDVI data and field observations of the herbaceous mass highlights that NDVI is particularly well correlated to the herbaceous layer productivity in the Sahel, even when long-term archives are used. It proves that vegetation trend analysis using long-term satellite data is not only possible, but that satellite archive is an effective and reliable tool, both for qualitative and quantitative studies.

4.2. Trends interpretation

4.2.1. Rainfall

Rainfall is the first driver of vegetation production in Sahel (Penning de Vries & Djitéye, 1982). In the Gourma region, the re-greening trends evidenced can be related in the first order to rainfall trends over the last three decades. As an example, anomalies of annual rainfall measured at the Hombori meteorological station exhibit a linear increment of 109 mm over 1981–2011 (p-value = 0.08; see Fig. 12a). However, the negative trends found in vegetation production over the Fakara window both with ground measurements and satellite data are hardly explained by trends in annual rainfall. Indeed, rainfall measurements collected over the Niamey Square Degree do not exhibit significant trends (linear increment of 39 mm over 1990–2011, p-value = 0.50;

linear increment of –58 mm over 1994–2011, p-value = 0.43; see Fig. 12b). Other factors should be taken into account to interpret trends and will be discussed later on.

4.2.2. Soil type and changes in landscape

In the Gourma region, significant positive trends in both NDVI and field observations are mainly observed over sandy surfaces and clayed depressions. On the contrary, the positive trend is very weak over shallow soils and only significant when including the two last years of the time period (2010 and 2011), during which rainfall were exceptionally high. Large increase in run-off has occurred during the past decades over the shallow soil sites in Gourma as in other Sahel regions (known as the “Sahelian paradox”, Descroix et al., 2009), in some places in association with vegetation decay and strong erosion, which shows up on high resolution satellite data or aerial pictures (Descroix et al., 2012; Gardelle et al., 2010). As a consequence, more water runs on in the low lands where the vegetation cover increases.

Therefore, even in a region like Gourma where an overall re-greening trend is indisputable, changes may occur in the ecosystems and in some hydrological processes which can have important impacts on the landscape functioning. Local degradation trends are thus actually happening as demonstrated by the large increase in erosion processes and run-off rates and the vegetation decline over shallow soils. Observations of such phenomena (vegetation decline over some areas coupled to increased run-off and vegetation cover in other areas) may help reconciling the re-greening and degradation theories.

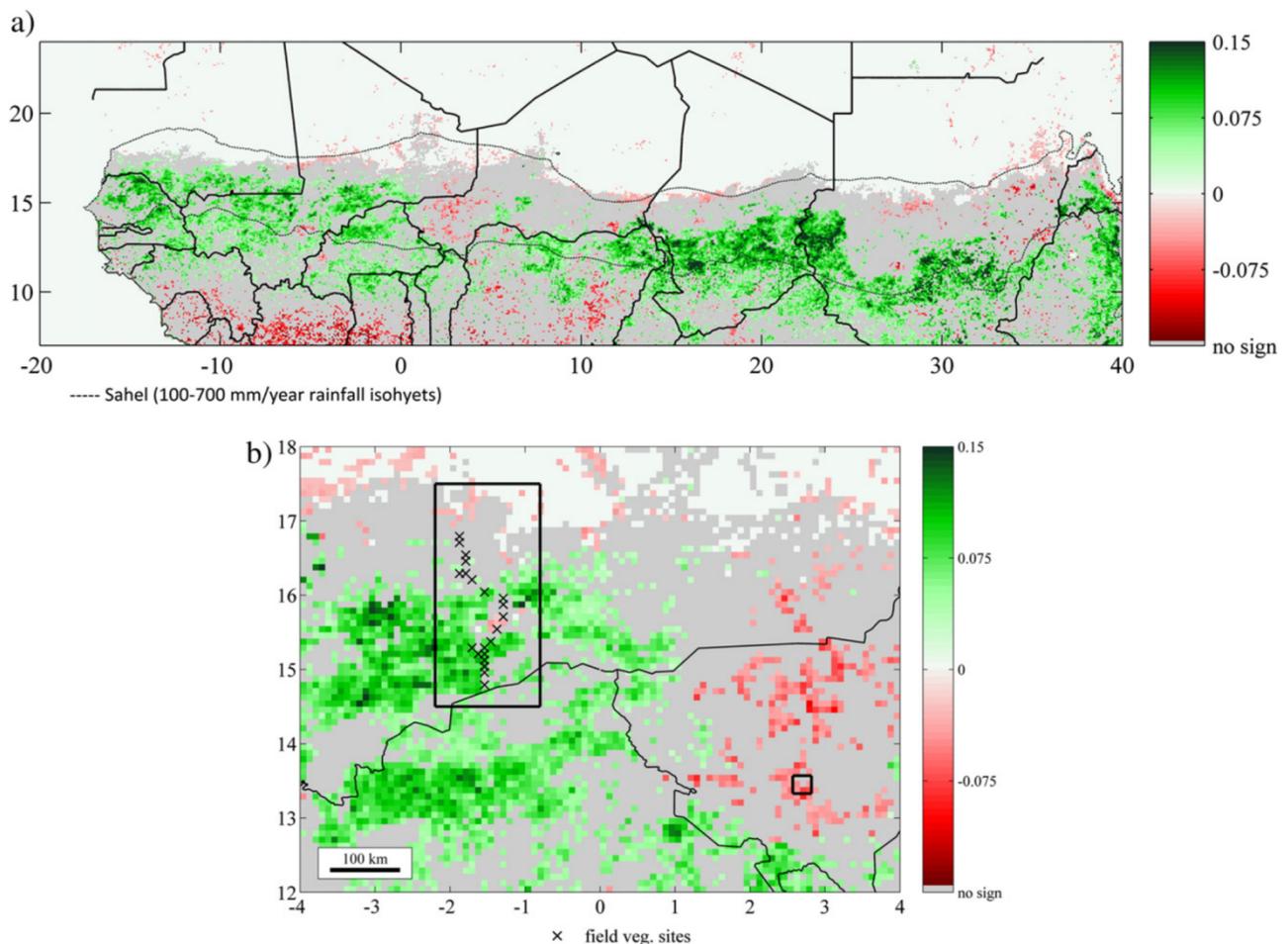


Fig. 7. a) GIMMS-3g NDVI trends (linear increment) from 1981 to 2011 over the Sahel region. Dark gray areas are not significant at the 95% level, while areas where NDVI standard deviation is lower than 0.015 NDVI units are masked out in light gray. b) Zoom over the Gourma (left box) and Fakara (right box) windows. The black crosses locate the field vegetation survey sites over the Gourma region.

4.2.3. Woody cover

The question of the role of the woody cover in the observed re-greening trends has often been raised. To cite just two studies, Herrmann and Tappan (2013) used tree inventory, high resolution imagery and population surveys in central Senegal over the last three decades. They concluded a decline in the high trees population, a strong increase in shrub density, and a decline in species diversity interpreted as a shift towards more arid-tolerant species. Another study based on aerial photography, Ikonos images and field measurements collected in Senegal and Mauritania concluded in a general decline in tree density and diversity in western Sahel (Gonzalez, Tucker, & Sy, 2012). This decreasing tendency was linked to global climate change, through a negative trend in precipitation and an increase in air temperature observed from 1901 to 2002. Some studies however mention an increase of the woody cover over the last decades (Tarchiani, Di Vecchia, Genesio, & Sorani, 2008).

The woody plants population dynamics in the Gourma region have been analyzed through field tree inventories from 1984 to 2006 (Gardelle et al., 2010; Hiernaux, Diarra, et al., 2009). It was shown that, similar to the herbaceous cover, woody plants have a significance resilience to the 1983–84 drought over sandy soils (3.7% in 1985 to 4% in 2006), while a decline is reported over shallow soils (7.8% in 1985 to 3.2% in 2006). In clayed depressions an increase is most often observed, but not everywhere, on average 22% in 1985 and 27% in 2006.

In the Fakara region, it is even more complicated to follow woody cover changes because of the land use dynamics. Broadly, woody cover dynamics is similar to the woody dynamics in Gourma (decline over shallow soils, stable or positive trends over sandy soils), but locally important changes occur because of the land use, like shrub management in cropped fields. Part of the woody cover remains unchanged (agroforestry parks, hedges) while small trees and shrubs growing over fallow areas are cut down when the land becomes cultivated. Therefore, long-term and short-term dynamics are interacting, making it difficult to distinguish a global evolution.

In the Sahel however, productivity is often dominated by annual herbaceous plant productivity (the woody cover being generally lower than 5% of the surface; Sankaran et al., 2005), so that NDVI variability and trends are linked to herbaceous cover dynamics in the first place, as opposed to tree cover. During peak growing season, the radiometric response of woody plants is hardly distinguishable from the herbaceous cover response. Thus, even if the woody cover increased or decreased slightly during the last decades, the influence on the peak growing season NDVI data at the kilometer scale or larger would be difficult to ascribe to changes in tree cover. Because of the phenological lag between herbaceous and woody plants (trees and shrubs leaves remaining green longer), woody plants may be detectable by satellite data mostly at the end of the growing season. The phenological analysis performed in this study showed generally higher trend values during the herbaceous growing season (August and September) than at its end (November).

Based on literature, it seems difficult to find large-scale patterns of woody cover changes, either over pastoral or cultivated lands. More importantly, potential changes in the woody cover that may have taken place in the Sahel are not easily linked to the overall re-greening trends observed during peak growing season, whereas herbaceous productivity, including crops, is a fairly obvious candidate.

4.2.4. Other drivers

Even if the first driver of vegetation productivity remains the rainfall patterns (annual amounts, frequency, redistribution), literature often points out land use, cropping practices in relation with population increase, tree regeneration and improved agro-environmental measures to explain local trends in vegetation productivity and greening trends. Over the agro pastoral Fakara region, a historical increase of areas under cultivation occurred since the 1950s. Because soils in Fakara are poorly fertile and the proportion of arable land is limited, the increase in cropped areas resulted in increasingly cropping marginal lands. In

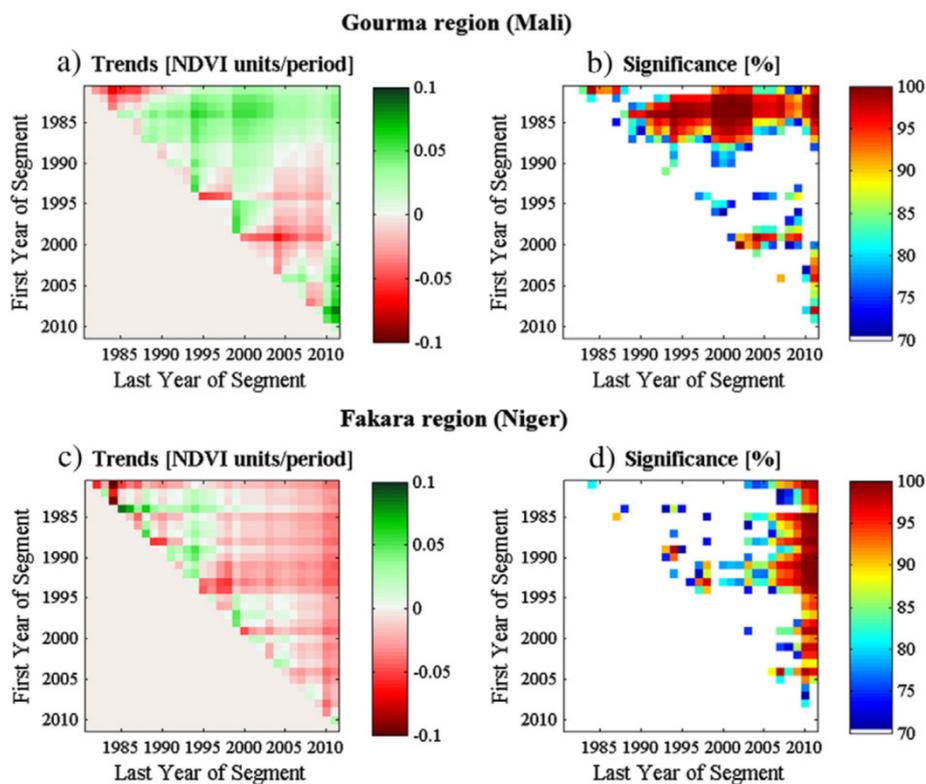


Fig. 8. Sensitivity of the trends to the time period for the Gourma window (a and b) and for the Fakara window (c and d). The left-hand side figures display the NDVI linear increments (a and c), while the right hand side figures display the associated significance values (b and d). The y and x axes are respectively the first and last year of the time period considered. Re-greening trends are in green, negative trends in red.

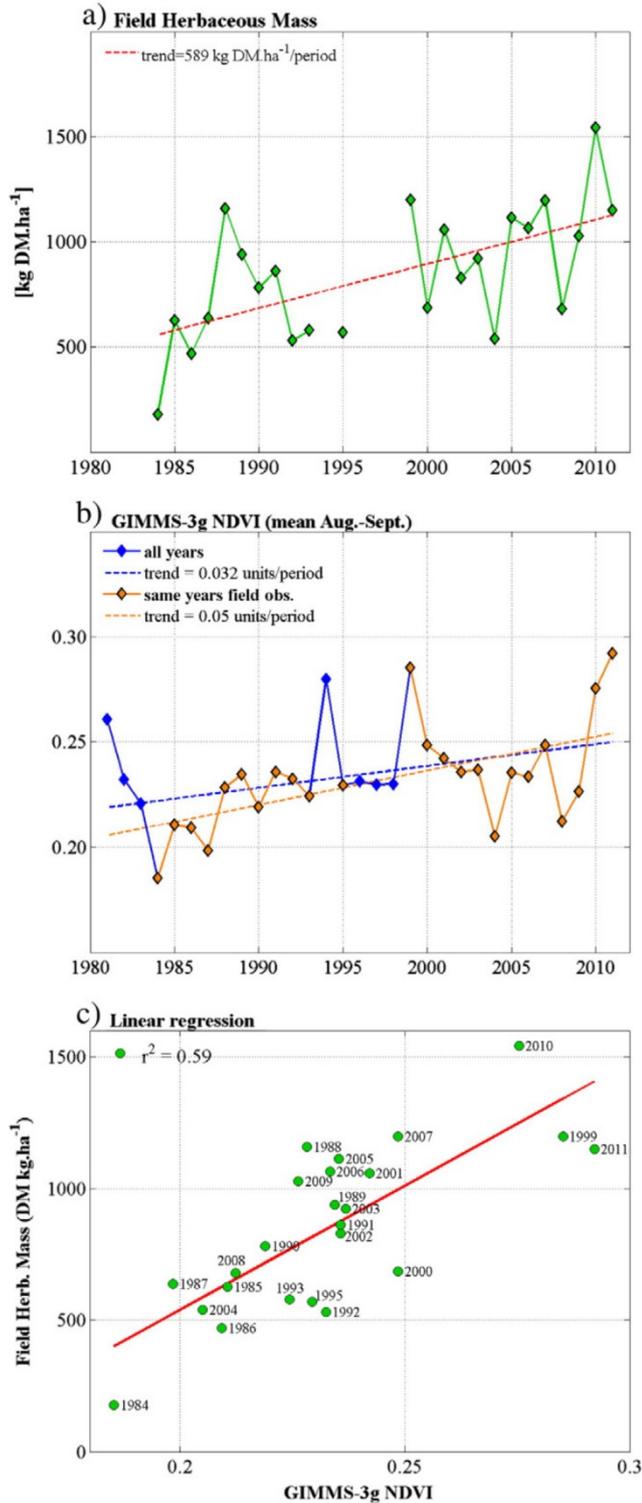


Fig. 9. Temporal profiles of a) field observations of herbaceous mass and b) GIMMS-3g NDVI over the Gourma region. Panel b) shows the NDVI GIMMS-3g for the exact same years when field observations are available (in orange) and for all years when NDVI data are available (1981–2011, in blue). c) Linear regression between GIMMS-3g NDVI and field observations of herbaceous mass over the Gourma window (1984–2011).

addition, a reduction in the proportion of fallows has been observed, and a shortening of the fallow duration reported (Hiernaux & Turner, 2002). An increase in the grazing pressure intensity during the rainy season was reported as well, which is related to the cropped areas

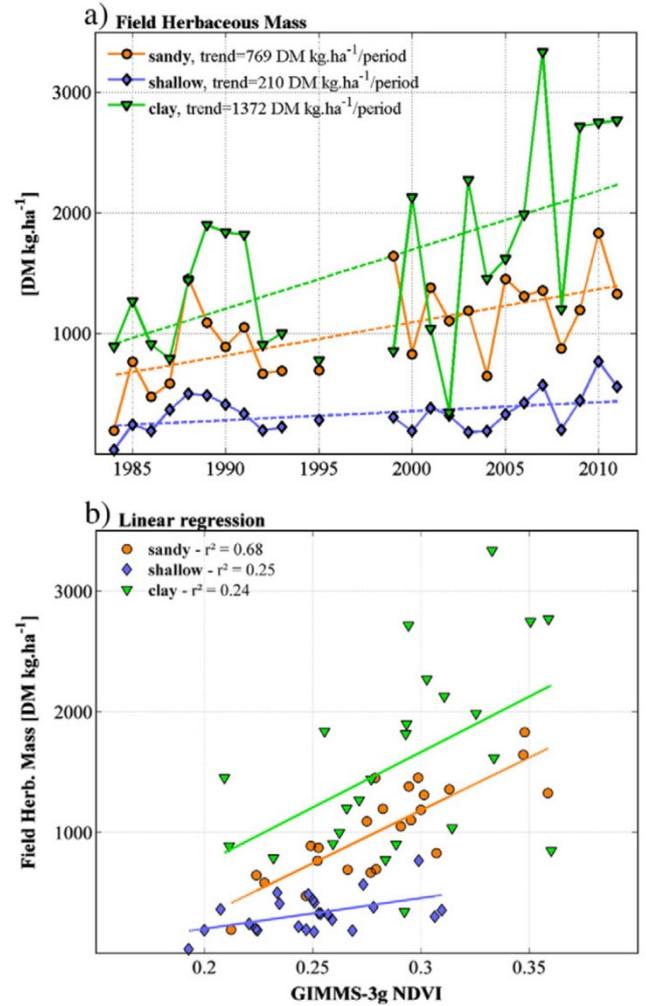


Fig. 10. a) Temporal profiles of field observations of herbaceous mass over the Gourma region. Sites are classified by soil type: sandy soils (circles, orange line), shallow soils (diamonds, blue line) and lowland clay soils (triangles, green line). b) Linear regressions between herbaceous masses and GIMMS-3g NDVI extracted over the corresponding pixel, and aggregated into the three soil type classes (see text for details about the heterogeneity issues).

expansion and thus the reduction of available land for pastoral use (Hiernaux, Diarra, et al., 2009). All these factors might have induced a decline in the “average” (including marginal lands) soil fertility (de Rouw & Rajot, 2004), thus in vegetation productivity, and could explain the persistent decreasing trend in vegetation production observed both by satellite data and field observations of the herbaceous layer. The use of fertilizer and anti-erosion devices in the region is rather limited and does not seem to have a significant impact on the overall decreasing trend.

The constant increase in cropped areas may have changed the relationship between NDVI and the aboveground herbaceous mass over years. In their studies during the HAPEX Sahel experiment in Niger, Hanan, Begue, and Prince (1997) and Hanan, Prince, and Begue (1997) found that seasonal integrated NDVI was higher for fallows than for millet fields when considering aboveground primary production only. They also showed that the efficiency of conversion of intercepted radiation by the canopy into aboveground plant material was higher for millet than for fallow vegetation. Thus, an increase in cropped areas such as the one observed for the Fakara region could result in decreasing NDVI, but not necessarily decreasing aboveground herbaceous mass. On the other hand, Begue et al. (2011) suggested that an increase in cropped areas

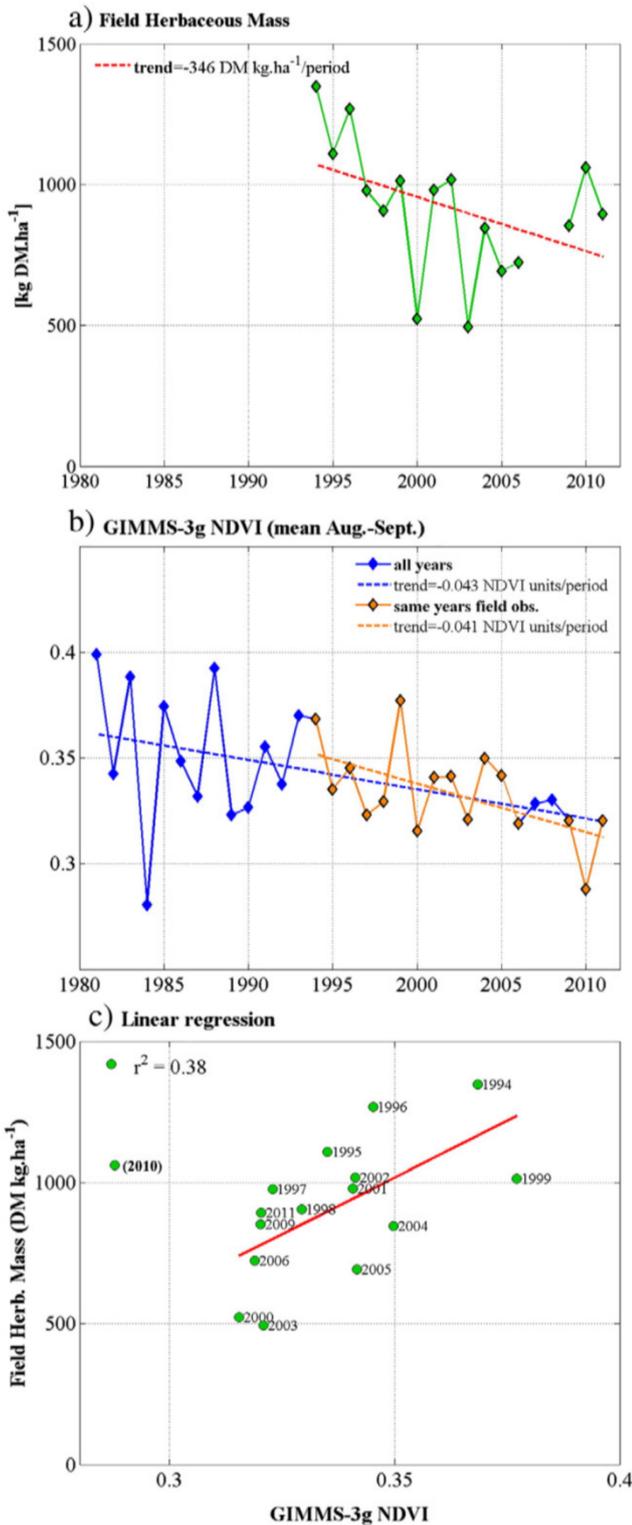


Fig. 11. Temporal profiles of a) field observations of herbaceous mass and b) NDVI GIMMS-3g over the Fakara region. Panel b) shows the NDVI GIMMS-3g for the exact same years when field observations are available (in orange) and for all years when NDVI data are available (1981–2011, in blue). c) Linear regression between field observations of herbaceous mass and GIMMS-3g NDVI over the Fakara region (1994–2011). The regression line is plotted in red (2010 is not considered).

induced an increase in NDVI in their study area in Mali, located in southern Sahel with annual rainfall reaching 700 mm/year. At this stage, it is difficult to conclude about the effect of crop expansion on the overall NDVI signal and on aboveground primary production. Further studies

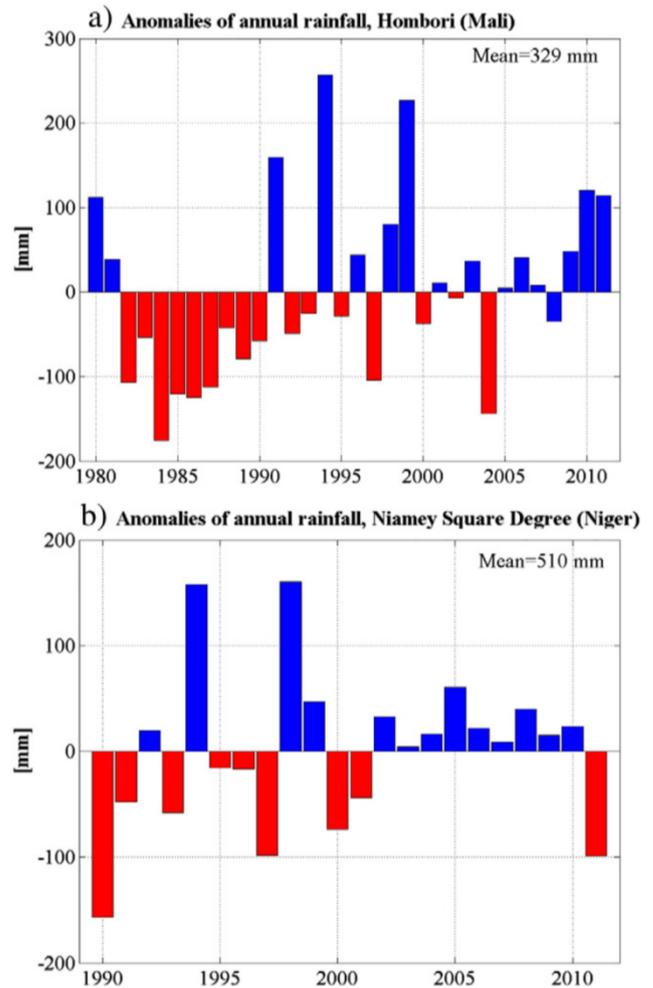


Fig. 12. Anomalies of annual rainfall measured at a) the Hombori meteorological station from 1980 to 2011 and b) over the Niamey Square Degree from 1990 to 2011. Panel a courtesy of Direction Nationale de la Météorologie (DNM) from Mali. Panel b courtesy of AMMA-Catch.

would be required to better understand the changes in the NDVI/mass relationship throughout the time period.

In addition, when the whole Sahel is considered, no systematic correlation between agro-pastoral land use and negative vegetation trends can be observed. Indeed, when looking at the GIMMS-3g NDVI trends over the Sahel, the most intensively cultivated areas such as the groundnut belt in Senegal, Seno in Mali, Yatenga in Burkina Faso, the Haoussa land in northern Nigeria and bordering zone in Niger do not exhibit negative trends, meaning that cropped surface expansion is not systematically associated with negative satellite-observed trends.

5. Conclusion

We analyzed long-term NDVI data together with long-term field observations of vegetation collected in northern Mali and western Niger from 1984 to 2011 and from 1994 to 2011 respectively. A good agreement was found between NDVI and field measurements of the herbaceous layer mass, both for the Gourma and Fakara regions, where positive and negative trends were found respectively. Thus, the GIMM3g archives revealed consistent over time and well correlated to trends in vegetation productivity over the whole 1981–2011 period.

The re-greening trends observed over pastoral Gourma were found highly significant over the whole period, and particularly so when including the years following the 1983–84 drought. This implies a significant resilience of Sahelian ecosystems to extreme climatic events. Soil

type and soil depth were found to significantly modulate the vegetation trends observed. Indeed, positive vegetation trends were found over the widespread deep sandy soils, while non-significant trends in vegetation cover were observed over shallow soils. In the agro-pastoral Fagara greening patterns were only found immediately after the drought and a constant decline in NDVI was observed starting in the mid 1990s that could not be related to rainfall. Several factors may be responsible for this decline in productivity, such as the historical increase in cropped areas, changes in land use, a shortening of the fallow duration, an increase in the grazing pressure intensity during the rainy season, and a decline in soil fertility.

For the whole Sahel, the satellite greening trend is dominant, and the present analysis points toward a large-scale increase of herbaceous production over 1981–2011, and a less important role of degradation either because of it is less common or because the changes occur at a smaller spatial scale than the satellite products' resolution.

In addition to proving the consistency of multi-sensor satellite time-series, this study shows that greening is associated with increasing herbaceous productivity. It also shows that 'browning' occurs, both in satellite series and field observations, which helps reconciling the greening and desertification theories.

Acknowledgments

We are thankful to the two reviewers for their helpful comments which contributed to improve this manuscript. Dardel C. is supported by CNES. Support from AMMA-Catch, ANR ESCAPE (ANR-10-CEPL-005) and AMMA-IP are also acknowledged. Precipitation data are kindly provided by DNM Mali and Niger. We are grateful to the GIMMS group for their ongoing efforts and for sharing their NDVI3g data. Finally, we thank all the people who participated to the field surveys over this 28-year long period!

References

- An, N., Price, K. P., & Blair, J. M. (2013). Estimating above-ground net primary productivity of the tallgrass prairie ecosystem of the Central Great Plains using AVHRR NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 3717–3735.
- Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, 63, 596–614.
- Aubreville, A., & Chevalier, A. (1949). *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Paris: Société d'éd. géographiques, maritimes et coloniales (351 pages).
- Beck, H. E., McVicar, T. R., van Dijk, A., Schellekens, J., de Jeu, R. A. M., & Bruijnzeel, L. A. (2011). Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2547–2563.
- Begue, A., Vintrou, E., Ruelland, D., Claden, M., & Dessay, N. (2011). Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions*, 21, 413–420.
- Boudet, G. (1972). *Désertification de l'Afrique tropicale sèche*. Adansonia. Série 2, 12. (pp. 505–524), 505–524.
- Boudet, G. (1977). *Désertification ou remontée biologique du Sahel*. Cahiers ORSTOM. Série Biologie: Ecologie et Biologie Végétale, 12. (pp. 293–300), 293–300.
- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., Boulain, N., Ramier, D., Laurent, J. P., et al. (2009). The AMMA-CATCH experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger: Investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *Journal of Hydrology*, 375, 34–51.
- Charney, J. G. (1975). Dynamics of deserts and drought in Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 193–202.
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37, 451–460.
- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., & Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115, 692–702.
- de Rouw, A., & Rajot, J. L. (2004). Nutrient availability and pearl millet production in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 249–262.
- Descroix, L., Laurent, J. P., Vauclin, M., Amogu, O., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., et al. (2012). Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology*, 424, 1–15.
- Descroix, L., Mahe, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., et al. (2009). Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, 375, 90–102.
- Diallo, O., Diouf, A., Hanan, N. P., Ndiaye, A., & Prevost, Y. (1991). AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa — 1987–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1259–1279.
- Eklundh, L., & Olsson, L. (2003). Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 1430–1433.
- Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S. D., Tucker, C., et al. (2012). Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 121, 144–158.
- Fensholt, R., & Rasmussen, K. (2010). Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 438–451.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T. T., & Mbow, C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Inter-comparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1886–1898.
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Stisen, S. (2006). Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION — Vegetation indices using *in situ* measurements in a semiarid environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1774–1786.
- Fensholt, R., Sandholt, I., Stisen, S., & Tucker, C. (2006). Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteorological second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, 101, 212–229.
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L., & Grippa, M. (2010). Less rain, more water in ponds: A remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 309–324.
- Gonzalez, P., Tucker, C. J., & Sy, H. (2012). Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate. *Journal of Arid Environments*, 78, 55–64.
- Hanan, N. P., Begue, A., & Prince, S. D. (1997). Errors in remote sensing of intercepted photosynthetically active radiation: An example from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 189, 676–696.
- Hanan, N. P., Prince, S. D., & Begue, A. (1997). Modelling vegetation primary production during HAPEX-Sahel using production efficiency and canopy conductance model formulations. *Journal of Hydrology*, 189, 651–675.
- Hein, L., & de Ridder, N. (2006). Desertification in the Sahel: A reinterpretation. *Global Change Biology*, 12, 751–758.
- Hellden, U. (1991). Desertification — Time for an assessment. *Ambio*, 20, 372–383.
- Hellden, U., & Tottrup, C. (2008). Regional desertification: A global synthesis. *Global and Planetary Change*, 64, 169–176.
- Herrmann, S. M., Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions*, 15, 394–404.
- Herrmann, S. M., & Tappan, G. G. (2013). Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal. *Journal of Arid Environments*, 90, 55–66.
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., & Jonsson, P. (2007). AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, 108, 385–392.
- Hickler, T., Eklundh, L., Seaquist, J. W., Smith, B., Ardo, J., Olsson, L., et al. (2005). Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, 32, L21415.
- Hiernaux, P. (1988). Vegetation monitoring by remote sensing: progress in calibrating a radiometric index and its application in the Gourma, Mali. *ILCA Bulletin*, 32, 14–21 (available from <http://www.ilri.org/InfoServ/Webpub/fulldocs/Bulletin32/vegeta.htm>)
- Hiernaux, P., & Ayantunde, A. (2004). The Fagara: A semi-arid agro-ecosystem under stress. *Report of research activities, first phase (July 2002–June 2004) of the DMP-GEF Program (GEF/2711-02-4516)*. Nairobi (Kenya): ILRI (available from <http://hdl.handle.net/10568/1550>)
- Hiernaux, P., Ayantunde, A., Kalilou, A., Mougou, E., Gerard, B., Baup, F., et al. (2009). Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: impact of land use, management and variable rainfall. *Journal of Hydrology*, 375, 65–77.
- Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougou, E., Soumagueu, N., & Baup, F. (2009). Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology*, 375, 103–113.
- Hiernaux, P., Mougou, E., Diarra, L., Soumagueu, N., Lavenue, F., Tracol, Y., et al. (2009). Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375, 114–127.
- Hiernaux, P., & Turner, M. D. (1996). The effect of clipping on growth and nutrient uptake of Sahelian annual rangelands. *Journal of Applied Ecology*, 33, 387–399.
- Hiernaux, P., & Turner, M. D. (2002). The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In J. F. Reynolds, & D. M. Stafford Smith (Eds.), *Global desertification: Do humans cause deserts?* (pp. 35–148). Berlin: Dahlem University Press.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417–1434.
- Huber, S., Fensholt, R., & Rasmussen, K. (2011). Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, 76, 186–195.
- Hubert, H. (1920). Le dessèchement progressif en Afrique occidentale. *Bulletin du Comité d'études Historiques et Scientifiques de l'Afrique Occidentale Française*, 3, 401–467.
- Hulme, M. (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973–1998. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions*, 11, 19–29.
- Hutchinson, C. F., Herrmann, S. M., Maukonen, T., & Weber, J. (2005). Introduction: The "greening" of the Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 535–537.
- James, M. E., & Kalluri, S. N. V. (1994). The Pathfinder AVHRR land data set — An improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3347–3363.

- Jones, B. (1938). Desiccation and the West African colonies. *Geographical Journal*, 91, 401–423.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., et al. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3–15.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., et al. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1228–1249.
- Kidwell, K. B. (1998). *NOAA polar orbiters user's guide*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, 20–233.
- Le Barbé, L., & Lebel, T. (1997). Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. *Journal of Hydrology*, 189, 43–73.
- Le Houerou, H. N. (1984). Rain use efficiency – A unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 213–247.
- Le Houerou, H. N. (1996). Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34, 133–185.
- Lebel, T., & Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, 375, 52–64.
- Lindqvist, S., & Tengberg, A. (1993). New evidence of desertification from case-studies in northern Burkina-Faso. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 75, 127–135.
- Los, S. O. (1998). Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA AVHRR channels 1 and 2 from monthly NDVI composites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 206–213.
- Mbow, C., Fensholt, R., Rasmussen, K., & Diop, D. (2013). Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements. *Journal of Arid Environments*, 97, 56–65.
- Mougin, E., Hiermaux, P., Kergoat, L., Grippa, M., de Rosnay, P., Timouk, F., et al. (2009). The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources. *Journal of Hydrology*, 375, 14–33.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 481–486.
- Myneni, R. B., & Williams, D. L. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49, 200–211.
- Nicholson, S. E. (2013). *The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability*. *ISRN Meteorology*, Vol. 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521> (Article ID 453521).
- Nicholson, S. E., & Palao, I. M. (1993). A reevaluation of rainfall variability in the Sahel. 1. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, 13, 371–389.
- Nicholson, S. E., Tucker, C. J., & Ba, M. B. (1998). Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 815–829.
- Olsson, L., Eklundh, L., & Ardo, J. (2005). A recent greening of the Sahel – Trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556–566.
- Pedely, J., Devadiga, S., Masuoka, E., Brown, M., Pinzon, J., Tucker, C. J., et al. (2007). Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. *IGARSS 2007. Sensing and understanding our planet, Vol. 1–12*. (pp. 1021–1024). New York: IEEE.
- Penning de Vries, F. W. T., & Djitéye, M. A. (1982). *La Productivité des pâturages sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*. Wageningen: Centre for Agricultural Pub. and Documentation.
- Pinzon, J. E., Brown, M. E., & Tucker, C. J. (2005). *EMD correction of orbital drift artifacts in satellite data stream*. Hilbert–Huang transform and its applications. Singapore: World Scientific Publ Co Pte Ltd, 167–186.
- Prince, S. D. (1991). Satellite remote-sensing of primary production – Comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1301–1311.
- Prince, S. D., De Colstoun, E. B., & Kravitz, L. L. (1998). Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4, 359–374.
- Prince, S. D., Wessels, K. J., Tucker, C. J., & Nicholson, S. E. (2007). Desertification in the Sahel: A reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology*, 13, 1308–1313.
- Sala, O. E., & Austin, A. T. (2000). Methods of estimating aboveground net primary productivity. In O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney, & R. W. Howarth (Eds.), *Methods in ecosystem science* (pp. 31–43). New-York: Springer.
- Sankaran, M., Hanan, N.P., Scholes, R. J., Ratnam, J., Augustine, D. J., Cade, B.S., et al. (2005). Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, 438, 846–849.
- Seaquist, J. W., Hickler, T., Eklundh, L., Ardo, J., & Heumann, B. W. (2009). Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics. *Biogeosciences*, 6, 469–477.
- Stebbing, E. P. (1935). The encroaching Sahara: The threat to the West African colonies. *Geographical Journal*, 85, 506–524.
- Tarchiani, V., Di Vecchia, A., Genesio, L., & Sorani, F. (2008). Monitoring drylands ecosystem dynamics for sustainable development policies: The Keita experience. In C. Lee, & T. Schaaf (Eds.), *The future of Drylands* (pp. 395–407). : UNESCO.
- Timouk, F., Kergoat, L., Mougin, E., Lloyd, C. R., Ceschia, E., Cohard, J. M., et al. (2009). Response of surface energy balance to water regime and vegetation development in a Sahelian landscape. *Journal of Hydrology*, 375, 178–189.
- Townshend, J. R. G., & Justice, C. O. (1995). Spatial variability of images and the monitoring of changes in the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2187–2195.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
- Tucker, C. J., Dregne, H. E., & Newcomb, W. W. (1991). Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. *Science*, 253, 299–301.
- Tucker, C. J., Justice, C. O., & Prince, S. D. (1986). Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1571–1581.
- Tucker, C. J., Newcomb, W. W., & Dregne, H. E. (1994). AVHRR data sets for determination of desert spatial extent. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3547–3565.
- Tucker, C. J., & Nicholson, S. E. (1999). Variations in the size of the Sahara desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28, 587–591.
- Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R., et al. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4485–4498.
- Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J., & Van Ittersum, G. (1985). Satellite remote-sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel – 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, 17, 233–249.
- Vermote, E., & Kaufman, Y. J. (1995). Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2317–2340.
- Zhu, Z. C., Bi, J., Pan, Y. Z., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L., et al. (2012). Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)3g for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5, 927–948.

3. Les principaux résultats et leur interprétation

3.1. Validation du produit NDVI GIMMS-3g

Les données de NDVI GIMMS-3g se sont révélées être en bon accord avec les jeux GIMMS (1981-2006), LTDR (1981-1999) et MODIS (2000-2011). Les cartes de corrélation établies à l'échelle du Sahel démontrent un très bon accord entre les jeux GIMMS-3g et LTDR sur la période commune 1981-1999, et ce particulièrement sur la bande sahéenne. Dès lors que l'on passe la frontière des isohyètes à 700 mm (frontière sud sur les figures de l'article) l'accord est nettement moins bon, l'effet de la couverture nuageuse devenant plus difficile à atténuer en appliquant la simple méthode des composites temporels et le NDVI subissant un effet de saturation pour des canopées denses. L'accord entre GIMMS et GIMMS-3g sur la période 1981-2006 répond au même schéma, à savoir une meilleure corrélation sur la bande sahéenne stricto-sensu qu'au sud de la région. Lorsque l'on compare les corrélations GIMMS-3g/GIMMS et GIMMS-3g/LTDR sur la période commune 1981-1999 pour les fenêtres du Gourma et du Fakara, la correspondance est meilleure entre GIMMS-3g et GIMMS qu'entre GIMMS-3g et LTDR (voir Tableau 2 de l'article). La corrélation entre GIMMS-3g et le produit MODIS MOD13C2 (satellite Terra) est plus faible, mais ne prend en compte que 11 années d'observation. La comparaison des profils temporels sur les fenêtres du Gourma et du Fakara montre des différences en valeur absolue du NDVI qui sont principalement dues aux différences de traitement entre les jeux de données, mais on observe surtout une bonne cohérence en termes de variabilité interannuelle et de tendances. L'année 1984 a par exemple une signature négative très marquée, comme attendu (pic de sécheresse). Les années 2004 et 2008 sont également caractérisées par un NDVI relativement bas pour tous les jeux de données. En revanche, les années 1994 et 1999 ressortent comme étant des très bonnes années en termes de production annuelle, ce qui est cohérent avec les fortes pluviométries relevées sur le terrain ces années-là. Dans le reste de notre étude, nous n'avons donc plus considéré que le jeu de NDVI GIMMS-3g, car c'est celui qui est disponible sur la plus grande période (1981-2011).

3.2. Étude des tendances

3.2.1. A l'échelle du Sahel

Les tendances calculées à partir des données NDVI GIMMS-3g à l'échelle du Sahel nous permettent de confirmer les tendances au reverdissement rapportées par les précédentes études (Anyamba & Tucker 2005, Hutchinson *et al.* 2005). De plus, elles nous permettent d'établir que ces tendances sont encore observées lorsque l'on considère une période plus longue, c'est-à-dire les trois dernières décennies (voir Figure 7 de l'article). Ces tendances au reverdissement concernent la majeure partie de la bande sahéenne et sont fortement significatives. Quelques zones toutefois sont caractérisées par des tendances négatives, notamment l'ouest du Niger ainsi que l'ouest et le centre du Soudan. Sur la

région du Gourma, le reverdissement est très marqué. En revanche, le Fakara et l'ouest du Niger en général sont caractérisés par des tendances à la diminution du couvert végétal. Nos deux régions d'étude sont donc caractérisées par des tendances significatives de signe opposé.

3.2.2. Comparaison avec les données terrain

Les tendances calculées à partir des séries temporelles des données terrain valident les tendances observées par satellite : les données terrain du Gourma montrent également une forte tendance au reverdissement, alors qu'une diminution significative de la production est observée sur le Fakara. Pour le Gourma, une régression linéaire met en évidence que les données terrain expliquent 59% de la variabilité du NDVI GIMMS-3g. Pour le Fakara, les données terrain expliquent 38% du NDVI GIMMS-3g si l'année 2010 est exclue des calculs, 17% lorsqu'elle est incluse. L'année 2010 nous a en effet paru à considérer avec précaution pour le Fakara, le NDVI GIMMS-3g étant anormalement bas en comparaison avec le NDVI MODIS (Aqua et Terra).

3.2.3. Sensibilité des tendances à la période considérée

Lorsque l'on étudie les tendances sur une période donnée, les années de début et de fin ont un grand poids dans le signe et la force de la tendance analysée. Nous avons cherché à évaluer cette sensibilité aux "années limites" par le biais de diagrammes triangulaires représentant toutes les combinaisons possibles de segments temporels continus sur une période donnée (voir Figure 8 de l'article ; la première année de la période considérée est représentée en ordonnée, la dernière année en abscisse). Sur ce type de graphique, les années à très faible ou très fort NDVI se démarquent : une "bonne année" a une signature positive marquée à la verticale et négative à l'horizontale ; c'est l'inverse pour une "mauvaise année".

Pour la région du Gourma, ce diagramme met en évidence une reprise significative de la végétation consécutive à la sécheresse des années 1980. La tendance au reverdissement est marquée dès lors que la période prend en compte les années de la décennie 1980, et elle l'est aussi fortement lorsque l'on prend en compte les 3 dernières années (2009 à 2011). Pour le Fakara, une signature similaire exprimant une reprise de la végétation est visible pour la première partie de la période, mais dès le milieu des années 1990 une forte signature négative apparaît et persiste jusqu'à aujourd'hui. Ces tendances négatives sont particulièrement significatives lorsque l'on prend en compte les dernières années de la période. Pour ces deux régions, nous observons donc des schémas tout à fait différents en termes de tendances, avec une mise en évidence de la résilience des écosystèmes sahéliens pour le Gourma mais une dégradation persistante du couvert pour le Fakara.

3.2.4. Phénologie

Nous avons cherché à détecter d'éventuels changements survenus dans la phénologie de la végétation sur l'ensemble de la période. Pour cela, nous avons calculé les tendances du NDVI pour chaque mois

de l'année. Pour la fenêtre du Gourma, sur la totalité de la période 1981-2011 (voir Figure 6a de l'article), nous n'avons pas détecté de décalage significatif dans le démarrage ou la fin de la saison de croissance (définie de manière large entre les mois d'août à octobre), c'est-à-dire que nous n'avons pas détecté de changement significatif dans la longueur de la saison de croissance. Des tendances positives et significatives sont en revanche observées pour les mois d'août et de septembre: le reverdissement observé dans la région du Gourma est donc principalement lié à une augmentation de l'amplitude du signal durant la saison de croissance.

De manière plus surprenante et toujours en considérant la totalité de la période, nous avons détecté des tendances négatives et significatives au milieu de la saison sèche, entre le mois d'avril et le mois de juillet. Ces tendances négatives sont encore plus marquées si l'on considère la dernière décennie uniquement (2000-2011, figure 6c de l'article), surtout pour les mois de mai et juin, mais elles n'apparaissent plus si l'on considère la période 1981-2000 seulement (figure 6b de l'article), et elles ne sont pas non plus présentes avec les données MODIS Terra (MOD13C2) sur la période 2000-2011 (figure 6d de l'article). Les tendances négatives observées sur GIMMS-3g pendant la saison sèche ne sont donc probablement pas imputables à un signal lié à la végétation, mais sont certainement dues à un artefact lié aux données satellites. Les résultats obtenus pour le Fakara sont tout à fait similaires en ce qui concerne les tendances négatives observées pendant la saison sèche. En revanche, il n'y a pas d'augmentation du signal pendant la saison de croissance, mais au contraire une légère diminution du NDVI pour le mois d'août entre 1981 et 2011 (voir ANNEXE 4).

3.3. Interprétation des tendances

3.3.1. Le Gourma et l'importance du type de sol

Le reverdissement observé sur la région du Gourma suit d'abord la reprise des précipitations qui a eu lieu sur la même période (voir Figure 12a de l'article). Il est donc principalement associé à des conditions climatiques plus favorables à la production herbacée. Cependant, à l'intérieur même de notre "fenêtre" Gourma, des tendances différentes peuvent coexister, notamment en fonction des types de sol. Par comparaison visuelle de la carte des types de sol du Gourma avec celle des tendances du NDVI (figures 1 et 7b de l'article), et en analysant les données classées par type de sol (figure 10 de l'article), nous pouvons voir que le reverdissement est clairement observé sur les grandes surfaces sableuses qui constituent environ 65% du paysage, ainsi que dans les dépressions argileuses, représentant environ 5% de la surface totale. En revanche, les tendances observées sur les sols superficiels (environ 30% de la surface du Gourma) ne sont pas ou peu significatives. Une faible tendance positive est toutefois observée sur les données terrain des sols superficiels (voir Figure 10 de l'article), mais elle est principalement due à 2010 et 2011, deux années très pluvieuses où les ensablements de surface caractéristiques des sols superficiels ont induit de fortes productions de la strate herbacée. Globalement, le NDVI GIMMS-3g ne permet pas de détecter ces nuances de

"comportement" entre les grands types de sol. Seul le reverdissement observé sur les grandes plaines sableuses est détectable par satellite (voir Figure 10b de l'article). La résolution spatiale est ensuite trop grossière pour détecter les changements ayant lieu dans les petites dépressions argileuses, et la production des sols superficiels est trop faible pour être détectable avec le NDVI.

Nous en concluons que le signal global de reverdissement observé sur le Gourma est principalement dû à la forte résilience de la végétation herbacée sur les grands ensembles sableux, mais que ce signal global peut également masquer des tendances à la dégradation. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence une forte augmentation du ruissellement sur les sols superficiels du Gourma et d'autres régions sahéliennes sur les dernières décennies (Descroix *et al.* 2009, Gardelle *et al.* 2010). A certains endroits, cette augmentation du ruissellement peut être associée à une réduction du couvert végétal ainsi qu'à une augmentation de l'érosion. On observe en conséquence une augmentation de la couverture végétale dans les dépressions argileuses recevant plus d'eau de ruissellement, ainsi qu'une augmentation de la quantité d'eau dans les mares. Ce phénomène est détectable par imagerie satellitaire à haute résolution spatiale et par photographie aérienne. Il est connu sous le nom de "paradoxe sahélien" : malgré les faibles précipitations caractéristiques des dernières décennies, les surfaces des mares ont significativement augmenté sur l'ensemble du Sahel (Gardelle *et al.* 2010).

3.3.2. *Le Fakara et la dynamique de l'occupation du sol*

Pour le Fakara, la tendance à la diminution de la production herbacée est difficilement expliquée par l'évolution des précipitations sur la même période (voir Figure 12b de l'article). D'autres facteurs semblent ainsi rentrer en jeu. La région du Fakara est une région agro-pastorale qui a été soumise à une forte augmentation de la pression anthropique depuis les années 1950. La superficie des surfaces cultivées a par conséquent connu une très forte augmentation : environ 25% de la surface totale en 1986 contre 50% en 2011. Cette augmentation des superficies cultivées s'est accompagnée d'une réduction des surfaces laissées en jachère ainsi que d'une réduction de la durée de jachère. Des terres initialement considérées comme non-cultivables ont également été mises en culture, ce qui a induit une augmentation de la pression de pâture, le nombre de bêtes ayant augmenté mais la surface dédiée à la pâture ayant été réduite. Tous ces facteurs ont très probablement induit une diminution de la fertilité des sols et donc de sa capacité de production, ce qui pourrait expliquer la diminution constante observée sur la région du Fakara, et par les observations satellitaires, et par les observations de terrain.

On ne peut cependant pas établir de lien de causalité entre une évolution de l'usage des sols et la dégradation du couvert. A l'échelle du Sahel, certaines régions connaissant une très forte pression agricole (la région du Séno au Mali, le bassin arachidier au Sénégal, le Yatenga au Burkina Faso...) ne montrent pas de tendances négatives du NDVI (voir Figure 7a de l'article). De plus, l'effet des changements d'occupation du sol sur la relation NDVI/masse herbacée aérienne n'est pas clair. Des études menées au Niger pendant le projet HAPEX Sahel ont montré que le NDVI intégré pendant la

saison de croissance était plus élevé pour des jachères que pour des cultures de mil, et que l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté par la canopée en masse aérienne produite par la plante était plus élevée pour le mil que pour de la végétation laissée en jachère (Hanan *et al.* 1997a, Hanan *et al.* 1997b). Une augmentation de la superficie cultivée comme sur le Fakara pourrait donc induire une diminution du NDVI sans nécessairement impliquer une diminution de la production herbacée aérienne. D'un autre côté, Begue *et al.* (2011) ont montré que dans leur zone d'étude au Mali (située plus au sud en région soudano-sahélienne, avec une pluviométrie annuelle moyenne autour de 700 mm) une augmentation des superficies cultivées se traduirait par une augmentation du NDVI. À ce stade, il est donc difficile de conclure sur l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les tendances de NDVI.

3.3.3. La dynamique du couvert ligneux

Dans nos régions d'étude et au Sahel en général, les plantes ligneuses ne représentent qu'environ 5% de la totalité du couvert. Le signal global détecté pendant la saison de croissance est donc globalement peu relié à la dynamique du couvert ligneux en comparaison à celle du couvert herbacé, cultures comprises. A l'échelle locale, le décalage phénologique entre ligneux et plantes herbacées (les feuilles des ligneux restant vertes plus tardivement dans la saison) peut être utilisé pour détecter les changements dans le couvert ligneux grâce à de l'imagerie satellitaire ou aérienne à très haute résolution spatiale acquise en début de saison sèche (novembre, décembre). Mais cela n'est techniquement pas réalisable à l'échelle du Sahel, compte tenu du compromis entre résolution spatiale et temporelle. Des études locales utilisant ces techniques conjuguées à des observations de terrain ont abouti à des conclusions contrastées quant à l'évolution du couvert ligneux : certaines voient une diminution du couvert, d'autres rapportent au contraire une augmentation (Tarchiani *et al.* 2008, Gonzalez *et al.* 2012, Herrmann & Tappan 2013). A l'échelle du Sahel, il n'est donc pas simple d'évaluer les changements du couvert ligneux, quantitativement ni même qualitativement.

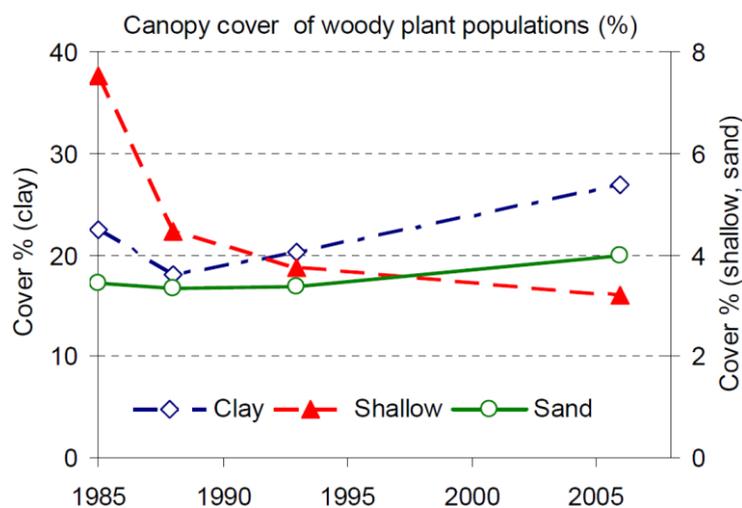


Figure 32. Evolution du couvert ligneux sur le Gourma en fonction du type de sol (*source* : Gardelle *et al.* (2010)).

En ce qui concerne la région du Gourma, les relevés de terrain montrent une évolution qui suit globalement les mêmes tendances que le couvert herbacé (Figure 32), à savoir une augmentation du couvert sur les sols sableux et dans la plupart des dépressions argileuses mais une diminution sur les sols superficiels (Hiernaux *et al.* 2009b, Gardelle *et al.* 2010). Pour le Fakara, il est encore plus difficile de conclure sur les tendances observées par le couvert ligneux, notamment à cause de la forte dynamique de l'occupation des sols. Les pratiques culturales liées à la rotation culture/jachère induisent ainsi des différences de dynamique entre les différentes "classes" de ligneux (grands arbres, arbustes, haies). Globalement, on peut toutefois détecter une tendance à l'augmentation du couvert sur les sols sableux et une tendance à la diminution sur les sols peu profonds.

Nous avons montré dans cette étude que la majeure partie du Sahel "reverdit" sur les 30 dernières années. Nous avons mis en évidence la cohérence du jeu de NDVI GIMMS-3g avec les observations de masse de la strate herbacée collectées au Mali (Gourma) et au Niger (Fakara), où sont respectivement observées des tendances positives et négatives du couvert. Les données de NDVI sont donc un bon indicateur de l'évolution de la productivité de la végétation herbacée en région sahéenne. Le reverdissement observé sur le Gourma démontre la résilience de ces écosystèmes à des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses des années 1970 et 1980. De plus, le type de sol apparaît être un facteur majeur : le reverdissement est principalement observé sur les grandes plaines sableuses, alors que des tendances peu ou pas significatives sont observées sur les sols superficiels. Cette dualité observée dans le même paysage doit aider à réconcilier les théories qui s'affrontent, défendant désertification et reverdissement de la région. Sur la région du Fakara, la diminution continue de la production n'est pas expliquée par les précipitations : d'autres facteurs rentrent en jeu, liés à la dynamique de l'occupation des sols sur la période et à une probable diminution de la fertilité.

L'analyse d'indicateurs comme le *Rain Use Efficiency* (le rapport de la production sur la pluie) doit pouvoir aider à la compréhension de l'origine des tendances observées, en s'affranchissant de l'influence de la pluie pour permettre d'accéder à d'autres facteurs, comme ceux d'origine anthropique.

Chapitre 4. Comment expliquer le reverdissement du Gourma ?

1. Contexte et objectifs

1.1. Le RUE, un indicateur de dégradation

Le RUE (Rain Use Efficiency) est un indicateur calculé comme le ratio de la production primaire nette (NPP) et des précipitations. Il a été pensé pour s'affranchir de l'influence de la pluie sur la production végétale. Cet indicateur est particulièrement pertinent dans les régions arides et semi-arides du globe, où la production est contrainte en premier lieu par les précipitations (Le Houerou 1984). Le RUE d'un écosystème représente ainsi la quantité de biomasse produite par quantité de pluie reçue. Pour un écosystème qui ne connaît pas de changements particuliers au cours du temps, cette quantité est stable ; inversement, des variations du RUE dans le temps seront significatives de changements dans le fonctionnement du site observé. Pour aller plus loin, une diminution significative du RUE au cours du temps amènera à porter un diagnostic de dégradation de l'écosystème ("dégradation" signifiant une diminution de la capacité de production de la végétation). Les causes de dégradation le plus souvent avancées étant d'origine anthropique (changements d'occupation du sol, notamment par l'augmentation des surfaces cultivées par la mise en culture de terres peu fertiles ou marginales ; augmentation de la pression de pâture voire surpâturage ; déforestation), le RUE est un indicateur qui est particulièrement utilisé pour identifier des régions montrant des signes de dégradation, et pour mettre en évidence l'impact de l'action de l'homme sur les écosystèmes.

Le RUE a été ainsi utilisé dans de nombreuses études portant sur la détection des terres dégradées des régions arides et semi-arides de tous les continents (Holm *et al.* 2003a, Holm *et al.* 2003b, Evans & Geerken 2004, Wessels *et al.* 2007, Bai *et al.* 2008, Zhongmin *et al.* 2010), et particulièrement dans les régions sahéliennes, dans le cadre du débat entre désertification et reverdissement (Prince *et al.* 1998, Herrmann *et al.* 2005, Hein & de Ridder 2006, Mieke 2006, Prince *et al.* 2007, Vintrou *et al.* 2009, Mieke *et al.* 2010, Begue *et al.* 2011). À ces échelles régionales, le RUE est généralement calculé à partir du NDVI, qui est, comme nous l'avons vu, un bon estimateur de l'ANPP (la productivité primaire nette aérienne), elle-même difficilement mesurable à des échelles spatio-temporelles adaptées au suivi des changements de la végétation sur de grands espaces et de longues périodes.

1.2. Les limitations du RUE

Cependant, le RUE est un indicateur qui est également considérablement critiqué. D'un point de vue strictement méthodologique, un certain nombre de précautions sont à prendre lors du calcul et de l'interprétation du RUE. La raison majeure réside dans la non-indépendance du RUE par rapport aux précipitations. Si la fonction linéaire entre ANPP et précipitations ne passe pas par l'origine, par construction, il subsistera dans le RUE une corrélation avec les précipitations. Cela se produit dans deux cas de figures : soit parce que l'estimation d'ANPP pour des pluies à zéro n'est pas nulle, soit parce qu'il faut un certain cumul de pluies avant qu'il y ait démarrage de la production (voir Figure 33). Par conséquent, l'existence d'une tendance dans le champ de pluie sur une période donnée induira une tendance dans le RUE qui ne sera pas imputable à des changements dans la réponse de la végétation à la pluie, mais uniquement à des biais méthodologiques. Dans le cas où le NDVI est utilisé comme estimateur de l'ANPP, c'est surtout le premier cas qui est rencontré (valeur positive de l'ANPP pour des pluies nulles). Cet effet est essentiellement dû à l'arrière-plan sol, qui induit des valeurs positives du NDVI pour un couvert nul (voir Chapitre 2.2.2.), et peut être limité si l'intégration temporelle du NDVI est faite sur la saison de croissance et non pas sur l'année entière (Fensholt *et al.* 2013). Une autre méthode consiste à "corriger" le NDVI en enlevant la valeur de l'ordonnée à l'origine de la relation NDVI / pluie (Fensholt & Rasmussen 2011, Fensholt *et al.* 2013).

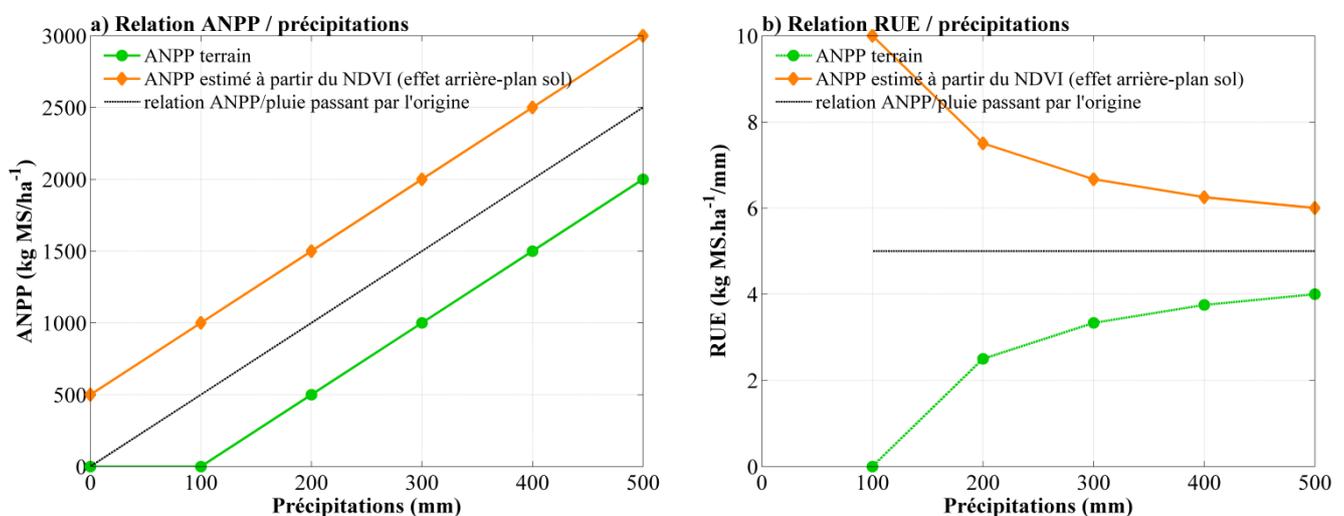


Figure 33. Illustration des problèmes méthodologiques rencontrés lors du calcul et de l'interprétation du RUE. Relation entre a) ANPP et précipitations et b) entre les RUE résultants et les précipitations.

Toutefois, pour éviter totalement ces problèmes, la "méthode des résidus" a été proposée par Evans & Geerken (2004). Cette méthode consiste à calculer une régression linéaire entre ANPP et précipitations (les précipitations étant la variable indépendante), et à soustraire l'ANPP prédite par la pluie aux valeurs d'ANPP observées (Équation 1). L'analyse des tendances temporelles des résidus permet ainsi de détecter des changements du couvert végétal non expliqués par les précipitations, tout en

s'affranchissant des problèmes méthodologiques du RUE (i.e. la possible corrélation restante avec les précipitations). Un autre indicateur intéressant est la pente de la régression linéaire entre ANPP et précipitations annuelles, appelée PMR (Precipitation Marginal Response). La PMR indique ainsi la sensibilité (ou l'efficacité) de la végétation à la pluie reçue. Cependant, cet indicateur sera plutôt utilisé pour étudier les différences de réponse entre les écosystèmes, c'est-à-dire la variabilité spatiale (Veron *et al.* 2005, Veron *et al.* 2006, Begue *et al.* 2011). Dans cette étude, nous nous intéressons à la variabilité temporelle de la réponse de la végétation à la pluie, nous étudierons donc le RUE et les résidus d'ANPP uniquement, mais nous reviendrons sur la PMR dans le Chapitre 5.

$$ANPP_{pred} = a \cdot \text{précipitations} + b \quad (\text{avec } a = \text{PMR})$$

$$\text{et } ANPP_{res} = ANPP_{obs} - ANPP_{pred}$$

Équation 1. Calcul des résidus d'ANPP (formule applicable à partir des estimations terrain ou des estimations satellitaires issues du NDVI).

L'interprétation du RUE est également discutée d'un point de vue écologique. Là encore, c'est la relation entre ANPP et précipitations qui fait l'objet du débat, et en particulier la nature (linéaire ou non) de cette relation. Dans le contexte du reverdissement du Sahel, cela induit des interprétations diamétralement opposées concernant l'augmentation du NDVI observée sur une période de rétablissement des pluies. Hein & de Ridder (2006), qui supposent que la relation ANPP/précipitations est d'ordre quadratique, soutiennent que le manque de tendances significatives dans les séries de RUE à l'échelle du Sahel démontre une dégradation des écosystèmes (selon l'hypothèse de relation quadratique entre ANPP et précipitations, le RUE devrait augmenter avec les précipitations). Au contraire, Prince *et al.* (2007) défendent la linéarité de la relation ANPP / précipitations, et soutiennent que le manque de tendances du RUE à l'échelle du Sahel peut être interprété comme une preuve de la non-dégradation des écosystèmes sahéliens depuis la sécheresse de 1983-84.

1.3. Le paradoxe Sahélien

De façon contradictoire au reverdissement mis en évidence sur la quasi globalité de la bande sahélienne, une augmentation des coefficients de ruissellement, des phénomènes d'érosion (Gardelle *et al.* 2010) et des débits de rivière (Descroix *et al.* 2012, Sighomnou *et al.* 2013) a été observée sur plusieurs régions au Sahel depuis les années 1950, grâce à l'analyse de photographies aériennes et d'images satellitaires à très haute résolution spatiale. Ces phénomènes sont à l'origine d'une augmentation du nombre de mares au Sahel, ainsi que de la surface en eau de ces mares, et ce malgré le déficit pluviométrique relatif entre les années 1950-60, humides, et les décennies suivantes, sèches. Ce phénomène a été baptisé le "paradoxe sahélien" (voir Chapitre 3.3.3.1.). Or, l'augmentation du ruissellement et de l'érosion sont des indicateurs utilisés pour détecter la dégradation des écosystèmes.

Il est donc particulièrement intéressant de confronter ce que peuvent nous révéler des indicateurs de dégradation distincts, comme le sont le RUE (ou les résidus) et les coefficients de ruissellement.

1.4. Objectifs de notre étude

Afin de mieux comprendre les tendances au reverdissement observées dans la région du Gourma, et d'étudier la cohérence des différents indicateurs utilisés pour détecter des tendances à la dégradation des écosystèmes, nous procéderons ici à l'analyse du RUE et des résidus d'ANPP pour la région du Gourma. La disponibilité des séries longues d'observation de la masse herbacée nous permet en effet de calculer et de comparer les RUE et résidus obtenus à partir des données de terrain et du NDVI GIMMS-3g, sur les trois dernières décennies (1984-2010). Nous nous intéresserons particulièrement à la variabilité interannuelle et aux tendances temporelles détectables dans les séries de RUE (et de résidus).

Les questions que nous aborderons au cours de cette étude sont donc les suivantes :

- Les résultats obtenus avec chacune des méthodes (RUE et résidus) et avec chacun des jeux de données (NDVI et données terrain) sont-ils cohérents ? Le RUE est-il un indicateur utilisable, malgré les précautions méthodologiques qu'il requiert ?
- La linéarité de la relation ANPP / précipitations est-elle vérifiée (en utilisant les données terrain et le NDVI) ?
- Quelles sont les tendances du RUE (des résidus) sur le Gourma, sur la période 1984-2010 ? Comment peut-on les interpréter ?
- Peut-on réconcilier les "théories" contradictoires du reverdissement du Sahel et du paradoxe Sahélien ?

2. Publication dans la revue *Remote Sensing*

Cette étude a donné lieu à un article qui a été soumis à la revue internationale à comité de lecture *Remote Sensing*, dans le cadre d'une issue spéciale consacrée au nouveau jeu de NDVI GIMMS-3g (éditeurs Ranga Myneni et Jorge Pinzon ; ISSN 2072-4292). Un résumé des principaux résultats et conclusions suit le texte de l'article, qui est intégré sous sa forme soumise ci-après.

Référence de l'article :

Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Grippa M., Mougin E., Ciais P., Nguyen C.-C. (2014). Rain-Use Efficiency: What it tells about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox, *Remote Sensing (submitted)*.

Rain-Use-Efficiency : What it tells about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox.

Dardel C.*¹, Kergoat L.¹, Hiernaux P.¹, Grippa M.¹, Mougou E.¹, Ciais P.², Nguyen C.-C.¹

¹ Geosciences Environnement Toulouse (GET)
Observatoire Midi-Pyrénées, UMR 5563 (CNRS/UPS/IRD/CNES)
14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

² LSCE CEA UVSQ CNRS, F-91190 Gif Sur Yvette, France

* Corresponding author:
cecile.dardel@gmail.com
Tel.: +33 5 61 33 29 32

Abstract

Rain Use Efficiency, defined as aboveground net primary production (ANPP) divided by rainfall, is increasingly used to diagnose land degradation. Yet, the outcome of RUE monitoring has been significantly debated, different studies finding opposite results regarding land degradation in the Sahel region over the same period of time. The debate is fueled by methodological issues, especially when using satellite remote sensing data to estimate ANPP, and also by differences in the ecological interpretation. Here we use long-term field observations collected in Mali as well as remote sensing data (GIMMS-3g Normalized Difference Vegetation Index) to estimate ANPP, RUE, and the residuals of ANPP regressed against rainfall over 1984-2010. The residuals as well as RUE do not reveal any trend over time, implying that vegetation is resilient over that period. We found no conflict between field-driven and satellite-driven results in terms of trends, and no role of non-linearity of the ANPP/rainfall relationship impacting the interpretation. However, at odd with a stable RUE, an increase in runoff coefficient was observed in the area over the same period, pointing towards land degradation. The divergence of these two indicators of land degradation (RUE and runoff coefficient) is referred to as the 'second Sahelian paradox'. When shallow soils and deep soils were examined separately, high resilience was diagnosed on the deep soil sites, but the shallow soils either showed signs of resilience or degradation, the latter being characterized by vegetation decay and an increase in runoff coefficient. Such results show that contrasted changes may co-exist within a region where a strong overall re-greening pattern is observed.

Key-words : Sahel, re-greening, desertification, degradation, RUE, NDVI, GIMMS-3g, MODIS, herbaceous vegetation, Sahelian paradox, runoff, erosion.

1. Introduction

Rain Use Efficiency, defined as the ratio between net primary production (NPP), or aboveground NPP (ANPP) to rainfall, is increasingly used to analyze the variability of vegetation production in arid and semi-arid biomes, where rainfall is a major limiting factor for plant growth (Huxman *et al.* 2004, Veron *et al.* 2006, Bai *et al.* 2008, Fensholt *et al.* 2009, Ruppert *et al.* 2012). RUE was designed to separate rainfall constraint to vegetation production from other factors such as plant life-form, nutrient status or anthropogenic effects like cultivation (Le Houerou 1984). During the past decades, increasing use of RUE was fostered for two major reasons: i) RUE derivation over large areas and throughout long periods of times became feasible from the 80's onward thanks to Earth Observation satellites ; ii) RUE was increasingly used to diagnose land degradation or 'desertification', assuming that it would cause a decrease in RUE (Veron *et al.* 2006).

Although RUE is an appealing concept, both its derivation from satellite data and its interpretation in ecological terms present important difficulties, which fueled significant debates in the recent past (Wessels 2009). The case of the Sahel drought has given rise to such a debate, with opposing theories and interpretations, and several revisits of published findings (Prince *et al.* 1998, Hein & de Ridder 2006, Mieke 2006, Prince *et al.* 2007, Hein *et al.* 2011). In the 1970's and 1980's, two successive and very severe droughts occurred in the Sahel which had dramatic impact on the population and their resources . These extreme events, embedded in a long period of below-average rainfall, contributed to revive the vision of a Sahel suffering from desertification. Some of the most commonly cited causes of degradation were changes in land use, crop practices (over-exploitation of land, shortening of fallow duration), livestock management (over-grazing), resource collection (wood) and also climate-driven degradation of ecosystems. However, this hypothesis of an ongoing desertification process has been challenged over the last decade by several studies based on satellite observations that reported a spectacular "re-greening" of the Sahel, occurring since the beginning of satellite archive, that is the early 1980's (Eklundh & Olsson 2003, Anyamba & Tucker 2005, Herrmann *et al.* 2005, Fensholt & Proud 2012, Dardel *et al.* 2014). Cited causes of the re-greening ranged from climate, with a recovery of the rainfall amount, to farming techniques, and land reclamations. Evidence from long-term ground data have shown that vegetation evolution is not uniform throughout the whole Sahel. Even if most regions show strong signs of "re-greening" due herbaceous production increase in 'less unfavorable' climatic conditions, in other regions a decrease of vegetation production is undoubtedly taking place, even if it seems not to be widespread. South-western Niger, for instance, presents decreasing vegetation production inferred from both long term ground data and satellite archive (Dardel *et al.* 2014).

Concurrently to the observation of re-greening Sahel over the last decades, evidence has been accumulated showing that the runoff coefficient, defined as runoff divided by the rainfall amount, has dramatically increased from the 1950's up to now. In many places, the comparison of the 1980-2010

period to the wet 1950-60 period reveals increased water table height (Leduc *et al.* 2001), increased river discharge (Amogu *et al.* 2010), increased pond surface (Gardelle *et al.* 2010), and increased flood of the Niger (Sighomnou *et al.* 2013), although the 1980-2010 rainfall is still not at the level of the 1950-60 rainfall. This is known as the "Sahelian paradox" (Albergel, 1987). As increasing runoff coefficient is also considered a consequence of land degradation (Savenije 1996), we are again confronted to a paradoxical situation: How can vegetation productivity increase while at the same time runoff coefficient increases ? A good understanding of how net primary productivity relates to rainfall is required if this "second Sahelian paradox" is to be solved.

Not surprisingly, several studies have explored the changes in Sahelian RUE over the last decades, but they have reached contrasted conclusions: some studies point towards land degradation (Hein & de Ridder 2006), while other conclude to the absence of extensive land degradation (Prince *et al.* 1998, Herrmann *et al.* 2005, Fensholt *et al.* 2013). The differences in interpretation partly result from methodological issues, and partly from different ecological theories or expectations. As far as methods are concerned, the RUE concept is based on a linear relationship between above-ground Net Primary Production (ANPP) and rainfall, and it is meaningful when ANPP reaches zero when rainfall also reaches zero (i.e. zero intercept). Both assumptions are often challenged by ground datasets as shown by the meta-analysis of Ruppert *et al.* (2012). Different methods have been proposed to remove methodological difficulties (see Fensholt *et al.* (2013) for a review). For instance, Fensholt *et al.* (2013) only retained pixels with a strong correlation between satellite-derived ANPP and annual rainfall which also did not show a correlation between RUE and rainfall. Regressing ANPP against rainfall, as suggested by Evans & Geerken (2004) for instance, alleviates the non-zero intercept problems. Moreover, the residuals of the regression can be examined to look for a non-random distribution, and possible dependence of residuals on either time and rainfall amount (Evans & Geerken 2004, Wessels 2009, Ruppert *et al.* 2012, Fensholt *et al.* 2013). In the following text, this method will be referred to as the "ANPP residuals" method. It will be the preferred method, but we also present the widely-used RUE, so that possible methodological biases can be identified.

On the ecological side of the controversy (is land degradation diagnosed or not from RUE analysis in the Sahel ?), the key question is the dependence of RUE or residuals on rainfall. The situation occurs if the ANPP/rainfall relationship departs from linearity. If RUE is intrinsically lower for higher rainfall amounts, which has been suggested several times (eg Mieke *et al.* (2010), Huxman *et al.* (2004)), an increase in rainfall after the 80s' drought should be accompanied by a decrease in RUE, without any Sahelian 'desertification' in that case. A similar situation may affect the other edge of the rainfall range: if RUE increases with rainfall, because for instance RUE is intrinsically low for the lowest rainfall, a recovery of the rainfall, as it is observed since 1984, should result in increasing RUE. Hein & de Ridder (2006) argued that an absence of increase in RUE over 1984-2000 could be attributed to some degradation of the land, a view that has been challenged by Prince *et al.* (2007) and Mieke

(2006). The linearity of the ANPP/response to rainfall has been further discussed by Hein *et al.* (2011), who suggested that site-level and large-scale averages relation may differ in terms of non linearity. There is evidence that the ANPP/rainfall relationship differs when the same ecosystem undergoes rainfall changes (site-level RUE) from the ANPP/rainfall relationship of different ecosystems undergoing different average rainfall (RUE along a climate gradient), according to Huxman *et al.* (2004), Bai *et al.* (2008) and Ruppert *et al.* (2012). The latter case usually results in steeper gradients of the ANPP/rainfall curve than for the local-site curves. The possible change of RUE over a range of rainfall amount is clearly critical for the debate of desertification in the Sahel.

As it is common for long-term ecological studies, other issues may arise because of accuracy issues for the rainfall and ANPP data themselves. In addition, the estimation of ANPP over large regions requires upscaling of ground data using remote sensing methods. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is particularly used to estimate ANPP and to perform RUE analyses (Nicholson *et al.* 1998, Prince *et al.* 1998, Diouf & Lambin 2001, Herrmann *et al.* 2005, Wessels *et al.* 2007, Fensholt & Rasmussen 2011). The NDVI / ANPP relationship has been firmly established, from both empirical studies (Tucker *et al.* 1985) and theoretical ones. The latter generally build on the 'Monteith' model, which states that NDVI linearly correlates with absorbed photosynthetically active radiation, which in turn correlates with photosynthesis, and, after integration in time, to ANPP. The slope of the APAR/ANPP relation is referred to as the Light Use Efficiency. This approach has proven very successful over the years, but it is recognized that uncertainty affects the different terms of the Monteith model, especially the LUE, which may depend on plant type, phenology, water, temperature or nutrient stresses. Sjöström *et al.* (2013), for instance, showed that the LUE used in the MODIS GPP product is probably underestimated for Sahelian ecosystems. In addition, the derivation of long series of NDVI needs to solve a number of problems like orbital drift, changing atmospheric conditions, sensor degradation (Tucker *et al.* 2005). As a result, the accuracy of long term estimates of ANPP is not well known, especially for biomes where long-term ground data are scarce. Given these uncertainties, it is certainly important to evaluate long term time series of RUE and ANPP residuals with corresponding long-term ground data (Miche *et al.* 2010, Dardel *et al.* 2014).

The present study aims at testing two different methods (i.e. RUE and ANPP residuals) over the Gourma region in pastoral Sahel, where 27 years of field observations of the aboveground herbaceous mass are available. RUE and ANPP residuals from field data are compared to RUE and ANPP residuals computed with satellite GIMMS-3g NDVI over 1984-2010. The interannual variability and trends in RUE and ANPP residuals estimated both from field and satellite data are analyzed, to determine whether these methods are consistent with the knowledge of the vegetation history in the Gourma region, and thus if they are likely to be used in other landscapes for purposes of detecting land degradation. Then an explanation of the second Sahelian paradox is proposed, that reconciles increased runoff coefficient and overall re-greening.

2. Data and methods

2.1. Field observations of vegetation

The Gourma region is located in north-eastern Mali, south of the Niger River. The exact window considered in this study extends from 14.5 to 17.5°N and from 2.2 to 0.8°W. Field observations of above-ground herbaceous vegetation mass are available from 1984 to 2010. Detailed protocol and data description can be found in Hiernaux *et al.* (2009b), whereas Dardel *et al.* (2014) analyses the time series of ground ANPP averaged at the Gourma window scale in relation to GIMMS-3g times-series. The Gourma is a pastoral region, land under cultivation representing less than 5% of the surface, and the vegetation is mainly constituted of annual herbaceous plants. The woody cover is less than 3% of the surface. 21 sites of 1 km² are observed every year (sites being irregularly measured have not been used). These sites (Figure 1) sample the bioclimatic gradient as well as the landscape heterogeneity: soil type, water regime, topography, land use, grazing pressure intensity (Mougin *et al.* 2009). Herbaceous ANPP is derived from the above-ground herbaceous mass measured for each site through a stratified random sampling method (Hiernaux *et al.* 2009b, Dardel *et al.* 2014) combining destructive measurement of 12 plots of 1m x 1m per site with a 4-classes stratification of each 1m x 1m plot along a 1 km line. For these plots, herbaceous plants are cut, dried, and weighted. The relative contribution of plant species is also reported for each site, each year, since it changes significantly from year to year (Hiernaux *et al.* 2009b).

Dardel *et al.* (2014) used peak mass as a proxy for ANPP. Here we also use several mass data per rain season, when the mass went through several maxima during the season. This occurs, although rarely, when a strong dry spell interrupts plant growth. In that case, ANPP is best approximated by the sum of the successive mass increments. The impact on ANPP estimate is small, since vegetation is dominated by annual plants growing rapidly during a short rain season. We also compensated for late measurement of mass, which occurred principally in 1995, assuming an average rate of mass decay of 17% per month (based on field data) and a maximum of standing mass in mid-September. There still is a difference between ANPP and our estimates, caused by herbivory losses.

Since the sites are smaller than the GIMMS-3g pixels, we chose to aggregate both field data and satellite data to a relatively large window (3° x 1.2°). The field sites are grouped into the 3 main soil types : deep sandy soils, shallow soils and clayed depressions. An average ANPP for the Gourma window is obtained by weighting ANPP of these 3 types, following the relative proportions of these classes within the window (i.e. 65.1% of sandy surfaces, 30.8% of shallow soils, and 4.1% of clayed depressions (Figure 1). We therefore focus on the temporal changes of ANPP and RUE of a relatively large super-site.

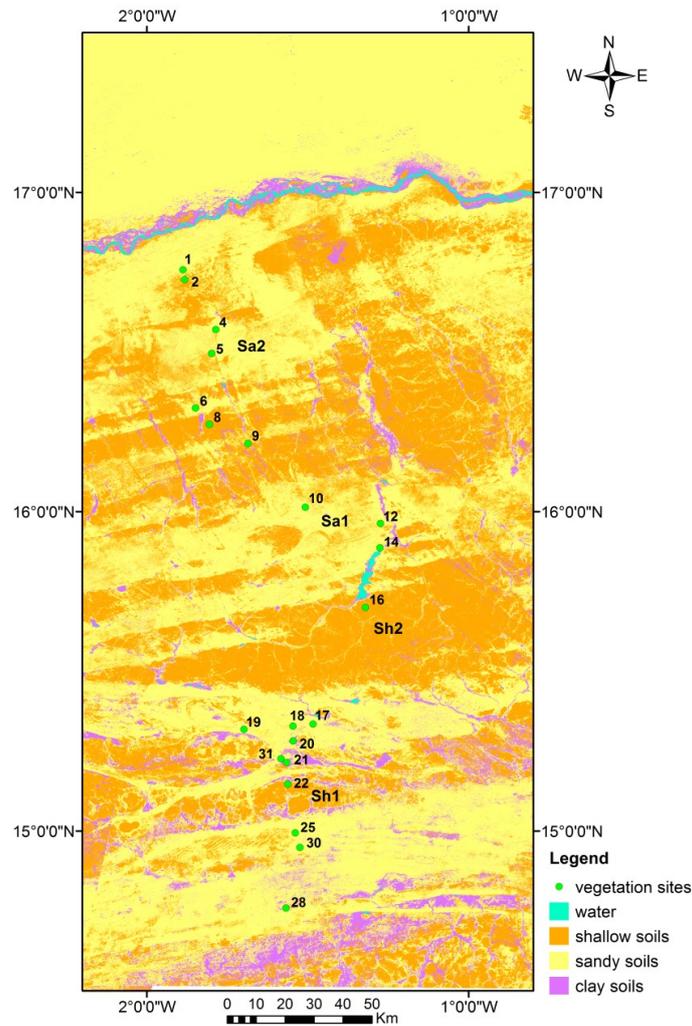


Figure 1. Map of the central Gourma, in Sahelian Mali, portraying the different soil types and the network of long-term ecological survey sites. The map is a subset of a classification of Landsat images which corresponds to the area over which GILMMS-3g data are averaged, referred to as the Gourma window in this article.

2.2. Rainfall data

Studies of RUE preferably rely on rainfall data collected by ground networks, which are dense all around the world, but are relatively scarce and of varying reliability in regions such as the Sahel. At the regional scale, gridded rainfall products can be used, which combine rain gauge measurements with satellite data (Fensholt & Rasmussen 2011). Here, the rainfall data come from a network of rain gauges installed on purpose over the Gourma region. Daily data available from 1984 up to 2010 have been quality-checked to discard gauges with spurious gaps, which occasionally occur for isolated man-read gauges or pluviographs. Sums for the June-July-August-September-October (JJASO) period were computed for each gauge and averaged to provide one value for the Gourma window (Figure 2). Most of the years, a rain gauge could be associated to every vegetation site, meaning that there was a gauge with good quality data close enough, typically within 10 km of the vegetation site. The rainfall and

vegetation data are therefore consistent. The Gourma average JJASO rainfall was compared to the simple average of the two long-term stations of Gourma-Rharous (station from DMN, Mali) and Hombori (SYNOP station from DMN Mali). Also, to evaluate the importance of commonly-used satellite rainfall datasets in estimating RUE or ANPP residuals, we included the TARCAT v2.0 dataset from the TAMSAT Research Group (Tropical Applications of Meteorology using SATellite data and ground-based observations, Maidment *et al.* (in prep.)). TARCAT provides rainfall estimates from 1983 up to today with a spatial resolution of 0.0375° , based on Meteosat thermal infra-red data and calibrated with ground-based rain gauge data. It aims at providing consistent estimations of rainfall over Africa for long-term purpose studies, since the calibration is constant over time for a given grid cell. In the following, the baseline rainfall dataset is the one based on the network of gauges in the Gourma region.

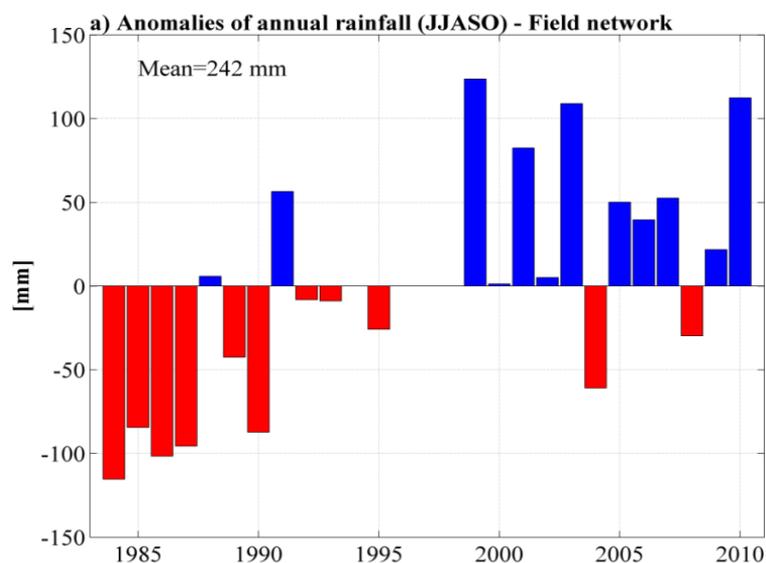


Figure 2. Rainfall anomalies over 1984-2010 derived from averaging the gauges installed near the long-term ecological survey sites. Anomalies are computed from the 1984-2010 mean. They clearly show the recovery of the precipitation after the extreme drought of 1984.

2.3. Normalized Difference Vegetation Index data

The NDVI-3g dataset is produced by the GIMMS group from data collected with the AVHRR sensors onboard the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiting meteorological satellite series. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is calculated from the AVHRR channel 1 (red, 550-700 nm) and channel 2 (near-infrared, 730-1000 nm). Data are provided globally from 1981 to 2011 with a $1/12^\circ$ spatial resolution and 15 days maximum composite images. GIMMS-3g NDVI is the longest available dataset, which gives the opportunity to perform trend and inter-annual variability analyses over more than 30 years.

Seasonal NDVI integrals, noted iNDVI (Mbow *et al.* 2013), were computed on a per-pixel basis as follows. The base level for integration was estimated as the dry season NDVI average (January to

April, and November and December). A “normalized NDVI” was computed for each year by subtracting the average dry season value to the original data, and temporal integration of "normalized NDVI" was then performed over the growing season (July to October). Finally a spatial average was computed over the Gourma window. MODIS (MOD13C2) NDVI data were used as well over the 2000-2010 period for comparison with GIMMS-3g NDVI. MOD13C2 data are provided on a monthly basis with a spatial resolution of 0.05°. MODIS NDVI was integrated over the growing season and spatially averaged over the Gourma window, following the same methods as for the GIMMS-3g dataset.

2.4. Estimation of satellite-derived ANPP

Satellite-derived above-ground Net Primary Production was estimated from spatially averaged iNDVI values calibrated over the weighted average of the ANPP measurements as was previously done in Dardel *et al.* (2014), except that iNDVI was used instead of average August-September NDVI. iNDVI was regressed against field herbaceous ANPP over 1984-2010 with iNDVI as the independent variable (Equation 1). The resulting regression was in turn used to provide the satellite estimates of ANPP from iNDVI (Equation 2).

$$\text{ANPP}_{\text{field}} = a. \text{iNDVI} + b \quad (\text{Equation 1})$$

$$\text{ANPP}_{\text{sat}} = a. \text{iNDVI} + b \quad (\text{Equation 2})$$

The same method was applied over 2000-2010, using iNDVI data both from GIMMS-3g and MODIS. Time series of $\text{ANPP}_{\text{field}}$ and ANPP_{sat} were extensively documented by Dardel *et al.* (2014). The focus here is on the relationships between these series and the rainfall series, using linear regression, and Principal Component Analysis of z-scores of the three series.

2.5. Computation of Rain Use Efficiency and Residuals

Rain Use Efficiency was computed as the ratio of spatially averaged ANPP (derived from both field observations and satellite estimates) to annual rainfall over the Gourma window. Thus, two time series of RUE are directly comparable: RUE computed from field measurements of vegetation (referred to as “ $\text{RUE}_{\text{field}}$ ”) and RUE computed from satellite estimates of ANPP (referred to as “ RUE_{sat} ”). The residuals method was also applied to both field observations and satellite estimates. First, a linear regression between ANPP estimates (field or satellite) and annual rainfall provided a time series of "predicted ANPP" (field or satellite). Residuals were then computed as the difference between observed ANPP and ANPP predicted by rainfall, providing the times series referred to as “field residuals” and “satellite residuals”.

3. Results

3.1. ANPP and rainfall

Over the 1984-2010 period, satellite-derived ANPP and field ANPP vary in a very consistent way (Figure 3). The time profiles of both field and satellite data illustrate the recovery of plant production after the 1984 extreme drought, characterized by an increasing trend and a strong interannual variability. Field ANPP explains 65 % of the iNDVI variance (Figure 4), which is slightly higher than the 56 % reported in Dardel *et al.* (2014) for peak biomass / NDVI over 1984-2011. Efforts to assess ANPP rather than using peak biomass, together with the use of a remote-sensing proxy for ANPP which is closer to the Monteith production model, are causing this small improvement. The agreement between the two datasets is apparently slightly better during the 2000-2010 period than during the 1984-1995 period. Indeed, when equations 1 and 2 are applied to estimate ANPP from MODIS and GIMMS-3g over 2000-2010, the time profiles of the three ANPP datasets are very similar and the explained variance reaches 87% for MODIS and 70% for GIMMS-3g (see appendix A).

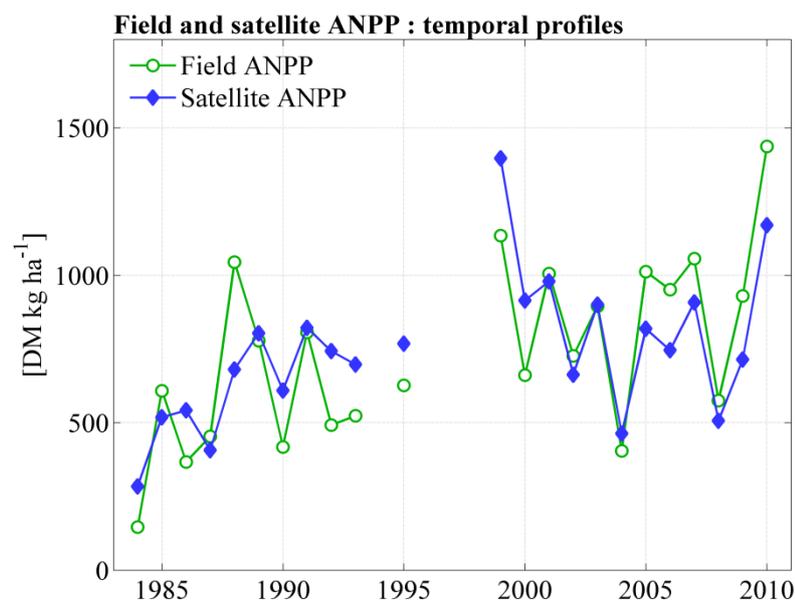


Figure 3. Time series of ANPP derived from field data and satellite data aggregated at the scale of the Gourma window. Years without field data are not considered.

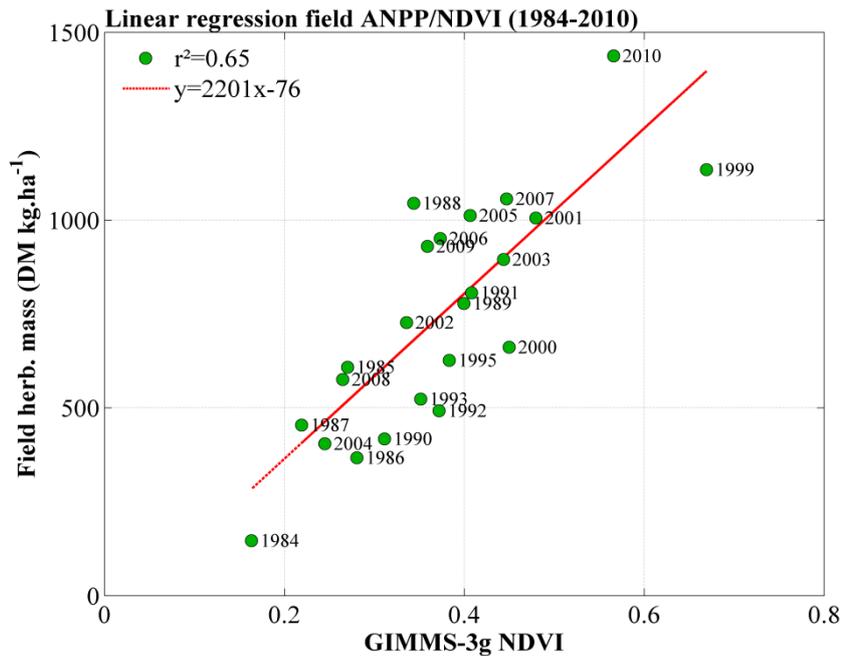


Figure 4. Scatterplot and linear regression of field ANPP against integrated NDVI from GIMMS-3g.

Whether ANPP is estimated from field data or satellite data, it is highly correlated with the JJASO rainfall, which, in both cases, explains 76% of the variance (Figures 5a and 5b). The overall consistency of the three independent datasets, each of which could be impaired by quality issues, therefore strongly supports the use of satellite archive for long-term monitoring of dry lands.

The relationship between field ANPP and rainfall is illustrated by the evolution of RUE and the ANPP residuals over 1984-2010 (Figure 6): RUE_{field} displays a low value in 1984, followed by a series of relatively high but variable RUE (or positive residuals) in 1985-1989, and then a rapid decrease from 1988 to 1992 followed by a slow recovery until 2010. Over the whole period, neither RUE nor residuals show significant trends (P values of 0.29 and 0.81). The trend in field RUE (non-significant) is caused by the unique value of 1984. Noticeably, an analysis of RUE starting after 1992 may conclude to an increase in RUE. This again illustrates that trends have to be established over long periods of time and have to be robust over several time-periods (Miehe *et al.* 2010, Dardel *et al.* 2014). RUE and residuals based on satellite-derived ANPP instead of field ANPP also conclude to non-significant trend over 1984-2010. The time profiles however lack the succession of high and low RUE periods detected with RUE_{field} , and the interannual variability does not correspond well to the RUE_{field} variability, except when the MODIS data are considered (see Appendix A). These results are still valid when TAMSAT or the two-stations rainfall datasets are used instead of the in situ network: no significant trends over the whole 1984-2010 period are detected for field or satellite based ANPP, and similar slight differences in the shape of the time-profiles for field and satellite ANPP are found (appendix B).

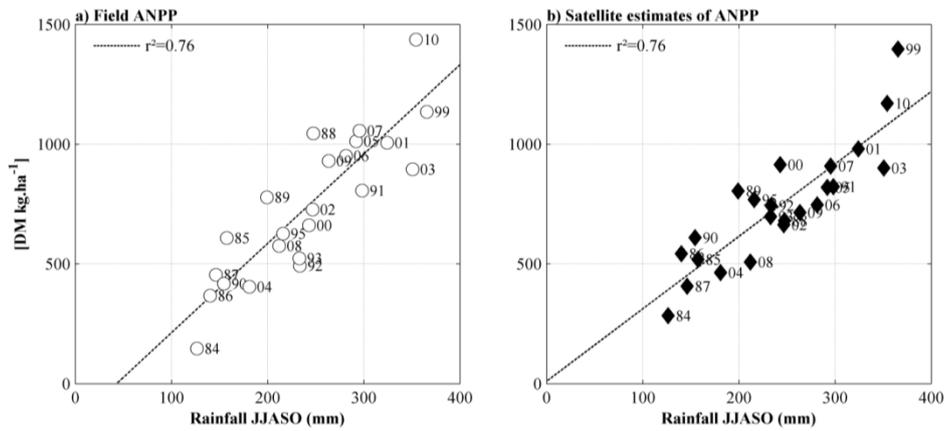


Figure 5. a) Regression of field ANPP against JJASO rainfall. b) Same for satellite-derived ANPP.

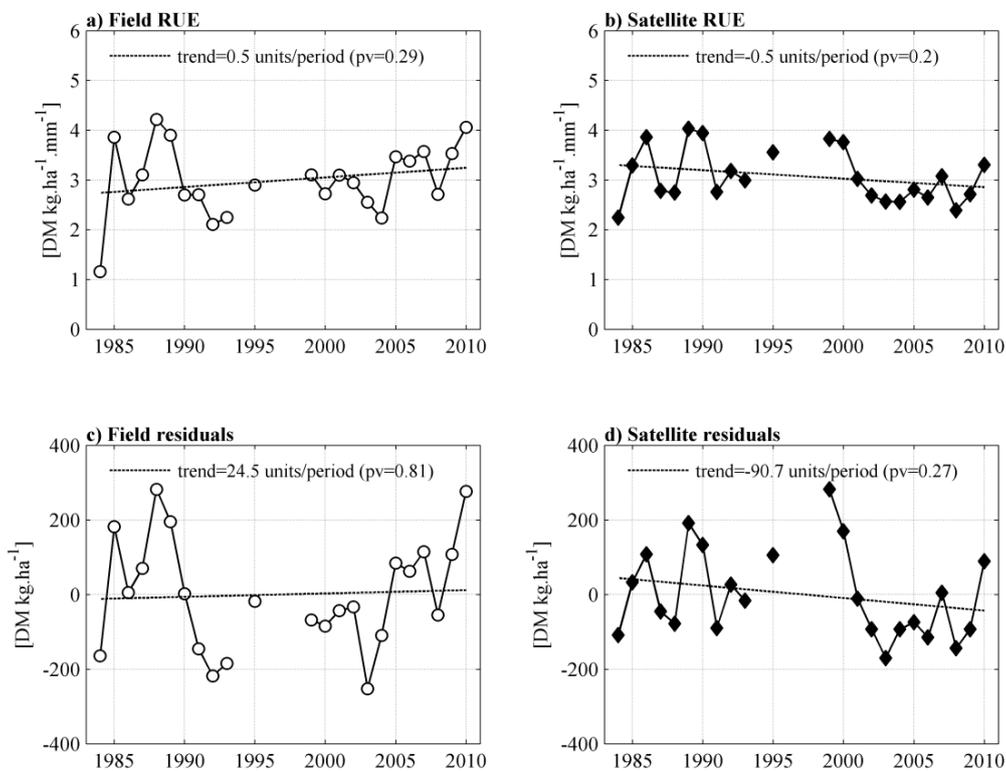


Figure 6. Time series of RUE computed with a) field ANPP and b) with satellite estimates of ANPP. Times series of residuals (see text) derived from c) field ANPP and d) satellite ANPP. The trends are not significant.

3.2. RUE and residuals in relation to rainfall amount

By construction, RUE and rainfall are not independent. As a result, the correlation between these variables is prone to 'spurious correlation'. For instance, Brett (2004) showed that a small negative correlation between X/Y and Y is likely to occur, if X and Y are unrelated, depending on the variation coefficient of Y . In the case of RUE, a large coefficient of variation of the rainfall may produce a slightly negative and spurious correlation.

For the Gourma, RUE from field ANPP is slightly positively correlated to rainfall (Figure 7). The correlation is significant at the 90 level ($P = 0.10$) and is caused by year 1984 only. The ANPP residuals do not display any particular patterns (Figure 7c), showing no support for non-linearity of the ANPP/rainfall relationship over the range of rainfall considered here. The highest rainfall values result in proportionally high ANPP, with no evidence of other factors, like nutrient status, being increasingly limiting when the water constraint is relieved. The satellite-derived RUE is not correlated to rainfall and the satellite residuals do not suggest either any non-linear relationship between ANPP and rainfall (Figure 7b and d). The principal component analysis supports the following statements: the three variables ($ANPP_{field}$, $ANPP_{sat}$ and rainfall) are strongly correlated. RUE or the residuals of ANPP versus rainfall are second order signals, which do not display significant trends over 1984-2010. Indeed, the first principal component explains 90 % of the total variance, and the coefficients are similar for the three variables (0.57, 0.57, 0.59 for $ANPP_{field}$, $ANPP_{sat}$ and rainfall respectively). The second principal component explains 6% of the total variance, and the coefficients (0.71, -0.70, 0.01) indicate that it represents the differences between $ANPP_{field}$ and $ANPP_{sat}$.

In the case of the Gourma, the residuals and RUE methods provide relatively similar views of the ANPP/rainfall relationship, although the residuals method should be preferred or at least checked for confirmation.

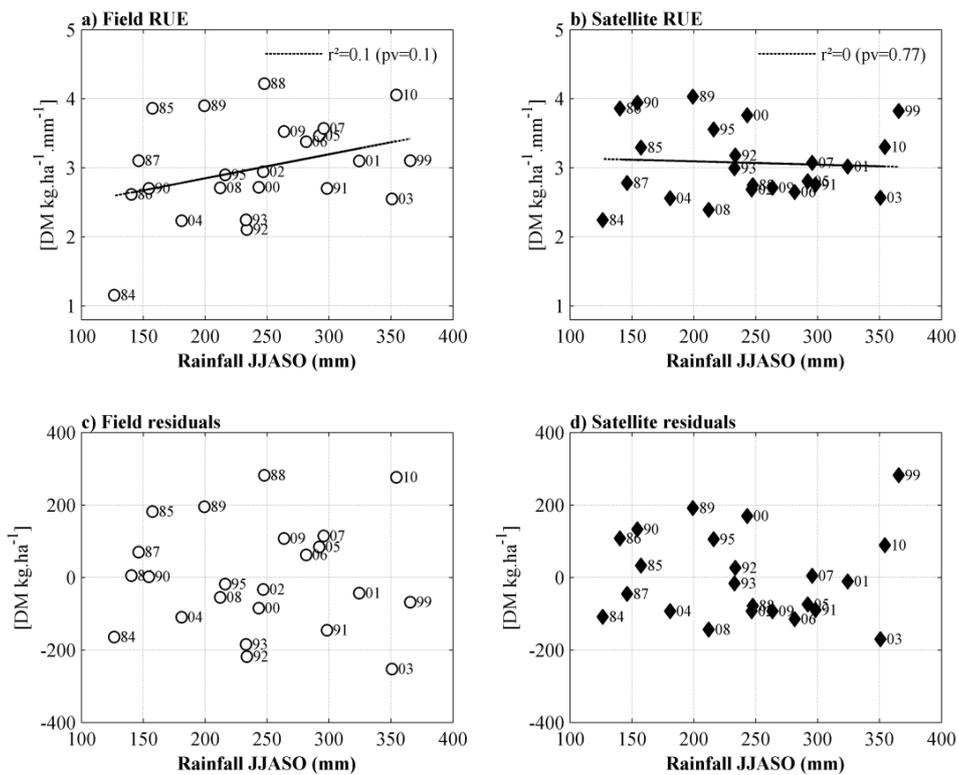


Figure 7. Plots of RUE against JJASO rainfall. a) RUE computed with field ANPP. b) RUE computed with satellite estimates of ANPP. c) Residuals obtained with field ANPP plotted against rainfall. d) Residuals obtained with satellite estimates of ANPP plotted against rainfall.

3.3. Ecological interpretations

Herbaceous productivity in the Gourma is largely predicted by rain-season rainfall amount. It is well known that rainfall shapes plant productivity in many ecosystems and explains spatial variability, especially over significant rainfall gradients, as well as time variability (Huxman *et al.* 2004). The range of RUE values found in this study is comparable to the range reported by studies in similar ecosystems (Le Houerou 1989, Prince *et al.* 1998, Ruppert *et al.* 2012). Le Houerou (1989), for instance, reported RUE between 1 to 4 DM kg.ha⁻¹.mm⁻¹ for regions with mean annual precipitation around 250 mm (Saharo-Sahelian transition) and RUE values from 1.7 to 8 DM kg.ha⁻¹.mm⁻¹ for regions with mean annual precipitation around 350 mm. The ratio of field measurements of ANPP to annual rainfall typically ranges from 0.3 to 0.6 (Diouf & Lambin 2001, Holm *et al.* 2003b, Mieke *et al.* 2010).

Correlation between satellite-derived ANPP (usually based on NDVI) or field ANPP and rainfall has been reported in the past for semi-arid regions. The strongest relationships are usually established when average ANPP is estimated along large climatic gradients. For example, r^2 as high as 0.89 has been reported for climatic means ranging from 200 to 800 mm in North America in Muldavin *et al.* (2008), or 0.90 for a 200-1200 gradient in Sala *et al.* (1988). The correlation based on interannual variability is usually much lower (Diouf & Lambin (2001): $r^2 = 0.41$; Evans & Geerken (2004): $r^2 = 0.50$ to 0.77 depending on the method used to estimate rainfall Prince *et al.* (1998): $r^2 = 0.52$, Muldavin *et al.* (2008) : $r^2 = 0.56$ to 0.66). Spatial averaging tends to increase the correlation: Nicholson *et al.* (1998) found a correlation of 0.85 (r^2) in regressing Sahel-averaged NDVI against rainfall, for years 1982-1993.

For our dataset, the variance explained by rainfall for both ANPP_{sat} and ANPP_{field} is therefore in the upper values of the literature range. The spatial averaging method, although it is performed here over a much smaller area than Nicholson *et al.* (1998), may contribute to reduce the noise in the data (but aggregation may also raise up-scaling issues and require adequate sampling ; Holm *et al.* (2003a)).

Different ecological factors may cause variability in RUE and residuals. Field data suggest that residuals of ANPP / rainfall may be negative in dry years as in 1984, 2004, 2008 (Figure 6b). Such a decrease is consistent with the idea that below a certain rainfall threshold, vegetation growth may be more severely impaired, for instance if a large mortality event occurs during the rainy season or if the drought limits resource capture or resource use. Increased herbivory impact in poor production years may also lead to an underestimation of ANPP from mass data (Mieke *et al.* 2010). Such a decay of RUE for the driest years is present in the meta-analysis of field data by Ruppert *et al.* (2012). However, some other dry years like 1985, 1987, or 1990 do not support this concept. In line with Mieke *et al.* (2010), we do not find any apparent delayed effect of the 1984 drought, since high RUE and positive residuals are found as early as 1985. This is not in line with the lag effect of drought

suggested by Prince *et al.* (1998), Prince *et al.* (2007) and Diouf & Lambin (2001). There is no simple explanation for the variability of RUE_{field} , or residuals, in terms of specific composition, although floristic composition change significantly between years and over the whole period. The global trends in ANPP, iNDVI and rainfall show some correlation with some species or group of species : positive and significant at 0.90 level with the fraction of C_4 plants (for each year, the median of the contribution of C_4 to the aboveground mass of all sites is used as the independent variable), palatable species and poacea , negative and significant with the fraction of sciaphile and short-cycle species. This was noted already by Hiernaux *et al.* (2009b) for the ANPP over the 1984-2006 period. RUE, however, is only weakly correlated to some marginal groups of plants or even species. Compensations at the canopy level and seasonal time scale therefore mask leaf-level or plant-level traits of the species or group of species, like the intrinsic high water use efficiency of C_4 plants. Variations in RUE were not simply related to within-year rainfall variability either (not shown).

The fact that no trend of RUE or residuals are found either from field data and satellite data demonstrates the resilience of ecosystems in the Gourma. We do not find evidence of decreasing RUE over time, as Mieke *et al.* (2010) did find for pastoral Sahel in Senegal in their 'grazing' experimental conditions, yet on a smaller area. Pastoral land in the Gourma apparently fully benefits from the increase in rainfall over the last three decades.

3.4. Reconciling stable RUE and increasing runoff coefficient

The previous analyses make a strong case for ecosystem resilience over 1984-2010. Yet, there is also compelling evidence that the runoff coefficient over the same area has dramatically increased over the same period of time. In fact, Gardelle *et al.* (2010) have demonstrated that most ponds in the Gourma started to grow after the 70s drought, with a important acceleration of the phenomenon usually a few years after the 1983-84 drought. The case of the Agoufou pond (located near sites 17, 18, 20 and 31 in Figure 1) illustrates this phenomenon. The annual increase of pond's volume derived from Landsat and other high resolution imagery is a proxy of the water entering the pond and therefore of the runoff collected over the catchment. The ratio of this volume to the annual precipitation rapidly increased after 1984, as can be seen in Figure 8. Local observations (like the growth of the gully network) support a significant trend towards runoff concentration and acceleration on some shallow soils, especially in the first years with normal or above-average rainfall after a major drought, like year 1991 for the Gourma case. Such an increase in runoff coefficient is often associated with land degradation, which is apparently conflicting with the stable RUE (and residuals) found over the same period. A detailed examination of shallow soils sites however shed some light on this question. The resolution of the GIMMS-3g prevents strict comparisons of the satellite data to specific sites, since most sites are homogeneous at the 1 km scale, but not at the $1/12^\circ$ scale. Yet, several areas dominated by shallow soils are large enough to be observed with GIMMS-3g data, and it is the case also for some sandy soils dominated areas. A typical shallow soil signal is obtained by averaging GIMMS-3g data over areas

labeled "Sh1" and "Sh2" on Figure 1, and compared to a sandy soil signal averaged over the neighboring "Sa1" and "Sa2" areas. Over shallow soils, the satellite iNDVI display no trend over 1984-2010 (Figure 9a), whereas the satellite residuals display a weakly significant decreasing trend (Figure 9b). By contrast, over the neighboring sandy soils, iNDVI is strongly increasing (Figure 10b) while residuals are stable (Figure 10d), as they are over the whole Gourma. Field data for two shallow soil sites, which are in (site 16) or close to (site 8) the Sh1 and Sh2 areas, reveal contrasted behaviors. On site 16, ANPP progressively recovers after the driest years (Figure 11a) while residuals are stable over time (Figure 11b), implying that this site behaves like the sandy soil sites although its productivity is much lower. Conversely, over site 8, ANPP at the end of the 1984-2010 period is much lower than in 1986-90 (Figure 11a). The residuals decrease as well (Figure 11b), the trend being close to significance ($P=0.11$). Field trip reports for this site also mentioned obvious soil erosion and runoff concentration in the early 1990's, which adds limitations to plant growth for this site. The response of the shallow soils ecosystems to the drought is therefore not uniform. Shallow soil sites in the Gourma typically consist of bedrock (schist or sandstone) or iron pan, interspersed with bars or shallow discontinuous layer of sand, sandy loam or clay loam, over which herbaceous vegetation and shrub may grow (Hiernaux & Gerard 1999). Runoff is high, and most often occurring as sheet runoff, but signs of runoff concentration are visible. The sandy-loam bars are sometimes organized perpendicular to the slope, creating patterned vegetation, where vegetated bars are able to capture sheet runoff. Some of the shallow soil sites show clear signs of degradation, while other do not. Woody cover for these sites also tend to decay, as they are deprived of water because of runoff concentration (Hiernaux *et al.* 2009a).

Since ponds' water originates from the shallow soils only (Timouk *et al.* 2009, Gardelle *et al.* 2010), degradation of a fraction of these landscape units is sufficient to cause a strong increase in runoff at the scale of the whole Gourma. The field data suggest that some of the shallow soil areas are prone to some 'degradation', while others are less affected or not affected at all. The satellite-derived RUE and residuals are not at odd with such an evolution since they suggest decreasing RUE (residuals) over the shallow soils Sh1 and Sh2.

Shallow soils in the Gourma are relatively large landscape units, at least for some of them, which is not the case of iron pans or rocky outcrops in many other parts of the Sahel. A slight decrease of productivity or RUE in areas of already low productivity (or RUE) would most probably be undetected in many places where shallow soils are smaller than the GIMMS-3g resolution (Holm *et al.* 2003a). In situations where local degradation and erosion occur over a small fraction of a landscape, on patches surrounded by otherwise resilient re-greening ecosystems, divergent indicators of land degradation may well be detected, namely stable RUE and increasing runoff coefficient, as soon as the resolution of the sensors is too coarse to distinguish these units. Since increased runoff coefficient is observed in many places in the Sahel and since the present study gives additional confidence in RUE

observed from space, which is often stable (Fensholt *et al.* 2013), we propose that divergent indicators of degradation may co-exist in the Sahel as soon as shallow soils are present, especially if their detection is complicated by a typical patch size smaller than the resolution of the remote sensing dataset.

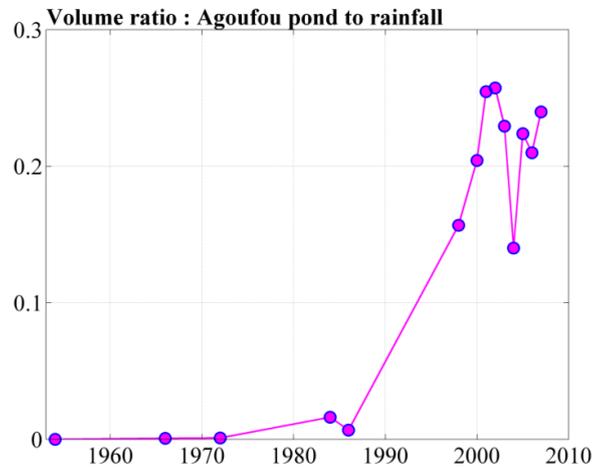


Figure 8. Time series of the ratio between the Agoufou pond's annual volume increment and the annual rainfall collected over the catchment. The surface of the Agoufou pond is estimated from high spatial resolution remote sensing data while the height data come from field measurements. This ratio is a proxy for the runoff coefficient of the pond's catchment. It has dramatically increased after the extreme droughts (early 1970's and early 1980's).

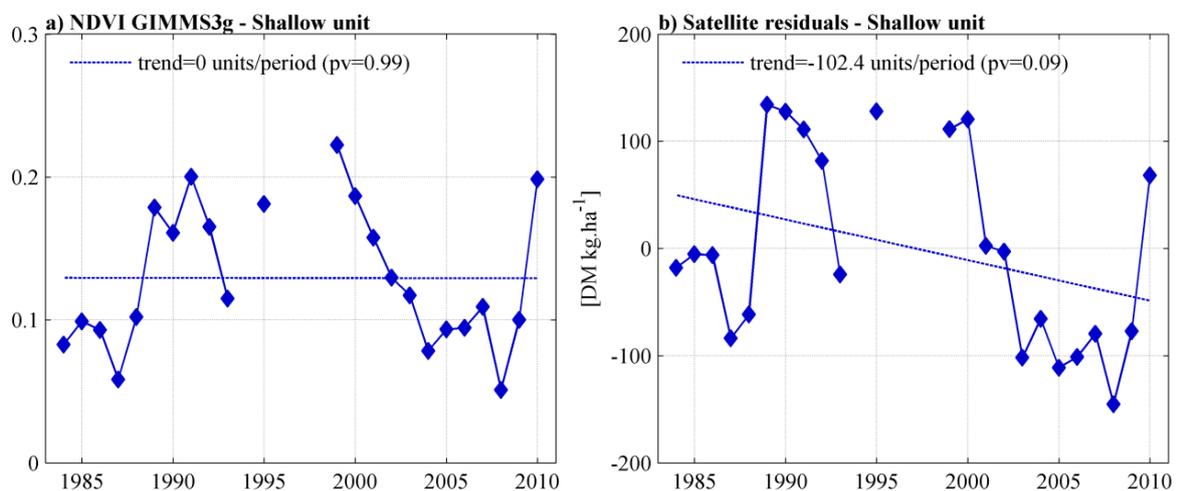


Figure 9. iNDVI and satellite residuals over the shallow soil unit (Sh1+Sh2) described on Figure 1. Satellite residuals are computed using the mean rainfall over the Gourma region. No trend is found for iNDVI, while the residuals decrease.

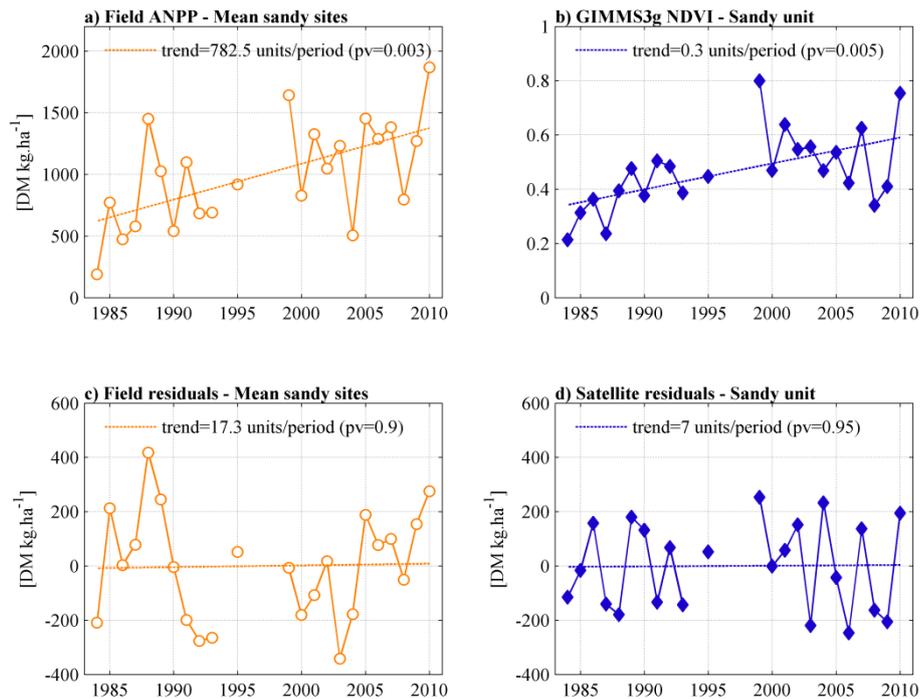


Figure 10. a) Field herbaceous ANPP averaged over the sandy sites in the Gourma window. b) GIMMS-3g iNDVI averaged over the sandy unit (Sa1+Sa2) displayed in Figure 1. c) and d) ANPP residuals from field and satellite ANPP estimates respectively. ANPP residuals are computed using the mean rainfall over the Gourma region. ANPP increases while the residuals do not show any trend.

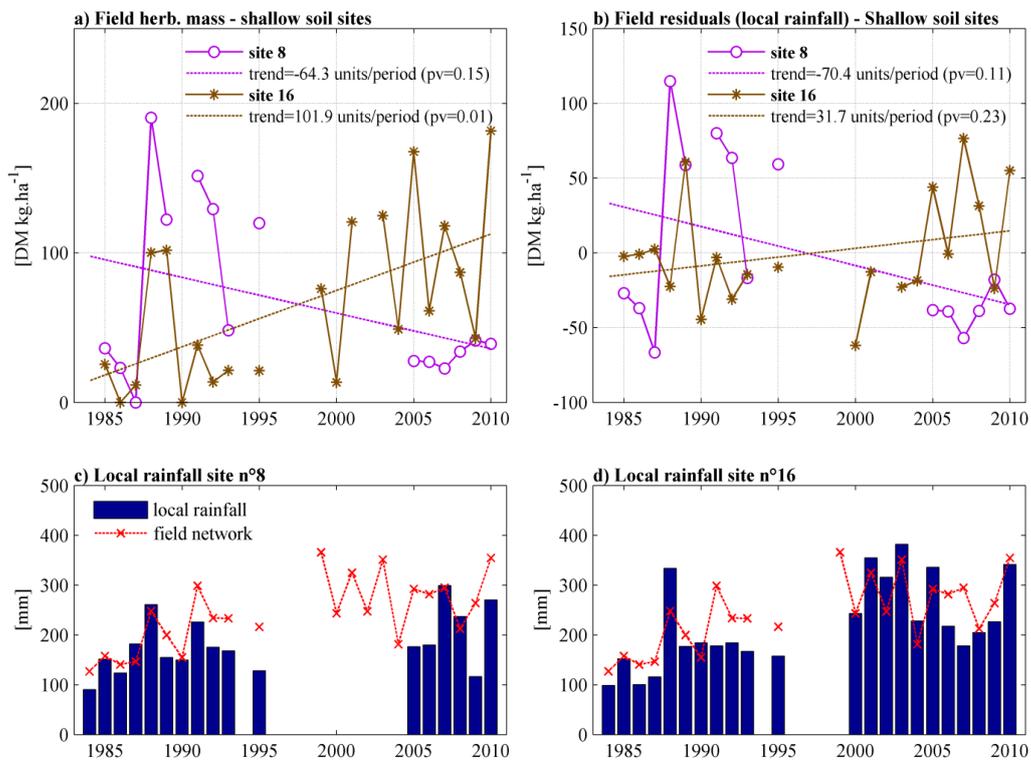


Figure 11. a) Field ANPP and b) field residuals over two shallow soil sites. Field ANPP residuals are computed using rainfall from the nearest gauges, which are compared to the window-averaged rainfall for c) site n°8 and d) site n°16.

4. Conclusions

Long-term ecological survey provides strong evidence that the longest global satellite archive can be used to estimate ANPP over decades. Interannual variability in pastoral Sahel and trends following the extreme drought of the early 1980's are both consistently portrayed by ground and remote sensing time series aggregated over a $3^{\circ} \times 1.2^{\circ}$ area. Both series are remarkably correlated to rainfall over 1984-2010, in a linear manner. The residual of the ANPP/rainfall regression as well as rain-use efficiency do not reveal any trend over time, implying that vegetation is resilient over that period, and that RUE do not suggest that land degradation is affecting the area at this level of aggregation. We found no conflict between field-driven results and satellite-driven results in terms of trends, and no role of non-linearity of the ANPP/rainfall relation impacting the interpretation, two highly-disputed issues in the past. The small interannual variability of RUE is not simply explained, neither by shift in floristic composition and the correspondence of field versus satellite RUE is modest.

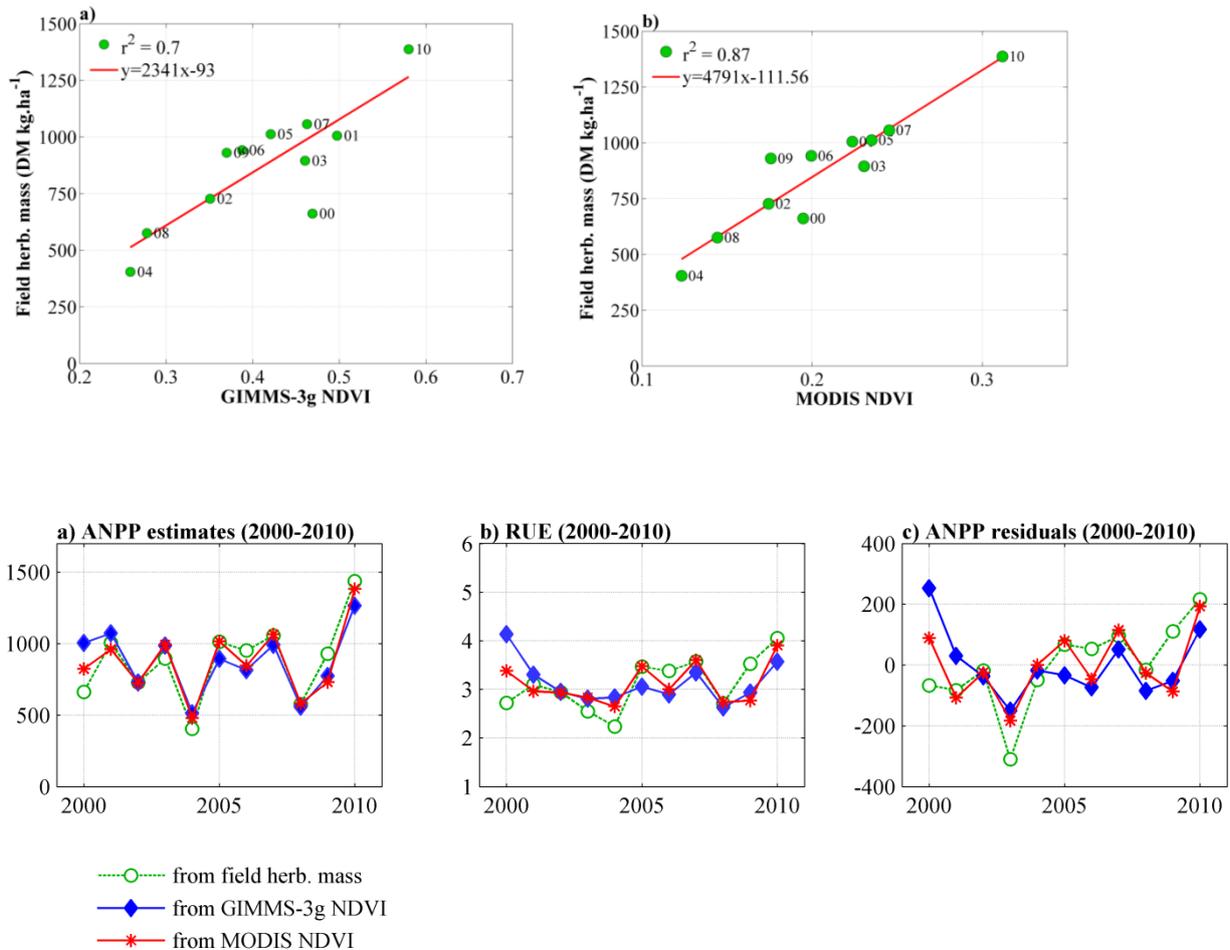
At odd with a stable RUE, an increase in runoff coefficient has affected the same area over the period, pointing towards some land degradation. The divergence of these two indicators of land degradation is referred to as the 'second Sahelian paradox'. When shallow soils and deep soils were examined separately, it turned out that high resilience was diagnosed on the deep soil sites, but the shallow soils either showed signs of resilience or degradation. We showed that the second Sahelian paradox (simultaneous stable RUE and increased runoff coefficient) observed in the Gourma can be explained by the fact that the small fraction of the landscape showing signs of degradation is dominated, in terms of ANPP, by the large fraction of resilient and productive deep soils. We suggested that similar processes may exist in many other dry lands, as soon as some shallow soils are present and are not scrutinized separately.

Acknowledgements

This work was funded by ANR ESCAPE and used data from Service d'Observation AMMA-CATCH and from DNM Mali. We thank Jim Tucker for making the GIMMS-3g available, and Marielle Gosset for helpful discussions on TARCAT.

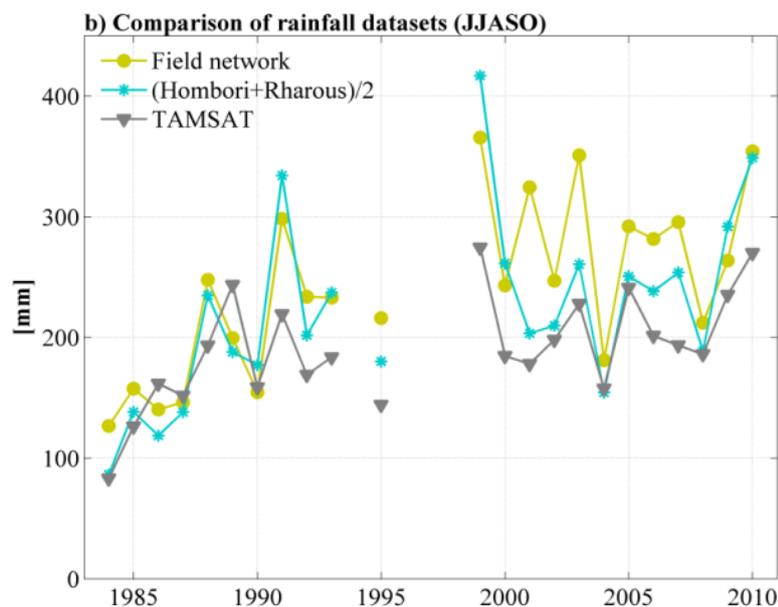
Appendix A:

Estimation of ANPP with the AVHRR GIMMS-3g data is compared to estimation with MODIS NDVI data for the 2000-2010 period. Both datasets are well correlated to the field ANPP data aggregated to the Gourma window. As a result, the time series of ANPP from GIMMS-3g MODIS and field data are very close from one another. Note that, for consistency, regressions are derived for both datasets over the 2000-2010 period, thus for GIMMS-3g the regression differs from the regression used over the whole period.



Appendix B :

Comparison of rainfall data from a network of local gauges, from the mean of two long-term meteorological stations (Hombori and Gourma-Rharous), and estimated with satellite (TAMSAT). The three datasets are consistent in terms of interannual variability and trends. Some discrepancies are found for 2 years between the in situ network and the two other datasets (2001 and 2003), while TAMSAT shows a different interannual variability for 1988, 1989 and 2007 and a less pronounced trend over 1984-2010. The agreement is quite interesting given that rainfall in the Sahel are notoriously spatially heterogeneous and given that the spatial sampling of the three datasets are different: around 15 gauges for the field network (depending on the year), 2 for the Hombori / Gourma-Rharous dataset and spatial average over the Gourma window for TAMSAT.



As a consequence, RUE and residuals computed with the different datasets are fairly close. More specifically, the conclusions drawn with the in situ network data hold true when the other rainfall datasets are used: no trends for RUE or residuals, same differences in the shape of the time series between field and satellite ANP (except for the years 2001 and 2003 cited above). The correlation between the rainfall dataset ranges between 0.62 and 0.72. Yet, the correlations between ANPP and rainfall are higher with rainfall from the in situ network. As a consequence, it seems that simple dataset from either the SYNOP stations or the TAMSAT datasets could be used to infer the general patterns of RUE and residuals over the Sahel, albeit with less precision than with dense network gauge data.

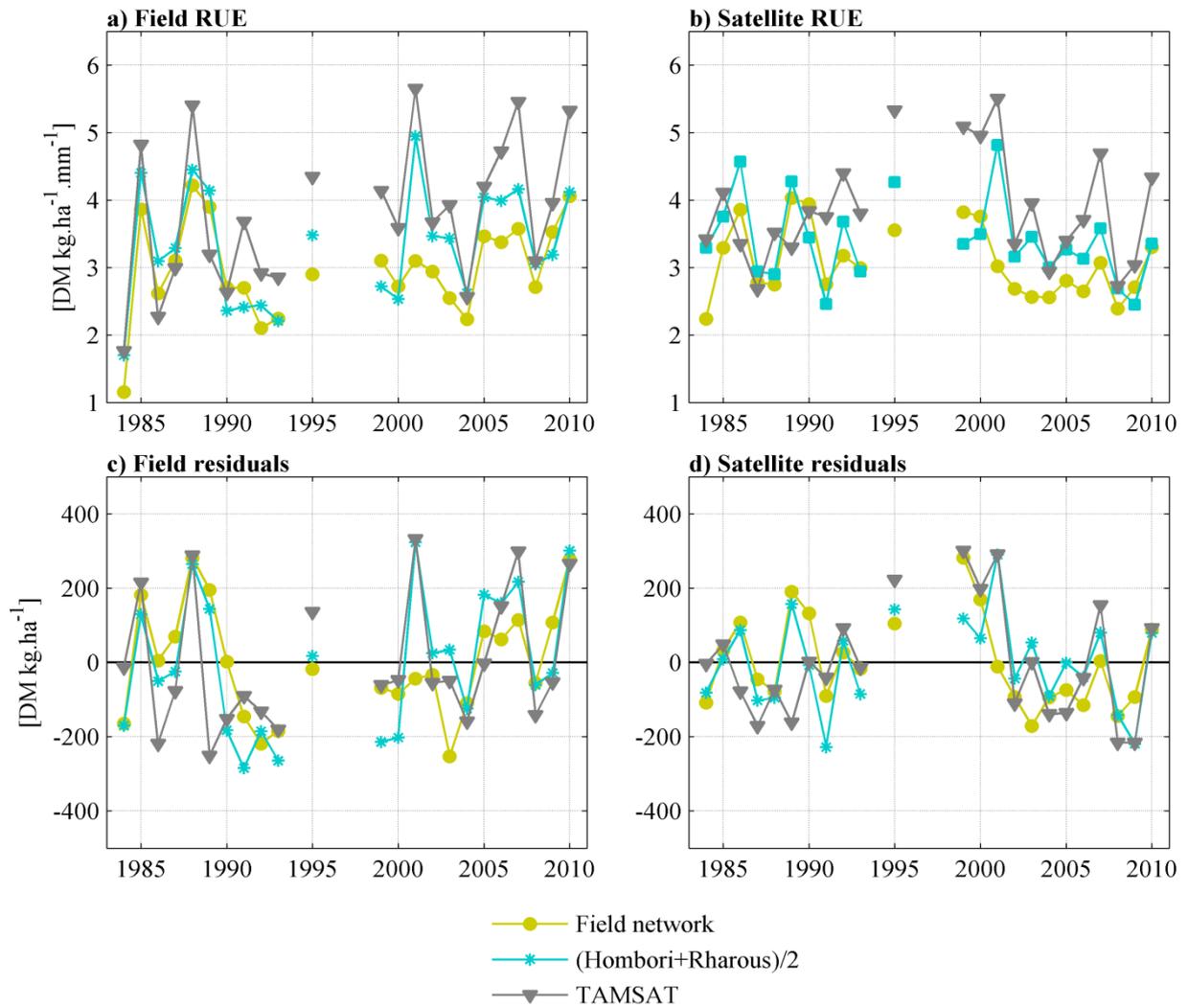


Table: Correlation (linear regression) between ANPP, iNDVI and the 3 rainfall datasets (JJASO sum).

Correlation ANPP_field/rainfall (r^2)		Correlation iNDVI/rainfall (r^2)		Correlation between the rainfall datasets (r^2)	
ANPP_field / TAMSAT	0.66	iNDVI / TAMSAT	0.61	field network / Homb-Rha	0.76
ANPP_field / Homb-Rha	0.63	iNDVI / Homb-Rha	0.75	field network / TAMSAT	0.62
ANPP_field / field network	0.76	iNDVI / field network	0.76	TAMSAT / Homb-Rha	0.72

References

- Amogu O., Descroix L., Yero K. S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J. C., Moussa I. B., Gautier E., Boubkraoui S. & Belleudy P. (2010), "Increasing River Flows in the Sahel?", *Water*, 2(2), p.170-199.
- Anyamba A. & Tucker C. J. (2005), "Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003", *Journal of Arid Environments*, 63(3), p.596-614.
- Bai Y. F., Wu J. G., Xing Q., Pan Q. M., Huang J. H., Yang D. L. & Han X. G. (2008), "Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau", *Ecology*, 89(8), p.2140-2153.
- Brett M. T. (2004), "When is a correlation between non-independent variables "spurious"?", *Oikos*, 105(3), p.647-656.
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougou E., Grippa M. & Tucker C. J. (2014), "Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger)", *Remote Sensing of Environment*, 140(0), p.350-364.
- Diouf A. & Lambin E. F. (2001), "Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal", *Journal of Arid Environments*, 48(2), p.129-148.
- Eklundh L. & Olsson L. (2003), "Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999", *Geophysical Research Letters*, 30(8), p.1430-1433.
- Evans J. & Geerken R. (2004), "Discrimination between climate and human-induced dryland degradation", *Journal of Arid Environments*, 57(4), p.535-554.
- Fensholt R. & Proud S. R. (2012), "Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends - Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series", *Remote Sensing of Environment*, 119, p.131-147.
- Fensholt R. & Rasmussen K. (2011), "Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data", *Remote Sensing of Environment*, 115(2), p.438-451.
- Fensholt R., Rasmussen K., Kaspersen P., Huber S., Horion S. & Swinnen E. (2013), "Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships", *Remote Sensing*, 5(2), p.664-686.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T. T. & Mbow C. (2009), "Evaluation of earth observation based long term vegetation trends - Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data", *Remote Sensing of Environment*, 113(9), p.1886-1898.
- Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L. & Grippa M. (2010), "Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali)", *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), p.309-324.
- Hein L. & de Ridder N. (2006), "Desertification in the Sahel: a reinterpretation", *Global Change Biology*, 12(5), p.751-758.

- Hein L., de Ridder N., Hiernaux P., Leemans R., de Wit A. & Schaepman M. (2011), "Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images", *Journal of Arid Environments*, 75(11), p.1164-1172.
- Herrmann S. M., Anyamba A. & Tucker C. J. (2005), "Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate", *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 15(4), p.394-404.
- Hiernaux P., Diarra L., Trichon V., Mougin E., Soumaguel N. & Baup F. (2009a), "Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali)", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.103-113.
- Hiernaux P. & Gerard B. (1999), "The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity and stability of vegetation: The case of 'brousse tigrée' in the Sahel", *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 20(3), p.147-158.
- Hiernaux P., Mougin E., Diarra L., Soumaguel N., Lavenu F., Tracol Y. & Diawara M. (2009b), "Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.114-127.
- Holm A. M., Cridland S. W. & Roderick M. L. (2003a), "The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia", *Remote Sensing of Environment*, 85(2), p.145-158.
- Holm A. M., Watson I. W., Loneragan W. A. & Adams M. A. (2003b), "Loss of patch-scale heterogeneity on primary productivity and rainfall-use efficiency in Western Australia", *Basic and Applied Ecology*, 4(6), p.569-578.
- Huxman T. E., Smith M. D., Fay P. A., Knapp A. K., Shaw M. R., Loik M. E., Smith S. D., Tissue D. T., Zak J. C., Weltzin J. F., Pockman W. T., Sala O. E., Haddad B. M., Harte J., Koch G. W., Schwinning S., Small E. E. & Williams D. G. (2004), "Convergence across biomes to a common rain-use efficiency", *Nature*, 429(6992), p.651-654.
- Le Houerou H. N. (1984), "Rain Use Efficiency - a Unifying Concept in Arid-Land Ecology", *Journal of Arid Environments*, 7(3), p.213-247.
- Le Houerou H. N. (1989), *The grazing land ecosystems of the African Sahel*, Berlin, Springer.
- Leduc C., Favreau G. & Schroeter P. (2001), "Long-term rise in a sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger", *Journal of Hydrology*, 243(1-2), p.43-54.
- Maidment R., Grimes D., Tarnavsky E., Allan R., Stringer M., Hewison T. & Roebeling R. (in prep.), "Development of the 30-year TAMSAT African Rainfall Time Series And Climatology (TARCAT) Dataset Part II: constructing a temporally homogeneous rainfall dataset".
- Mbow C., Fensholt R., Rasmussen K. & Diop D. (2013), "Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements", *Journal of Arid Environments*, 97(0), p.56-65.
- Miehe S. (2006), "Comment on: Hein,L. 2006: The impacts of grazing and rainfall variability on the dynamics of a Sahelian rangeland. J. Arid Environ. 64(3): 488-504", *Journal of Arid Environments*, 67(1), p.174-176.
- Miehe S., Kluge J., von Wehrden H. & Retzer V. (2010), "Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal", *Journal of Applied Ecology*, 47(3), p.692-700.

- Mougin E., Hiernaux P., Kergoat L., Grippa M., de Rosnay P., Timouk F., Le Dantec V., Demarez V., Lavenu F., Arjounin M., Lebel T., Soumaguel N., Ceschia E., Mougénot B., Baup F., Frappart F., Frison P. L., Gardelle J., Gruhier C., Jarlan L., Mangiarotti S., Sanou B., Tracol Y., Guichard F., Trichon V., Diarra L., Soumare A., Koite M., Dembele F., Lloyd C., Hanan N. P., Damesin C., Delon C., Serca D., Galy-Lacaux C., Seghieri J., Becerra S., Dia H., Gangneron F. & Mazzega P. (2009), "The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.14-33.
- Muldavin E. H., Moore D. I., Collins S. L., Wetherill K. R. & Lightfoot D. C. (2008), "Aboveground net primary production dynamics in a northern Chihuahuan Desert ecosystem", *Oecologia*, 155(1), p.123-132.
- Nicholson S. E., Tucker C. J. & Ba M. B. (1998), "Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), p.815-829.
- Prince S. D., De Colstoun E. B. & Kravitz L. L. (1998), "Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification", *Global Change Biology*, 4(4), p.359-374.
- Prince S. D., Wessels K. J., Tucker C. J. & Nicholson S. E. (2007), "Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation", *Global Change Biology*, 13(7), p.1308-1313.
- Ruppert J. C., Holm A., Mieke S., Muldavin E., Snyman H. A., Wesche K. & Linstadter A. (2012), "Meta-analysis of ANPP and rain-use efficiency confirms indicative value for degradation and supports non-linear response along precipitation gradients in drylands", *Journal of Vegetation Science*, 23(6), p.1035-1050.
- Sala O. E., Parton W. J., Joyce L. A. & Lauenroth W. K. (1988), "Primary Production of the Central Grassland Region of the United-States", *Ecology*, 69(1), p.40-45.
- Savenije H. H. G. (1996), "The runoff coefficient as the key to moisture recycling", *Journal of Hydrology*, 176(1-4), p.219-225.
- Sighomnou D., Descroix L., Genthon P., Mahé G., Bouzou Moussa I., Gautier E., Mamadou I., Vandervaere J. P., Bachir T., Coulibaly B., Rajot J.-L., Malam Issa O., Malam Abdou M., Dessay N., Delaitre E., Faram Maiga O., Diedhiou A., Panthou G., Vishel T., Yacouba H., Karambiri H., Paturel J.-E., Diello P., Mougin E., Kergoat L. & Hiernaux P. (2013), "La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?", *Sécheresse*, 24(1), p.3-13.
- Sjöström M., Zhao M., Archibald S., Arneth A., Cappelaere B., Falk U., de Grandcourt A., Hanan N., Kergoat L., Kutsch W., Merbold L., Mougin E., Nickless A., Nouvellon Y., Scholes R. J., Veenendaal E. M. & Ardö J. (2013), "Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data", *Remote Sensing of Environment*, 131(0), p.275-286.
- Timouk F., Kergoat L., Mougin E., Lloyd C. R., Ceschia E., Cohard J. M., de Rosnay P., Hiernaux P., Demarez V. & Taylor C. M. (2009), "Response of surface energy balance to water regime and vegetation development in a Sahelian landscape", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.178-189.
- Tucker C. J., Pinzon J. E., Brown M. E., Slayback D. A., Pak E. W., Mahoney R., Vermote E. F. & El Saleous N. (2005), "An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data", *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), p.4485-4498.
- Tucker C. J., Vanpraet C. L., Sharman M. J. & Vanittersum G. (1985), "Satellite Remote-Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel - 1980-1984", *Remote Sensing of Environment*, 17(3), p.233-249.

Veron S. R., Paruelo J. M. & Oesterheld M. (2006), "Assessing desertification", *Journal of Arid Environments*, 66(4), p.751-763.

Wessels K. J. (2009), "Comments on 'Proxy global assessment of land degradation' by Bai et al. (2008)", *Soil Use and Management*, 25(1), p.91-92.

Wessels K. J., Prince S. D., Malherbe J., Small J., Frost P. E. & VanZyl D. (2007), "Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa", *Journal of Arid Environments*, 68(2), p.271-297.

3. Principaux résultats et conclusions

3.1. Relation entre ANPP, NDVI et précipitations

L'analyse du RUE et des résidus d'ANPP sur la région du Gourma a été effectuée sur la période 1984-2010 en estimant l'ANPP à partir des données terrain de masse de la strate herbacée (moyenne pondérée des sites échantillonnés, en fonction des proportions surfaciques des trois types de sol principaux) et à partir du NDVI GIMMS-3g (intégré sur la saison de croissance, et moyenné spatialement dans la "fenêtre Gourma"). La comparaison des séries longues de ces deux sources d'observation confirme la pertinence de l'utilisation du NDVI comme estimateur de l'ANPP à l'échelle de plusieurs décennies, et donc pour la détection des changements du couvert végétal dans les régions sahéliennes. Une forte corrélation est mise en évidence entre chacune des trois variables (ANPP terrain, iNDVI et précipitations annuelles), avec des coefficients de corrélation très proches ($r^2 = 0.76$ pour les relations ANPP terrain / précipitations et iNDVI / précipitations ; $r^2 = 0.65$ pour la relation ANPP terrain / iNDVI). La linéarité de la relation entre ANPP (estimée à partir des données terrain ou du iNDVI) et les précipitations n'est pas remise en cause, du moins pour la gamme des précipitations de notre région, et pour les moyennes spatiales que nous avons considérées dans cette étude. L'analyse de la variabilité spatio-temporelle du RUE pour les différents sites de mesure du Gourma fera l'objet d'analyses supplémentaires dans le Chapitre 5.

3.2. RUE et résidus d'ANPP

Les RUE (et résidus) calculés à partir du NDVI montrent des résultats similaires à ceux obtenus avec les données terrain (corrélations avec les précipitations et profils temporels). Nos résultats confirment que le NDVI GIMMS-3g peut être utilisé pour étudier la variabilité temporelle du RUE et des résidus d'ANPP sur une région donnée, c'est-à-dire pour étudier les tendances d'un signal de "second ordre", le premier ordre étant l'influence de la pluie, qui est le premier facteur explicatif de la production dans nos régions.

L'indicateur du RUE donne des résultats comparables à ceux obtenus avec la méthode des résidus, en termes de variabilité interannuelle et de tendances temporelles. Pour les données terrain cependant une relation significative ($p=0.1$) demeure entre le RUE et les précipitations, qui est due aux artefacts méthodologiques uniquement (relation ANPP / pluie ne passant pas par l'origine). Par précaution nous recommandons donc que la méthode des résidus soit préférée au RUE, ou du moins qu'elle soit utilisée comme moyen de vérification de la validité de l'utilisation du RUE.

Aucune tendance significative n'est mise en évidence dans les séries temporelles de RUE et de résidus d'ANPP, que cela soit à partir des données terrain ou des observations satellitaires : cela signifie que nous ne détectons pas de dégradation du couvert végétal à l'échelle du Gourma et que le reverdissement est expliqué par la reprise des précipitations sur la période. Cela démontre la résilience

des écosystèmes sahéliens de cette région pastorale pendant et après les sécheresses extrêmes de 1983-84. Nos résultats sont en accord avec ceux de Herrmann *et al.* (2005) et de Prince *et al.* (2007), qui, à l'échelle du Sahel, ne détectent pas de dégradation généralisée du couvert végétal. Par rapport à ces études, nous apportons les observations de terrain, qui permettent de valider les approches spatiales.

La variabilité interannuelle du RUE (des résidus) est en revanche plus difficile à expliquer. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de lien particulier entre les années sèches et les humides, ni avec les variations de la composition floristique, sur laquelle nous reviendrons dans le Chapitre 5.

3.3. Stabilité du RUE et paradoxe sahélien : en contradiction ?

L'augmentation des coefficients de ruissellement et des phénomènes d'érosion qui a été observée sur plusieurs zones sahéliennes et sur la même période de temps questionne les conclusions précédemment apportées (résilience de la végétation du Gourma sur la période). Nous avons analysé séparément l'ANPP (terrain et satellite) et le RUE (les résidus) sur deux types de surface distincts : une zone de sols superficiels (sols sur lesquels sont observés la concentration du ruissellement et l'augmentation de l'érosion), et une zone de sols profonds sableux.

Les RUE (et résidus) calculés à partir des données satellitaires extraites sur les sols superficiels montrent une tendance négative, faiblement significative, suggérant que des changements non liés aux précipitations ont bien eu lieu sur cette portion du paysage. Les RUE (et résidus) calculés à partir des données de terrain sur deux sites particuliers (sur sols superficiels toujours) montrent que des tendances très contrastées sont observables sur ce type de surface : certains sites ont connu une augmentation de l'érosion accompagnée d'une diminution du couvert végétal, alors que d'autres sites n'ont pas, ou peu, été affectés, en terme de production végétale, ou tout du moins ont récupéré rapidement des capacités de production significatives. Le signal observé sur les sols sableux profonds démontre en revanche une forte résilience du couvert végétal malgré les événements climatiques extrêmes : les RUE et résidus (satellite et terrain) sont très stables dans le temps.

Ces résultats montrent que dans une région clairement caractérisée par une tendance à la reprise du couvert végétal, des tendances de signes opposés peuvent toutefois y être également observées. Ainsi, le désaccord apparent entre deux indicateurs (à savoir le RUE et les coefficients de ruissellement) utilisés pour caractériser une dégradation des écosystèmes peut être en partie expliqué par la différence d'échelles des phénomènes observés. Si le signal de reverdissement est dominant à l'échelle régionale, il peut masquer des changements ayant lieu à une échelle inférieure à celle des pixels GIMMS-3g, et ne concernant qu'une portion du paysage.

Bien que notre étude porte uniquement sur la région du Gourma, des phénomènes similaires peuvent vraisemblablement être détectés dans d'autres régions arides ou semi-arides, si tant est que des données à une résolution spatiale adéquate soient disponibles. Les questions d'échelle (spatiale et

temporelle) sont donc encore une fois cruciales dans le diagnostic de tendances et pour la qualification d'état de santé des écosystèmes.

L'analyse du RUE à l'échelle de la région du Gourma est cohérente avec les tendances au reverdissement qui sont principalement dues à une reprise des précipitations sur la période, comme le montre l'absence de tendances significatives dans les séries temporelles de RUE (ou résidus) terrain et satellite. Bien que les résultats obtenus avec le RUE et la méthode des résidus soient similaires et cohérents dans notre étude, il est recommandé de préférer la méthode des résidus d'ANPP au RUE, ou tout au moins de vérifier la validité des hypothèses (i.e. l'absence de corrélation résiduelle avec les précipitations) avant d'analyser les tendances de RUE au cours du temps.

La résilience de la végétation sahélienne est mise en évidence sur la région pastorale du Gourma, alors que sur la même période une augmentation des coefficients de ruissellement et des phénomènes d'érosion a pu être détectée. Bien qu'apparemment en contradiction avec le reverdissement du Gourma, ces phénomènes de dégradation sont en réalité observés sur une petite portion du paysage dont les changements peuvent être masqués par les tendances régionales au reverdissement. L'utilisation de données satellitaires à haute résolution spatiale est recommandée pour pouvoir détecter des phénomènes de dégradation ayant lieu à une échelle inférieure à celle des pixels du jeu de NDVI GIMMS3g. De manière plus générale, ces résultats impliquent que des phénomènes totalement opposés en termes d'impact sur la croissance des plantes peuvent avoir lieu dans la même région, leur visibilité dépendant de l'échelle adoptée.

Chapitre 5. Peut-on expliquer la variabilité du RUE à l'échelle locale (Gourma)?

1. Contexte et objectifs

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la variabilité spatio-temporelle de la production de la strate herbacée et du RUE (des résidus), à l'échelle des sites, sur la région du Gourma. Pour rappel, pour chaque site les mesures sont effectuées le long d'une ligne de 1 km par une méthode d'échantillonnage stratifiée et destructive qui prend en compte l'hétérogénéité du paysage (voir le Chapitre 3, section 2.2.1. de l'article, pour la description détaillée de la méthode d'échantillonnage). Dorénavant, le terme "site" fera référence à ces lignes de mesures kilométriques, et non à la région du Gourma dans son ensemble. Nous nous concentrerons sur les sols sableux uniquement car ce sont ceux qui répondent le plus directement aux précipitations, la production dans les dépressions argileuses et sur les sols superficiels étant fortement contrainte par la redistribution des pluies (ruissellement). Nous allons ainsi chercher à distinguer des particularités dans la production des sites sableux échantillonnés dans la région du Gourma, sites qui sont répartis le long d'un gradient éco-climatique caractéristique des régions sahéliennes.

La variabilité spatio-temporelle de la productivité est une question souvent abordée dans la littérature. Premièrement, la nature de la relation entre ANPP et précipitations est débattue : peut-on faire l'hypothèse d'une relation linéaire entre ces deux variables (Sala *et al.* 1988, Prince *et al.* 1998, Diouf & Lambin 2001, Prince *et al.* 2007, Bai *et al.* 2008, Muldavin *et al.* 2008) ? Ou au contraire, la relation ANPP / précipitations est-elle de nature unimodale (Huxman *et al.* 2004, Hein & de Ridder 2006, Yang *et al.* 2008, Hein *et al.* 2011, Ruppert *et al.* 2012) ? Nous avons vu dans le Chapitre 4 que pour la moyenne de tous les sites du Gourma, c'est-à-dire en ne considérant que la variabilité interannuelle de la production sur l'ensemble de la région, l'hypothèse d'une régression linéaire est vérifiée. Mais qu'en est-il lorsque l'on considère également la variabilité spatiale de la productivité ?

Deuxièmement, nous avons vu (également dans le Chapitre 4) que la pente de la relation ANPP / précipitations, appelée PMR (Veron *et al.* 2005), est un indicateur de la sensibilité de la végétation à la quantité de pluie reçue. Par conséquent, des variations de la PMR dans l'espace indiqueront des réponses différentes de la végétation aux précipitations selon les sites (Veron *et al.* 2006, Begue *et al.*

2011). Nous nous intéresserons à cet indicateur, pour les sites sableux du Gourma. En particulier, nous chercherons l'existence de différences dans la PMR selon le gradient des précipitations (en moyenne climatique). Dans leur étude, Huxman *et al.* (2004) ont par exemple montré que la PMR était plus forte pour les sites situés au début de leur gradient de précipitations, et diminuait considérablement pour les valeurs fortes de précipitations.

La variabilité spatio-temporelle du RUE (ou des résidus) est également un point qui est souvent étudié dans la littérature, et notamment en ce qui concerne la relation entre RUE (ou résidus) et les précipitations (Ruppert *et al.* 2012). Nous examinerons la nature de cette relation pour les sites sableux du Gourma : quelles en sont les caractéristiques ? Enfin, nous chercherons à interpréter la variabilité spatiale et temporelle du RUE en fonction de la distribution intra-saisonnière des précipitations et des changements de composition floristique. Ces deux facteurs sont en effet souvent désignés comme étant d'importance dans la variabilité spatio-temporelle de la production et du RUE (des résidus).

L'analyse a été systématiquement effectuée pour le RUE et les résidus d'ANPP. Pour comparaison avec la littérature qui questionne la relation RUE/précipitations à l'échelle du site, nous montrerons les résultats obtenus avec le RUE. Pour l'étude de la variabilité interannuelle en fonction de la composition floristique, nous montrerons ceux obtenus avec la méthode des résidus. Mais avant toute chose nous reviendrons sur les données terrain, et plus particulièrement sur les incertitudes associées aux mesures de masse de la strate herbacée et à l'estimation de l'ANPP annuelle qui est effectuée à partir de ces dernières. Nous analyserons également la relation iNDVI / ANPP à l'échelle locale en utilisant le NDVI GIMMS-3g et le NDVI MODIS (MOD13Q1). Peut-on utiliser le NDVI GIMMS-3g à l'échelle locale, pour les sites sableux et spatialement homogènes du Gourma ?

Le plan qui sera suivi dans ce chapitre est détaillé dans la Figure 34.

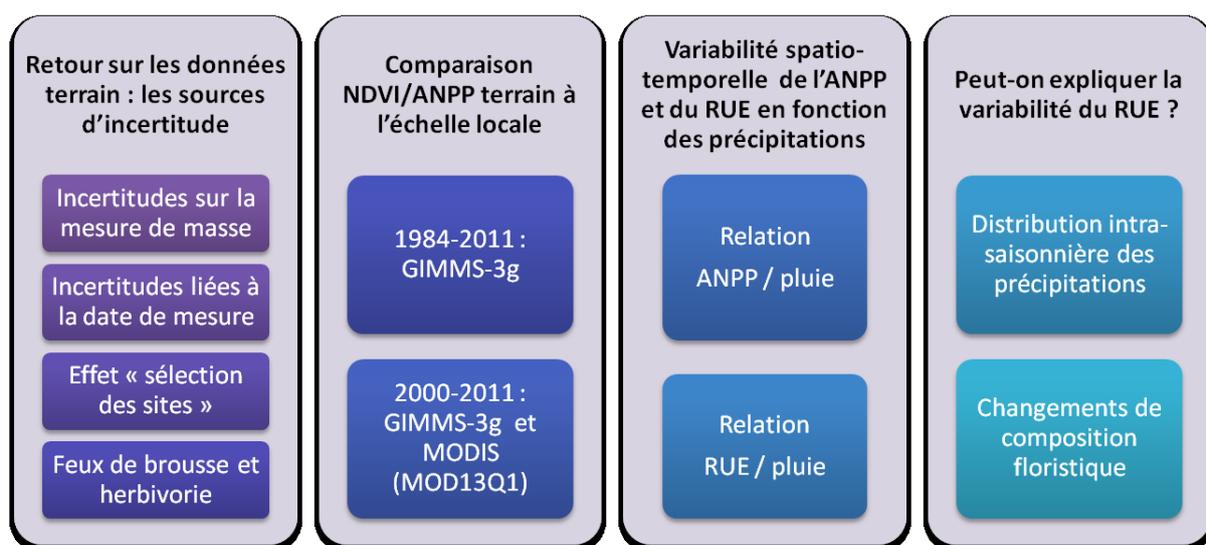


Figure 34. Schématisation des différents points abordés dans ce chapitre.

2. Retour sur les données terrain : les sources d'incertitudes

La collecte de mesures de végétation sur un réseau d'observation de l'ampleur de celui du Gourma (en nombre de sites et en kilomètres parcourus pour couvrir l'ensemble des sites, voir Tableau 6), dont l'accès peut en plus être rendu particulièrement difficile certaines années, implique que le nombre de sites observés chaque année a varié au cours du temps, ainsi que le nombre de mesures effectuées par site et par année (certaines années n'étant pas du tout mesurées), ou encore que différents opérateurs ont effectué les mesures tout le long de la période. Autant de facteurs qui sont source de variabilité dans la "qualité" des données collectées. L'analyse de ces données acquises sur 27 ans et sur plus de 30 sites demande donc un important travail préliminaire que nous n'avons pas détaillé jusqu'ici mais qui a été effectué dès les premières analyses.

Ce travail a cependant été affiné tout le long de ces travaux de thèse. Les légères différences de corrélation entre ANPP et NDVI trouvées entre les chapitres 3 et 4 pour la région du Gourma ($r^2 = 0.59$ pour le Chapitre 3, $r^2 = 0.65$ pour le Chapitre 4) s'expliquent ainsi par trois différences :

- les périodes considérées (de 1984 à 2011 pour le Chapitre 3, de 1984 à 2010 pour le Chapitre 4 car nous ne disposons pas de données de pluie en 2011) ;
- l'intégration temporelle du NDVI (moyenne Août-Septembre dans le Chapitre 3, intégrale sur la saison de croissance pour le Chapitre 4) ;
- les tris et corrections additionnels apportés aux données de terrain pour les chapitres 4 et 5.

Pour le chapitre 4 par exemple, les mesures des sites échantillonnés sur une petite partie de la période seulement n'ont pas été considérées. De plus, certaines données ont été corrigées. Celles de 1990 sur les sites du Nord ont été sous-traitées à un partenaire, pour cause de guerre civile dans le secteur, et montrent des valeurs aberrantes de productivité (elles ont été supprimées). Celles de 1995 ont été corrigées, les mesures ayant été effectuées trop tardivement dans la saison.

Nous allons expliciter maintenant plus en détail les incertitudes liées aux mesures de masse de la strate herbacée ainsi que celles qui impactent l'estimation de l'ANPP annuelle faite à partir de ces mesures.

Type de sol (surface)		Sableux, sablo-limoneux		Argileux, limoneux	Sols superficiels
Pression de pâture		Faible	Forte	Forte	Faible
Moyenne des précipitations annuelles (mm)	150-250	1 ; 3 ; 5	4 ; 6	2 ; 9	8
	250-350	10 ; 12	14 ; 32	15	16 ; 40
	350-450	17 ; 18 ; 23	19 ; 31 ; 41	20 ; 21	22
	450-550	25 ; 30 ; 38	37	28	

Tableau 6. Classement des sites par type de sols. Sont inclus dans le tableau les sites considérés pour ce chapitre. Les sites 37 et 38 n'ont pas été inclus dans les précédentes études (Chapitre 3 et 4) car localisés en dehors de la fenêtre Gourma définie pour le satellite. Les sites 3 et 23 n'ont pas été inclus dans le Chapitre 4 (période trop courte). Adapté de Hiernaux *et al.* (2009c).

2.1. Incertitudes sur l'estimation de la masse à chaque ligne

La mesure de masse à l'échelle de la ligne de 1 km est soumise à différentes erreurs systématiques ou aléatoires, dont certaines sont dépendantes de l'opérateur. Dans le cas du Gourma, un suivi des sites a été assuré par les mêmes observateurs sur une très grande partie de la période, ce qui limite ce genre d'erreurs mais n'assure pas que le jeu de données en soit totalement exempté. Ainsi, la stratification d'un site est définie chaque année par l'observateur en fonction de la densité apparente de la végétation. Une mauvaise évaluation des faciès ou des strates peut alors induire un biais dans l'estimation de la masse à l'échelle du site (surestimation ou sous-estimation de la production). La sélection des plots de 1x1m dans lesquels la végétation verte est coupée puis prélevée doit ensuite se faire de façon aléatoire parmi les strates prédéfinies. Une fois la végétation verte prélevée, elle est séchée puis pesée. Certaines erreurs de mesure peuvent alors être dues à un mauvais séchage, ou à des erreurs dans la pesée des sacs. Une description plus complète de ces sources d'erreur peut être trouvée dans Hiernaux *et al.* (2009c). Il est difficile de quantifier l'impact de ces différentes erreurs sur la mesure, toutefois, de manière générale la méthode d'échantillonnage a été pensée pour les minimiser au maximum.

De plus, il est intéressant de noter que ces incertitudes sont très fortement réduites lorsque l'on procède à une moyenne spatiale des données disponibles sur tous les sites, méthode que nous avons adoptée pendant tous ces travaux de thèse (voir chapitres 3 et 4) à l'exception de ce chapitre qui s'intéresse spécifiquement à l'échelle locale.

2.2. Incertitudes liées à la date de mesure

2.2.1. Le maximum de masse comme estimateur de l'ANPP

Dans le cas d'un couvert majoritairement constitué d'herbacées annuelles poussant lors d'une saison courte, le maximum de masse est considéré comme étant un bon estimateur de l'ANPP. Certaines années, pour certains sites, la distribution intra-saisonnière des pluies induit une distribution de la production de nature bimodale (par exemple en 1984). Dans ce cas, le maximum de masse sera un mauvais estimateur de la production annuelle. Nous avons alors estimé la production annuelle en effectuant les incréments des masses correspondant aux 2 pics de croissance principaux. Cela revient à additionner les incréments positifs de masse.

Dans les régions sahéliennes, le pic de croissance de la végétation est très court et n'intervient pas forcément à la même date chaque année. Une date de passage sur le site trop précoce ou trop tardive dans la saison peut alors engendrer une importante erreur dans l'estimation de la production annuelle (Figure 35). Sur certains sites, plusieurs mesures sont faites chaque année et nous disposons donc d'une bonne estimation du maximum de masse. Pour d'autres sites, ou d'autres années, le nombre de passages sur le site a été limité (ne fournissant parfois qu'une mesure annuelle), et par conséquent

l'estimation de la production annuelle peut être faussée car basée sur une masse significativement éloignée du maximum de masse réel. Nous avons cherché à minimiser cet impact en identifiant les données considérées acquises trop tôt ou trop tard dans la saison. Certaines données ont alors été éliminées du jeu de données (par exemple les mesures prélevées en juin, ou en décembre comme pour l'année 1994, ce qui revient à écarter 1994), tandis que d'autres ont été corrigées pour fournir une estimation plus proche du maximum de masse réel (voir plus loin).

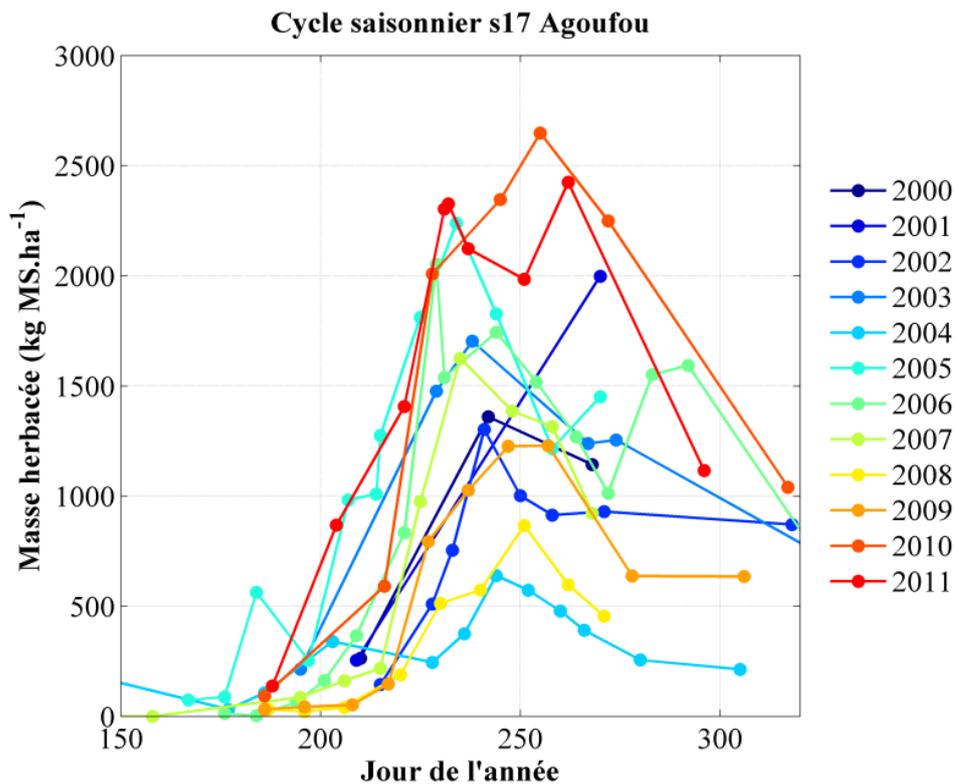


Figure 35. Illustration de la variabilité du pic de croissance rapide de la végétation herbacée : cycle saisonnier de masse pour le site d'Agoufou (s17), entre les années 2000 et 2011.

2.2.2. Correction de la variabilité dans la date de mesure du maximum de masse

La Figure 36 montre la variabilité des dates de mesure correspondant aux maxima de masse annuels, pour tous les sites du Gourma (en abscisse le jour de l'année, en ordonnée le numéro de site). Le nombre de mesures disponibles pour chaque année est indiqué par la taille des cercles, chaque cercle représentant une année. Une donnée située au jour de l'année 250 et représentée par une taille de cercle correspondant à $n=5$ signifie donc que pour cette année-là (non précisée sur le graphe), la masse maximale a été mesurée au jour 250 (à la mi-septembre), et que 5 mesures étaient disponibles, cette année, pour ce site. La Figure 37 montre l'état de la base de données après ce premier travail de sélection des données, pour les sites sableux du Gourma uniquement.

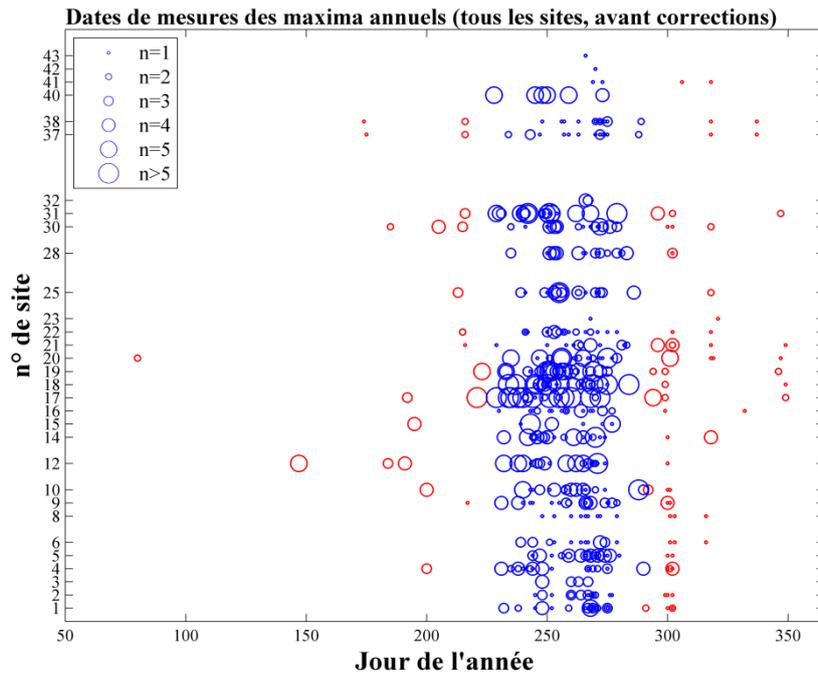


Figure 36. Représentation de l'échantillonnage des mesures de masse de la strate herbacée, pour tous les sites du Gourma, entre 1984 et 2010. Le numéro du site est indiqué en ordonnée en fonction du jour de l'année. Chaque cercle représente une année de mesure et est positionné le long des abscisses selon la date où a été mesuré le maximum de masse cette année-là. La taille du cercle représente le nombre de mesures disponibles (nombre de passages sur le site) parmi lesquelles est sélectionné le maximum de masse. Les données représentées en rouge ont été collectées avant le 15 Août ou après le 20 Octobre et l'ANPP est donc potentiellement sous-estimée.

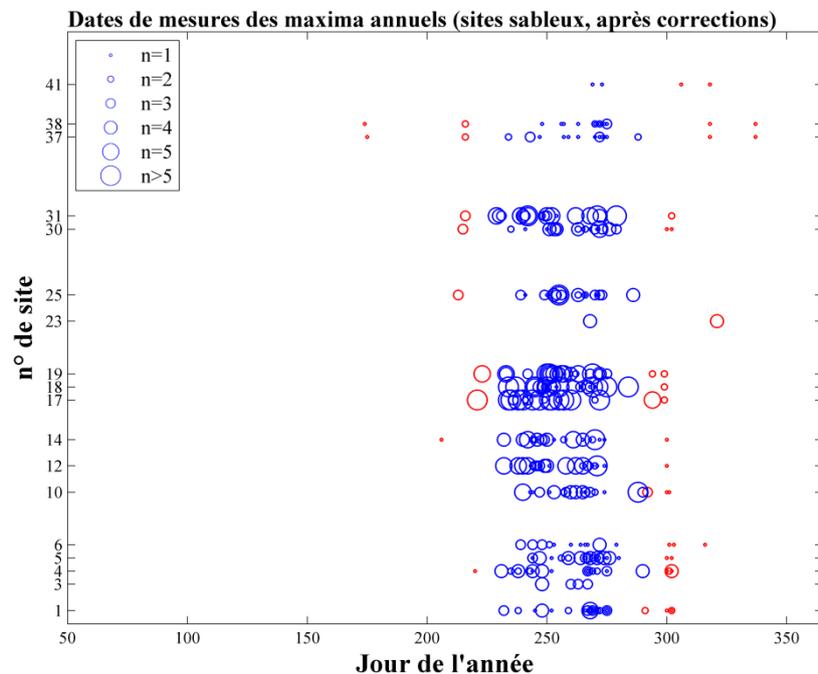


Figure 37. Représentation de l'échantillonnage entre 1984 et 2010, pour les sites sableux du Gourma uniquement, après quelques corrections préliminaires (élimination de valeurs aberrantes). La couleur rouge indique les valeurs précoces ou tardives, qui ont ensuite été vérifiées et éventuellement corrigées (voir le texte).

Nous avons ensuite vérifié manuellement et éventuellement corrigé les données considérées comme trop précoces (avant le 15 Août, jour de l'année 225) ou trop tardives (après le 20 octobre, jour de l'année 290). Pour cela, nous avons estimé la vitesse de disparition des herbacées, pour chaque site sableux, en nous basant sur l'indicateur MODIS STI, qui est le ratio des bandes MODIS 6 et 7. Ces résultats sont issus du travail de fin d'études de Damien Jacques (Jacques *et al.* in prep.). Nous avons considéré que le maximum de masse avait lieu au 10 septembre et que le couvert disparaissait en moyenne à une vitesse de 17 % par mois de part et d'autre de cette date de pic de croissance rapide (Figure 38), chiffre moyen obtenu pour l'ensemble des sites sableux par la méthode de Jacques *et al.* (in prep.). Pour les mesures concernées, nous avons donc rajouté de la masse à la valeur du maximum annuel en fonction de ce taux de disparition et du nombre de jours d'écart par rapport au 10 Septembre. Ces corrections ont surtout impacté l'année 1995 pour laquelle toutes les mesures étaient particulièrement tardives. Le détail des séries temporelles obtenues pour chaque site (données brutes de masse et maxima retenus, soit l'ANPP "corrigée") peut être trouvé en ANNEXE 6.

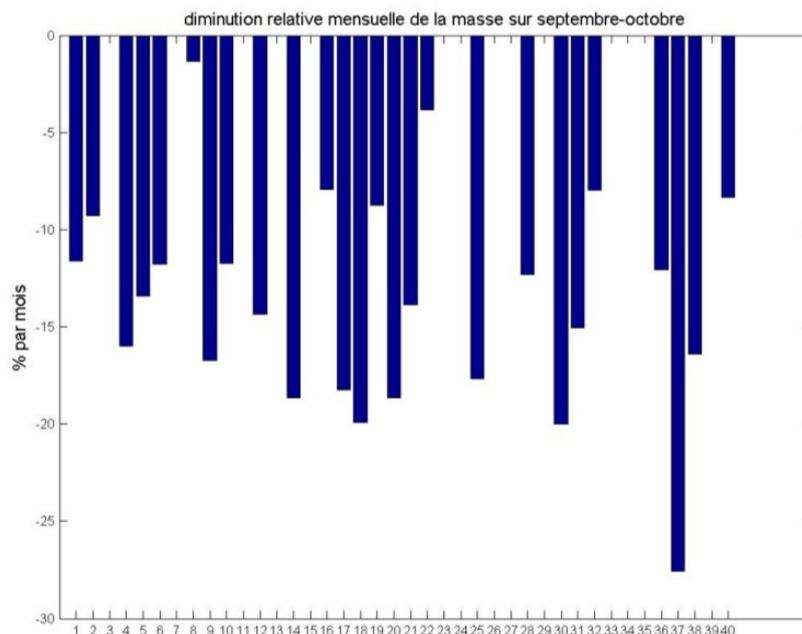


Figure 38. Estimation de la vitesse de disparition de la masse herbacée sèche à l'aide de l'indice STI de MODIS, sur 2000-2010, pour les sites sableux du Gourma. Une baisse moyenne de 20% par mois, typique des sites sableux, se traduit par un ajout de 17% quand on mesure la masse un mois après la date de maximum de masse.

2.3. Incertitudes liées à la "sélection" des sites

Au cours du temps, le réseau des sites de végétation s'est densifié (notamment avec le démarrage du S.O. AMMA-CATCH) tandis que certains sites ont été abandonnés (comme par exemple le site 15 qui a été inondé de manière permanente dès 1995). Les sites échantillonnés ne sont donc pas systématiquement les mêmes chaque année. Nous nommerons cette source d'incertitude "l'effet sélection des sites". Une méthode pour évaluer l'impact de cette incertitude sur l'estimation de la masse à l'échelle du Gourma est d'effectuer la moyenne des latitudes correspondant à chaque site, pour

chaque année. En effet, la production dans les régions sahéliennes est fortement corrélée à la latitude, les sites du nord ayant une production plus faible en moyenne que les sites du sud. La mise en évidence de variations conséquentes dans la latitude moyenne des sites du réseau, et plus précisément l'existence d'une tendance significative de cette latitude moyenne au cours du temps, peut ainsi révéler un biais lié aux variations intrinsèques du réseau d'observation.

Pour visualiser cet effet, nous avons calculé les moyennes des latitudes des sites, d'abord regroupés en fonction des trois types de sol principaux (Figure 39a), puis nous avons calculé la moyenne pondérée de ces latitudes selon les types de sol, en utilisant les mêmes coefficients de pondération que dans les chapitres 3 et 4 (Figure 39b). Nous avons appliqué la même méthode en utilisant l'ANPP moyenne de chaque site sur toute la période à la place des latitudes (Figure 39c et d). Ceci nous permet de visualiser l'effet "sélection des sites" au cours du temps, qui est surtout visible entre les années 2000 et 2005, c'est-à-dire lors de la mise en place du réseau AMMA-CATCH.

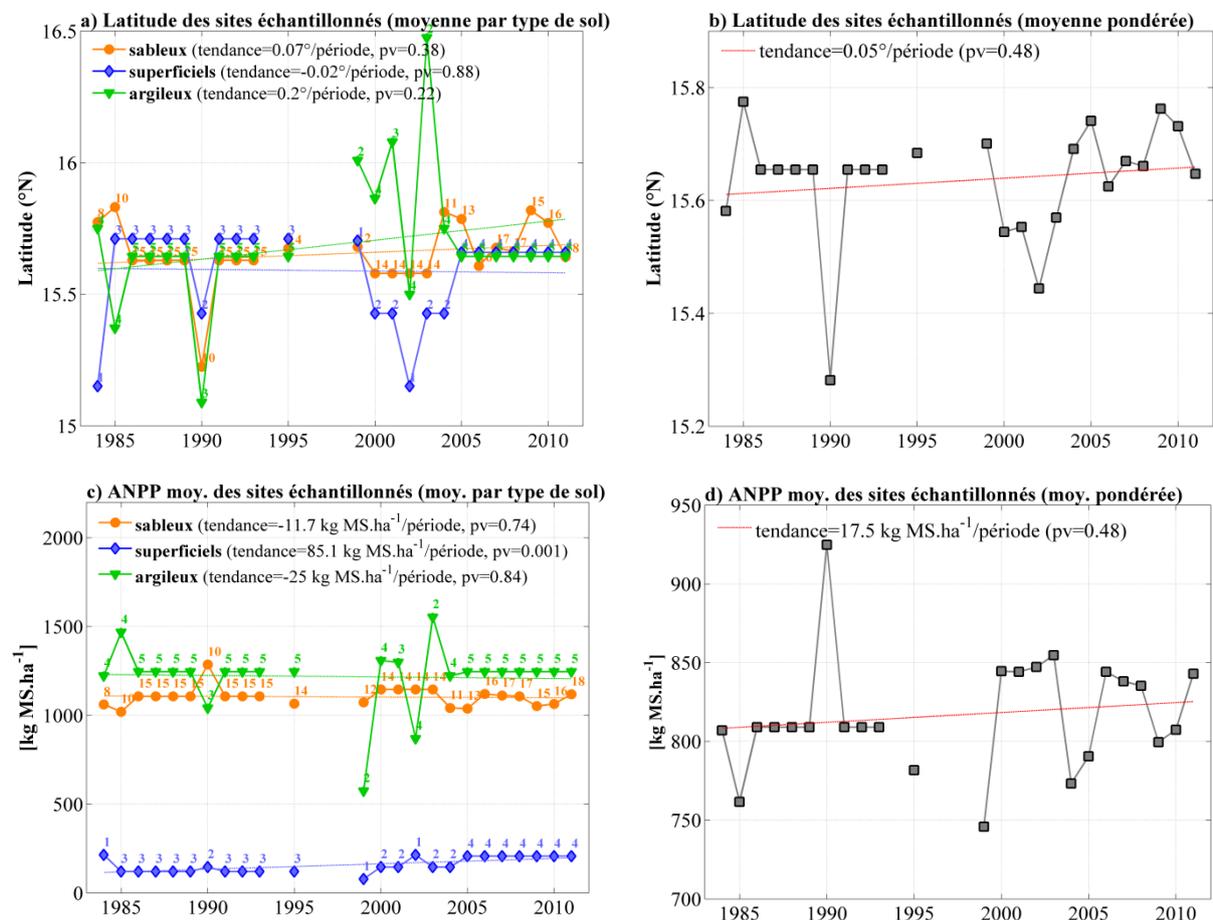


Figure 39. Effet de "sélection des sites" sur les latitudes (a et b) et sur l'ANPP moyenne des sites (c et d). Le nombre de sites où des données sont disponibles pour chaque année est indiqué en haut de chaque point (figures a et c). Notez que les échelles de l'axe des ordonnées sont très resserrées sur les figures b et d.

Toutefois, aucune tendance significative n'apparaît sur l'ensemble de la période, ni pour le critère "latitude" ni pour le critère "ANPP moyenne", ce qui nous permet de considérer que l'effet de sélection

des sites n'est pas un paramètre qui fausse de manière significative nos estimations de l'évolution de la production à l'échelle du Gourma. La seule exception réside dans les sites sur sols superficiels, qui sont peu nombreux, et pour lesquels une tendance significative est observée avec le paramètre "ANPP moyenne". Toutefois, cette tendance est uniquement due à la très forte masse mesurée en 2010 sur le site 40 (voir Chapitre 3), un site ajouté en 2005 et qui n'a pas été retenu dans le Chapitre 4 pour cette raison.

2.4. Incertitudes liées aux feux de brousse et à l'herbivorie

D'autres facteurs peuvent impacter la mesure de masse sur pied, et donc l'estimation de l'ANPP annuelle. Les feux de brousse peuvent par exemple induire une forte sous-estimation de la production, mais ils sont généralement aisément détectables. Les données altérées par ce type d'erreur n'ont pas été considérées.

En revanche, l'impact de l'herbivorie et de la pression de pâture en particulier est plus difficile à estimer, alors que selon les sites et les régions elle est loin d'être négligeable (Miehe *et al.* 2010). Le prélèvement fourrager durant la saison de croissance impacte clairement les mesures de masse sur pied, mais son impact sur la productivité du site reste discuté. Des mécanismes de rétroaction positives peuvent stimuler la production du site, alors qu'une pression dépassant un certain seuil peut la réduire (Hiernaux *et al.* 2009c). Dans tous les cas, la pression de pâture constitue une incertitude sur la mesure de masse, car elle est difficile à quantifier, et car son évolution au cours du temps peut également impacter la variabilité interannuelle de la masse mesurée sur un site donné. Par exemple, suite à la sécheresse des années 1980 le bétail a été décimé ou vendu, ce qui a sans doute induit une diminution significative de la pression de pâture dans les années suivantes, pour revenir aujourd'hui à une pression équivalente à celle d'avant la sécheresse. De plus, une forte pression de pâture peut modifier la relation iNDVI/masse. L'estimation de production par le NDVI se fait en effet via une intégration dans le temps, alors que l'estimation de la production sur le terrain se fait à partir d'une mesure ponctuelle.

3. Relation iNDVI/ANPP à l'échelle du site

A l'échelle locale, la relation iNDVI/ANPP (terrain) est contrainte par la grande taille des pixels GIMMS-3g ainsi que par l'hétérogénéité du paysage. Nous avons étudié la relation iNDVI/ANPP à l'échelle locale pour des sites jugés globalement homogènes à l'échelle du pixel GIMMS-3g (c'est-à-dire pour les grands ensembles sableux), et nous avons comparé ces résultats avec ceux obtenus en utilisant le NDVI MODIS (MOD13Q1) qui a une résolution spatiale kilométrique. Si, sur la période commune, GIMMS-3g et MODIS coïncident, cela signifie que l'on peut raisonnablement utiliser GIMMS-3g sur toute la période. Les sites sur lesquels GIMMS-3g et MODIS sont différents ne font pas l'objet d'analyse à partir de GIMMS-3g.

Pour chaque site, le NDVI a été extrait sur le pixel contenant les coordonnées du site, et intégré sur la saison de croissance (de juin à octobre). Nous avons également vérifié la cohérence des profils temporels par rapport aux 8 pixels voisins. Nous avons ensuite regroupé les sites sableux du Gourma en cinq groupes (Figure 40), en fonction de la localisation géographique des sites (le groupe 1 correspondant aux sites les plus au nord, et les numéros suivants suivant le gradient nord-sud), et nous avons calculé les régression linéaires entre iNDVI et ANPP (terrain) pour chaque groupe (Figure 41).

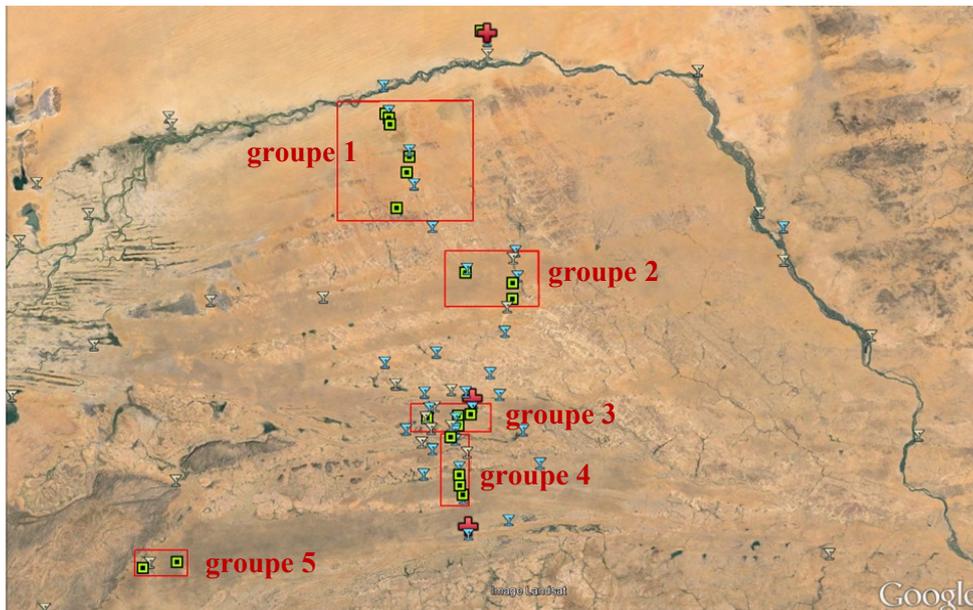


Figure 40. Localisation des sites de mesure de végétation du Gourma (image *Google Earth*).

Les résultats montrent une corrélation globalement bonne pour les 4 premiers groupes sur la période 1984-2011 ($r^2 = 0.78, 0.51, 0.59$ et 0.49 , voir Figure 41a), mais un fort désaccord pour le dernier groupe composé uniquement des sites du Séno (sites 37 et 38). Les profils temporels du NDVI sur ces deux sites montrent une tendance très forte au reverdissement, alors que les estimations terrain d'ANPP montrent une diminution significative du couvert herbacé (voir ANNEXE 6 pour le profil des données terrain par site).

Sur le Séno cependant, nous ne disposons que d'une mesure de masse par année, ces deux sites étant très éloignés des autres et particulièrement du super-site d'AMMA-Catch. La fiabilité des données terrain dans le Séno est donc significativement réduite, de par la difficulté de capter le pic de croissance de manière fiable avec une seule mesure annuelle. La diminution de la production montrée par les données terrain pourrait s'expliquer par des changements dans la pression de pâture au cours du temps, ou par des changements de la composition floristique, ou encore dans la phénologie de la végétation. Cela signifierait que la mesure de masse a été progressivement de plus en plus éloignée du maximum réel de production du site, ou bien que des changements seraient apparus dans la relation iNDVI/ANPP. Des études complémentaires portant sur l'évolution de la pression de pâture, de l'occupation du sol ou de la composition floristique peuvent être envisagées, même si nous n'avons

pour l'instant pas été en mesure de trouver une explication claire à cette divergence entre les estimations satellitaires et terrain de l'ANPP. Toutefois, il est important de rappeler qu'un tel désaccord n'a été observé que sur ces deux sites marginaux uniquement.

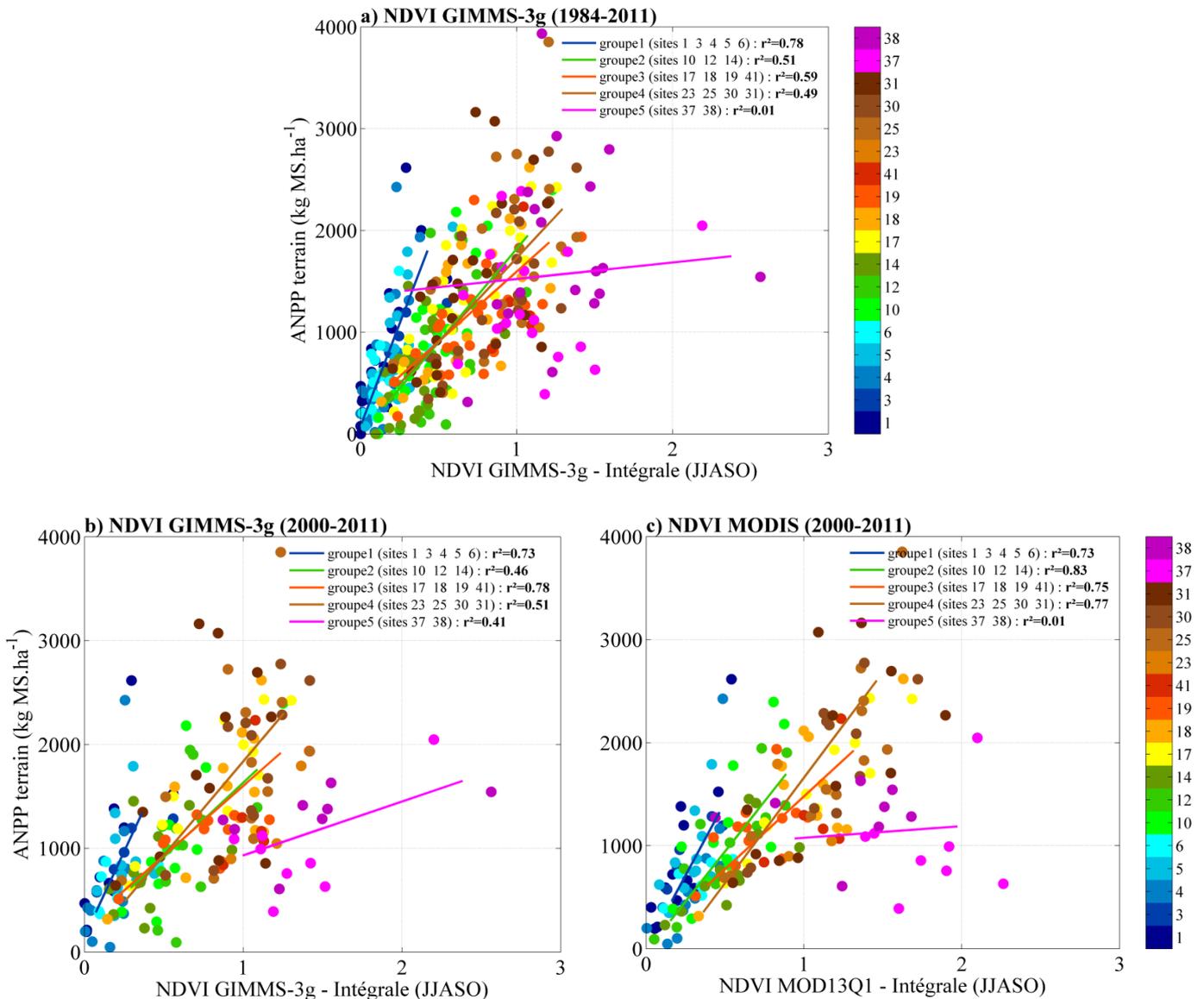


Figure 41. Corrélation iNDVI/ANPP (terrain) pour les sites sableux regroupés en 5 groupes, selon leur localisation géographique, pour a) le NDVI GIMMS-3g sur 1984-2011, b) le NDVI GIMMS-3g sur 2000-2011 et c) le NDVI MODIS sur 2000-2011.

Deuxièmement, ces corrélations par groupe montrent une différence de pente dans la corrélation iNDVI/ANPP en fonction du gradient nord-sud : les sites du nord (groupe 1) présentent une pente qui est plus forte que pour les groupes de sites situés plus au sud. Des facteurs tels que l'arrière plan sol, la couverture nuageuse, ou des différences dans l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en masse pourraient expliquer en partie ces différences de pente entre les sites, mais cela reste à éclaircir. Cet effet est également visible sur la période 2000-2011 avec le NDVI GIMMS-3g mais aussi avec le NDVI MODIS (Figure 41 b et c), ce qui montre la cohérence du NDVI GIMMS-3g avec des données

de plus haute résolution spatiale, et donc témoigne de la validité de son utilisation sur de longues périodes.

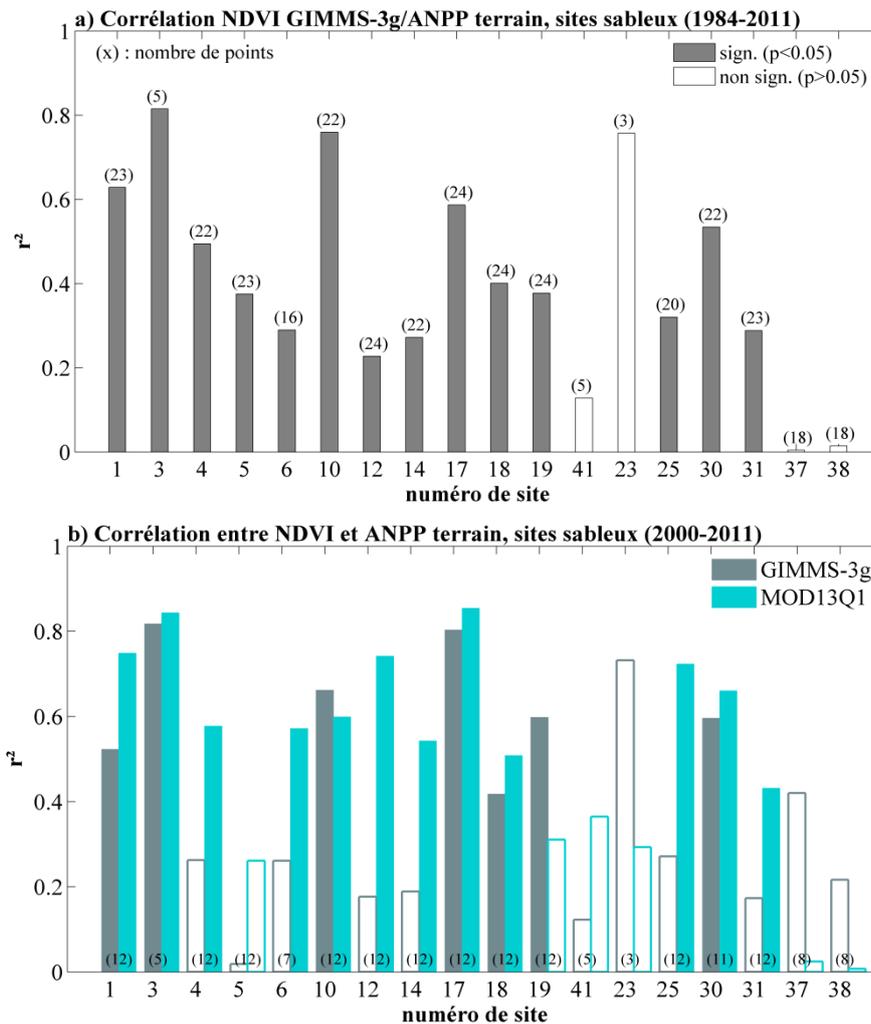


Figure 42. Régressions linéaires (r^2) entre ANPP terrain et iNDVI à l'échelle du site pour a) le NDVI GIMMS-3g, sur la période 1984-2010, et b) le NDVI GIMMS-3g et le NDVI MODIS sur 2000-2011. La significativité des tendances est indiquée par le remplissage des barres (barre pleine = tendance significative à 95% ; contour = tendance non significative). Voir ANNEXE 7 pour le détail des corrélations par site.

La Figure 42 indique les résultats obtenus pour des corrélations effectuées séparément pour chaque site sableux, sur 1984-2011 pour GIMMS-3g et sur 2000-2011 pour GIMMS-3g et MODIS. Sur la période 1984-2011 avec GIMMS-3g, à l'échelle du site les corrélations varient entre un r^2 proche de 0 (pour les sites du Séno) à un r^2 autour de 0.8 (sites 3, 10). Sur la période 2000-2011, les corrélations sont généralement meilleures avec MODIS mais le nombre de points est parfois fortement réduit. La limite de résolution du jeu de données GIMMS-3g est donc généralement atteinte dans cette approche site par site, ce qui démontre l'intérêt d'une agrégation spatiale pour l'étude des tendances à l'échelle de l'écosystème (Wessels *et al.* 2007, Nagol 2011).

Le regard critique porté sur ce jeu de données de terrain a permis d'identifier un certain nombre de sources d'incertitudes, et pour certaines d'en minimiser les impacts. De la même façon, la comparaison site par site entre les données terrain et le capteur MODIS s'avère possible mais uniquement faisable sur une période limitée, alors que la comparaison avec les données GIMMS-3g est possible sur une longue période, mais délicate au vu de la résolution spatiale. Ces deux points justifient les méthodes d'agrégation spatiale utilisées dans les chapitres 3 et 4, pour les données de terrain et de NDVI. Cependant, pour bénéficier de la richesse du jeu de données terrain, il demeure intéressant de regarder les variables de notre étude (ANPP, RUE) à l'échelle du site, ce qui explique que dans la suite de ce chapitre nous poursuivrons notre étude à partir des données terrain uniquement, sur les sites sableux du Gourma.

4. ANPP, RUE et précipitations

4.1. Relation ANPP / précipitations

La relation entre les estimations terrain de l'ANPP annuelle et les précipitations locales (pluviomètre/pluviographe le plus proche, voir les méthodes dans le Chapitre 4) s'avère être linéaire sur la plus grande partie du gradient de précipitations, soit jusqu'à environ 450 mm par an (Figure 44a). La médiane et le 95^e quantile sont calculés par "tranche" de pluie de 100 mm, soit de 0 à 100 mm/an, de 100 à 200 mm/an, etc. Ils sont représentés sur la figure en fonction de la pluie moyenne sur les points de la tranche considérée (par exemple autour de 80 mm/an pour la tranche 0-100 mm). Au-delà d'un certain seuil (ici entre 400 et 450 mm), le signe de la relation s'inverse clairement et devient négative, ce qui pourrait signifier que la production est limitée par d'autres facteurs que la pluie, comme par exemple par le contenu du sol en nutriments organiques (azote, phosphore). Ces résultats sont cohérents avec la littérature et notamment avec la méta-analyse effectuée par Ruppert *et al.* (2012) sur un gradient de précipitation similaire. La non-linéarité de la relation ANPP/pluie supposée par certains auteurs (Hein & de Ridder 2006), notamment pour des faibles cumuls annuels de pluie, n'apparaît pas pertinente au vu de l'analyse des estimations de l'ANPP sur les sites sableux du Gourma.

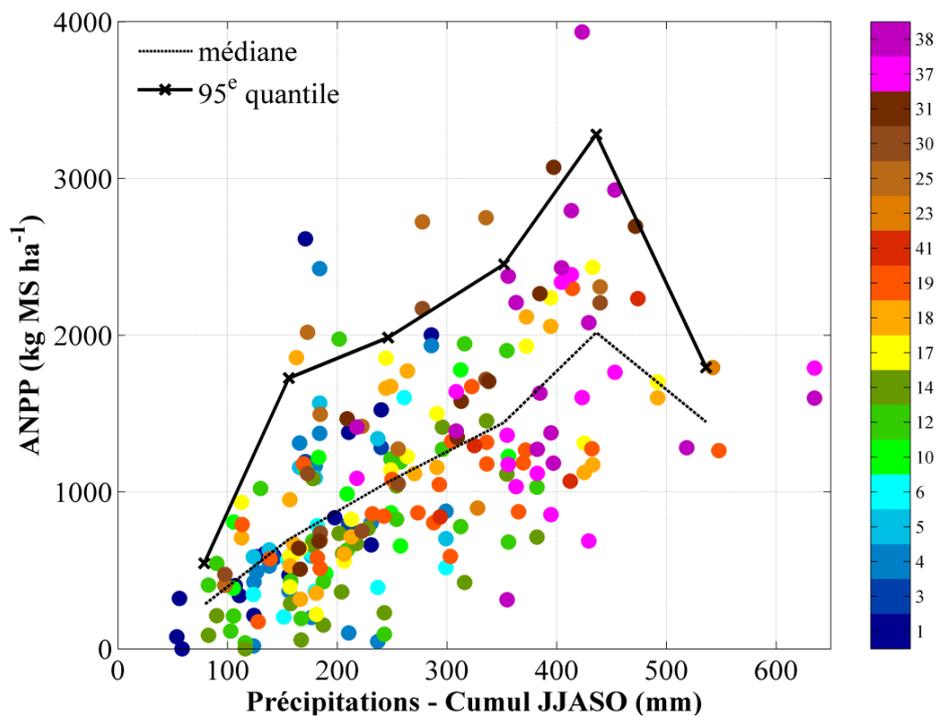


Figure 43. ANPP terrain en fonction du cumul des précipitations (JJASO) pour tous les sites sableux, entre 1984 et 2010 (un point = un site, une année). La médiane est indiquée en pointillés, le 95^e quantile en trait plein. Les couleurs indiquent les numéros des sites (voir Tableau 6 pour les caractéristiques des sites).

Par ailleurs, Huxman *et al.* (2004) ont étudié la pente de la relation ANPP / précipitations (ou PMR) à l'aide de données de terrain collectées sur 14 sites répartis sur 9 biomes, en Amérique du Nord et du Sud. Ces sites sont caractérisés par un très fort gradient pluviométrique allant de 0 à 3000 mm/an. Leur étude a montré que la pente de la PMR évoluait le long d'un gradient de pluie : la PMR caractéristique des sites les plus arides est plus forte que la PMR des sites plus humides (Figure 44a). Ces résultats n'ont pas été retrouvés avec nos données (Figure 44b) : mis à part les sites du Séno pour lesquels la fiabilité des mesures a préalablement été questionnée, nous n'observons pas de différences significatives entre les PMR des différents sites le long du gradient de précipitations, peut-être parce que le gradient caractéristique de notre région est moins étendu que celui des sites de l'étude d'Huxman *et al.* (2004).

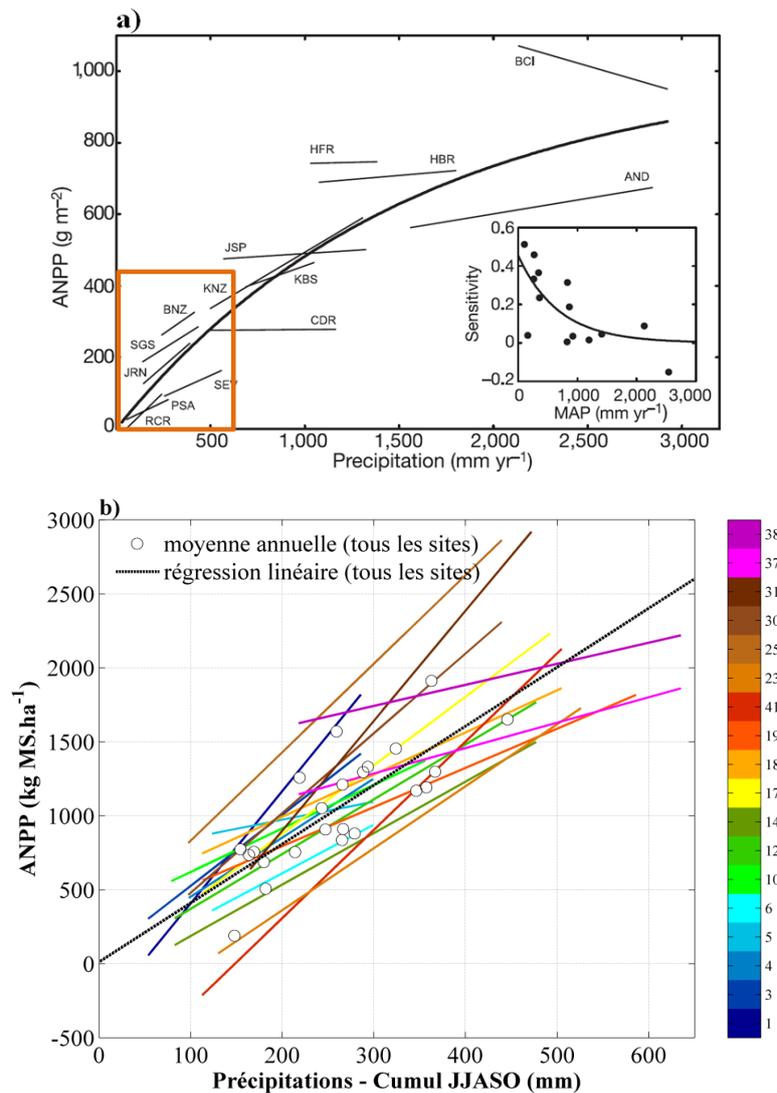


Figure 44. a) Extrait de Huxman *et al.* (2004) : ANPP en fonction des précipitations sur 14 sites de mesure situés en Amérique du Nord et du Sud. L'encadré représente le gradient de précipitations équivalent à notre étude. b) Régressions linéaires pour chaque site du Gourma entre ANPP et précipitations annuelles. Les moyennes annuelles sur tous les sites sont représentées par les cercles blancs ; la régression linéaire sur tous les points est représentée par la droite noire. A noter qu'il y a un facteur 10 entre les deux figures, lié aux différentes unités (g/m² et kg MS/ha).

4.2. Relation RUE / précipitations

La Figure 45 montre la distribution spatio-temporelle du RUE en fonction des précipitations pour les sites sableux du Gourma. La médiane et le 95^e quantile sont également calculés par "tranche" de pluie de 100 mm, et sont représentés sur la figure en fonction de la pluie moyenne sur la tranche considérée. La courbe du 95^e quantile montre une augmentation pour les premières gammes de pluie (entre 0 et 200 mm/an), puis une diminution qui suit l'augmentation des précipitations annuelles. Le RUE maximal est donc maximum pour des pluies annuelles entre 150 et 200 mm. Ceci induit que les écosystèmes recevant peu de précipitations annuelles sont plus efficaces en terme d'utilisation des pluies, tandis que d'autres facteurs viennent limiter la production quand les précipitations annuelles

reçues par un site augmentent. Cette conclusion concerne uniquement les sites qui contribuent au 95^e quantile, c'est-à-dire qui forment l'enveloppe supérieure du nuage.

Pour la médiane en revanche, la courbe est plus "plate". Une faible diminution du RUE est trouvée pour les précipitations les plus fortes, mais ces résultats dépendent de quelques points seulement. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Ruppert *et al.* (2012), qui montrent une réponse unimodale du RUE en fonction des précipitations pour l'enveloppe maximale (99^e quantile) avec un maximum autour de 200 mm/an, mais une distribution beaucoup plus "plate" de la médiane

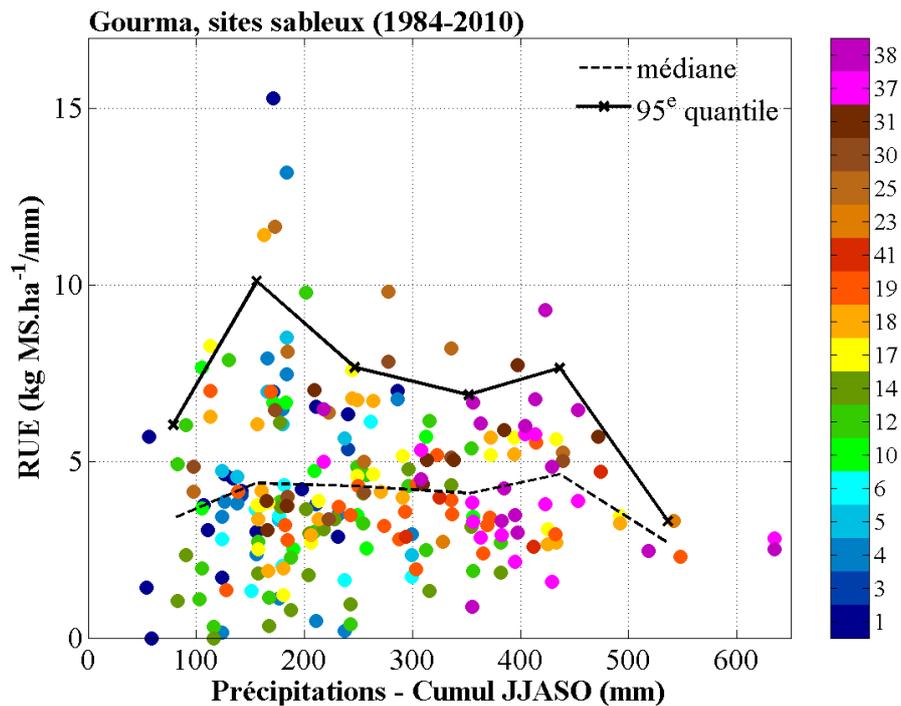


Figure 45. Variabilité spatio-temporelle du RUE en fonction des précipitations pour les sites sableux du Gourma. La médiane et le 95^e quantile sont représentés en noir (respectivement en pointillés et en trait plein).

5. Peut-on expliquer la variabilité du RUE ?

5.1. Influence de la distribution des pluies ?

Le cumul annuel des précipitations n'est qu'une représentation partielle des caractéristiques des pluies. En effet, la distribution intra-saisonnière est un facteur souvent considéré comme un facteur d'importance majeure pour la production de la végétation. Par exemple, pour un même cumul annuel, des pluies relativement faibles mais fréquentes pourraient permettre une bonne croissance du couvert, alors que des pluies fortes mais rares pourraient limiter la production (inondations, germinations avortées...). La régularité des pluies, la durée des pluies utiles pour la croissance, ou encore la durée des pluies non limitantes pourraient donc être des facteurs qui différencient la production d'un site pour un même cumul annuel (les données de précipitations et les paramètres dérivés sont issus d'un

travail de Hiernaux *et al.* (in prep.) Nous avons donc cherché à mettre en évidence un lien entre la variabilité spatio-temporelle du RUE et ces facteurs de "qualité" des pluies.

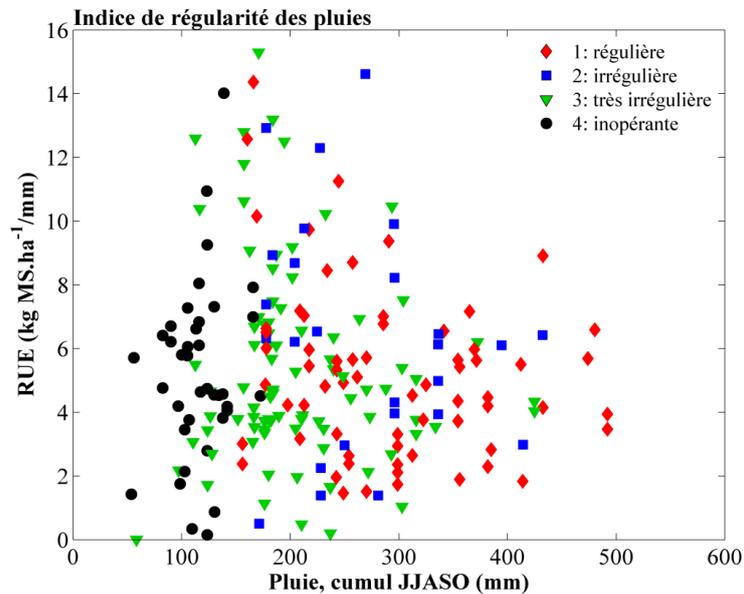


Figure 46. Relation RUE/précipitations pour les sites sableux du Gourma. Les points sont identifiés en fonction de la régularité des pluies annuelles (4 classes : pluies inopérantes, très irrégulières, irrégulières et régulières, selon Hiernaux *et al.* (in prep.))

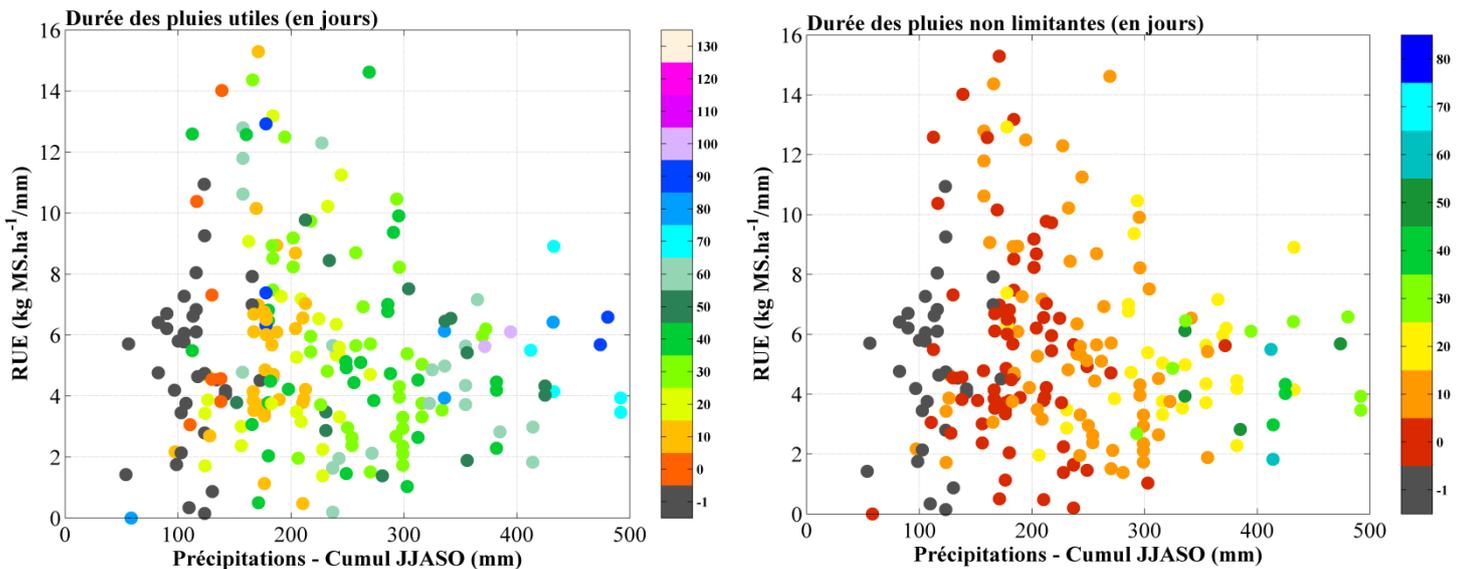


Figure 47. Relation RUE/précipitations en fonction de la durée des pluies utiles (à gauche) et de la durée des pluies non limitantes pour la croissance (à droite). L'échelle de couleur caractérise le nombre de jours de pluie utiles/non limitantes pour chaque couple année/site.

Les figures 46 et 47 représentent ainsi la relation RUE/précipitations locales en fonction de chacun de ces indicateurs (chaque point est classé selon la "qualité" des pluies pour l'année de mesure). De manière assez surprenante, aucun résultat significatif n'a été trouvé : aucun des trois indices étudiés ne montre un impact remarquable sur le RUE. Par exemple, en considérant le critère "régularité des

pluies" (Figure 46) , on s'attendrait à des valeurs plus fortes du RUE pour les pluies régulières, et des valeurs de moins en moins fortes quand l'irrégularité augmente, ce n'est pas ce qui est observé ici. Les valeurs moyennes des RUE des 4 classes ont des valeurs très similaires.

La distribution des deux autres indices (Figure 47) nous indique surtout qu'il y a une forte corrélation entre le cumul annuel des précipitations et le nombre de jours de pluie utiles pour la croissance.

5.2. Influence de la composition floristique sur la variabilité interannuelle ?

Des changements significatifs dans la composition floristique ont été observés dans la région tout le long de notre période d'étude (voir Figure 48 pour quelques exemples d'espèces fortement représentées dans la région du Gourma). Des changements marquants faisant suite à la sécheresse des années 1980 ont par exemple été documentés (Hiernaux *et al.* 2009c) et ont montré que la recolonisation de la végétation s'est effectuée grâce à des plantes annuelles pionnières, très productives et résilientes aux évènements secs. Petit à petit, à l'échelle du Gourma le couvert a ensuite globalement retrouvé une composition floristique proche de celui précédant la sécheresse, mais des modifications importantes ont aussi été observées sur plusieurs sites.

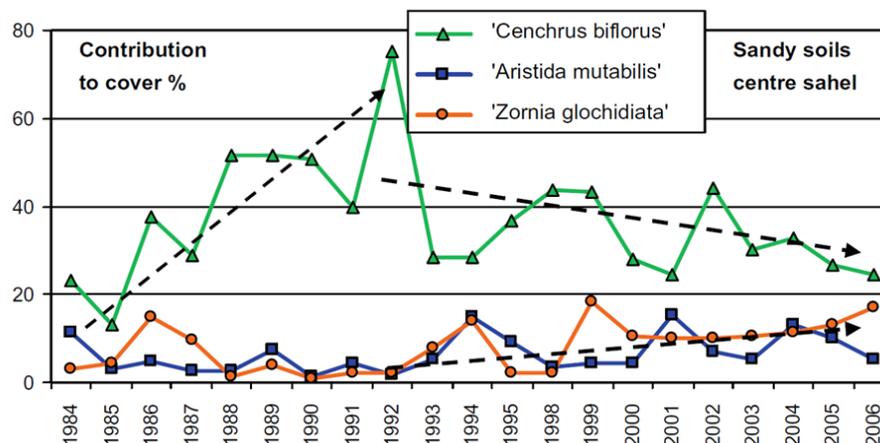


Figure 48. Exemples d'évolution de la proportion (en % de couvert) de trois espèces remarquables, entre 1984 et 2006 (*source* : Hiernaux *et al.* (2009c)).

La composition floristique est un facteur potentiellement important pour expliquer les différences de production d'un même site à des mêmes cumuls annuels, ainsi que des différences dans la réponse aux précipitations. Les plantes ayant une photosynthèse en C₃ sont par exemple moins efficaces en terme de conversion de l'énergie lumineuse en masse que les plantes en C₄, et elles sont aussi plus sensibles aux températures chaudes et au stress hydrique. Une modification significative de la proportion des plantes en C₄ par rapport aux plantes en C₃ devrait donc induire des changements dans la capacité de production des sites et du RUE. Nous nous attendons donc à ce que les espèces de plantes regroupées par groupes fonctionnels permettent d'expliquer en partie la variabilité interannuelle de l'ANPP ainsi que celle des résidus d'ANPP et du RUE. Pour aborder cette question, nous nous intéressons à nouveau à la moyenne des masses mesurées sur les sites sableux du Gourma, à l'exception des sites du Séno.

5.2.1. Évolution de la composition floristique sur la période

La base de données de végétation du Gourma est également riche d'informations sur la composition floristique de chaque site sur l'ensemble de la période (Hiernaux *et al.* 2009c). Nous avons analysé ici l'évolution des espèces classées par groupes fonctionnels (Tableau 7), définis par Hiernaux *et al.* (2009c).

Nous avons calculé la médiane du couvert (exprimée en pourcentage de la masse totale) sur les sites sableux pour chaque année, puis calculé une régression en fonction du temps sur la période 1984-2010 (Figure 49). Nous prolongerons donc ici l'étude de Hiernaux *et al.* (2009c), qui s'arrête en 2006. Les deux seuls groupements d'espèce qui montrent une tendance significative sur la période 1984-2010 se révèlent être les espèces xérophytes (diminution du couvert de 23% sur la période, $P = 0.02$) et les espèces appréciées par le bétail (augmentation du couvert de 10%, $P = 0.01$). Les changements observés sur les groupes des espèces à photosynthèse de type C_4 , des graminées, ou encore des espèces à cycle court ne sont pas significatifs. Nous avons alors recherché l'existence de relations significatives entre chacun de ces groupements et la variabilité interannuelle de l'ANPP, puis avec la variabilité interannuelle des résidus d'ANPP.

Abréviation	Définition
CTP4	Contribution relative des espèces à photosynthèse de type C_4
CTAQ	Contribution relative des espèces aquatiques
CTSC	Contribution relative des espèces sciaphiles
CTXE	Contribution relative des espèces xérophytes
CTZO	Contribution relative des espèces zoochores
CTPA	Contribution relative des espèces appréciées par le bétail
CTLO	Contribution relative des espèces à cycle long
CTBF	Contribution relative des espèces à cycle court
CTLG	Contribution relative des espèces légumineuses
CTPE	Contribution relative des espèces pérennes
CTGR	Contribution relative des espèces graminées

Tableau 7. Définition des abréviations utilisées pour décrire les différents groupements d'espèces .



Figure 49. Évolution de la composition floristique sur les sites sableux du Gourma entre 1984 et 2010 (sans les sites du Séno). Les contributions relatives des espèces classées selon différents critères sont exprimées en pourcentages du couvert total. La valeur annuelle représente la médiane des contributions relatives estimées sur l'ensemble des sites.

5.2.2. Lien avec la production herbacée et les résidus d'ANPP/précipitations

Des régressions linéaires ont été calculées entre l'ANPP annuelle moyenne des sites sableux et la médiane des contributions de chaque groupe d'espèces pour ces sites (Figure 50a). Les résidus ont été estimés à partir de l'ANPP annuelle moyenne des sites sableux et des précipitations mesurées sur le réseau du Gourma (voir les méthodes du Chapitre 4) (Figure 50b). Les corrélations ANPP / groupements d'espèces ne montrent pas de relations qui auraient pu être attendues (avec les graminées, les espèces à cycle court, les espèces en C₄...) : les seules relations significatives mises en évidence sont pour les espèces aquatiques ($r = -0.6$), sciaphiles ($r = -0.38$) et les espèces appréciées par le bétail ($r = 0.42$). Les résultats obtenus pour la corrélation entre les résidus et les groupements d'espèces sont comparables, et ne montrent des tendances significatives (et négatives) que pour les groupements d'espèces aquatiques et sciaphiles.

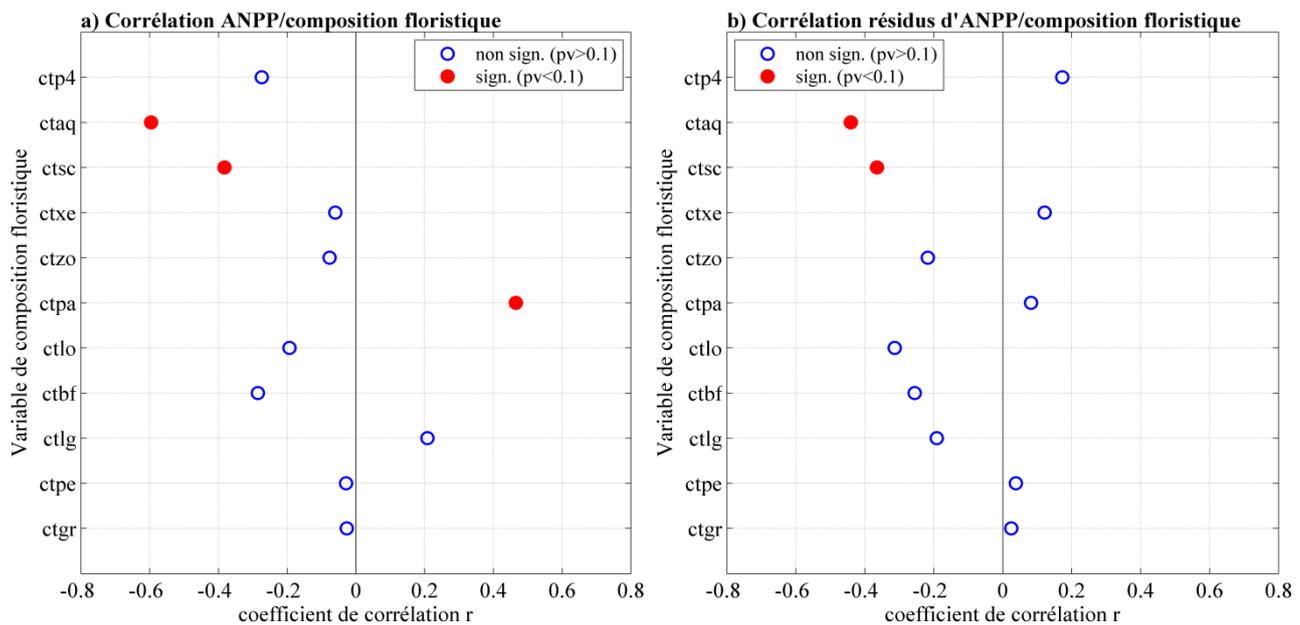


Figure 50. Régression linéaire entre les différentes variables de composition floristique (en pourcentage du couvert, médiane des valeurs annuelles mesurées sur tous les sites) et : a) l'ANPP annuelle moyennée sur les sites sableux (sans les sites du Séno) ; b) les résidus d'ANPP. Voir l'ANNEXE 9 pour le détail des corrélations pour chaque groupement d'espèce.

De manière assez surprenante, l'analyse des changements de composition floristique à l'échelle des sites sableux du Gourma ne permet donc pas d'expliquer de manière satisfaisante la variabilité interannuelle de l'ANPP, ni du RUE. Ce résultat pour l'ANPP avait déjà été noté par Hiernaux *et al.* (2009c), nous pouvons dire que les mêmes conclusions s'appliquent au RUE (aux résidus).

6. Principaux résultats et conclusions

La disponibilité de mesures collectées à partir d'un réseau d'observation de l'échelle de celui du Gourma représente une opportunité considérable pour améliorer notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes semi-arides du Gourma. Toutefois, l'estimation de l'ANPP à partir de mesures de masses de la strate herbacée requiert un important travail préliminaire visant à minimiser l'impact des différentes sources d'incertitude, et sur la mesure de masse elle-même, et sur l'estimation de la production annuelle.

La comparaison entre un site de mesure (échelle kilométrique) et les pixels satellitaires GIMMS-3g est limitée par la résolution spatiale du satellite ($1/12^\circ$) ainsi que par l'hétérogénéité du paysage. Nous avons cependant pu détecter des différences dans la relation iNDVI/ANPP entre les sites situés le plus au nord, et les sites situés plus au sud du gradient. Nous pouvons supposer que les écosystèmes situés dans les régions les plus arides répondent de manière plus efficace à la quantité de rayonnement solaire reçue. De plus, il est intéressant de noter qu'effectuer une moyenne dans l'espace de données collectées à l'échelle du site permet d'améliorer notre estimation de l'ANPP à l'échelle d'une région en réduisant les erreurs associées aux sites et aux incertitudes liées à la mesure satellitaire.

La relation ANPP / précipitations (PMR) sur les sites sableux est linéaire jusqu'à 450 mm annuels de pluie. Au-delà, la production n'est plus limitée par les précipitations, ce qui correspond au schéma de fonctionnement des écosystèmes des régions semi-arides. En revanche, nous n'avons pas mis en évidence de différence significative dans la PMR sur le gradient nord-sud du Gourma (relations par site). La variabilité spatio-temporelle du RUE en fonction des précipitations montre une réponse unimodale du RUE maximal (95^e quantile) avec un pic autour de 200 mm de pluies annuelles, ce qui sous-entend que les écosystèmes recevant peu de précipitations annuelles sont les plus efficaces en termes d'utilisation des précipitations. Cette conclusion ne concerne que certains sites, qui forment l'enveloppe supérieure du nuage. La valeur médiane ne montre pas cette distribution unimodale, il ne faut probablement pas sur-interpréter la forme de cette enveloppe supérieure.

Contre toute attente, l'étude de la distribution intra-saisonnière des précipitations et de la composition floristique n'a pas permis d'expliquer la variabilité interannuelle de l'ANPP ou de la RUE (ou des résidus d'ANPP). Pour la composition floristique, les seules relations mises en évidence concernent des types d'espèces secondaires (aquatiques, sciaphiles, appréciées par le bétail, xérophytes). Ces résultats posent question sur l'utilité de différencier les différents types de fonctionnement de plantes dans les modèles climatiques. Il est possible que des changements significatifs observés à l'échelle de la feuille (par exemple entre C_3 et C_4) pour des espèces très présentes dans la région soient masqués à l'échelle de la canopée et de la saison.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La désertification du Sahel, une théorie qui a de l'histoire

Les terres arides et semi-arides représentent environ 40% de la superficie totale des terres émergées de la planète et sont caractérisées par une grande sensibilité aux fluctuations du climat, et particulièrement à la variabilité des précipitations. Dans le contexte du changement climatique, de l'augmentation de la pression démographique et de l'évolution de l'occupation des sols (notamment en Afrique), la compréhension et le suivi de l'évolution de l'état des surfaces continentales (et donc de la végétation) est un enjeu crucial pour les populations qui vivent et dépendent des ressources naturelles. La désertification des terres arides et semi-arides est donc un sujet qui suscite un grand intérêt et de nombreuses polémiques dans les communautés scientifiques, institutionnelles et publiques depuis des décennies. Pour commencer, le terme même de désertification est sujet à controverse, et il y a souvent confusion entre les termes de "désertification", "dégradation" ou "sécheresses". Dans cette thèse, le terme de "dégradation" fait essentiellement référence à une perte de productivité des écosystèmes. La définition aujourd'hui adoptée par les Nations Unies décrit la désertification comme une "*dégradation des terres arides et semi-arides induite par suite de divers facteurs tels que les variations climatiques et les activités humaines*". Ainsi, la désertification est associée à une perte de productivité des écosystèmes sur le long-terme. L'influence de l'homme sur ces changements est particulièrement examinée.

Les institutions internationales (UNEP, FAO) ont, depuis les années 1970, cherché à estimer l'étendue et la sévérité des terres touchées ou menacées par la désertification sur l'ensemble du globe. L'UNEP estime ainsi en 1992 que 70% des terres arides et semi-arides sont affectées par la désertification. Ces chiffres ont été largement repris par les sphères médiatique, politique et scientifique, et ce jusqu'à aujourd'hui. Mais ces estimations ont aussi été fortement critiquées, notamment en raison de la nature subjective (qualitative) et ponctuelle (dans le temps et dans l'espace) d'une grande partie des données utilisées, et du manque de description de méthodes qui aboutissent à une évaluation chiffrée de la désertification à l'échelle globale. Au Sahel, les sécheresses successives des années 1970 et 1980 ont ravivé la théorie d'une désertification de la région et ont contribué à l'institutionnalisation du débat. Ces sécheresses ont en effet touché la globalité de la ceinture sahélienne et ont eu des conséquences très graves sur les écosystèmes et sur les populations locales. La désertification du Sahel est alors considérée comme une réelle menace, et des observations locales et ponctuelles (dans le temps) viennent étayer cette théorie. Plusieurs études décrivent ainsi l'avancée du désert du Sahara sur le reste du continent africain en caractérisant sa vitesse d'expansion à hauteur de 5.5 km par an, et l'envahissement total du continent par le Sahara est prédit à une échéance de 200 ans. Une vision très répandue de la désertification à l'époque repose sur un diagnostic de "condition désertique" (et non sur des processus biophysiques) supposément due à l'action de l'homme et souvent associée à une invasion

progressive des dunes sableuses. Cet état est généralement considéré irréversible. Mais ces études ont omis de prendre en considération l'état fondamentalement variable des frontières désertiques, et leurs conclusions ont été par conséquent infirmées par la suite.

Le reverdissement observé par les satellites sur les années récentes

L'apparition des données satellitaires dès les années 1970 (avec notamment le capteur Landsat), puis surtout à partir des années 1980 (avec les capteurs AVHRR à bord des satellites météorologiques de la NOAA), a représenté une opportunité sans précédent d'accéder à des informations sur le couvert végétal à l'échelle de la planète. Les premiers indices de végétation satellitaires, et en particulier le NDVI, se sont révélés particulièrement bien corrélés à la productivité végétale. Les capteurs AVHRR permettent de suivre l'évolution du couvert à une fréquence journalière et à une résolution spatiale kilométrique, autant de facteurs qui font du NDVI un outil précieux dans le contexte du débat de la désertification au Sahel. Les premières études basées sur ces indices ont couvert une période d'une dizaine d'années (1980-1990) et ont montré que, contrairement à ce qui était attendu, il n'y avait pas de désertification générale du Sahel. Au contraire, le NDVI démontrait une tendance positive sur la période et sur la majeure partie de la région ; c'est cette tendance positive du NDVI que l'on a baptisée "reverdissement". De la même façon, aucune "invasion" du désert du Sahara vers le sud du continent n'a été détectée. Le clivage entre les défenseurs de la théorie de la désertification du Sahel et ses détracteurs s'est donc accru, tandis que les études prenant en compte des périodes de temps de plus en plus longues confirmaient au fur et à mesure des années le reverdissement observé par satellite.

Mais le NDVI est un estimateur de la production basé sur les propriétés optiques des surfaces qui est soumis à un certain nombre de limitations et de biais pouvant impacter sa représentativité de la production végétale. De plus, dans l'étude des tendances temporelles, nombre de facteurs sont d'importance, comme les changements dans la composition atmosphérique, la détérioration des capteurs, ou encore la dérive orbitale des satellites au cours du temps. Par exemple, pour bénéficier de produits satellitaires continus dans le temps, les données issues de plusieurs capteurs doivent être combinées tout en s'assurant qu'aucune tendance résiduelle due à ces changements de capteurs ne vient altérer l'interprétation des tendances en termes d'évolution du couvert végétal. Pour toutes ces raisons, il est primordial de bénéficier de sources d'évaluation des données satellitaires. Les données de terrain sont considérées comme la meilleure source de validation, mais il est extrêmement difficile d'en acquérir à des échelles spatio-temporelles compatibles avec les mesures satellitaires, notamment pour les études de tendances temporelles. Des validations locales et sur de courtes période (quelques années maximum) sont fréquentes, mais à notre connaissance aucune validation des tendances temporelles long-terme n'est disponible à l'échelle régionale, et c'est encore plus vrai dans les régions sahéliennes où l'accès au terrain peut parfois être très compliqué.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons bénéficié d'observations de la végétation collectées dans deux régions du Sahel : la région pastorale du Gourma au Mali (1984-2011), et la région agro-pastorale du Fakara au sud-ouest du Niger (1994-2011). Ces données ont été collectées sur un ensemble de sites échantillonnant le gradient bioclimatique et représentatifs de l'hétérogénéité du paysage, et qui permettent donc d'avoir accès à une estimation de la production de la végétation à l'échelle de ces régions. Nous avons ainsi une occasion unique d'évaluer la qualité du suivi de la végétation par satellite sur une période de presque 30 ans sur deux régions distinctes, et plus spécifiquement d'explorer les théories contradictoires que représentent le reverdissement du Sahel et son éventuelle dégradation.

Les deux premières grandes questions auxquelles nous avons tenté de répondre étaient alors les suivantes : i) Les données de NDVI sont-elles en accord avec les observations de terrain, et peuvent-elles être utilisées pour suivre l'évolution de la production végétale au cours du temps dans les régions sahéniennes ? ii) Y-a-t-il reverdissement ou désertification du Sahel ?

La confrontation de nos deux sources de données (le NDVI GIMMS-3g et l'estimation de la productivité sur le terrain) a prouvé la cohérence des données satellitaires pour le suivi des changements de la végétation à l'échelle du Sahel ainsi qu'à l'échelle des régions du Gourma et du Fakara, qui montrent pourtant des tendances de signe opposé (reverdissement pour le Gourma, dégradation pour le Fakara). Le NDVI se révèle être un très bon estimateur de l'évolution de la strate herbacée, qui constitue la plus grande partie du couvert de ces régions (plus de 90% du couvert en moyenne). Les tendances au reverdissement sont confirmées sur la quasi-totalité de la région sahénienne à l'exception du sud-ouest nigérien et du Soudan. Ces tendances sont détectées sur la période 1981-2011 et traduisent l'augmentation globale de la productivité végétale depuis la sécheresse des années 1983-84, ce qui montre la résilience des écosystèmes sahéniens aux événements climatiques extrêmes. Sur les régions du Gourma et du Fakara nous avons également pu montrer que l'augmentation du NDVI sur la période était liée à une augmentation de l'amplitude du signal, et non pas à une modification de la phénologie de la végétation.

Pour poursuivre cette analyse des tendances du couvert végétal sur de longues périodes, il serait intéressant d'accéder à des informations plus anciennes de l'évolution du couvert au Sahel, par exemple en utilisant l'indice STI à partir d'images Landsat. Cet indice, qui détecte la végétation verte et la végétation sèche, permettrait d'accéder à des informations sur l'état du couvert à d'autres moments de l'année que pendant la période de croissance de la végétation. Les séries temporelles pourraient donc être accrues (la majorité des données sont acquises en saison sèche) ainsi que nos connaissances des changements de la végétation sur les dernières décennies. Le STI pourrait également être utilisé pour effectuer un suivi de la végétation pendant les 9 mois de saison sèche afin, par exemple, d'évaluer les ressources fourragères disponibles pour le bétail, ou encore pour estimer l'impact de la pression de

pâture sur la production et ses changements au cours du temps. Il pourrait ainsi être possible de reconstituer l'impact de la pression de pâture depuis les 30 ou 40 dernières années et d'éclaircir l'impact du pastoralisme sur les écosystèmes, ou encore sur la relation entre iNDVI et ANPP (par exemple dans le cas du Séno, afin de savoir si les différences entre les données terrain et NDVI s'expliquent par des changements dans la pression de pâture au cours du temps ou non).

La région agro-pastorale du Fakara, un exemple de dégradation du couvert végétal

Dans la région du Fakara, la diminution significative du couvert végétal est détectée et par le NDVI et par les données terrain. Mais cette dégradation n'est pas observée sur l'ensemble de la période : suite à la sécheresse de 1983-84, un rétablissement du couvert herbacé est d'abord détecté par le NDVI (à l'instar de ce qui est observé dans le Gourma), mais dès le milieu des années 1990 une dégradation continue et significative du couvert est mise en évidence. Cette diminution ne paraît pas reliée aux précipitations annuelles. En revanche, les changements connus par la région en matière d'occupation du sol depuis les années 1950 constituent des explications plausibles. La forte augmentation de la démographie depuis les années 1950 s'est traduite par une forte augmentation des superficies cultivées ainsi que par des changements dans les pratiques culturales (réduction du temps de jachère, mise en culture de terres réservées à la pâture). La fertilité moyenne des sols en a peut-être été impactée, ce qui pourrait expliquer la diminution du NDVI et de la productivité de la végétation sur la période.

Ces conclusions ne peuvent pas et ne doivent pas être étendues à toutes les régions agricoles du Sahel, puisque, par exemple, les cartes de tendance du NDVI montrent que certains terroirs agricoles connaissent au contraire un reverdissement. L'analyse de l'évolution de ces autres terroirs apporterait des éléments de comparaison intéressants et compléterait notre connaissance de l'évolution particulière des territoires cultivés ou agro-pastoraux. Pour mieux comprendre l'origine des tendances observées sur le Fakara (peut-on véritablement en attribuer la cause aux activités anthropiques ?), une analyse des tendances du RUE serait particulièrement utile, bien que probablement difficile à mettre en place en raison de la complexité de l'échantillonnage de terrain causée par la très forte dynamique de l'occupation des sols.

D'autre part, l'impact des changements d'occupation du sol sur le NDVI demande à être mieux compris, et particulièrement l'impact de la mise en culture des surfaces sur le signal. Aujourd'hui il n'est pas clair si l'augmentation des surfaces cultivées engendre une augmentation ou une diminution du NDVI. Par exemple, la structure et la composition du couvert étant modifiés lors d'une mise en culture de la terre, la réponse de l'arrière-plan sol l'est aussi, ainsi que l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en masse à l'échelle de la canopée. Des mesures de terrain de la réflectance prenant en compte l'ensemble de la réponse du sol et de la végétation sous différentes configurations (différentes cultures, mix cultures/jachères...) alliées à des mesures de production végétale

permettraient de voir plus clair sur ce point. Les séries temporelles à haute résolution permettraient également d'en savoir plus.

Le RUE et les coefficients de ruissellement, des indicateurs qui se contredisent

Un second indicateur souvent utilisé à des fins de détection de la dégradation des écosystèmes est le RUE, le ratio de l'ANPP et des précipitations. Dans les régions semi-arides, le premier facteur limitant la production végétale étant la pluie, il est intéressant de s'affranchir de la part de production expliquée par les précipitations. Ainsi l'on peut détecter d'éventuels changements dans la capacité de production dus à d'autres facteurs, qui peuvent autrement être masqués par ce premier signal lié à la pluviométrie. Dans un écosystème qui ne connaît pas de modifications majeures dans son fonctionnement, la réponse de la végétation (en termes de biomasse produite) à la quantité de pluie reçue est stable dans le temps (RUE constant). En revanche, si cet écosystème est soumis à des modifications importantes, comme par exemple sous pression anthropique (mise en culture, augmentation de la pression de pâture, déforestation...), alors la réponse de la végétation à la même quantité de pluie reçue sera modifiée (et donc le RUE aussi). Par conséquent, l'existence de tendances négatives du RUE au cours du temps sur une même région peut être interprétée comme un signe de dégradation de l'écosystème, dégradation qui est le plus souvent attribuée à l'action de l'homme sur son environnement.

Dans le cadre du débat entre désertification et reverdissement du Sahel, le RUE (calculé à l'échelle régionale grâce au NDVI) a été utilisé par plusieurs auteurs pour déterminer l'existence ou non de tendances à la dégradation des écosystèmes. Ces études, qui utilisent les mêmes données de NDVI, aboutissent pourtant à des conclusions contradictoires. Alors que certains considèrent qu'il n'y a pas de désertification de la région (Nicholson *et al.* 1998, Prince *et al.* 1998, Prince *et al.* 2007), d'autres soutiennent le contraire (Hein & de Ridder 2006, Hein *et al.* 2011). En réalité, l'estimation et l'interprétation du RUE sont sujettes à controverse, tant d'un point de vue méthodologique (non-indépendance avec les précipitations) qu'écologique (comportement "attendu" du RUE pour des faibles ou fortes précipitations). Récemment, la méthode des résidus d'ANPP (la différence de la production prédite par les pluies avec la production observée) a été proposée pour éviter ces biais méthodologiques.

Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle du RUE et des résidus dans la région du Gourma afin d'identifier l'origine du reverdissement observé. Nous avons ainsi mis en évidence que le reverdissement du Gourma est principalement lié à la reprise des précipitations sur la période (1984-2010). Nous avons également confirmé que le NDVI GIMMS-3g peut être utilisé pour calculer les RUE et résidus d'ANPP, grâce à la cohérence des résultats obtenus avec le NDVI et avec les estimations terrain long-terme d'ANPP agrégées sur la région. Les données satellitaires peuvent donc être utilisées pour étudier des variations de la végétation d'un "second ordre"

(le premier ordre étant celui lié aux précipitations). Nous préconisons cependant l'utilisation des résidus d'ANPP préférentiellement à celui du RUE, afin d'éviter toute fausse interprétation liée à des biais méthodologiques.

Concernant l'évolution du RUE à l'échelle sahéenne, nos résultats nous permettent de nous prononcer en faveur de l'interprétation de Prince *et al.* (1998) et de Nicholson *et al.* (1998), c'est-à-dire que l'absence de tendances temporelles dans le RUE (ou les résidus) doit être interprétée comme un signe de résilience de la végétation, et non pas comme un signe de dégradation. Les résultats contradictoires d'Hein & de Ridder (2006) sont basés sur l'hypothèse d'une relation non-linéaire (quadratique) entre ANPP et précipitations. Or, cette hypothèse est loin d'être évidente sur les données de terrain utilisées dans leur étude, comme le discutent Prince *et al.* (2007), et sur la région du Gourma nous montrons que la relation ANPP / précipitations (en considérant la variabilité interannuelle seulement) apparaît au contraire clairement linéaire.

Habituellement, le RUE est estimé à l'échelle de la région sahéenne grâce aux données de NDVI qui sont elles-mêmes calibrées sur quelques observations localisées de la végétation (afin d'estimer l'ANPP). C'est l'approche que nous avons adoptée pour estimer l'ANPP à partir du NDVI sur la région du Gourma. Dans notre cas cette approche est appropriée, étant donné la longueur des séries considérées et la correspondance entre l'étendue spatiale du réseau d'observation et la région sélectionnée pour extraire et moyenniser le NDVI. Mais à l'échelle du Sahel, il n'est vraiment pas certain que la relation $NDVI/ANPP_{\text{terrain}}$ soit la même sur l'ensemble de la région. Notre étude montre d'ores et déjà que la pente de la relation $NDVI/ANPP_{\text{terrain}}$ est légèrement plus forte pour les sites du nord du Gourma que pour les sites du sud. L'estimation du RUE à partir des estimations satellitaires serait donc probablement améliorée si l'on pouvait prendre en compte ces différences. Cela paraît cependant difficile à mettre en place sans disposer d'observations de terrain sur l'ensemble de la région sahéenne. Une autre façon d'estimer le RUE à partir d'observations satellitaires est d'utiliser les produits de fPAR. Mais cela demande alors de connaître l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse sur l'ensemble de la région afin d'en déduire l'ANPP ($ANPP = \epsilon \times fPAR \times PAR$). Or ce paramètre est également très difficile à estimer (Field *et al.* 1995), à tel point qu'une seule valeur de l'efficacité est généralement utilisée dans les études régionales. Une modélisation en fonction de la latitude ou de la précipitation moyenne pourrait permettre d'améliorer le calcul du RUE à l'échelle du Sahel. La question de l'impact des stress, hydriques ou liés aux nutriments (azote, phosphore), est cependant délicate. Les évaluations des produits GPP MODIS, par exemple, ne sont pas concluantes pour les sites sahéens (Sjöström *et al.* 2013).

Les tendances de l'ANPP et du RUE sont ainsi deux indicateurs qui ont été largement utilisés pour tenter de faire le point entre désertification et reverdissement du Sahel. Cependant, il existe d'autres indicateurs qui sont également utilisés pour détecter des écosystèmes dégradés. L'augmentation des

coefficients de ruissellement et des processus d'érosion sont deux de ces indicateurs. Or, de manière totalement contradictoire avec le reverdissement observé sur la quasi totalité du Sahel, une augmentation des coefficients de ruissellement et des phénomènes d'érosion a été observée sur plusieurs régions sahéliennes. Ces changements ont été détectés (par photographie aérienne et imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale, ainsi que par observations au sol des réseaux hydrographiques, des niveaux des mares, et des débits des oueds) sur une partie du paysage constituée de sols superficiels, soumis à une forte augmentation de l'érosion et des coefficients de ruissellement depuis les années 1950, parfois accompagnée d'une diminution du couvert végétal. La rapide augmentation du nombre de mares et de leur surface en eau depuis les 1950, contradictoire avec les faibles niveaux de pluie dans les années 1970 et 1980, en est une conséquence : c'est le "paradoxe sahélien" décliné dans sa version "Sahel pastoral". Une autre question soulevée dans cette thèse était donc la suivante : comment peut-on réconcilier les tendances au reverdissement observées à l'échelle du Sahel avec le paradoxe sahélien ?

Les résultats de notre étude montrent que les deux phénomènes (reverdissement et dégradation) peuvent probablement avoir lieu en même temps, dans la même zone, mais à des échelles spatiales différentes. En effet, dans la région du Gourma le reverdissement est majoritairement observé sur les sols sableux profonds, qui sont particulièrement résilients, ont des productions bien plus fortes que les sols superficiels, et couvrent des surfaces plus grandes. Ce fort signal au reverdissement peut alors masquer des tendances à la dégradation qui peuvent avoir lieu à une échelle plus petite (soit sur des zones étroites, soit à une échelle inférieure à celle des pixels GIMMS-3g). Il est intéressant de noter que l'analyse des données terrain acquises sur deux sites sur sols superficiels montre des changements contrastés : tandis qu'un premier site est caractérisé par une augmentation de l'érosion associée à une diminution du couvert végétal, le second semble peu impacté par ces processus, du moins en termes de production végétale. Le site a été fortement impacté par les sécheresses extrêmes des années 80, mais la productivité a pu s'améliorer par la suite, même si un changement de fonctionnement éco-hydrologique est noté. L'évolution n'est donc pas la même sur tous les sites sur sols superficiels du Gourma, et cette étude demande à être approfondie.

On peut noter, donc, que nous ne suivons pas complètement les conclusions de Prince *et al.* (1998) ou de Nicholson *et al.* (1998), mais pour des raisons différentes de celles de Hein & de Ridder (2006) : la dégradation est manifeste sur certains types de surface.

Ces phénomènes liés au "paradoxe sahélien" sont encore mal compris, que cela soit leur étendue spatiale ou les mécanismes qui en sont à l'origine. Une autre perspective à ces travaux de thèse concerne ainsi la compréhension de l'évolution des sols superficiels de la ceinture sahélienne. Premièrement, un état des lieux de l'étendue des surfaces concernées par ce phénomène pourrait être effectué à l'aide d'imagerie à très haute résolution spatiale (photographies aériennes ou images

satellites). Chacune des principales zones de sols superficiels de la ceinture sahélienne pourrait faire l'objet d'une étude spécifique, visant à établir les changements de l'état de surface entre une ou plusieurs dates lointaines (à partir des années 1950) comparativement à aujourd'hui. Ainsi, nous pourrions parvenir à une estimation de la superficie des sols superficiels soumis à forte érosion. Deuxièmement, un autre axe d'étude pourrait porter sur la compréhension des mécanismes qui provoquent cette augmentation significative des coefficients de ruissellement. Une hypothèse en attribue l'origine à une augmentation de l'érosion suite aux différentes périodes de sécheresse, mais cela n'est pas clairement établi. Pourquoi, par exemple, certains sols superficiels montrent-ils une diminution du couvert quand d'autres sites semblent moins impactés (comme observé dans le Gourma) ? Si une meilleure compréhension des mécanismes impliqués pouvait être acquise, alors la prévision de l'évolution du couvert sur ce type de surface pourrait éventuellement être abordée. Beaucoup de questions se posent encore aujourd'hui : Ces changements éco-hydrologiques sont-ils irréversibles, ou tout au moins susceptibles de durer plusieurs décennies ? Ou peut-on penser que si le niveau de pluie reste suffisamment haut pendant quelques années, un retour de la végétation sera possible ? A-t-on atteint un point de "non-retour" et ce phénomène va-t-il s'étendre au fur et à mesure que des épisodes secs vont survenir ?

Une façon d'aborder ces questions serait de modéliser des bassins versants soumis à des dynamiques différentes, à savoir un bassin versant soumis à une augmentation du ruissellement, et un bassin versant non impacté par les sécheresses. Il serait intéressant de voir quels facteurs seraient à l'origine de l'augmentation des coefficients de ruissellement, et quels facteurs pourraient stopper, voire inverser le phénomène.

Ce que l'on peut dire à l'échelle locale (pour les sites sableux du Gourma)

Dans la troisième partie de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la variabilité spatiale de la production et du RUE (des résidus) en sus de leur variabilité temporelle, via une étude locale des sites sableux du Gourma, qui sont ceux qui répondent directement aux précipitations. Par ce biais, nous avons voulu détecter des différences dans la réponse de la végétation au cumul des pluies, pour des sites comparables en termes de type de sol, mais répartis le long du gradient éco-climatique. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence la linéarité de la relation entre ANPP et précipitations sur la majeure partie du gradient de pluie (jusqu'à 450 mm). Au-delà de ce seuil, la production diminuant, d'autres facteurs limitent la production, comme par exemple les nutriments. Nous n'avons en revanche pas détecté de différences significatives dans la PMR (la pente de la régression ANPP / pluie) sur le gradient nord-sud des sites du Gourma, ce qui est contraire aux résultats d'Huxman *et al.* (2004). Cette différence est certainement due à la faible étendue du gradient de précipitations des sites du Gourma (0-600 mm/an) en comparaison au gradient caractérisant les sites de leur étude (0-3000 mm/an).

Deuxièmement, nos résultats révèlent que la distribution du RUE maximal (95^e quantile) en fonction des précipitations suit une fonction unimodale : un maximum du 95^e quantile du RUE est observé pour des précipitations annuelles autour de 200 mm. En deçà et au-delà de ce seuil, le RUE maximal est plus faible, ce qui souligne l'impact d'autres facteurs que la pluie dans la production des sites sableux du Gourma de cette partie du gradient. En revanche, la distribution de la médiane du RUE est beaucoup plus "plate", ce qui sous-entend que pour les valeurs moyennes du RUE, l'hypothèse de linéarité peut être adoptée. Ces résultats sont en accord avec une méta-analyse effectuée sur un gradient de précipitations similaire à celui du Gourma (Ruppert *et al.* 2012), et nous permettent de réconcilier des hypothèses contradictoires concernant le type de relation caractérisant le lien (linéaire ou non) entre la production et les pluies, et celui entre le RUE (ou les résidus) et les précipitations.

Nous avons également cherché à expliquer la variabilité de l'ANPP et du RUE en fonction de deux critères : la distribution intra-saisonnière des précipitations, en utilisant un travail de Hiernaux *et al.* (in prep.), et les changements de composition floristique du couvert. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de lien entre la variabilité interannuelle du RUE et la distribution intra-saisonnière des précipitations sur les sites sableux du Gourma, ce qui induit que le cumul annuel des précipitations, ou du moins le cumul JJASO, reste probablement un bon estimateur de la production annuelle. Malgré certains changements observés sur le terrain dans la composition floristique de la strate herbacée, nous n'avons pas non plus trouvé de lien significatif entre la variabilité interannuelle de l'ANPP et les différents groupements d'espèces représentant les caractéristiques fonctionnelles des végétaux, ni entre les résidus d'ANPP et les groupements d'espèces. Cela pose véritablement question sur l'utilité de différencier les types fonctionnels dans les modèles de végétation, et en particulier les espèces à photosynthèse en C₃ et les espèces à photosynthèse en C₄.

Et demain ?

En conclusion, à la question "Y-a-t-il désertification ou reverdissement du Sahel ?" ces travaux de thèse permettent de répondre clairement qu'il y a un reverdissement généralisé de la couverture végétale sur l'ensemble de la région sahélienne sur les 30 dernières années, mais que sur certaines régions comme le Fakara ou sur certains sols superficiels, une tendance à la dégradation du couvert peut également être observée. Nous réconcilions donc deux théories totalement opposées. Ces résultats sont importants pour l'ensemble de la communauté (télé-détecteurs, modélisateurs et utilisateurs des données), puisque l'utilisation des moyens spatiaux pour la détection des changements des milieux se révèle être une méthode robuste sur le long-terme, et cohérente avec les changements observés sur le terrain.

Lorsque l'on s'intéresse aux tendances climatiques, il est primordial de garder en tête que ces tendances sont extrêmement dépendantes des échelles (spatiales et temporelles) considérées, surtout lorsqu'il

s'agit de diagnostiquer un "état de santé" de la végétation par rapport à une situation de référence (i.e. le début de la période pour les études de tendance). Nous avons montré que le reverdissement observé dans la région du Gourma sur les 30 dernières années est majoritairement causé par le rétablissement des précipitations sur la période, ce qui est vraisemblablement le cas pour l'ensemble de la région sahélienne. Il est probable que l'influence de l'homme ou des processus d'érosion (paradoxe sahélien) soit limitée à une petite portion du paysage, comme dans le Gourma, ce qui n'altère en rien l'importance de ces tendances et la nécessité de mieux comprendre les processus impliqués, et également de suivre l'évolution des surfaces concernées.

Cependant, la variabilité décennale des pluies sahéliennes semble particulièrement liée à la variabilité des températures de surface des océans (en particulier à celles de l'Océan Atlantique Nord) via la variabilité de l'AMO, qui est actuellement caractérisée par une phase favorable pour la mousson sahélienne. Mais combien de temps cette phase favorable, et donc cette tendance à l'augmentation des précipitations va-t-elle durer ? Car si un renversement de l'AMO survient dans les décennies à venir, une diminution des précipitations au Sahel surviendra également. Le reverdissement observé aujourd'hui ne doit donc pas masquer des variabilités plus fortes, ni faire oublier la possibilité que cela ne représente qu'un état transitoire de la végétation dans un contexte de changement ou de variabilité climatique où les projections sont délicates, notamment en ce qui concerne le champ de précipitations.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schématisation des différentes régions éco-climatiques de la zone sahélienne.....	20
Figure 2. Schématisation des vents de surface et des pressions atmosphériques en Afrique de l'Ouest en a) hiver boréal et b) durant le pic de mousson.....	21
Figure 3. Schématisation a) de la ZCIT "classique" simplifiée et b) du fonctionnement de la mousson africaine moins simplifié.	22
Figure 4. Résultats de simulations présentant la distribution des biomes il y a a) 21 000 ans, b) 11 000 ans, c) 6000 ans et d) aujourd'hui	25
Figure 5. Indice d'humidité construit par Nicholson <i>et al.</i> (2012) à partir de relevés pluviométriques et de témoignages historiques.....	26
Figure 6. Anomalies annuelles des précipitations moyennées latitudinalement entre 11°N et 16°N, pour trois boîtes représentant l'Ouest, le centre, et l'Est du Sahel	26
Figure 7. Illustration du couvert végétal sur les trois types de sols principaux au Sahel	29
Figure 8. Illustration de la dynamique annuelle du couvert végétal sur le site d'Agoufou (Mali) en 2005, a) le 8 avril, b) le 17 juin, c) le 19 août, et d) le 28 septembre.	31
Figure 9. Taux de photosynthèse foliaire à plein éclairage exprimé par unité de surface de feuille pour différentes espèces en C ₃ et C ₄ typiques des régions sahéliennes	32
Figure 10. Dynamique saisonnière de la strate herbacée sur le site d'Agoufou au Mali pour a) l'année 2007 et b) l'année 2008.....	33
Figure 11. Passage d'un troupeau de bovins dans un paysage typique de la région du Ferlo au Sénégal. Le couvert ligneux est peu dense, et constitué d'une alternance d'arbustes et d'arbres plus grands	34
Figure 12. Mesures du peuplement ligneux dans le Ferlo au Sénégal.....	35
Figure 13. Région agro-pastorale du Fakara au sud-ouest du Niger : a) culture de mil, b) site en jachère, c) parcours pastoral.....	37
Figure 14. Étendue des terres arides et semi-arides.....	39
Figure 15. Vulnérabilité à la désertification	41
Figure 16. Évolution des chiffres officiels des Nations Unies concernant l'étendue des terres arides et semi-arides souffrant de désertification.....	43
Figure 17. Représentation de l'avancée du Sahara et proposition de "barrières de protection arbustives" au nord et au centre de la région.....	46
Figure 18. Expansion et contraction du Sahara sur la période 1980-1997	47
Figure 19. Signatures spectrales (réflectances) caractéristiques de la végétation verte, de la végétation sèche, et d'un sol nu	50
Figure 20. Signature spectrale d'une plante en fonction de son état physiologique	51
Figure 21. Relation entre NDVI et LAI.....	55
Figure 22. Effet de a) l'angle de visée et b) l'angle zénithal solaire sur le ratio proche IR/rouge et sur le NDVI	56
Figure 23. Construction des pixels GAC à partir des pixels LAC à bord des satellites NOAA.....	61
Figure 24. Heure de passage à l'Equateur des satellites NOAA, de 1981 à aujourd'hui.	63

Figure 25. Comparaison des bandes spectrales des capteurs AVHRR avec celles de SPOT Vegetation (VGT), SeaWifs et MODIS.....	65
Figure 26. Schématisation des différentes étapes du processus de calcul des réflectances de la surface des données MODIS.....	67
Figure 27. Tendances du NDVI GIMMS entre 1981 et 2003.....	69
Figure 28. Carte des tendances des indicateurs phénologiques issus du NDVI GIMMS sur la période 1982-2005.....	70
Figure 29. Comparaison du NDVI GIMMS, MODIS Terra, SPOT Vegetation (VGT) avec des mesures radiométriques <i>in situ</i> collectées sur le site de Dahra dans le nord du Sénégal.....	71
Figure 30. Méso-sites d'observation long-terme du programme AMMA-CATCH.....	72
Figure 31. Exemple d'emprise des pixels GIMMS-3g pour quelques sites de mesure du Gourma.....	75
Figure 32. Evolution du couvert ligneux sur le Gourma en fonction du type de sol.....	96
Figure 33. Illustration des problèmes méthodologiques rencontrés lors du calcul et de l'interprétation du RUE.....	99
Figure 34. Schématisation des différents points abordés dans le chapitre 5.....	131
Figure 35. Illustration de la variabilité du pic de croissance rapide de la végétation herbacée : cycle saisonnier de masse pour le site d'Agoufou (s17), entre les années 2000 et 2011.....	134
Figure 36. Représentation de l'échantillonnage des mesures de masse de la strate herbacée, pour tous les sites du Gourma, entre 1984 et 2010.....	135
Figure 37. Représentation de l'échantillonnage entre 1984 et 2010, pour les sites sableux du Gourma uniquement, après quelques corrections préliminaires.....	135
Figure 38. Estimation de la vitesse de disparition de la masse herbacée sèche à l'aide de l'indice STI de MODIS, sur 2000-2010, pour les sites sableux du Gourma.....	136
Figure 39. Effet de "sélection des sites" sur les latitudes et sur l'ANPP moyenne des sites.....	137
Figure 40. Localisation des sites de mesure de végétation du Gourma.....	139
Figure 41. Corrélations iNDVI/ANPP (terrain) pour les sites sableux regroupés en 5 groupes, selon leur localisation géographique, pour a) le NDVI GIMMS-3g sur 1984-2011, b) le NDVI GIMMS-3g sur 2000-2011 et c) le NDVI MODIS sur 2000-2011.....	140
Figure 42. Régressions linéaires (r^2) entre ANPP terrain et iNDVI à l'échelle du site pour a) le NDVI GIMMS-3g, sur la période 1984-2010, et b) le NDVI GIMMS-3g et le NDVI MODIS sur 2000-2011.....	141
Figure 43. ANPP terrain en fonction du cumul des précipitations (JJASO) pour tous les sites sableux, entre 1984 et 2010.....	143
Figure 44. a) Extrait de Huxman <i>et al.</i> (2004) : ANPP en fonction des précipitations sur 14 sites de mesure situés en Amérique du Nord et du Sud. b) Régressions linéaires pour chaque site du Gourma entre ANPP et précipitations annuelles.....	144
Figure 45. Variabilité spatio-temporelle du RUE en fonction des précipitations pour les sites sableux du Gourma.....	145
Figure 46. Relation RUE/précipitations pour les sites sableux du Gourma. Les points sont identifiés en fonction de la régularité des pluies annuelles.....	146
Figure 47. Relation RUE/précipitations en fonction de la durée des pluies utiles et de la durée des pluies non limitantes pour la croissance.....	146
Figure 48. Exemples d'évolution de la proportion (en % de couvert) de trois espèces remarquables, entre 1984 et 2006.....	147

Figure 49. Evolution de la composition floristique sur les sites sableux du Gourma entre 1984 et 2010 (sans les sites du Séno)	149
Figure 50. Régression linéaire entre les différentes variables de composition floristique et a) l'ANPP annuelle moyennée sur les sites sableux ; b) les résidus d'ANPP.....	150

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Classification bioclimatique des zones arides du monde entier, basée sur le ratio des précipitations (P) et de l'évapotranspiration potentielle (PET).....	39
Tableau 2. Estimation de l'étendue et de la sévérité de la désertification par continent.....	42
Tableau 3. Effets des variations de la composition atmosphérique sur les données AVHRR	57
Tableau 4. Exemples d'indices de végétation satellitaires	58
Tableau 5. Résumé des caractéristiques des principaux jeux de NDVI issus des données AVHRR	62
Tableau 6. Classement des sites par type de sols.	132
Tableau 7. Définition des abréviations utilisées pour décrire les différents groupements d'espèces. .	148

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ag Mahmoud M. (1992), *Le cercle de Gourma Rharous ou le Haut Gourma Central*, Bamako, Mali: Ministère du développement rural - Direction nationale de la coopération.
- An N., Price K. P. & Blair J. M. (2013), "Estimating above-ground net primary productivity of the tallgrass prairie ecosystem of the Central Great Plains using AVHRR NDVI", *International Journal of Remote Sensing*, 34(11), p.3717-3735.
- Anyamba A. & Eastman J. R. (1996), "Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Nino Southern Oscillation", *International Journal of Remote Sensing*, 17(13), p.2533-2548.
- Anyamba A. & Tucker C. J. (2005), "Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003", *Journal of Arid Environments*, 63(3), p.596-614.
- Asrar G., Kanemasu E. T., Jackson R. D. & Pinter P. J. (1985), "Estimation of Total above-Ground Phytomass Production Using Remotely Sensed Data", *Remote Sensing of Environment*, 17(3), p.211-220.
- Aubreville A., Chevalier, A. (1949), *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*, Paris: Société d'Éditions géographiques, maritimes et coloniales.
- Bai Y. F., Wu J. G., Xing Q., Pan Q. M., Huang J. H., Yang D. L. & Han X. G. (2008), "Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau", *Ecology*, 89(8), p.2140-2153.
- Barbosa P. M., Gregoire J. M. & Pereira J. M. C. (1999), "An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale", *Remote Sensing of Environment*, 69(3), p.253-263.
- Beck H. E., McVicar T. R., van Dijk A., Schellekens J., de Jeu R. A. M. & Bruijnzeel L. A. (2011), "Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery", *Remote Sensing of Environment*, 115(10), p.2547-2563.
- Begue A., Vintrou E., Ruelland D., Claden M. & Dessay N. (2011), "Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach", *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 21(2), p.413-420.
- Binns T. (1990), "Is desertification a myth ?", *Geography*, 75(327), p.106-113.
- Bonn F. (1996), *Précis de télédétection Vol. 2, Applications Thématiques*, F. Bonn, Québec: Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- Bonn F. & Rochon G. (1996), *Précis de télédétection Vol. 1, Principes et méthodes*, Québec: Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- Boudet G. (1974), *Inventaire et cartographie des pâturages en Afrique de l'Ouest*, Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains, Bamako, Mali. Addis Abeba: CIPEA-ILCA.
- Bounoua L., Collatz G. J., Los S. O., Sellers P. J., Dazlich D. A., Tucker C. J. & Randall D. A. (2000), "Sensitivity of climate to changes in NDVI", *Journal of Climate*, 13(13), p.2277-2292.

- Braconnot P., Joussaume S., Marti O. & de Noblet N. (1999), "Synergistic feedbacks from ocean and vegetation on the African monsoon response to mid-Holocene insolation", *Geophysical Research Letters*, 26(16), p.2481-2484.
- Braconnot P., Otto-Bliesner B., Harrison S., Joussaume S., Peterchmitt J. Y., Abe-Ouchi A., Crucifix M., Driesschaert E., Fichet T., Hewitt C. D., Kageyama M., Kitoh A., Loutre M. F., Marti O., Merkel U., Ramstein G., Valdes P., Weber L., Yu Y. & Zhao Y. (2007), "Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum - Part 2: feedbacks with emphasis on the location of the ITCZ and mid- and high latitudes heat budget", *Climate of the Past*, 3(2), p.279-296.
- Brender P., Hiernaux P., Ciais P., Maignan F. & Zhao Y. (2010), "On the causes of the recent Sahel "re-greening" : a review", *Commanditaire : AFD*, unpublished.
- Brooks N. (2004), "Drought in the African Sahel: long term perspectives and future prospects", *Tyndall Centre Working Papers*, U. o. E. Anglia.
- Cao M. K., Prince S. D., Small J. & Goetz S. J. (2004), "Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000", *Ecosystems*, 7(3), p.233-242.
- Carnegie D. M., deGloria S. D. & Colwell J. E. (1974), "Usefulness of ERTS-1 and supporting aircraft data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland", B. F. Report.
- Charney J. G. (1975), "Dynamics of Deserts and Drought in Sahel", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(428), p.193-202.
- Chevalier A. (1900), "Les zones et les provinces botaniques de l'Afrique occidentale française", *C.R. Académie des Sciences*, Paris, CXXX, p.1205-1208.
- Cihlar J., Chen J. M., Li Z., Huang F., Latifovic R. & Dixon R. (1998), "Can interannual land surface signal be discerned in composite AVHRR data?", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103(D18), p.23163-23172.
- Cissé A. M. (1986), *Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud- sahélienne*, Wageningen: Agricultural University.
- Claussen M., Kubatzki C., Brovkin V., Ganopolski A., Hoelzmann P. & Pachur H. J. (1999), "Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene", *Geophysical Research Letters*, 26(14), p.2037-2040.
- Colwell J. E. (1973), *Bidirectional spectral reflectance of grass canopies for determination of above ground standing biomass*, Ph.D. dissertation, University of Michigan.
- Cracknell A. P. (1997), *The Advances Very High Resolution Radiometer*, London: Taylor & Francis.
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougin E., Grippa M. & Tucker C. J. (2014), "Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger)", *Remote Sensing of Environment*, 140(0), p.350-364.
- Darkoh M. B. K. (1998), "The nature, causes and consequences of desertification in the drylands of Africa", *Land Degradation & Development*, 9(1), p.1-20.
- Deering D. W. (1978), *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*, Ph.D. dissertation, Texas A&M University.

- DeFries R., Hansen M. & Townshend J. (1995), "Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data", *Remote Sensing of Environment*, 54(3), p.209-222.
- Delbart N., Le Toan T., Kergoat L. & Fedotova V. (2006), "Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004)", *Remote Sensing of Environment*, 101(1), p.52-62.
- Delbart N., Picard G., Le Toans T., Kergoat L., Quegan S., Woodward I., Dye D. & Fedotova V. (2008), "Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale", *Global Change Biology*, 14(3), p.603-614.
- deMenocal P., Ortiz J., Guilderson T., Adkins J., Sarnthein M., Baker L. & Yarusinsky M. (2000), "Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing", *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), p.347-361.
- Descroix L., Laurent J. P., Vauclin M., Amogu O., Boubkraoui S., Ibrahim B., Galle S., Cappelaere B., Bousquet S., Mamadou I., Le Breton E., Lebel T., Quantin G., Ramier D. & Boulain N. (2012), "Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel", *Journal of Hydrology*, 424, p.1-15.
- Descroix L., Mahe G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J. C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I. & Sighomnou D. (2009), "Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.90-102.
- Diouf A. & Lambin E. F. (2001), "Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal", *Journal of Arid Environments*, 48(2), p.129-148.
- Dodd J. L. (1994), "Desertification and degradation in Sub-Saharan Africa - The role of livestock", *Bioscience*, 44(1), p.28-34.
- Dregne H. E. (1983), *Desertification of arid lands*, London: Harwood Academic Publishers.
- Dregne H. E. & Tucker C. J. (1988), "Desert encroachment", *Desertification Control Bulletin*, 16, p.16-19.
- Eklundh L. & Olsson L. (2003), "Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999", *Geophysical Research Letters*, 30(8), p.1430-1433.
- Eklundh L. R. (1995), "Noise estimation in NOAA AVHRR Maximum-Value Composite NDVI images", *International Journal of Remote Sensing*, 16(15), p.2955-2962.
- El Saleous N. Z., Vermote E. F., Justice C. O., Townshend J. R. G., Tucker C. J. & Goward S. N. (2000), "Improvements in the global biospheric record from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)", *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), p.1251-1277.
- Eltahir E. A. B. & Gong C. L. (1996), "Dynamics of wet and dry years in West Africa", *Journal of Climate*, 9(5), p.1030-1042.
- Evans J. & Geerken R. (2004), "Discrimination between climate and human-induced dryland degradation", *Journal of Arid Environments*, 57(4), p.535-554.
- Fensholt R., Anyamba A., Stisen S., Sandholt I., Pak E. & Small J. (2007), "Comparisons of compositing period length for vegetation index data from polar-orbiting and geostationary satellites for

- the cloud-prone region of West Africa", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(3), p.297-309.
- Fensholt R., Langanke T., Rasmussen K., Reenberg A., Prince S. D., Tucker C., Scholes R. J., Le Q. B., Bondeau A., Eastman R., Epstein H., Gaughan A. E., Hellden U., Mbow C., Olsson L., Paruelo J., Schweitzer C., Seaquist J. & Wessels K. (2012), "Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007 - an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers", *Remote Sensing of Environment*, 121, p.144-158.
- Fensholt R., Nielsen T. T. & Stisen S. (2006a), "Evaluation of AVHRR PAL and GIMMS 10-day composite NDVI time series products using SPOT-4 vegetation data for the African continent", *International Journal of Remote Sensing*, 27(13), p.2719-2733.
- Fensholt R. & Proud S. R. (2012), "Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends - Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series", *Remote Sensing of Environment*, 119, p.131-147.
- Fensholt R. & Rasmussen K. (2011), "Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data", *Remote Sensing of Environment*, 115(2), p.438-451.
- Fensholt R., Rasmussen K., Kaspersen P., Huber S., Horion S. & Swinnen E. (2013), "Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships", *Remote Sensing*, 5(2), p.664-686.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T. T. & Mbow C. (2009), "Evaluation of earth observation based long term vegetation trends - Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data", *Remote Sensing of Environment*, 113(9), p.1886-1898.
- Fensholt R., Sandholt I. & Rasmussen M. S. (2004), "Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements", *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), p.490-507.
- Fensholt R., Sandholt I. & Stisen S. (2006b), "Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION - Vegetation indices using in situ measurements in a semiarid environment", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), p.1774-1786.
- Field C. B., Randerson J. T. & Malmstrom C. M. (1995), "Global Net Primary Production - Combining Ecology and Remote-Sensing", *Remote Sensing of Environment*, 51(1), p.74-88.
- Gallo K., Li L., Reed B., Eidenshink J. & Dwyer J. (2005), "Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data", *Remote Sensing of Environment*, 99(3), p.221-231.
- Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L. & Grippa M. (2010), "Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali)", *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), p.309-324.
- Gasse F. (2000), "Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum", *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), p.189-211.
- Gates D. M. (1980), *Biophysical Ecology*, New York: Springer-Verlag.
- Ghannoum O., Von Caemmerer S., Ziska L. H. & Conroy J. P. (2000), "The growth response of C-4 plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment", *Plant Cell and Environment*, 23(9), p.931-942.

- Giannini A., Saravanan R. & Chang P. (2003), "Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales", *Science*, 302(5647), p.1027-1030.
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J. & Merzlyak M. N. (1996), "Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS", *Remote Sensing of Environment*, 58(3), p.289-298.
- Gonzalez P., Tucker C. J. & Sy H. (2012), "Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate", *Journal of Arid Environments*, 78, p.55-64.
- Goutorbe J. P., Lebel T., Tinga A., Bessemoulin P., Brouwer J., Dolman A. J., Engman E. T., Gash J. H. C., Hoepffner M., Kabat P., Kerr Y. H., Monteny B., Prince S., Said F., Sellers P. & Wallace J. S. (1994), "HAPEX-Sahel - A large-scale study of land-atmosphere interactions in the semiarid tropics", *Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences*, 12(1), p.53-64.
- Goward S. N., Dye D. G., Turner S. & Yang J. (1993), "Objective assessment of the NOAA Global Vegetation Index data product", *International Journal of Remote Sensing*, 14(18), p.3365-3394.
- Grouzis M. (1992), "Germination et établissement des plantes annuelles sahéniennes", In E. Le Flo'ch, M. Grouzis, A. Cornet & J.-C. Bille (Eds.), *L'aridité : une contrainte au développement : caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*, Paris: ORSTOM, p.267-282.
- Guyot G. (1989), *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, T. satellitaire, Caen: Paradigme.
- Hanan N. P., Begue A. & Prince S. D. (1997a), "Errors in remote sensing of intercepted photosynthetically active radiation: An example from HAPEX-Sahel", *Journal of Hydrology*, 189(1-4), p.676-696.
- Hanan N. P., Prevost Y., Diouf A. & Diallo O. (1991), "Assessment of Desertification around Deep Wells in the Sahel Using Satellite Imagery", *Journal of Applied Ecology*, 28(1), p.173-186.
- Hanan N. P., Prince S. D. & Begue A. (1997b), "Modelling vegetation primary production during HAPEX-Sahel using production efficiency and canopy conductance model formulations", *Journal of Hydrology*, 189(1-4), p.651-675.
- Hein L. & de Ridder N. (2006), "Desertification in the Sahel: a reinterpretation", *Global Change Biology*, 12(5), p.751-758.
- Hein L., de Ridder N., Hiernaux P., Leemans R., de Wit A. & Schaepman M. (2011), "Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images", *Journal of Arid Environments*, 75(11), p.1164-1172.
- Hellden U. (1988), "Desertification monitoring: is the desert encroaching ?", *Desertification Control Bulletin*, 17, p.8-12.
- Hellden U. (1991), "Desertification - Time for an Assessment", *Ambio*, 20(8), p.372-383.
- Herrmann S. M., Anyamba A. & Tucker C. J. (2005), "Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate", *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 15(4), p.394-404.
- Herrmann S. M. & Tappan G. G. (2013), "Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal", *Journal of Arid Environments*, 90(0), p.55-66.
- Heumann B. W., Seaquist J. W., Eklundh L. & Jonsson P. (2007), "AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005", *Remote Sensing of Environment*, 108(4), p.385-392.

- Hickler T., Eklundh L., Seaquist J. W., Smith B., Ardo J., Olsson L., Sykes M. T. & Sjoström M. (2005), "Precipitation controls Sahel greening trend", *Geophysical Research Letters*, 32(21), p.1-4.
- Hiernaux P. & Ayantunde A. (2004), "The Fakara: a semi-arid agro-ecosystem under stress", *Report of research activities, First phase (July 2002-June 2004) of the DMP-GEF Program (GEF/2711-02-4516)*, Nairobi (Kenya): ILRI.
- Hiernaux P., Ayantunde A., Kalilou A., Mougin E., Gerard B., Baup F., Grippa M. & Djaby B. (2009a), "Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: Impact of land use, management and variable rainfall", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.65-77.
- Hiernaux P., Diarra L., Trichon V., Mougin E., Soumaguel N. & Baup F. (2009b), "Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali)", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.103-113.
- Hiernaux P. & Le Houerou H. N. (2006), "Les parcours du Sahel", *Sécheresse*, 17(1-2), p.51-71.
- Hiernaux P., Mougin E., Diarra L., Soumaguel N., Lavenu F., Tracol Y. & Diawara M. (2009c), "Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.114-127.
- Hiernaux P., Mougin E., Soumaguel N., Diawara M., Auda Y. & Le Dantec V. (in prep.), "Do seasonal maximum growth rates explain the large variations in annual yields of the herbaceous in Sahel rangelands?"
- Hiernaux P. & Turner M. D. (1996), "The effect of clipping on growth and nutrient uptake of Sahelian annual rangelands", *Journal of Applied Ecology*, 33(2), p.387-399.
- Holben B. N. (1986), "Characteristics of Maximum-Value Composite images from temporal AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), p.1417-1434.
- Holm A. M., Cridland S. W. & Roderick M. L. (2003a), "The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia", *Remote Sensing of Environment*, 85(2), p.145-158.
- Holm A. M., Watson I. W., Loneragan W. A. & Adams M. A. (2003b), "Loss of patch-scale heterogeneity on primary productivity and rainfall-use efficiency in Western Australia", *Basic and Applied Ecology*, 4(6), p.569-578.
- Hountondji Y. C., Sokpon N. & Ozer P. (2006), "Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification", *International Journal of Remote Sensing*, 27(5-6), p.871-884.
- Huber S. & Fensholt R. (2011), "Analysis of teleconnections between AVHRR-based sea surface temperature and vegetation productivity in the semi-arid Sahel", *Remote Sensing of Environment*, 115(12), p.3276-3285.
- Hubert H. (1920), "Le dessèchement progressif en Afrique occidentale", *Bulletin du Comité d'études historiques et scientifiques de l'Afrique occidentale française.*, 3, p.401-467.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X. & Ferreira L. G. (2002), "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices", *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), p.195-213.
- Huete A. R. (1988), "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)", *Remote Sensing of Environment*, 25(3), p.295-309.

- Huete A. R. & Jackson R. D. (1987), "Suitability of spectral indexes for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands", *Remote Sensing of Environment*, 23(2), p.213-232.
- Huete A. R., Post D. F. & Jackson R. D. (1984), "Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination", *Remote Sensing of Environment*, 15(2), p.155-165.
- Huete A. R. & Tucker C. J. (1991), "Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), p.1223-1242.
- Hutchinson C. F., Herrmann S. M., Maukonen T. & Weber J. (2005), "Introduction: The "Greening" of the Sahel", *Journal of Arid Environments*, 63(3), p.535-537.
- Huxman T. E., Smith M. D., Fay P. A., Knapp A. K., Shaw M. R., Loik M. E., Smith S. D., Tissue D. T., Zak J. C., Weltzin J. F., Pockman W. T., Sala O. E., Haddad B. M., Harte J., Koch G. W., Schwinning S., Small E. E. & Williams D. G. (2004), "Convergence across biomes to a common rain-use efficiency", *Nature*, 429(6992), p.651-654.
- Ichii K., Kawabata A. & Yamaguchi Y. (2002), "Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990", *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), p.3873-3878.
- Jackson R. D. & Huete A. R. (1991), "Interpreting Vegetation Indices", *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3-4), p.185-200.
- Jacques D., Kergoat L., Hiernaux P., Mougou E. & Defourny P. (in prep.), "Monitoring dry vegetation in arid areas with MODIS SWIR bands".
- James M. E. & Kalluri S. N. V. (1994), "The Pathfinder AVHRR land data set – An improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), p.3347-3363.
- Janicot S. & Sultan B. (2001), "Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon", *Geophysical Research Letters*, 28(3), p.523-526.
- Jarlan L., Tourre Y. M., Mougou E., Philippon N. & Mazzega P. (2005), "Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982=2003)", *Geophysical Research Letters*, 32(4), p.1-4.
- Jia G. S. J., Epstein H. E. & Walker D. A. (2003), "Greening of arctic Alaska, 1981-2001", *Geophysical Research Letters*, 30(20).
- Jin M. (2004), "Analysis of land skin temperature using AVHRR observations", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(4), p.587-600.
- Jolly D., Harrison S. P., Damnati B. & Bonnefille R. (1998), "Simulated climate and biomes of Africa during the late quaternary: Comparison with pollen and lake status data", *Quaternary Science Reviews*, 17(6-7), p.629-657.
- Jones B. (1938), "Desiccation and the West African Colonies", *Geographical Journal*, 91(5), p.401-423.
- Jones H. G. (1992), *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- Jordan C. F. (1969), "Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor", *Ecology*, 50, p.663-666.

- Joussaume S., Taylor K. E., Braconnot P., Mitchell J. F. B., Kutzbach J. E., Harrison S. P., Prentice I. C., Broccoli A. J., Abe-Ouchi A., Bartlein P. J., Bonfils C., Dong B., Guiot J., Herterich K., Hewitt C. D., Jolly D., Kim J. W., Kislov A., Kitoh A., Loutre M. F., Masson V., McAvaney B., McFarlane N., de Noblet N., Peltier W. R., Peterschmitt J. Y., Pollard D., Rind D., Royer J. F., Schlesinger M. E., Syktus J., Thompson S., Valdes P., Vettoretti G., Webb R. S. & Wypytta U. (1999), "Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP)", *Geophysical Research Letters*, 26(7), p.859-862.
- Justice C. O., Markham B. L., Townshend J. R. G. & Kennard R. L. (1989), "Spatial Degradation of Satellite Data", *International Journal of Remote Sensing*, 10(9), p.1539-1561.
- Justice C. O., Townshend J. R. G., Holben B. N. & Tucker C. J. (1985), "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), p.1271-1318.
- Justice C. O., Townshend J. R. G., Vermote E. F., Masuoka E., Wolfe R. E., Saleous N., Roy D. P. & Morisette J. T. (2002), "An overview of MODIS Land data processing and product status", *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), p.3-15.
- Justice C. O., Vermote E., Townshend J. R. G., Defries R., Roy D. P., Hall D. K., Salomonson V. V., Privette J. L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R. B., Knyazikhin Y., Running S. W., Nemani R. R., Wan Z. M., Huete A. R., van Leeuwen W., Wolfe R. E., Giglio L., Muller J. P., Lewis P. & Barnsley M. J. (1998), "The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), p.1228-1249.
- Kammerud T. A. (1996), "Soil impact on satellite based vegetation monitoring in Sahelian Mali", *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography*, 78A(4), p.247-259.
- Kidane W., Maetz M. & Dardel P. (2006), "Sécurité alimentaire et développement agricole en Afrique subsaharienne", *Dossier pour l'accroissement des soutiens publics - Rapport principal*, Rome: FAO, Série sur l'assistance aux politiques.
- Kidwell K. B. (1998), *NOAA poar orbiters user's guide*, N. O. a. A. Administration, Washington D.C.: U.S. Department of Commerce.
- Knight J. R., Folland C. K. & Scaife A. A. (2006), "Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation", *Geophysical Research Letters*, 33(17).
- Kropelin S., Verschuren D. & Lezine A. M. (2008a), "Response to Comment on "Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years""", *Science*, 322(5906).
- Kropelin S., Verschuren D., Lezine A. M., Eggermont H., Cocquyt C., Francus P., Cazet J. P., Fagot M., Rumes B., Russell J. M., Darius F., Conley D. J., Schuster M., von Suchodoletz H. & Engstrom D. R. (2008b), "Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years", *Science*, 320(5877), p.765-768.
- Kutzbach J. E. & Liu Z. (1997), "Response of the African monsoon to orbital forcing and ocean feedbacks in the middle Holocene", *Science*, 278(5337), p.440-443.
- Lambin E. F. & Ehrlich D. (1997), "Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982-1991): Application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale", *Remote Sensing of Environment*, 61(2), p.181-200.
- Lamprey H. F. (1975), "Report on the desert encroachment reconnaissance in northern sudan : 21 october to 10 november 1975", *Technical report*, Paris/Nairobi: UNESCO/UNEP, 17, p.1-7.

- Le Barbé L. & Lebel T. (1997), "Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990", *Journal of Hydrology*, 189(1-4), p.43-73.
- Le Houerou H. N. (1976), "Nature & désertisation", *CR Consultation sur la foresterie au Sahel*, CILSS/UNESCO/FAO, Rome: FAO.
- Le Houerou H. N. (1980), "The rangelands of the Sahel", *Journal of Range Management*, 33(1), p.41-46.
- Le Houerou H. N. (1984), "Rain Use Efficiency - a Unifying Concept in Arid-Land Ecology", *Journal of Arid Environments*, 7(3), p.213-247.
- Le Houerou H. N. (1989), *The grazing land ecosystems of the African Sahel*, Berlin: Springer.
- Le Houerou H. N. (1996), "Climate change, drought and desertification", *Journal of Arid Environments*, 34(2), p.133-185.
- Le Houerou H. N. (1997), "Climate, flora and fauna changes in the Sahara over the past 500 million years", *Journal of Arid Environments*, 37(4), p.619-647.
- Le Houerou H. N. & Popov G. F. (1981), "An eco-climatic classification of intertropical Africa", *FAO Plant Production And Protection Papers (FAO)*, 31(9).
- Lebel T. & Ali A. (2009), "Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007)", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.52-64.
- Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C. & Seguis L. (2009), "AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview", *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.3-13.
- Lee R., Yu F., Price K. P., Ellis J. & Shi P. (2002), "Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis", *International Journal of Remote Sensing*, 23(12), p.2505-2512.
- Los S. O. (1998), "Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA AVHRR channels 1 and 2 from monthly NDVI composites", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1), p.206-213.
- Lucht W., Prentice I. C., Myneni R. B., Sitch S., Friedlingstein P., Cramer W., Bousquet P., Buermann W. & Smith B. (2002), "Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect", *Science*, 296(5573), p.1687-1689.
- Lunetta R. S. & Elvidge C. D. (1999), *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications*, R. S. Lunetta & C. D. Elvidge: Taylor & Francis.
- Mabbutt J. A. (1984), "A new global assessment of the status and trends of desertification", *Environmental Conservation*, 11(2), p.103-113.
- Mabbutt J. A. (1987), "A review of progress since the UN Conference on Desertification", *Desertification Control Bulletin*, 15, p.12-23.
- Mainquet M. (1991), *Desertification: Natural Background and Human Mismanagement*, New-York: Springer-Verlab.
- Major D. J., Baret F. & Guyot G. (1990), "A Ratio Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness", *International Journal of Remote Sensing*, 11(5), p.727-740.

- Miehe S. (2006), "Comment on: Hein, L. 2006: The impacts of grazing and rainfall variability on the dynamics of a Sahelian rangeland. *J. Arid Environ.* 64(3): 488-504", *Journal of Arid Environments*, 67(1), p.174-176.
- Miehe S., Kluge J., von Wehrden H. & Retzer V. (2010), "Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal", *Journal of Applied Ecology*, 47(3), p.692-700.
- Monod T. (1957), *Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique*, Londres: Conseil Scientifique pour l'Afrique au Sud du Sahara.
- Monteith J. L. (1972), "SOLAR-RADIATION AND PRODUCTIVITY IN TROPICAL ECOSYSTEMS", *Journal of Applied Ecology*, 9(3), p.747-766.
- Moulin S., Kergoat L., Viovy N. & Dedieu G. (1997), "Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements", *Journal of Climate*, 10(6), p.1154-1170.
- Muldavin E. H., Moore D. I., Collins S. L., Wetherill K. R. & Lightfoot D. C. (2008), "Aboveground net primary production dynamics in a northern Chihuahuan Desert ecosystem", *Oecologia*, 155(1), p.123-132.
- Myneni R. B., Hall F. G., Sellers P. J. & Marshak A. L. (1995), "The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), p.481-486.
- Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., Asrar G. & Nemani R. R. (1997a), "Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991", *Nature*, 386(6626), p.698-702.
- Myneni R. B., Los S. O. & Tucker C. J. (1996), "Satellite-based identification of linked vegetation index and sea surface temperature anomaly areas from 1982-1990 for Africa, Australia and South America", *Geophysical Research Letters*, 23(7), p.729-732.
- Myneni R. B., Nemani R. R. & Running S. W. (1997b), "Estimation of global Leaf Area Index and absorbed PAR using radiative transfer models", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6), p.1380-1393.
- Myneni R. B. & Williams D. L. (1994), "On the Relationship between Fapar and Ndvi", *Remote Sensing of Environment*, 49(3), p.200-211.
- Nagol J. R. (2011), *Quantification of error in AVHRR NDVI data*, Ph.D. dissertation, University of Maryland.
- Nagol J. R., Vermote E. F. & Prince S. D. (2009), "Effects of atmospheric variation on AVHRR NDVI data", *Remote Sensing of Environment*, 113(2), p.392-397.
- Nesbitt S. W. & Zipser E. J. (2003), "The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements", *Journal of Climate*, 16(10), p.1456-1475.
- Nicholson S. E. (2000), "The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millenia", *Global and Planetary Change*, 26(1-3), p.137-158.
- Nicholson S. E. (2009), "A revised picture of the structure of the "monsoon" and land ITCZ over West Africa", *Climate Dynamics*, 32(7-8), p.1155-1171.
- Nicholson S. E. (2013), "The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability", *ISRN Meteorology*, vol. 2013, Article ID 453521.

- Nicholson S. E., Dezfuli A. K. & Klotter D. (2012), "A Two-Century Precipitation Dataset for the Continent of Africa", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(8), p.1219-1231.
- Nicholson S. E. & Palao I. M. (1993), "A Reevaluation of Rainfall Variability in the Sahel .1. Characteristics of Rainfall Fluctuations", *International Journal of Climatology*, 13(4), p.371-389.
- Nicholson S. E., Some B. & Kone B. (2000), "An Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa, Including the Rainy Seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña Years", *Journal of Climate*, 13(14), p.2628-2640.
- Nicholson S. E., Tucker C. J. & Ba M. B. (1998), "Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), p.815-829.
- Olsson L., Eklundh L. & Ardo J. (2005), "A recent greening of the Sahel - Trends, patterns and potential causes", *Journal of Arid Environments*, 63(3), p.556-566.
- Otterman J. (1974), "Baring High-Albedo Soils by Overgrazing - Hypothesized Desertification Mechanism", *Science*, 186(4163), p.531-533.
- Ozer A. & Ozer P. (2005), "Désertification au Sahel : crise climatique ou anthropique ?", *Bull. Séanc. Acad. R. des Sci. Outre-Mer*, 51(4), p.395-423.
- Paruelo J. M., Garbulsky M. F., Guerschman J. P. & Jobbagy E. G. (2004), "Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change", *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), p.2793-2806.
- Pearson R. L. & Miller L. D. (1972), *Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie*, Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Mich. Ann Arbor, Michigan USA: Willow Run Laboratories, Environmental Research Institute of Michigan.
- Penning de Vries F. W. T. & Djitéye M. A. (1982), *La Productivité des pâturages sahéliens : une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*, F. W. T. Penning de Vries & M. A. Djitéye, Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Piao S. L., Fang J. Y. & He J. S. (2006a), "Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang Plateau, China, from 1982 to 1999", *Climatic Change*, 74(1-3), p.253-267.
- Piao S. L., Fang J. Y., Ji W., Guo Q. H., Ke J. H. & Tao S. (2004), "Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China", *Journal of Vegetation Science*, 15(2), p.219-226.
- Piao S. L., Fang J. Y., Zhou L. M., Ciais P. & Zhu B. (2006b), "Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation", *Global Change Biology*, 12(4), p.672-685.
- Piao S. L., Fang J. Y., Zhou L. M., Guo Q. H., Henderson M., Ji W., Li Y. & Tao S. (2003), "Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D14).
- Piao S. L., Mohammad A., Fang J. Y., Cai Q. & Feng J. M. (2006c), "NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China", *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 16(4), p.340-348.
- Pielke R. A., Avissar R., Raupach M., Dolman A. J., Zeng X. B. & Denning A. S. (1998), "Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate", *Global Change Biology*, 4(5), p.461-475.

- Pinty B. & Verstraete M. M. (1992), "GEMI - A nonlinear index to monitor global vegetation from satellites", *Vegetatio*, 101(1), p.15-20.
- Pinzon J. E., Brown M. E. & Tucker C. J. (2005), "EMD correction of orbital drift artifacts in satellite data stream", In N. E. Huang & S. P. S. Shen (Eds.), *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*, Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 5, p.167-186.
- Prihodko L. & Goward S. N. (1997), "Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations", *Remote Sensing of Environment*, 60(3), p.335-346.
- Prince S. D. (1991), "Satellite Remote-Sensing of Primary Production - Comparison of Results for Sahelian Grasslands 1981-1988", *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), p.1301-1311.
- Prince S. D., De Colstoun E. B. & Kravitz L. L. (1998), "Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification", *Global Change Biology*, 4(4), p.359-374.
- Prince S. D. & Goward S. N. (1995), "Global primary production: A remote sensing approach", *Journal of Biogeography*, 22(4-5), p.815-835.
- Prince S. D., Wessels K. J., Tucker C. J. & Nicholson S. E. (2007), "Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation", *Global Change Biology*, 13(7), p.1308-1313.
- Pu B. & Cook K. H. (2012), "Role of the West African Westerly Jet in Sahel Rainfall Variations", *Journal of Climate*, 25(8), p.2880-2896.
- Redelsperger J. L., Thorncroft C. D., Diedhiou A., Lebel T., Parker D. J. & Polcher J. (2006), "African monsoon multidisciplinary analysis - An international research project and field campaign", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12), p.1739-1746.
- Renssen H., Brovkin V., Fichefet T. & Goosse H. (2003), "Holocene climate instability during the termination of the African Humid Period", *Geophysical Research Letters*, 30(4).
- Rial J. A., Pielke R. A., Beniston M., Claussen M., Canadell J., Cox P., Held H., De Noblet-Ducoudre N., Prinn R., Reynolds J. F. & Salas J. D. (2004), "Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system", *Climatic Change*, 65(1-2), p.11-38.
- Richardson A. J. & Wiegand C. L. (1977), "Distinguishing vegetation from soil background information", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12), p.1541-1552.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. & Deering D. W. (1974a), *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*, NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium. Washington, D.C: NASA.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. & Harlan J. C. (1974b), "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (greenwave Effect) of Natural Vegetation. Type III Final Report", Greenbelt, Md: NASA/GSFC.
- Rozanov B. G. (1990), *Global assessment of desertification : status and methodologies*, Desertification revisited: Proceedings of an *Ad-Hoc* consultative meeting, Nairobi, Kenya. Nairobi: UNEP DC/PAC.
- Ruimy A., Kergoat L., Bondeau A. & Participants Potsdam N. P. M. I. (1999), "Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency", *Global Change Biology*, 5, p.56-64.

- Ruimy A., Saugier B. & Dedieu G. (1994), "Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99(D3), p.5263-5283.
- Ruppert J. C., Holm A., Miede S., Muldavin E., Snyman H. A., Wesche K. & Linstadter A. (2012), "Meta-analysis of ANPP and rain-use efficiency confirms indicative value for degradation and supports non-linear response along precipitation gradients in drylands", *Journal of Vegetation Science*, 23(6), p.1035-1050.
- Sage R. F., Li M. & Monson R. K. (1999), "The Taxonomic Distribution of C4 Photosynthesis", In F. S. Rowan & K. M. Russell (Eds.), *C4 Plant Biology*, San Diego: Academic Press, p.551-584.
- Sala O. E. & Austin A. T. (2000), "Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity", In O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney & R. W. Howarth (Eds.), *Methods in Ecosystem Science* New-York: Springer, p.31-43.
- Sala O. E., Parton W. J., Joyce L. A. & Lauenroth W. K. (1988), "Primary Production of the Central Grassland Region of the United-States", *Ecology*, 69(1), p.40-45.
- Sankaran M., Hanan N. P., Scholes R. J., Ratnam J., Augustine D. J., Cade B. S., Gignoux J., Higgins S. I., Le Roux X., Ludwig F., Ardo J., Banyikwa F., Bronn A., Bucini G., Caylor K. K., Coughenour M. B., Diouf A., Ekaya W., Feral C. J., February E. C., Frost P. G. H., Hiernaux P., Hrabar H., Metzger K. L., Prins H. H. T., Ringrose S., Sea W., Tews J., Worden J. & Zambatis N. (2005), "Determinants of woody cover in African savannas", *Nature*, 438(7069), p.846-849.
- Seaquist J. W., Olsson L., Ardo J. & Eklundh L. (2006), "Broad-scale increase in NPP quantified for the African Sahel, 1982-1999", *International Journal of Remote Sensing*, 27(22), p.5115-5122.
- Sellers P. J. (1985), "Canopy reflectance, Photosynthesis and Transpiration", *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), p.1335-1372.
- Shanahan T. M., Overpeck J. T., Anchukaitis K. J., Beck J. W., Cole J. E., Dettman D. L., Peck J. A., Scholz C. A. & King J. W. (2009), "Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa", *Science*, 324(5925), p.377-380.
- Sighomnou D., Descroix L., Genthon P., Mahé G., Bouzou Moussa I., Gautier E., Mamadou I., Vandervaere J. P., Bachir T., Coulibaly B., Rajot J.-L., Malam Issa O., Malam Abdou M., Dessay N., Delaitre E., Faram Maiga O., Diedhiou A., Panthou G., Vishel T., Yacouba H., Karambiri H., Paturel J.-E., Diello P., Mougin E., Kergoat L. & Hiernaux P. (2013), "La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?", *Sécheresse*, 24(1), p.3-13.
- Sjöström M., Zhao M., Archibald S., Arneth A., Cappelaere B., Falk U., de Grandcourt A., Hanan N., Kergoat L., Kutsch W., Merbold L., Mougin E., Nickless A., Nouvellon Y., Scholes R. J., Veenendaal E. M. & Ardö J. (2013), "Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data", *Remote Sensing of Environment*, 131(0), p.275-286.
- Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O. & Tucker C. J. (2003), "Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99", *Global Change Biology*, 9(1), p.1-15.
- Song Y., Ma M. G. & Veroustraete F. (2010), "Comparison and conversion of AVHRR GIMMS and SPOT VEGETATION NDVI data in China", *International Journal of Remote Sensing*, 31(9), p.2377-2392.
- Stebbing E. P. (1935), "The Encroaching Sahara: The Threat to the West African Colonies", *Geographical Journal*, 85(6), p.506-524.

- Sud Y. C. & Fennessy M. (1982), "A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM", *Journal of Climatology*, 2(2), p.105-125.
- Sultan B. & Janicot S. (2000), "Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability", *Geophysical Research Letters*, 27(20), p.3353-3356.
- Swinnen E. & Veroustraete F. (2008), "Extending the SPOT-VEGETATION NDVI time series (1998-2006) back in time with NOAA-AVHRR data (1985-1998) for southern Africa", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), p.558-572.
- Talbot M. R. (1985), "Major bounding surfaces in aelian sandstones - A climatic model", *Sedimentology*, 32(2), p.257-265.
- Tappan G. G., Sall M., Wood E. C. & Cushing M. (2004), "Ecoregions and land cover trends in Senegal", *Journal of Arid Environments*, 59(3), p.427-462.
- Tarchiani V., Di Vecchia A., Genesisio L. & F. S. (2008), "Monitoring Drylands Ecosystem Dynamics for Sustainable Development Policies: The Keita Experience", In C. Lee & T. Schaaf (Eds.), *The future of Drylands*: UNESCO, p.395-407.
- Taylor C. M., de Jeu R. A. M., Guichard F., Harris P. P. & Dorigo W. A. (2012), "Afternoon rain more likely over drier soils", *Nature*, 489(7416), p.423-426.
- Taylor C. M., Gounou A., Guichard F., Harris P. P., Ellis R. J., Couvreur F. & De Kauwe M. (2011), "Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscale soil-moisture patterns", *Nature Geoscience*, 4(7), p.430-433.
- Taylor C. M., Lambin E. F., Stephenne N., Harding R. J. & Essery R. L. H. (2002), "The Influence of Land Use Change on Climate in the Sahel", *Journal of Climate*, 15(24), p.3615-3629.
- Thomas D. S. G. (1993), "Sandstorm in a tea cup - Understanding desertification", *Geographical Journal*, 159, p.318-331.
- Thorncroft C. D., Hanh N., Zhang C. D. & Peyrille P. (2011), "Annual cycle of the West African monsoon: regional circulations and associated water vapour transport", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654), p.129-147.
- Townshend J. R. G. & Tucker C. (1981), *Utility of AVHRR NOAA-6 and -7 for vegetation mapping*, Proceedings of the International Conference on Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, London/Nottingham Remote Sensing Society.
- Tracol Y. (2004), *Etude des variations interannuelles de la production herbacée des pâturages sahéliens : Exemple du Gourma malien*, Thèse de doctorat d'université, Université de Toulouse III Paul Sabatier.
- Trochain J. L. (1940), *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*, M. d. I. I. F. d. A. Noire, Paris: Larose.
- Tucker C. J., Dregne H. E. & Newcomb W. W. (1991), "Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990", *Science*, 253(5017), p.299-301.
- Tucker C. J., Gatlin J. A. & Schneider S. R. (1984), "Monitoring vegetation in the Nile Delta with NOAA-6 and NOAA-7 AVHRR imagery", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(1), p.53-61.

- Tucker C. J., Justice C. O. & Prince S. D. (1986), "Monitoring the Grasslands of the Sahel 1984-1985", *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), p.1571-1581.
- Tucker C. J., Newcomb W. W. & Dregne H. E. (1994), "AVHRR Data Sets for Determination of Desert Spatial Extent", *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), p.3547-3565.
- Tucker C. J. & Nicholson S. E. (1999), "Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997", *Ambio*, 28(7), p.587-591.
- Tucker C. J., Pinzon J. E., Brown M. E., Slayback D. A., Pak E. W., Mahoney R., Vermote E. F. & El Saleous N. (2005), "An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data", *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), p.4485-4498.
- Tucker C. J., Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O., Myneni R. B. & Taylor M. G. (2001), "Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999", *International Journal of Biometeorology*, 45(4), p.184-190.
- Tucker C. J., Vanpraet C. L., Sharman M. J. & Vanittersum G. (1985), "Satellite Remote-Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel - 1980-1984", *Remote Sensing of Environment*, 17(3), p.233-249.
- UNCOD (1977), *Proceedings of the Desertification Conference (Nairobi, UNEP)*, London: Pergamon Press.
- UNEP (1987), "Sands of Change", *UNEP Environmental Brief 2*, Nairobi: UNEP.
- UNEP (1992), *World Atlas of Desertification*, N. J. Middleton & D. S. G. Thomas, London: Edward Arnold.
- Vermote E., El Saleous N. & Holben B. N. (1996), "Aerosol retrieval and atmospheric correction", In G. D'Souza, A. S. Belward & J. P. Malingreau (Eds.), *Advances in the Use of NOAA AVHRR Data for Land Applications*, Dordrecht: Kluwer, 5.
- Vermote E. & Kaufman Y. J. (1995), "Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views", *International Journal of Remote Sensing*, 16(13), p.24.
- Vernet R. (2002), "Climate during the late Holocene in the Sahara and the Sahel: Evolution and consequences on human settlement.", In F. A. Hassan (Eds.), *Droughts, Food and Culture*, New York/Boston: Springer, p.47-63.
- Veron S. R., Oesterheld M. & Paruelo J. M. (2005), "Production as a function of resource availability: Slopes and efficiencies are different", *Journal of Vegetation Science*, 16(3), p.351-354.
- Veron S. R., Paruelo J. M. & Oesterheld M. (2006), "Assessing desertification", *Journal of Arid Environments*, 66(4), p.751-763.
- Vintrou E. (2012), *Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au Mali par télédétection à moyenne résolution spatiale*, Thèse de doctorat d'université, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Vintrou E., Claden M., Begue A. & Ruelland D. (2009), *Analysis of 1982-2006 Sudano-Sahelian Vegetation Dynamics Using Noaa-Avhr Ndvi Data and Normalized Rain-Use Efficiency*, 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa. New-York, USA: IEEE.

- Vintrou E., Desbrosse A., Begue A., Traore S., Baron C. & Lo Seen D. (2012), "Crop area mapping in West Africa using landscape stratification of MODIS time series and comparison with existing global land products", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), p.83-93.
- Weldeab S., Lea D. W., Schneider R. R. & Andersen N. (2007), "155,000 years of West African monsoon and ocean thermal evolution", *Science*, 316(5829), p.1303-1307.
- Wessels K. J., Prince S. D., Malherbe J., Small J., Frost P. E. & VanZyl D. (2007), "Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa", *Journal of Arid Environments*, 68(2), p.271-297.
- Xue Y. K. & Shukla J. (1993), "The influence of land-surface properties on Sahel climate. 1. Desertification", *Journal of Climate*, 6(12), p.2232-2245.
- Yang Y. H., Fang J. Y., Ma W. H. & Wang W. (2008), "Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands", *Geophysical Research Letters*, 35(23).
- Yu F. F., Price K. P., Ellis J. & Shi P. J. (2003), "Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia", *Remote Sensing of Environment*, 87(1), p.42-54.
- Zeng N., Neelin J. D., Lau K. M. & Tucker C. J. (1999), "Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction", *Science*, 286(5444), p.1537-1540.
- Zhang X. Y., Friedl M. A., Schaaf C. B., Strahler A. H., Hodges J. C. F., Gao F., Reed B. C. & Huete A. (2003), "Monitoring vegetation phenology using MODIS", *Remote Sensing of Environment*, 84(3), p.471-475.
- Zhao M. S., Heinsch F. A., Nemani R. R. & Running S. W. (2005a), "Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set", *Remote Sensing of Environment*, 95(2), p.164-176.
- Zhao Y., Braconnot P., Marti O., Harrison S. P., Hewitt C., Kitoh A., Liu Z., Mikolajewicz U., Otto-Bliesner B. & Weber S. L. (2005b), "A multi-model analysis of the role of the ocean on the African and Indian monsoon during the mid-Holocene", *Climate Dynamics*, 25(7-8), p.777-800.
- Zhongmin H., Guirui Y., Jiangwen F., Huaping Z., Shaoqiang W. & Shengong L. (2010), "Precipitation-use efficiency along a 4500-km grassland transect", *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), p.842-851.
- Zhou L., Kaufmann R. K., Tian Y., Myneni R. B. & Tucker C. J. (2003), "Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D1).

ANNEXES

ANNEXE 1.	Comparaison des différentes méthodes d'agrégation temporelle du NDVI.....	182
ANNEXE 2.	Tendances du NDVI au Sahel : ce que montrent les autres jeux de données.....	186
ANNEXE 3.	Cartes de corrélation entre jeux de NDVI.....	187
ANNEXE 4.	Indicateurs de phénologie (tendances mensuelles du NDVI) sur le Fakara.....	188
ANNEXE 5.	Caractérisation de la dynamique de l'occupation des sols sur le Fakara au cours du temps : classifications supervisées.....	189
ANNEXE 6.	Détail des données terrain de masse herbacée (Gourma).....	190
ANNEXE 7.	Corrélations NDVI/masse herbacée, site par site.....	193
ANNEXE 8.	Détails sur les moyennes pondérées des données terrain de masse herbacée (Gourma, Fakara).....	197
ANNEXE 9.	Composition floristique, masse et résidus (détails des corrélations par variable de composition floristique).....	198

ANNEXE 1 . Comparaison des différentes méthodes d'agrégation temporelle du NDVI

Nous avons testé différentes méthodes pour estimer des valeurs "annuelles" du NDVI : la moyenne pendant la saison de croissance, l'intégrale, les maxima annuels. Pour chacune de ces méthodes, nous avons procédé à de nombreux tests supplémentaires (choix des périodes à considérer, seuils de significativité, définition des masques...). Nous montrons ici un échantillon caractéristique des résultats obtenus : cartes des tendances à l'échelle du Sahel, profils temporels du NDVI, régressions linéaires entre NDVI et données terrain de la masse herbacée sur les régions du Gourma et du Fakara.

Les tendances sont représentées comme le produit de la pente de la régression par le nombre total d'années considérées ("incrément linéaire"). Pour les cartes de tendances, les régions où les tendances ne sont pas significatives à 95% sont masquées en gris clair. Enfin, les régions où l'écart-type du NDVI en fonction du temps est inférieur à +/- 0.015 unités de NDVI sont masquées en gris foncé.

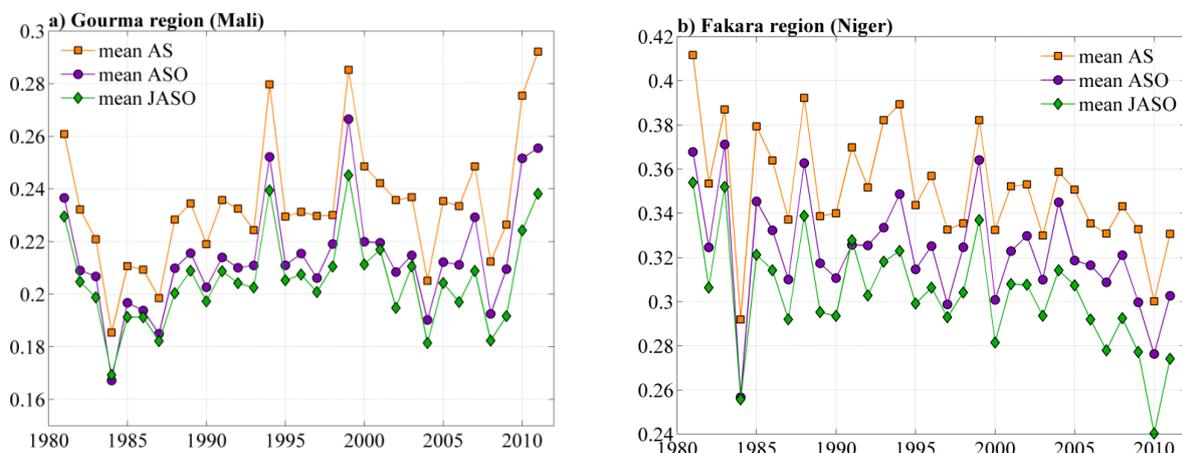
Les résultats obtenus avec les méthodes de la moyenne saisonnière et de l'intégrale sont similaires et cohérents, surtout sur la ceinture sahélienne. La méthode des maxima annuels produit un biais vers des valeurs fortement positives qui exacerbe certainement les changements pouvant être réellement observés sur le terrain.

1. Moyenne saisonnière (pour différentes périodes)

Avec cette méthode, une valeur "annuelle" du NDVI est obtenue en moyennant les valeurs du NDVI sur une période préalablement définie. Dans notre article Dardel *et al.* (2014) (voir Chapitre 3), nous avons choisi de moyennner sur les mois d'août-septembre (AS). Voici les résultats obtenus pour deux autres périodes : ASO (août, septembre, octobre) et JASO (de juillet à octobre).

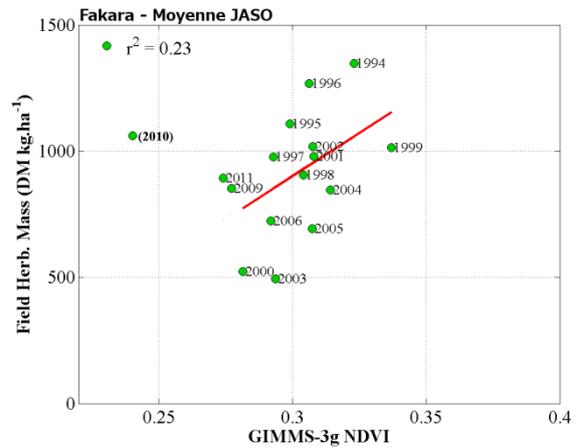
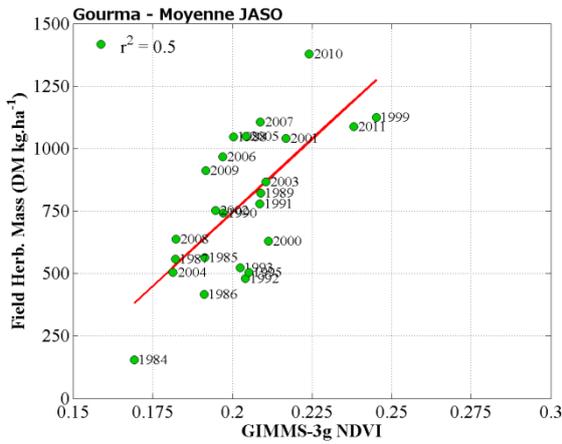
Profils temporels pour les différentes périodes de moyenne du NDVI (AS, ASO, JASO)

Pour le Gourma (à gauche) et le Fakara (à droite) :

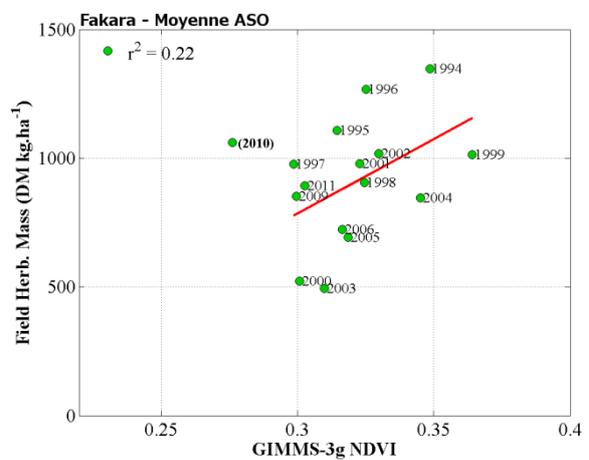
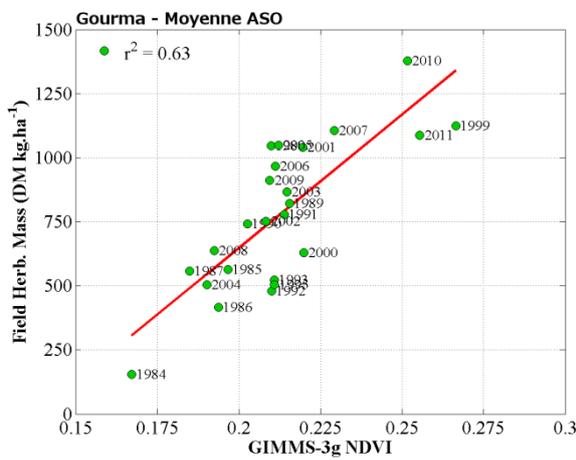


Régression linéaire entre le NDVI et la moyenne pondérée des données terrain

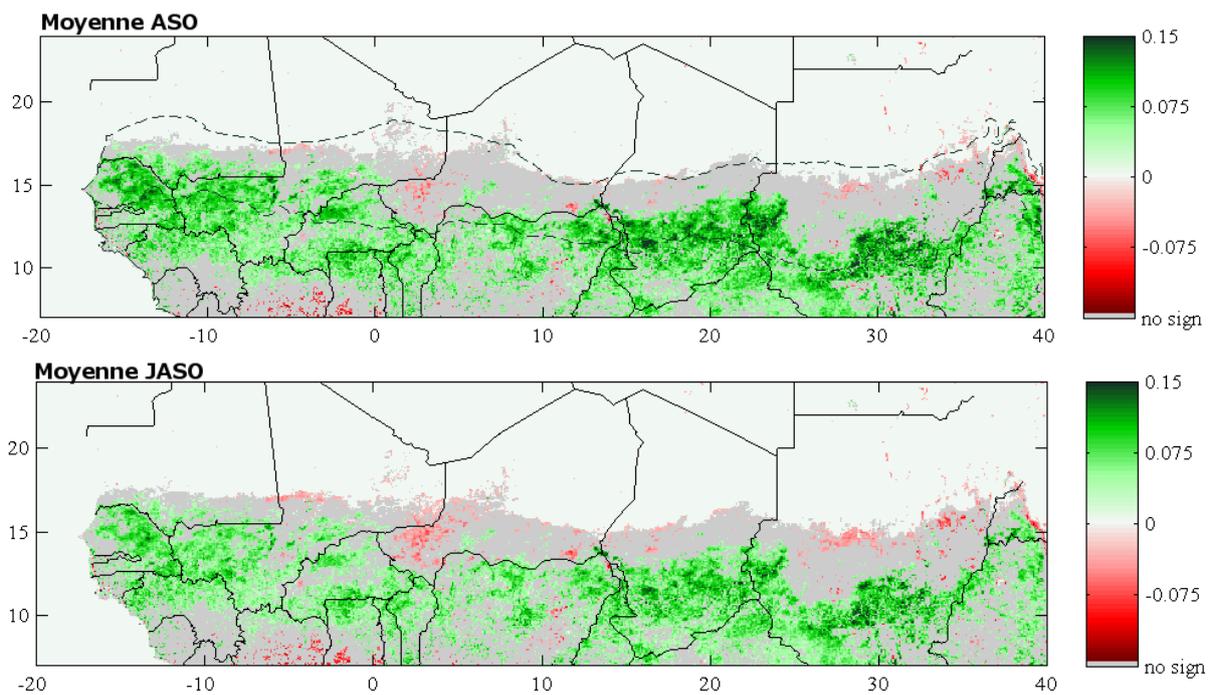
NDVI moyenné sur la période JASO (pour le Gourma à gauche, le Fakara à droite) :



NDVI moyenné sur la période ASO (pour le Gourma à gauche, le Fakara à droite) :



Tendances du NDVI GIMMS-3g à l'échelle du Sahel (1981-2011):

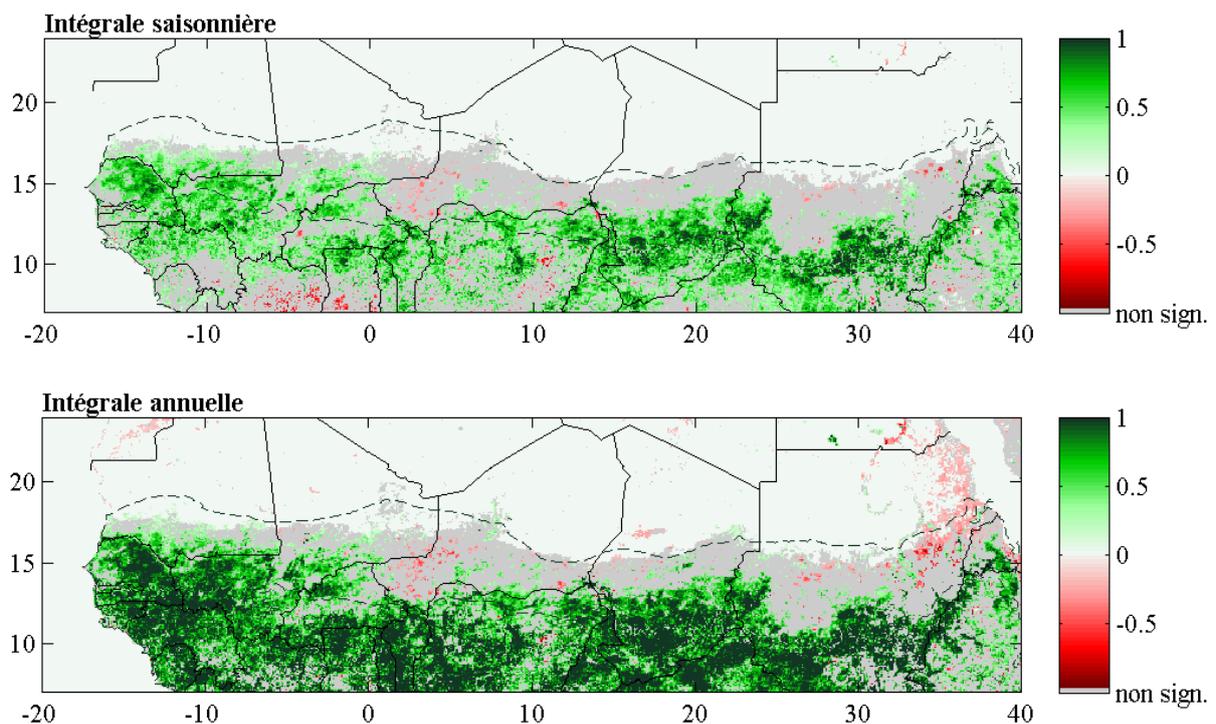


2. Intégration temporelle

Méthode:

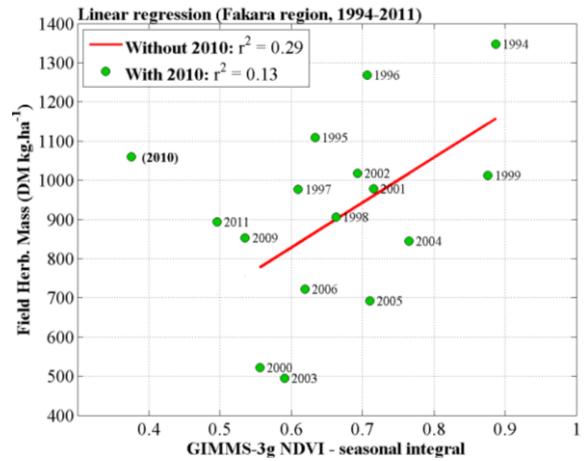
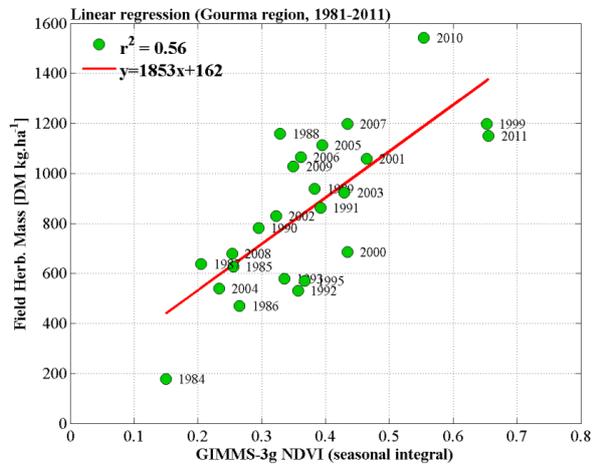
L'intégrale du NDVI (iNDVI) est calculée pixel par pixel, pour chaque année. Un niveau de base pour l'intégration est d'abord estimé, que nous avons défini comme étant la valeur moyenne du NDVI en saison sèche sur toute la période. La saison sèche est elle-même définie pour les mois de janvier à avril et de novembre à décembre. Ce niveau de base permet de calculer un NDVI "normalisé" qui est la différence entre les valeurs brutes du NDVI et le niveau de base pour l'intégration. Les valeurs positives du NDVI normalisées sont ensuite intégrées sur une période de temps qui est soit l'année entière, soit la saison de croissance uniquement, définie ici de manière large entre les mois de juin à octobre. Nous présentons ci-après quelques résultats significatifs obtenus pour le NDVI intégré sur la saison de croissance (intégrale "saisonnière") et sur l'année entière (intégrale "annuelle").

Carte de tendances du iNDVI, 1981-2011 :



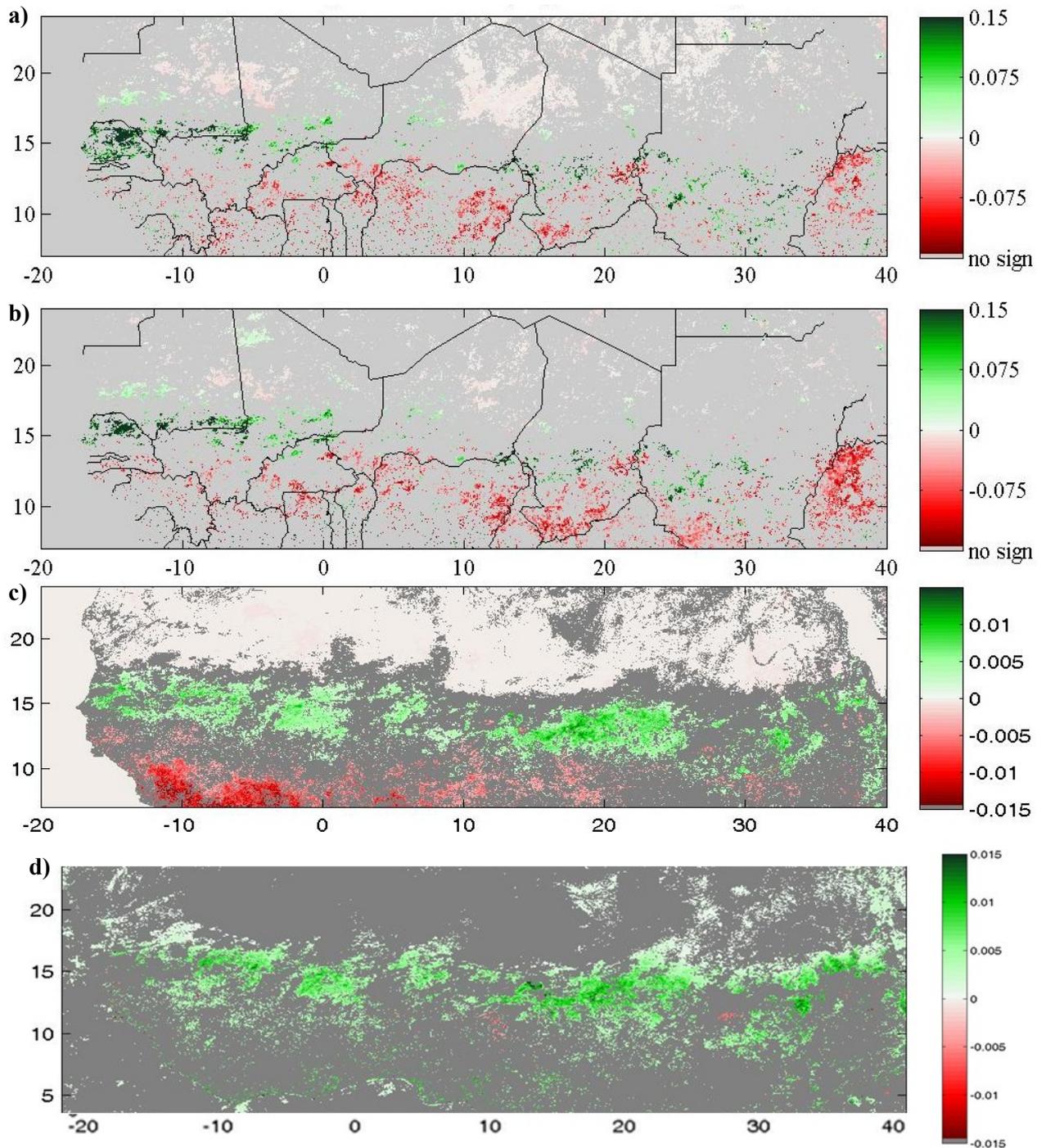
Régression linéaire entre le iNDVI et la moyenne pondérée des données terrain

Pour le Gourma (à gauche) et le Fakara (à droite, avec et sans 2010):



ANNEXE 2 . Tendances du NDVI au Sahel : ce que montrent les autres jeux de données

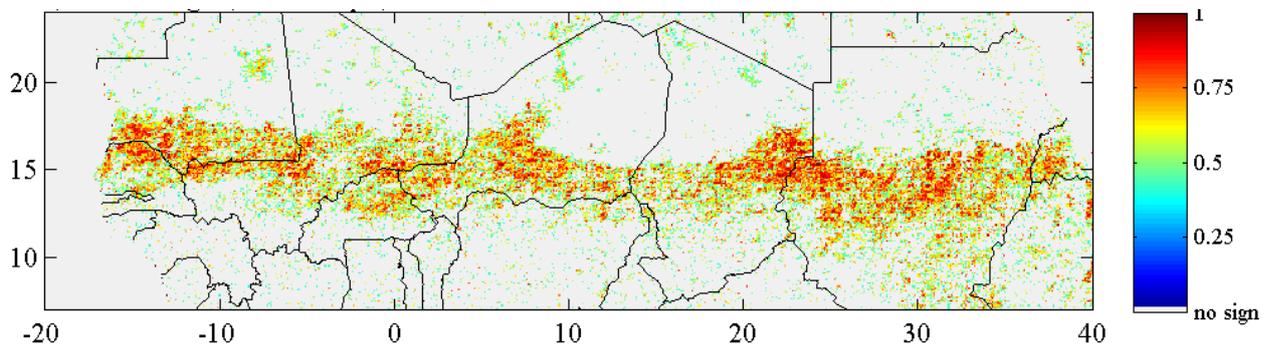
Tendances linéaires du NDVI moyenné sur la saison de croissance (Août-Septembre) pour les données MODIS (a-Aqua et b-Terra) sur 2002-2011, c- pour les données GIMMS sur 1981-2006, et d- pour les données LTDR sur 1981-1999.



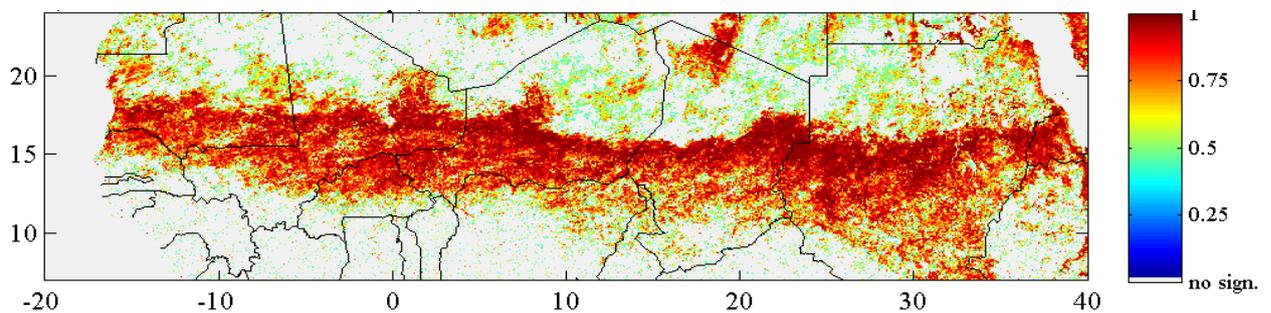
ANNEXE 3 . Cartes de corrélation entre jeux de NDVI

Les cartes de corrélation suivantes sont calculées selon la méthode décrite dans la publication du Chapitre 3 (voir la section Méthodes). Le NDVI est moyenné sur la saison de croissance (Août-Septembre). Cette annexe vise à compléter les figures publiées dans Dardel *et al.* (2014) (où on peut trouver les cartes de corrélation calculées entre GIMMS-3g et respectivement GIMMS, LTDR et MODIS Terra).

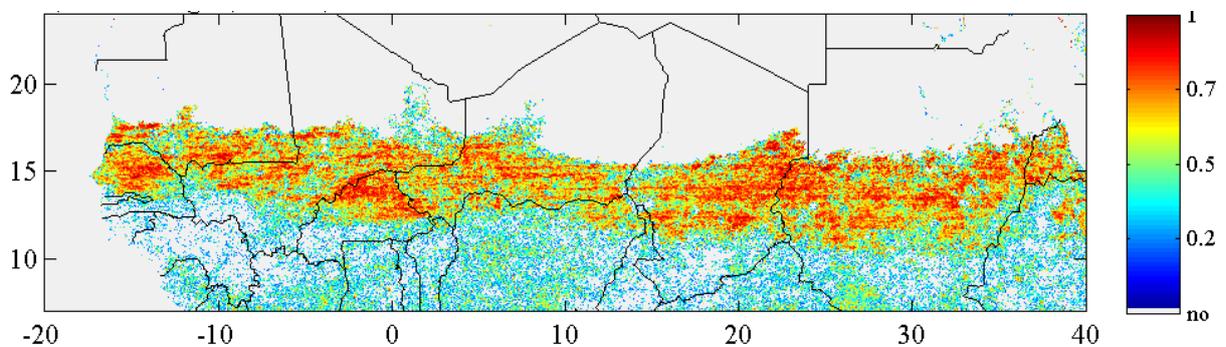
a. Coefficients (r^2) de la régression linéaire : GIMMS3g = f(MODIS Aqua) ; 2002-2011



b. Coefficients (r^2) de la régression linéaire : MODIS Terra = f(MODIS Aqua) ; 2002-2011



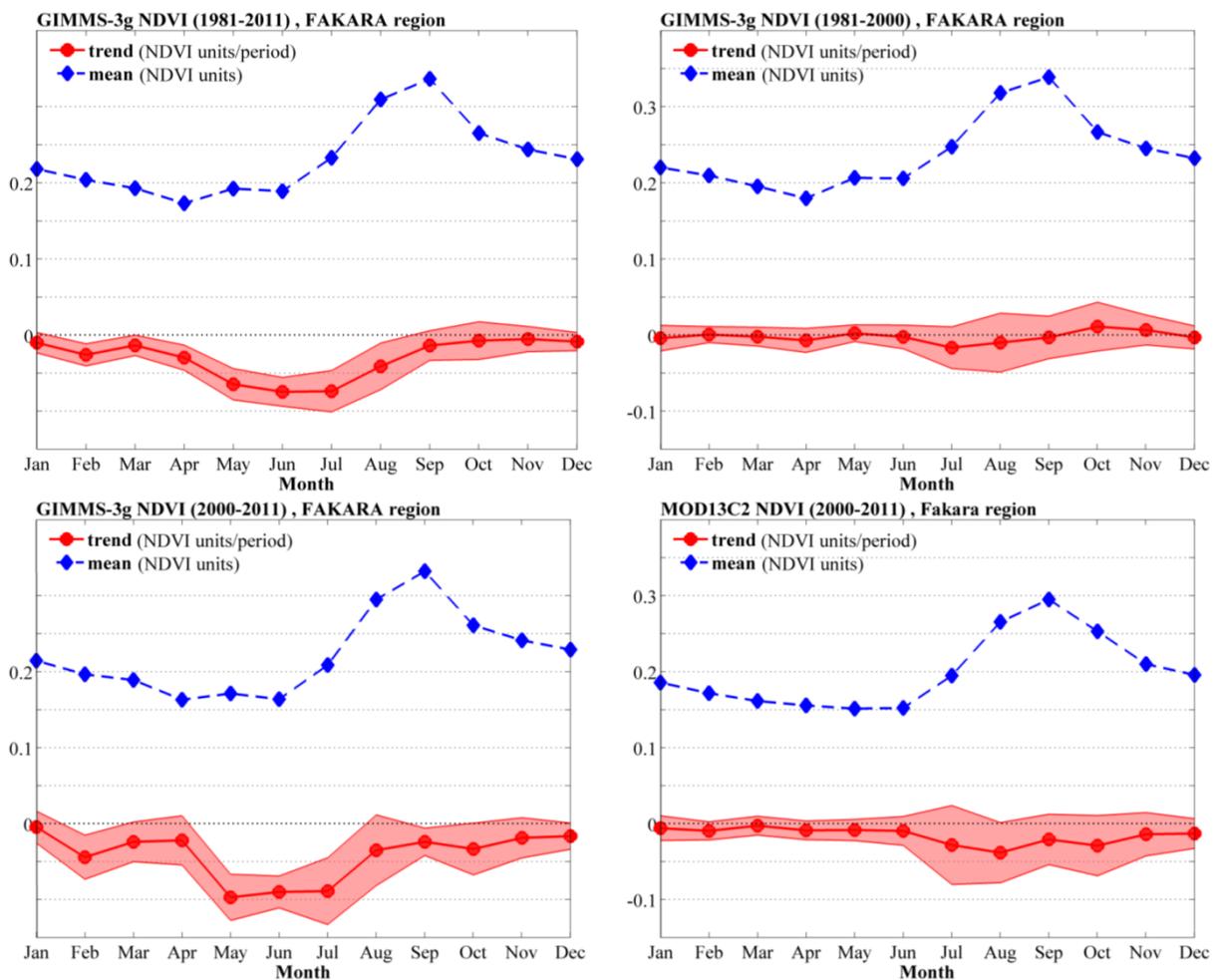
c. Coefficients (r^2) de la régression linéaire : GIMMS-3g = f(GIMMS) ; 1981-2006



ANNEXE 4 . Indicateurs de phénologie (tendances mensuelles du NDVI) sur le Fakara

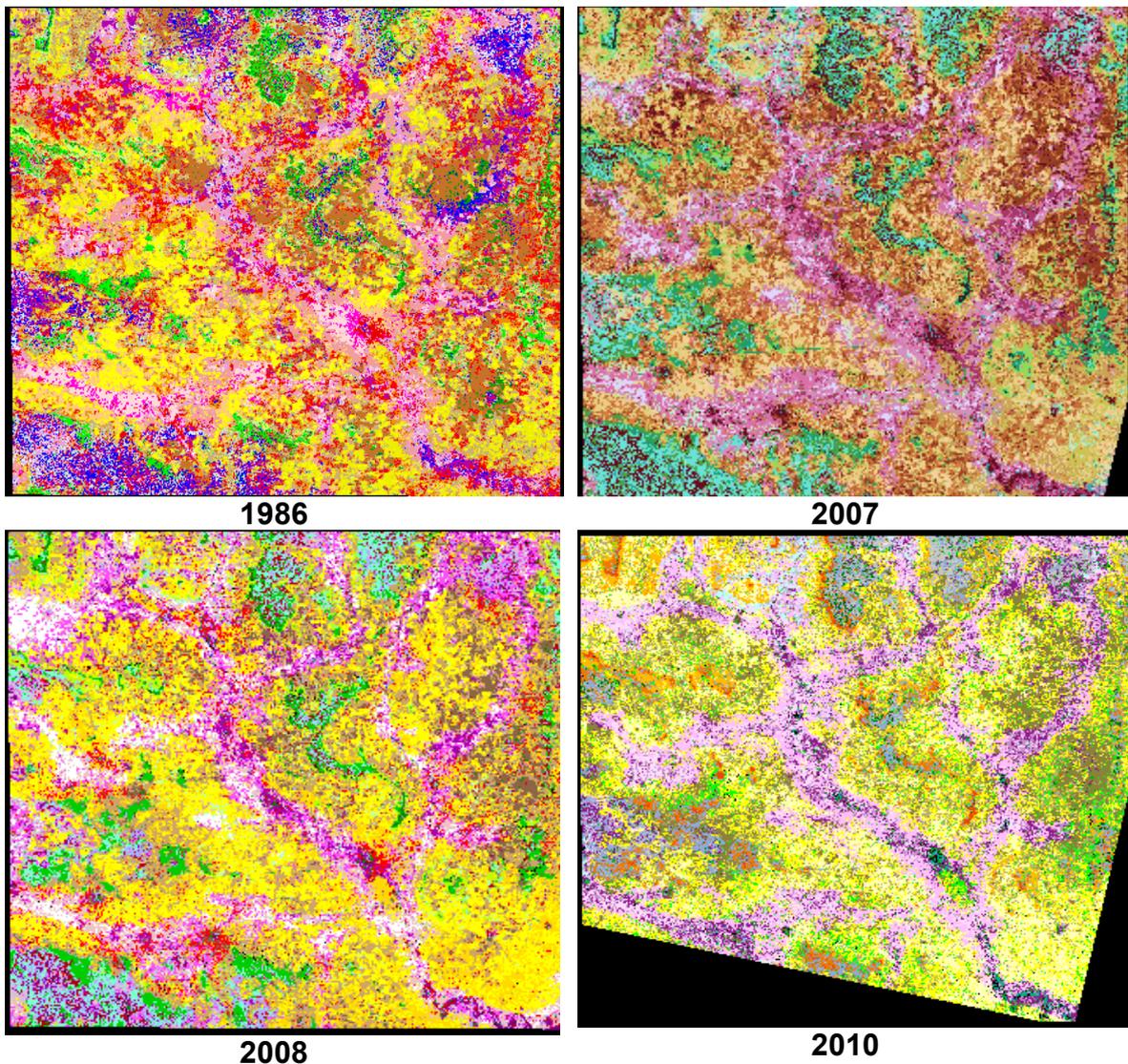
Ces graphiques sont calculés de la même façon que pour la région du Gourma (voir la publication présentée dans le Chapitre 3).

Lecture de la figure : Cycles annuels (en bleu) et tendances mensuelles (en rouge ; la zone ombrée représente l'intervalle de confiance) pour : le NDVI GIMMS-3g sur 1981-2011 (a), 1981-2000 (b), 2000-2011 (c) et pour le NDVI MODIS Terra sur 2000-2011 (d). Le NDVI est moyenné sur la région du Fakara



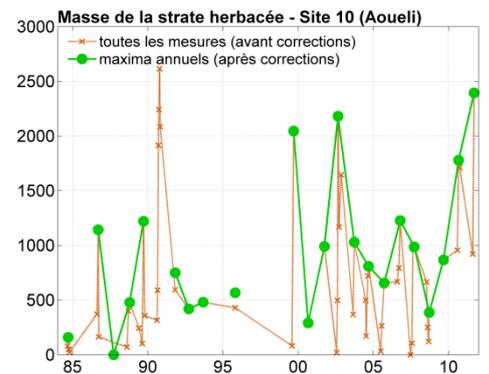
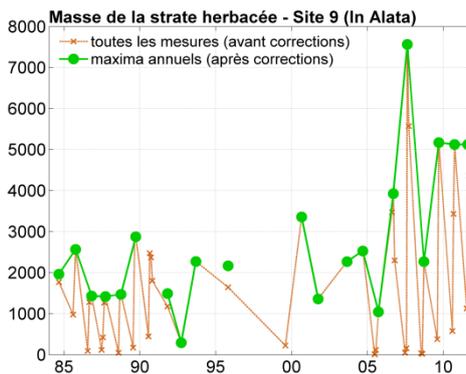
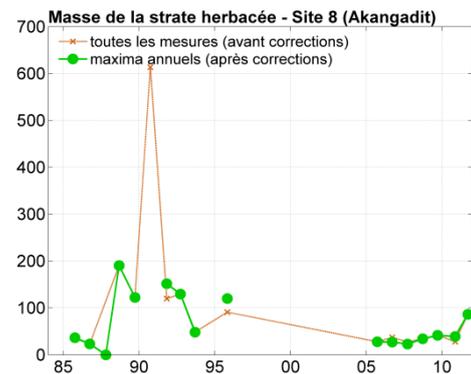
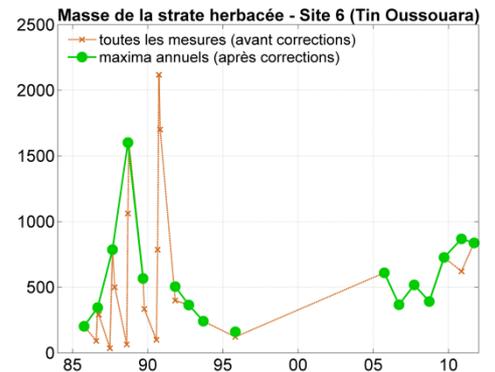
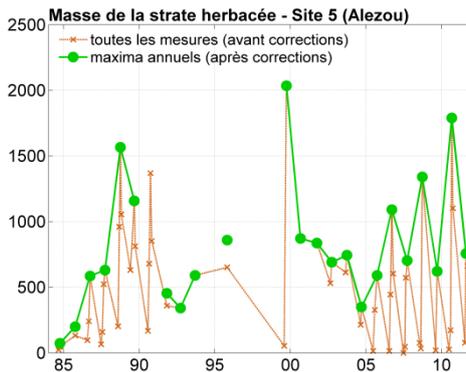
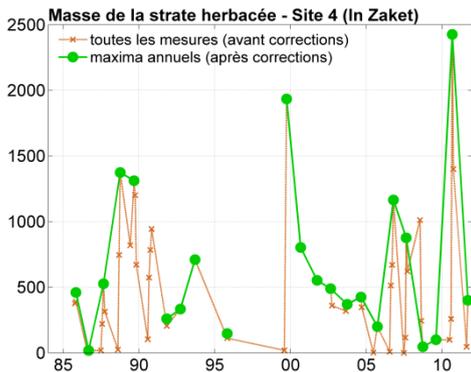
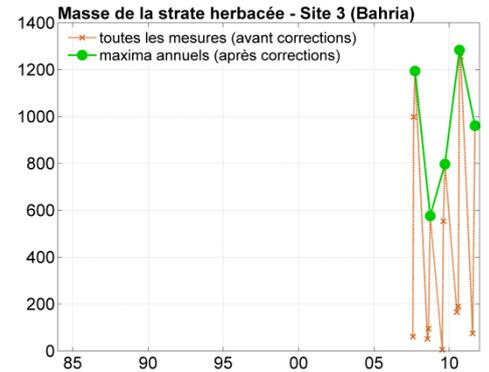
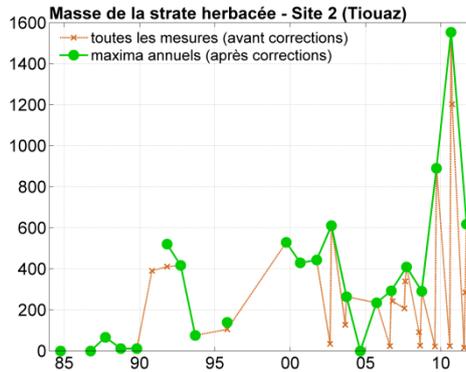
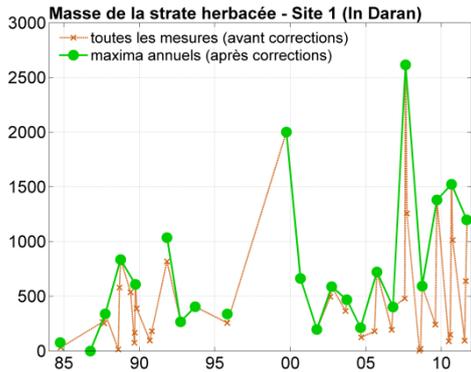
ANNEXE 5 . Caractérisation de la dynamique de l'occupation des sols sur le Fakara au cours du temps : classifications supervisées

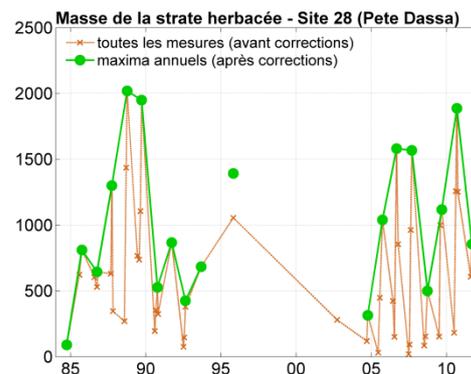
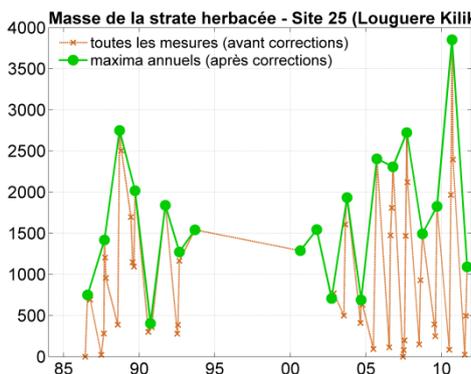
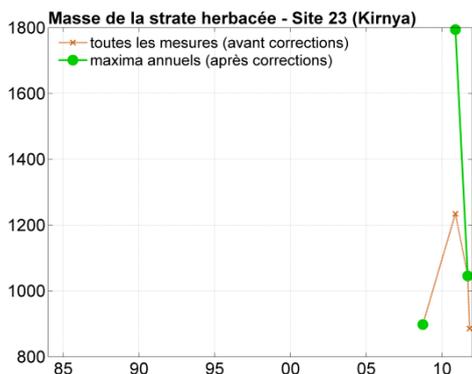
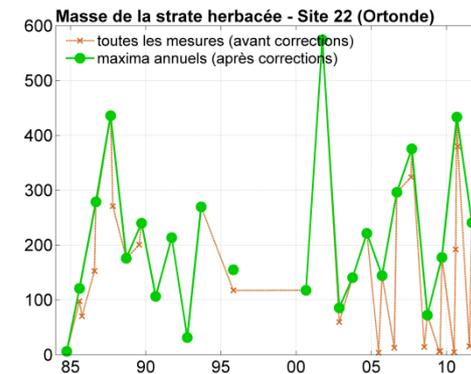
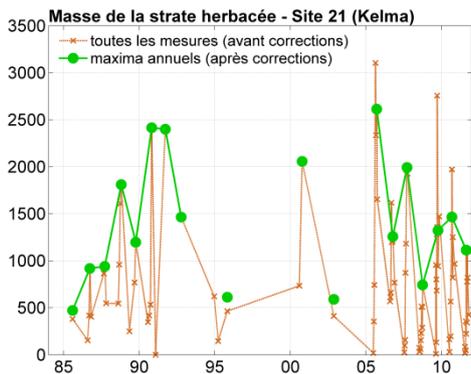
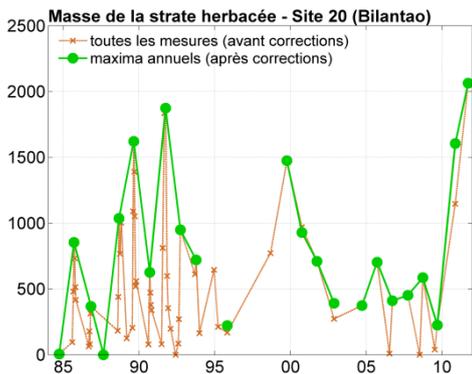
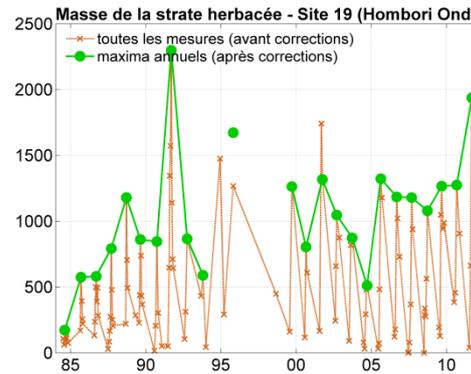
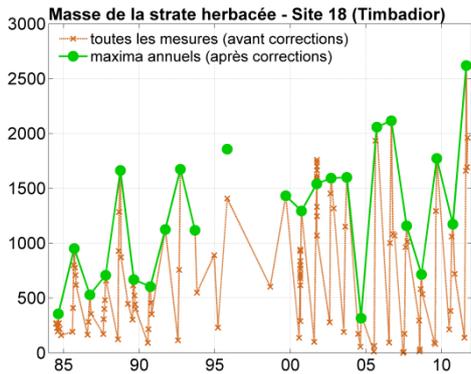
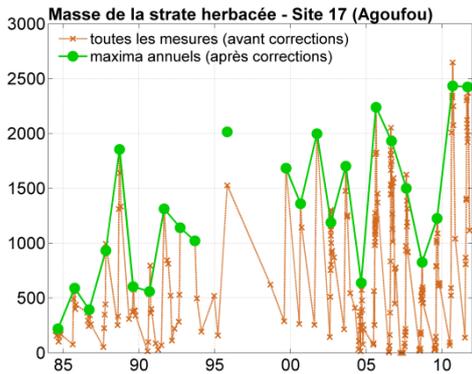
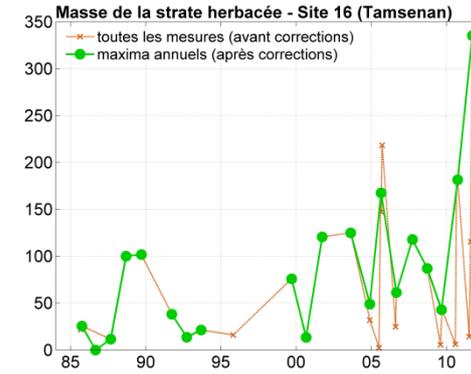
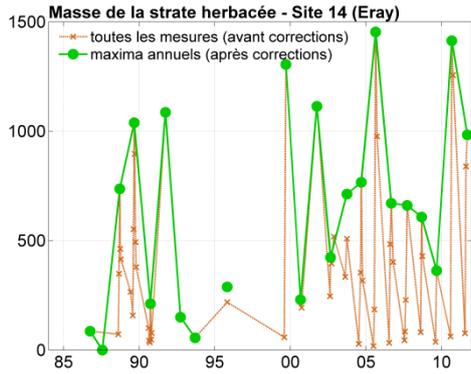
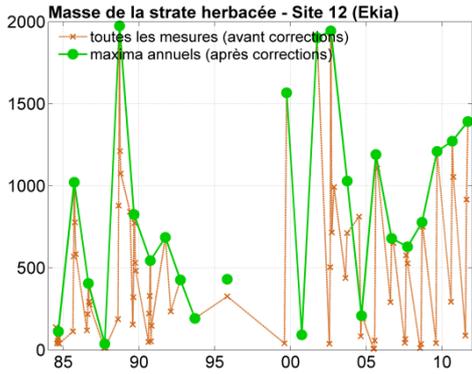
Les coefficients utilisés pour pondérer la moyenne des données terrain en fonction du type d'occupation du sol ont été établis à partir de classifications supervisées issues d'images SPOT. Pour chacune de ces classifications, les classes initialement très détaillées ont été regroupées selon quatre classes majoritaires : "surfaces cultivées", "surfaces en jachère", "parcours pastoraux" et "plantes ligneuses". La proportion relative de chacune des trois premières classes (cultures, jachères, parcours) est alors recalculée en considérant la proportion des plantes ligneuses constante au cours de la période. Les résultats de ces classifications sont résumés dans le Tableau 2 de notre article publié dans *Remote Sensing of Environment* (voir Chapitre 3). Cette annexe vise surtout à illustrer les calculs qui ont été effectués (les jeux de couleurs n'étant pas similaires entre chaque classification).

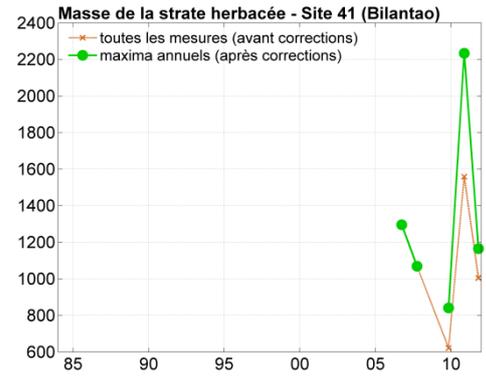
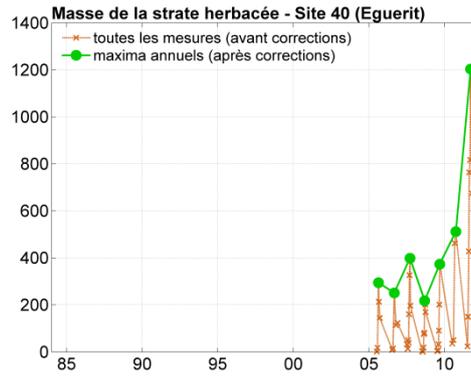
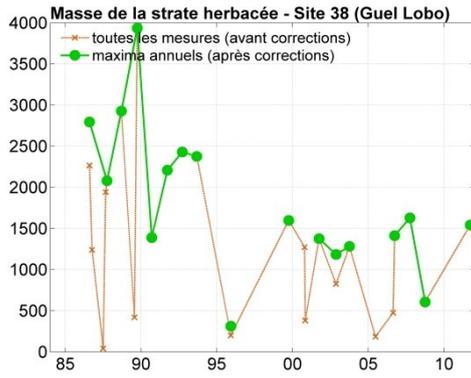
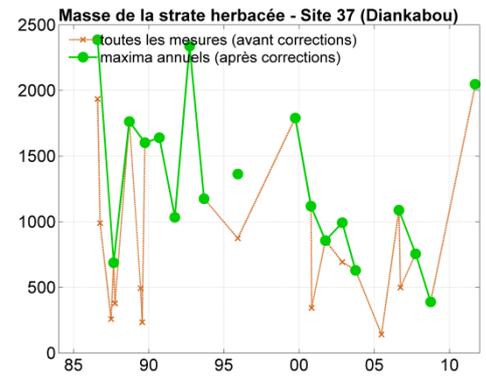
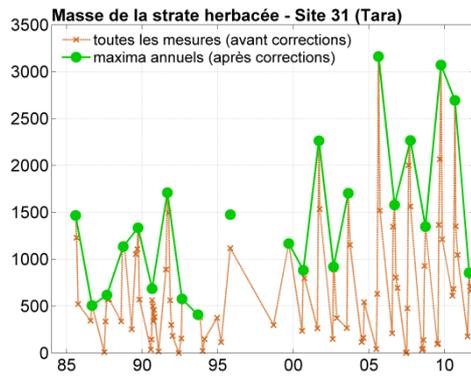
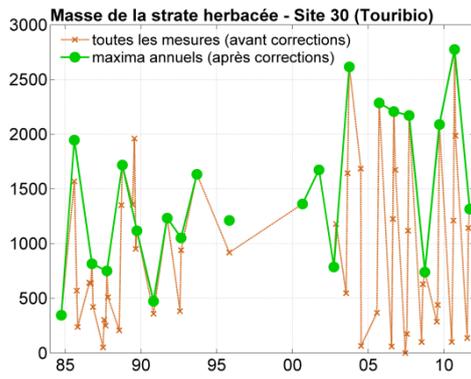


ANNEXE 6 . Détail des données terrain de masse herbacée (Gourma)

Nous présentons ici les détails des données terrain de masse herbacée pour les sites du Gourma, et plus précisément l'estimation de la productivité annuelle. En marron sont représentées les données initiales (avant corrections) ; en vert sont représentées les données après corrections (voir Chapitres 4 et 5 pour plus de détails).





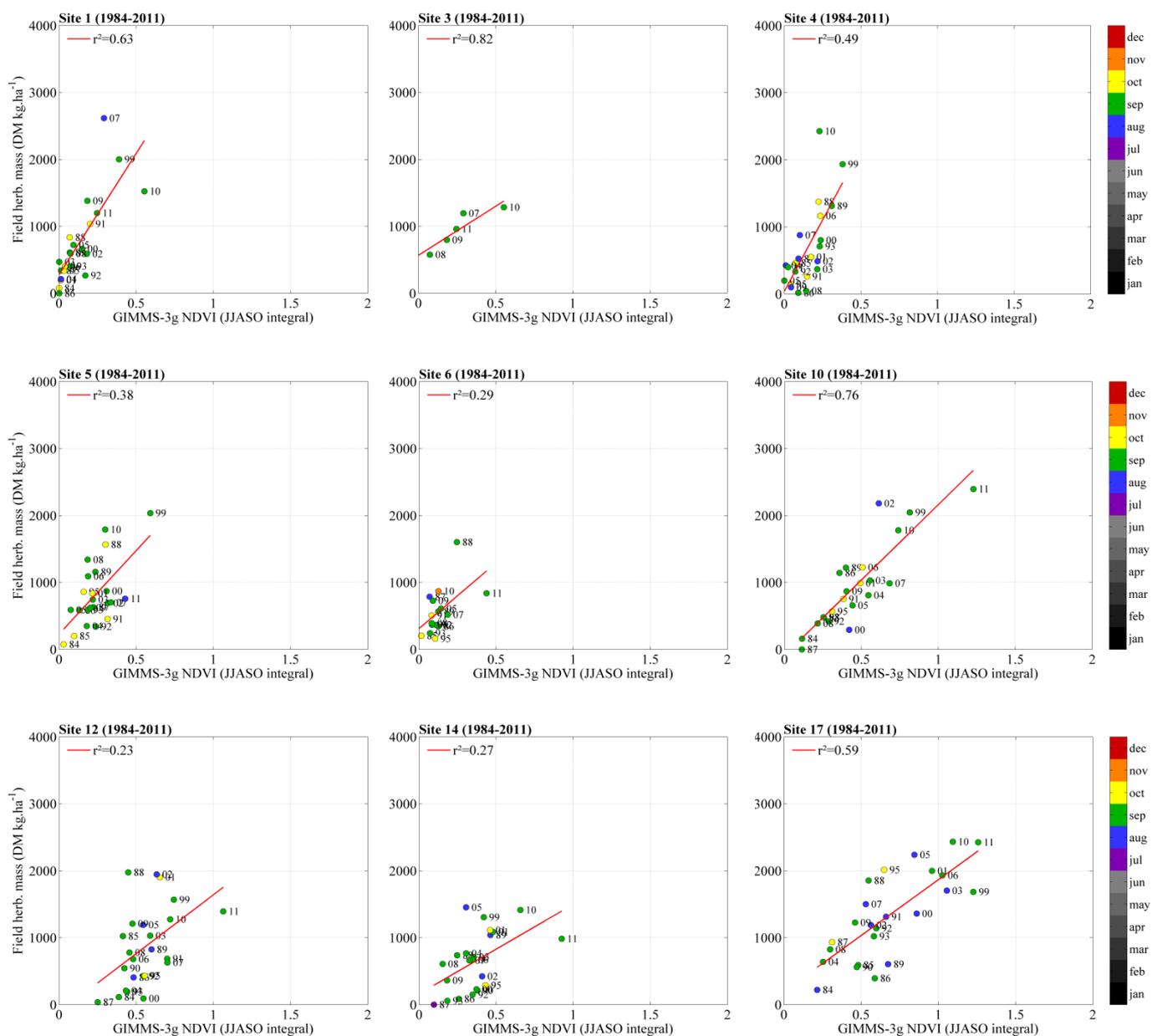


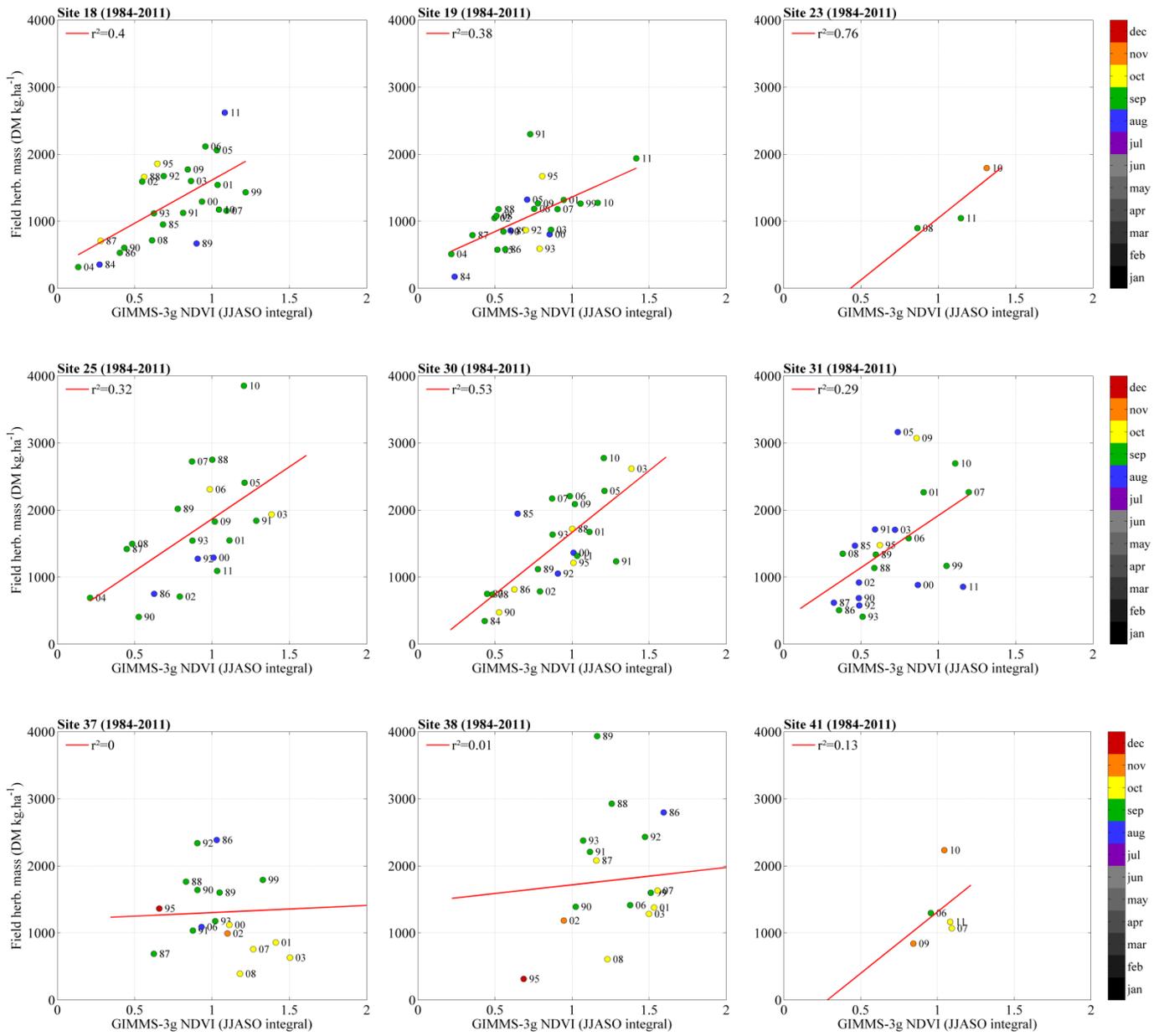
ANNEXE 7 . Corrélations NDVI/masse herbacée, site par site

Cette annexe reprend les corrélations calculées à l'échelle locale, entre un pixel GIMMS-3g (intégrale sur la saison de croissance des plantes, JJASO) et les estimations terrain de productivité. Ces corrélations ne sont montrées que pour les sites sableux du Gourma, qui sont les sites les plus homogènes (généralement).

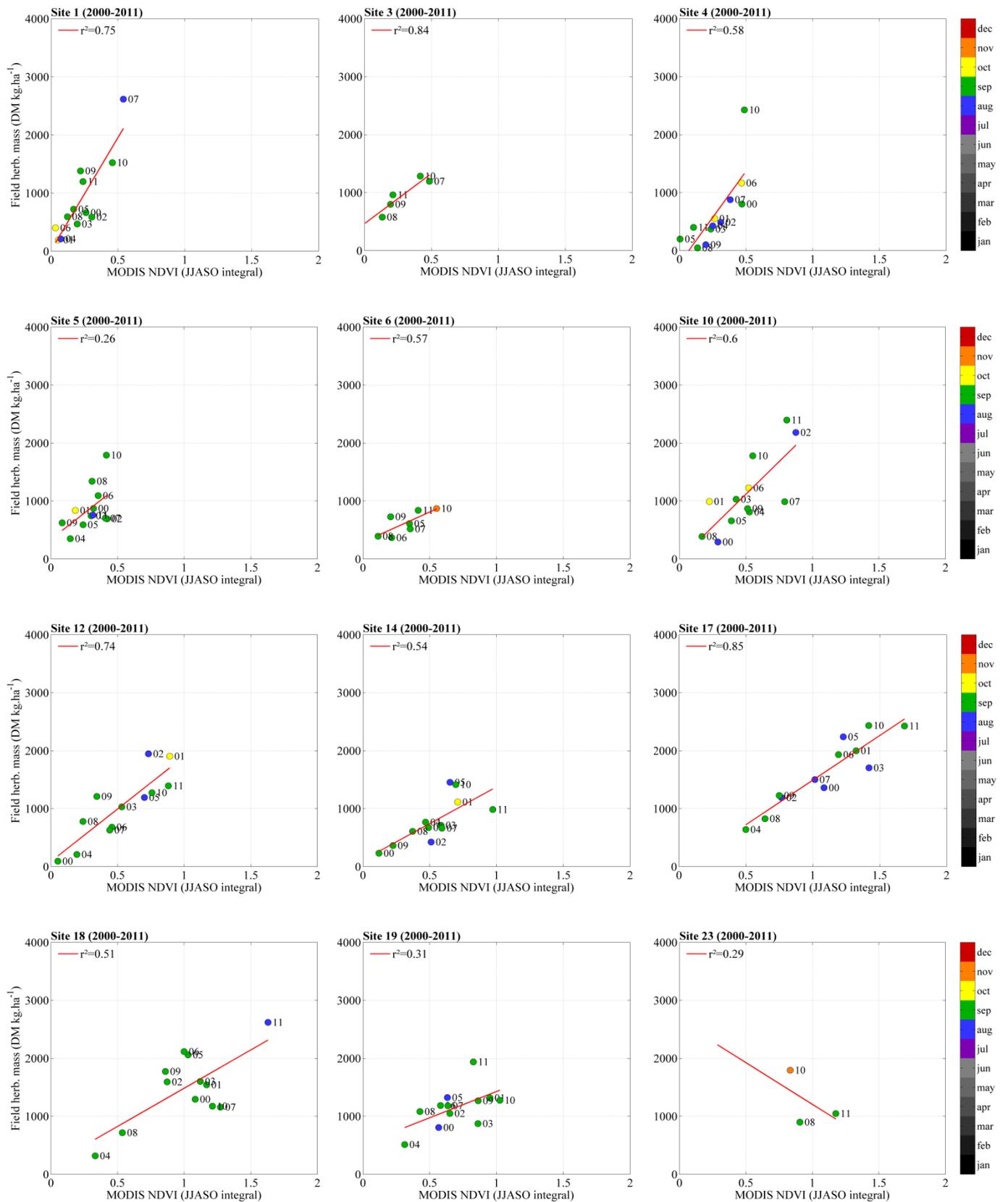
La seconde partie de cette annexe montre les résultats obtenus en effectuant les corrélations entre le NDVI MODIS et les estimations terrain de productivité, entre 2000 et 2011.

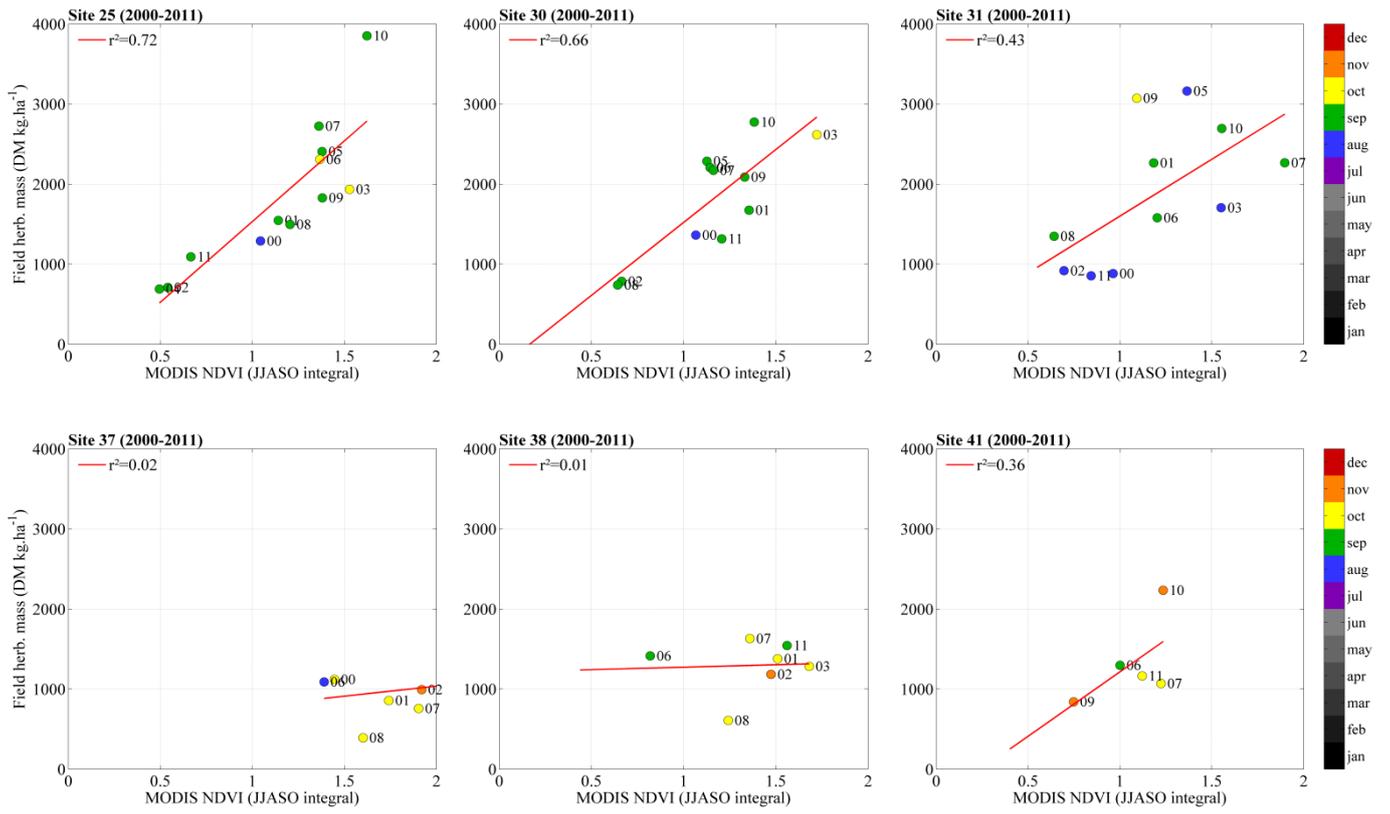
1- Pour le NDVI GIMMS-3g (intégrale JJASO, 1984-2011), sites sableux.





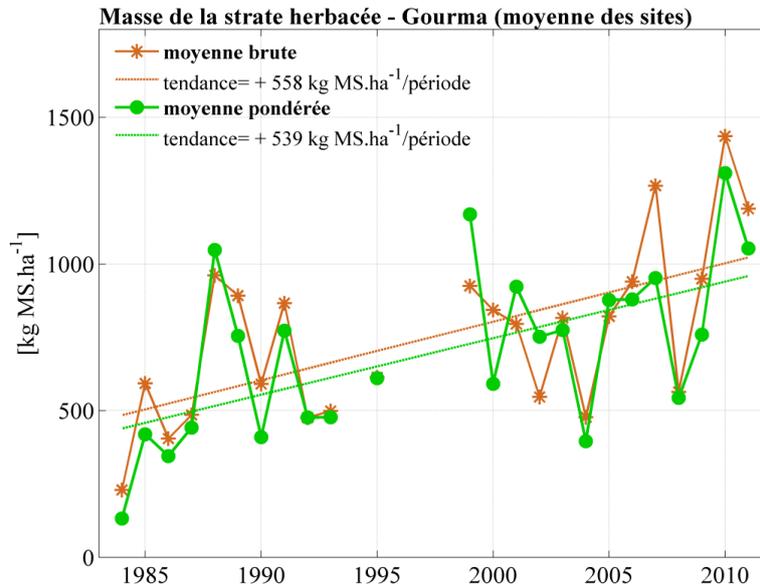
2- Pour le NDVI MODIS MOD13Q1 (intégrale JJASO, 2000-2011), sites sableux uniquement.



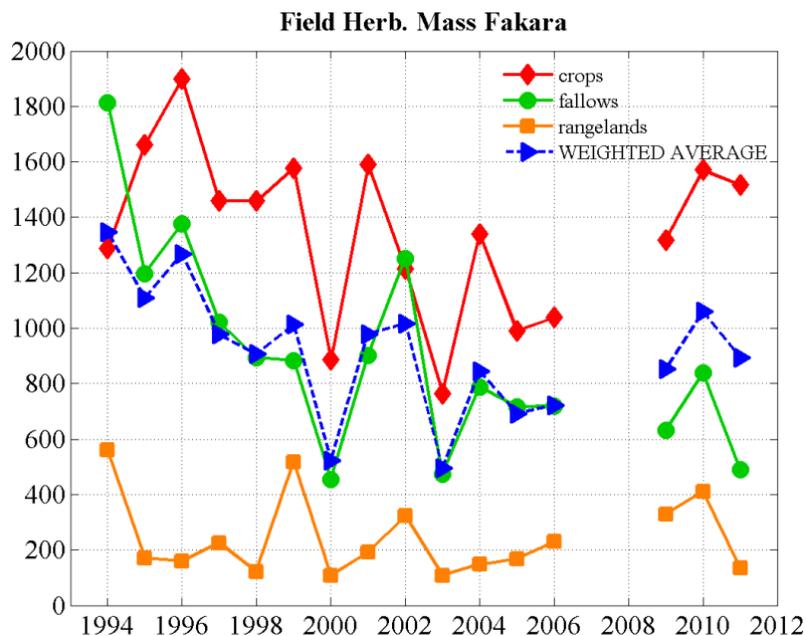


ANNEXE 8 . Détails sur les moyennes pondérées des données terrain de masse herbacée (Gourma, Fakara)

1- Pour le Gourma : comparaison des moyennes spatiales des données terrain de masse de la strate herbacée : moyenne pondérée (en vert) et moyenne brute (en brun), sans considérer les sites du Séno, après avoir effectué les corrections décrites dans le Chapitre 5 (pour chaque site de mesure).



2- Pour le Fakara : profils temporels sur 1994-2011 des mesures de masse herbacée moyennées par type d'occupation du sol : champs en rouge, jachères en vert, parcours pastoraux en orange, et la moyenne pondérée totale en bleu.



ANNEXE 9 . Composition floristique, masse et résidus (détails des corrélations par variable de composition floristique)

Figure 1. Corrélation entre la production végétale (moyenne des sites sableux du Gourma, sans les sites du Séno) et les différentes variables de composition floristique (valeur annuelle = médiane).

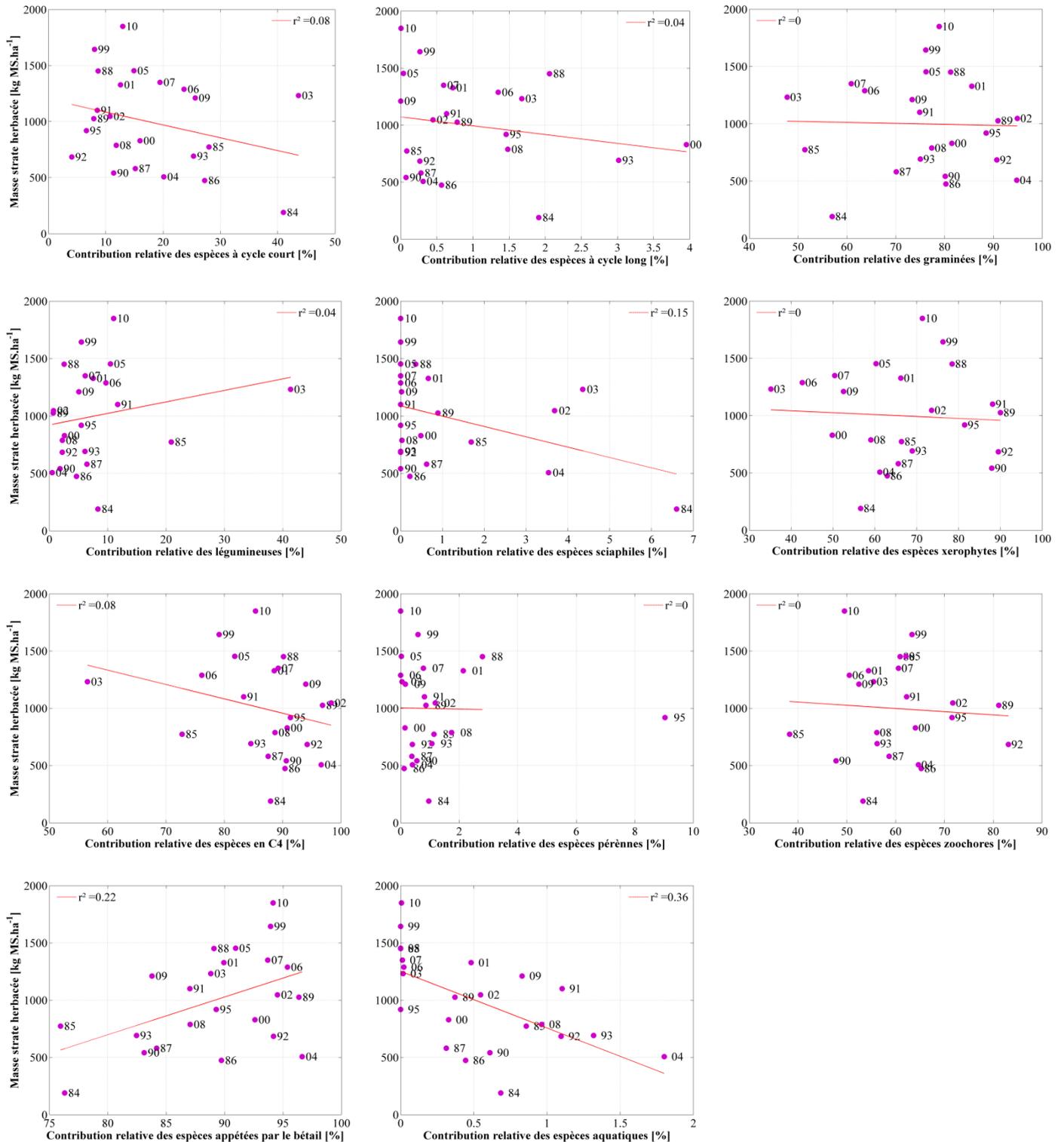


Figure 2. Régression linéaire entre les résidus d'ANPP (moyenne sur les sites sableux du Gourma, sans les sites du Séno) et les différentes variables de composition floristique (valeurs annuelles correspondant à la médiane des données disponibles sur tous les sites).

