



HAL
open science

Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : approche multiscalaire

Oumar Marega, José-Luis San Emeterio, Ababacar Fall, Julien Andrieu

► To cite this version:

Oumar Marega, José-Luis San Emeterio, Ababacar Fall, Julien Andrieu. Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : approche multiscalaire. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 2021, 16, pp.1-28. 10.4000/physio-geo.11977 . hal-03101192

HAL Id: hal-03101192

<https://hal.science/hal-03101192>

Submitted on 11 Jan 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : approche multiscalaire

Remote sensing mapping of vegetation land cover change with regard to rainfall variability in the Sahel: a multiscale approach

Oumar Marega, José-Luis San Emeterio, Ababacar Fall et Julien Andrieu

**Édition électronique**

URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/11977>

DOI : [10.4000/physio-geo.11977](https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977)

ISBN : 978-2-8218-0427-2

ISSN : 1958-573X

Éditeur

Claude Martin

Édition imprimée

Pagination : 1-28

Ce document vous est offert par Aix-Marseille Université (AMU)

**Référence électronique**

Oumar Marega, José-Luis San Emeterio, Ababacar Fall et Julien Andrieu, « Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : approche multiscalaire », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 16 | 2021, mis en ligne le 02 janvier 2021, consulté le 11 janvier 2021. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/11977> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>



Les contenus de *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

CARTOGRAPHIE PAR TÉLÉDÉTECTION DES VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE SPONTANÉE FACE À LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE AU SAHEL : APPROCHE MULTISCALEAIRE

Oumar MAREGA ⁽¹⁾, José-Luis SAN EMETERIO ⁽²⁾,
Ababacar FALL ⁽³⁾ et Julien ANDRIEU ⁽⁴⁾

- (1) : Université d'Orléans, Laboratoire EA 1210 CEDETE - Centre d'Études sur le Développement des Territoires et l'Environnement, 10 rue de Tours, BP 46527, 45065 ORLÉANS LA SOURCE cedex 2.
Courriel : oumar.marega@univ-orleans.fr
- (2) : Université Paris Diderot - Paris 7, UMR 8236 LIED, 35 rue Hélène Brion, 75013, PARIS.
Courriel : jose-luis.sanemeterio@univ-paris-diderot.fr
- (3) : École polytechnique de Thiès, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), BP A10, THIÈS, SÉNÉGAL. Courriel : afall@ept.sn
- (4) : Université Côte d'Azur, UMR 7300 ESPACE, 98 boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 6204 NICE cedex 3. Courriel : julien.andrieu@univ-cotedazur.fr

RÉSUMÉ : La bande sahéenne est une région fragile, caractérisée ces dernières décennies par des changements profonds de l'occupation du sol, résultats de processus biophysiques et de complexes interactions entre les sociétés et leur environnement. Ces processus, qui modulent et transforment le paysage, s'expriment à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Pourtant peu de travaux mettent en valeur cette réalité multidimensionnelle et rares sont les approches comparatives multiscales. Dans cette étude, deux échelles (locale et régionale) ont été conjointement mobilisées, sur trois sites. La cartographie diachronique de la couverture du sol par l'analyse d'images multispectrales Landsat et son articulation avec l'analyse des séries temporelles (pluviométrie et NDVI) ont été couplées.

Les résultats mettent en lumière une synthèse originale des tendances observées concernant les changements d'occupation du sol par la végétation en zone agropastorale sahéenne. Ils permettent de mieux cerner la complexité du caractère multiscale de l'évolution des espaces sahéens. À la suite de nombreux auteurs, l'analyse des séries temporelles confirme globalement une tendance au reverdissement à l'échelle régionale comme résultat de l'amélioration des conditions pluviométriques à partir des années 1990. Cependant les analyses diachroniques proposées dans cette étude ont révélé d'importants contrastes puisque par rapport à la surface totale cartographiée (emprise des images Landsat couvrant chaque région) les surfaces de progression de la couverture végétales entre 1999 et 2010 correspondent à 18 % de la zone du Gourma et 27 % pour le Fakara. En termes d'évolution nette entre 1999 et 2010, dans le Fakara, qui présente le plus fort taux de progression (+13 %), la commune de Dantiandou montre, à l'inverse, un taux négatif (-35 %), ce qui n'est pas le cas des deux autres communes étudiées : +7 % pour Tèssékéré (dans le Ferlo) et +12 % pour Hombori (dans le Gourma).

MOTS-CLÉS : télédétection, cartographie des changements, occupation du sol, végétation, pluviométrie, NDVI, Sahel.

ABSTRACT : Remote sensing mapping of vegetation land cover change with regard to rainfall variability in the Sahel: a multiscale approach

The Sahel is a fragile region, characterized in recent decades by profound changes in land use, which are the result of complex interactions between societies and their environment. These phenomena, which modulate and transform the landscape, take place on several spatial and temporal scales. However, few studies have highlighted this multidimensional reality, most generally focusing only on the local or regional level, and on a single site. In this study, we mobilized two scales (local and regional) on three different sites. On the one hand, we performed a diachronic mapping of land cover

by the analysis of multispectral Landsat images and, on the other hand, we studied its articulation with NDVI and rainfall time series.

The results bring out an original synthesis of the land cover trends observed in the Sahelian agro-pastoral zone. They help understanding the complexity of the multi-scale phenomena that characterize the evolution of Sahelian areas. If the analysis of the time series confirms, as has been observed by several authors, an overall greening trend on a regional basis as a result of the improvement in rainfall conditions from the 1990s, the diachronic analyzes proposed in this study found significant contrasts at finer scales. Considering the total area mapped (Landsat images covering each region), the areas of vegetation cover progression between 1999 and 2010 represent 18 % of the Gourma area and 27 % for Fakara. In terms of net change between 1999 and 2010, in Fakara which has the highest rate of progression (+13 %), the Dantiandou municipality shows, in contrast, a negative rate (-35 %) which is not the case in the two other studied municipalities: +7 % for Téssékré (in Ferlo) and +12 % for Hombori (in Gourma).

KEY-WORDS : remote sensing, changes mapping, land cover, vegetation, rainfall, NDVI, Sahel.

I - INTRODUCTION

Parmi les problèmes environnementaux qui caractérisent le Sahel, la succession d'années sèches durant la période 1968-1994 a eu un impact important sur le couvert végétal.

Les précipitations dans les pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest sont marquées par une forte variabilité spatio-temporelle (T. LEBEL et A. ALI, 2009 ; S.E. NICHOLSON, 2013). La décennie 1950 et une bonne partie des années 1960 constituent une anomalie humide, tandis que la période 1968-1994 correspond à une anomalie sèche. L'amélioration constatée des conditions pluviométriques à partir du milieu des années 1990, même si elle reste modérée, a engendré une progression de la couverture végétale perceptible par télédétection, communément appelée "reverdissement" du Sahel (R. FENSHOLT et K. RASMUSSEN, 2011 ; A. ANYAMBA *et al.*, 2014 ; C. DARDEL *et al.*, 2014). Ce reverdissement, qui couvre un assez large spectre de processus phénologiques, comme l'allongement de la saison "verte" (J. ANDRIEU, 2017-b) ou l'augmentation des biomasses agricole (R. LALOU *et al.*, 2019) et pastorale (A. FALL, 2017), fait néanmoins encore l'objet de débats (Y.C. HOUNTONDI, 2008 ; J. L. SAN EMETERIO, 2018). Face à cette situation, une approche multiscalaire et multisite semble bien adaptée à l'étude des contrastes et de la complexité du reverdissement sahélien.

Parmi les techniques d'observation spatiale, la cartographie de l'occupation des sols occupe une place centrale. L'intérêt de l'utilisation de la télédétection dans l'étude des parcours a très tôt été démontré par G. DE WISPELAERE et G. WAKSMAN (1977), M.F. COUREL *et al.* (1988). Plus récemment, de nombreuses études basées sur l'analyse diachronique de l'occupation des sols au Sahel (M.A. SARR, 2009 ; K. SOULEY YERO, 2013 ; O. MAREGA, 2016), mais aussi dans des régions plus humides (J. ANDRIEU, 2018 ; B. SOLLY *et al.*, 2020), confirment cet apport de la télédétection.

Dans cette perspective diachronique, les photographies aériennes anciennes des années 1950 et 1960 ont été très souvent comparées aux images satellitaires à moyenne ou haute résolution, comme Landsat MSS, Landsat TM, ETM+, HRV de Spot, dans le but d'avoir une plus grande profondeur historique dans l'étude de l'occupation du sol (Y.C. HOUNTONDI, 2008). Par occupation du sol, il est ici entendu une nomenclature avec plusieurs types de formations végétales (végétation ouverte, végétation fermée, végétation de zones humides), de zones de cultures, de sols nus et de surfaces en eau.

Par ailleurs, plusieurs travaux ont démontré que les séries temporelles de NDVI sont très efficaces pour estimer la productivité de la végétation ainsi que les rythmes phénologiques des différents biomes terrestres (C.J. TUCKER et P.J. SELLERS, 1986 ; A. BANNARI *et al.*, 1995 ; C. DARDEL *et al.*, 2014 ; J. ANDRIEU, 2017-b ; J.L. SAN EMETERIO, 2018). Cet indice est très largement utilisé par la communauté scientifique, en raison de sa reproductibilité et de son efficacité dans la détection de l'activité chlorophyllienne. Les capteurs des satellites grands champs, à l'exemple de l'AVHRR de la NOAA, ont une grande résolution temporelle, qui permet un suivi régulier, impossible avec les capteurs à résolution moyenne tels que Landsat.

Une difficulté pour les chercheurs en Afrique sahélienne est de trouver des données climatiques fiables sur des séries temporelles assez longues. Selon les observations faites par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le réseau des pays sahéliens présente de graves lacunes liées à des problèmes techniques et économiques, tels que la défaillance des instruments et des systèmes, l'insuffisance de la maintenance et de l'étalonnage, la faiblesse des infrastructures de communication et le coût élevé de l'exploitation. En 2020, la densité du réseau d'observation en Afrique est huit fois inférieure au minimum recommandé par l'OMM. Depuis quelques années, l'existence de plusieurs types de données satellitaires (GPCP, TRMM, RFE, CRU, *etc.*) a permis de s'émanciper de cette contrainte. D'une manière générale, ces produits présentent de bonnes performances, quoique variables selon les échelles spatiales et temporelles (C. CASSE, 2015). Dans cette étude, les données pluviométriques dérivées des bases GPCC et ARC 2.1 seront utilisées, afin de les mettre en parallèle avec les tendances du NDVI pour analyser et comprendre les changements d'occupation du sol.

Cette étude a pour objet de cartographier et de quantifier par télédétection les processus de progression ou de régression de la couverture du sol par la végétation spontanée (herbacée et ligneuse) entre 1973 et 2010 dans trois secteurs agropastoraux sahéliens des régions du Ferlo (Sénégal), du Gourma (Mali) et du Fakara (Niger), pour des superficies de 83000, 42760 et 36000 km² respectivement.

Deux approches complémentaires ont été mobilisées. Il s'agit, d'une part, d'une cartographie diachronique de la couverture du sol par l'analyse d'images multispectrales à moyenne résolution et, d'autre part, d'une approche fondée sur les séries temporelles du NDVI et de la pluviométrie. La complémentarité entre ces deux approches permet d'émettre une série d'hypothèses sur l'explication des changements.

II - ZONE D'ÉTUDE

Les trois régions au cœur de cette étude sont situées dans la bande sahélo-soudanienne de l'Afrique de l'Ouest.

La première est le Ferlo ou "Sahel sénégalais" (Fig. 1). Il s'agit d'un vaste territoire agropastoral qui occupe une grande partie du Sénégal intérieur. Le climat est de type sahélien avec une pluviométrie annuelle moyenne variant de 300 à 500 mm du nord au sud (A. FALL, 2014). Les activités y sont dominées par l'élevage transhumant, et l'agriculture vivrière y est faiblement représentée. Au sein de cette région, la commune de Tébékrou (2052 km²) a été choisie comme site d'étude à l'échelle locale.

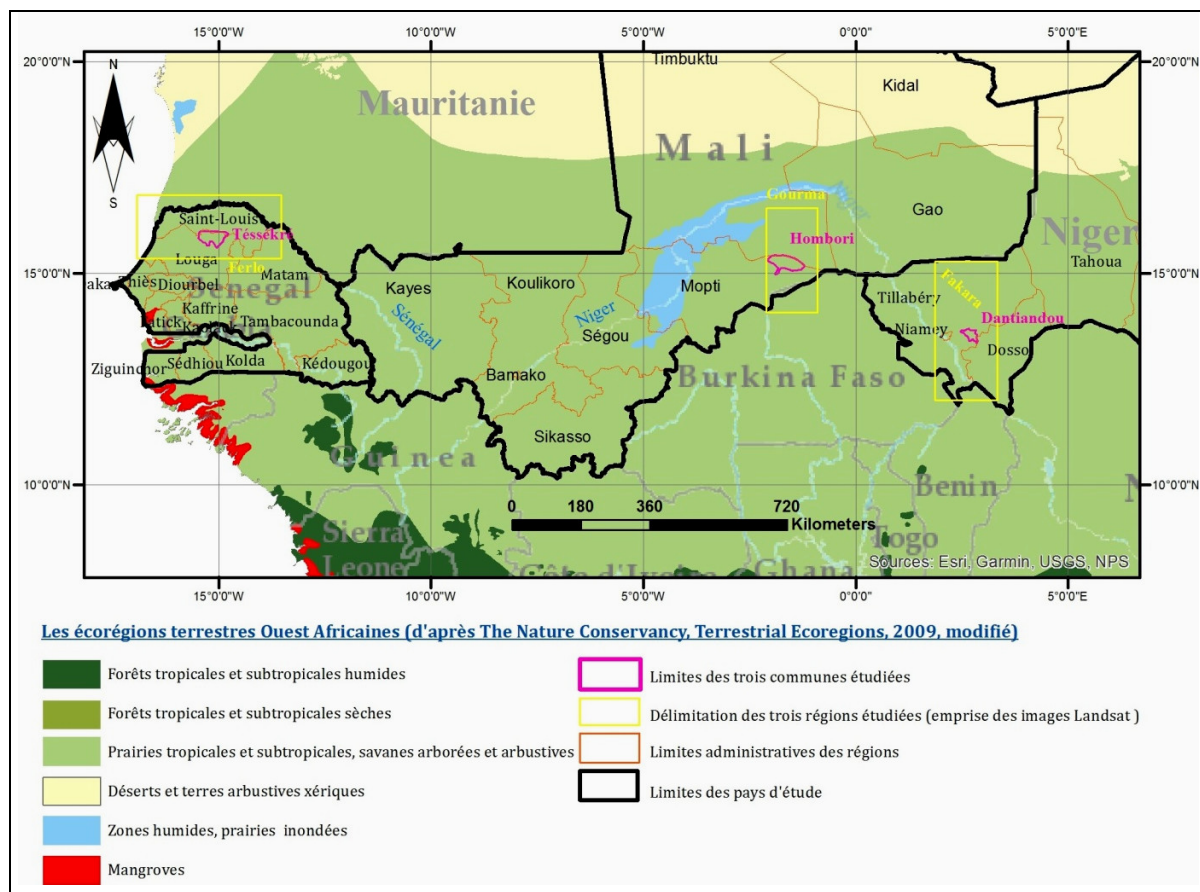


Figure 1 - Localisation des zones d'étude.

La deuxième région est le Gourma (Fig. 1). Cette vaste entité géographique est partagée entre trois pays sahéliens : le Mali, le Niger et le Burkina Faso. Les moyennes annuelles des précipitations vont ici de 200 à 400 mm du nord au sud. C'est une zone agropastorale où l'élevage tient la place majeure (P. HIERNAUX *et al.*, 2014). Il s'agit essentiellement d'un élevage de type transhumant essentiellement consacré aux bovins, mais comprenant aussi des ovins, des caprins, et accessoirement des asins et des camelins. L'agriculture vivrière y est pratiquée de façon extensive. Dans ce territoire, la commune de Hombori (2280 km²) a été retenue comme site d'étude à l'échelle locale.

Enfin, l'étude a porté sur une partie du Sud-Ouest nigérien. L'appellation Fakara (Fig. 1) est appliquée ici à cet ensemble régional situé entre les vallées fossiles des Dallols et le fleuve Niger au sud-ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden (P. HIERNAUX et A. AYANTUNDE, 2004). Cette région, plus méridionale par rapport aux deux autres, fait partie du domaine sahélo-soudanien. Sur le plan climatique, la pluviométrie annuelle moyenne varie de 300 mm au nord à 650 mm au sud. L'irrégularité interannuelle des précipitations est particulièrement marquée dans cette région, où elle a parfois induit des effets catastrophiques sur les systèmes de production (A. CASENAVE et C. VALENTIN, 1989). Au cœur de ce territoire, la commune de Dantiandou (790 km²) a été adoptée comme site d'étude à l'échelle locale.

Ces secteurs présentent des contextes climatiques comparables, caractérisés d'abord par les sécheresses sévères des périodes 1968-1973 et 1983-1984, qui ont affecté durement l'environnement et les systèmes de production agropastoraux (T. VISCHEL *et al.*, 2015), puis, à

partir de 1994, par une reprise des précipitations (S.E. NICHOLSON, 2013 ; L. DESCROIX *et al.*, 2015) accompagnée d'un reverdissement du Sahel (A. ANYAMBA et C.J. TUCKER, 2005 ; R. DE JONG *et al.*, 2011) resté non uniforme (J.L. SAN EMETERIO, 2018).

En matière d'occupation du sol, le Gourma est dominé par les steppes tandis que le Ferlo et le Fakara offrent des paysages de steppes arbustives et de savanes arborées. Dans le Fakara, la présence d'une formation végétale de brousse tigrée laisse place, plus au sud, à la savane arborée du Parc du W, aux frontières avec le Bénin et le Burkina-Fasso.

Par ailleurs, le relief à dominante dunaire du Ferlo contraste avec celui des monts Hombori du Gourma et des plateaux entaillés par les "coris" et les "dallols", vallées fossiles du Fakara nigérien.

Sur le plan socio-économique, face aux mutations structurelles devenues nécessaires dans les années 1980, les modalités différentes selon les pays de la mise en place de la privatisation et de la monétarisation, voire du désengagement de l'État dans le développement rural, sont responsables de contrastes entre les régions (O. MAREGA, 2016). Par ailleurs, la forte croissance démographique, qui caractérise les trois régions, est l'autre facteur important de l'évolution de l'occupation du sol. Dans ce contexte, l'existence de données issues de programmes scientifiques sur les sociétés rurales d'Afrique de l'Ouest, tels que le programme Eclis (élevage, climats et sociétés), a contribué à notre choix des sites d'étude.

III - DONNÉES ET MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DIACHRONIQUE DE LA COUVERTURE DU SOL PAR L'ANALYSE D'IMAGES MULTISPECTRALES LANDSAT

1) Données Landsat

Le choix des données utilisées dans cette étude tient compte d'un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles la qualité des images aux différentes dates et leur comparabilité. Pour alimenter une étude diachronique telle qu'envisagée ici, la série temporelle des images doit couvrir les périodes de sécheresse des années 1970, et les pas de temps doivent permettre de reconstituer les grandes tendances de l'évolution de l'occupation du sol des années 1970 à nos jours. Les images des satellites Landsat, par leur gratuité, leur qualité de prétraitement, leur couverture tant spatiale que temporelle et leur disponibilité ont donc été privilégiées. Dans cette approche multiscalaire, il est en effet important d'avoir accès à des images ayant une résolution spatiale et une couverture au sol permettant d'établir une cartographie des ensembles régionaux et locaux. Avec une résolution spatiale de 30 m, les images Landsat couvrent des scènes de 185 km de côté et se prêtent bien à cet objectif, par un lissage des micro-hétérogénéités (le parcellaire) qui n'empêche pas une cartographie précise de l'occupation du sol (J ANDRIEU et C MERING, 2008). Par ailleurs, la volonté de retracer l'occupation du sol depuis les années 1970 a forcé le choix puisque seules les images Landsat MSS ont été prises durant cette période. Ces images ont donc un grand intérêt pour mener des études rétrospectives.

Les données utilisées proviennent des capteurs Multi Spectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM) et ETM+ du programme Landsat. Pour le choix des images, plusieurs éléments ont été pris en compte, notamment la date de prise de vue, la saison de prise de vue, le niveau

de prétraitement. Concernant les années de prise de vue, les images des années 1973, 1999 et 2010 ont été sélectionnées. Toutefois, dans le cas du secteur du Fakara, en l'absence d'images disponibles pour 1999, nous avons dû nous rabattre sur des clichés de 2000 et 2001. Enfin, les images de 2010 correspondent à la dernière année de nos investigations de terrain, juste avant la dégradation de la situation politico-sécuritaire dans la bande sahélienne. Ces investigations ont permis de confirmer les changements cartographiés et de les expliquer.

Par ailleurs, dans le cadre des analyses diachroniques, il est préférable d'utiliser des images acquises à la même période de l'année (P.S. CHAVEZ et D.J. MACKINNON, 1994 ; J.F. MAS, 2000). Dans une région où les saisons sont très fortement différenciées, la date de la prise de vue des images est un paramètre particulièrement important. Le choix s'est porté sur la charnière entre la fin de la saison des pluies et le début de la saison sèche (Tab. I). Les images traitées ont été acquises entre le 11 septembre et le 8 décembre.

En cette période de l'année, la couverture nuageuse est généralement faible. De plus, et c'est là le principal avantage, les images permettent alors de distinguer la végétation spontanée (ligneuse et herbacée) des zones de cultures (associées aux sols nus dans tous les résultats de cette étude). En effet, la signature spectrale des cultures s'apparente, pour nos analyses, à celle des sols nus et contraste donc bien avec celle de la végétation spontanée. À cela, il y a plusieurs raisons. Tout d'abord, au Sahel, les récoltes sont effectuées entre début septembre (pour certains champs de maïs) et mi-novembre, et pour l'essentiel avant la mi-octobre, car la plupart des paysans sahéliens privilégient largement les cultures à cycle court (90 jours) à cause des contraintes climatiques. Parmi les images satellitaires étudiées, 15 sur 24 sont postérieures au 20 octobre, alors qu'une part importante des cultures avaient été récoltées. L'année 1973 a été étudiée par des images plus précoces (6 images sur 9 ont été acquises entre le 23 et le 30 septembre). Mais au cours de cette année particulièrement sèche, toutes les cultures ont été fortement affectées, voire complètement détruites (J DURAND, 1977), ce qui a induit le classement des champs comme des sols nus malgré la date précoce.

Pour les trois images d'avant mi-novembre hors 1973, il est important de rappeler que la plupart des cultures sahéliennes sont des plantes à faible feuillage. De plus, elles sont largement espacées les unes des autres, avec du sol apparent entre elles. Ainsi, pour un pixel de 30 m de côté (Landsat TM), c'est bien une signature de sol qui domine. Même avec des cultures non récoltées et assez couvrantes, la réflectance dans le proche infrarouge qu'elles génèrent reste moins importante que celle des zones boisées et pastorales où se combinent la biomasse herbacée et ligneuse. Bien sûr, il reste possible que la distinction entre de rares champs très denses et certaines zones de végétation spontanée très ouverte puisse être difficile, mais elle rentre dans la marge d'erreur inhérente à tout travail de télédétection. Cette marge d'erreur est ici de l'ordre de 10 %. Cette valeur acceptable s'explique non seulement par la faible couverture des sols cultivés, mais aussi par le fait que les champs ont une taille (moyenne de 0,05 ha au Sahel) généralement inférieure à celle des pixels des images Landsat (1 pixel MSS = 0,3 ha, 1 pixel TM = 0,09 ha) et qu'ils sont le plus souvent agglomérés (L. LEROUX, 2015).

Une fois réalisées les mosaïques, les trois zones couvertes par les images Landsat ont fourni la délimitation des secteurs d'étude (échelle régionale). La délimitation des sites (échelle locale) correspond aux limites administratives communales. Les traitements ont été effectués avec le logiciel de télédétection IDRISI Taiga (TerrSet), puis avec ArcGis pour la mise en page des cartes et leur croisement avec les données vectorielles (localités d'enquête, limites administratives des régions et communes).

Tableau I - Données satellitaires utilisées.

| Pays | Scènes | Coordonnées X, Y | Path / Row | Satellites et capteurs | Résolution spatiale | Date de prise de vue |
|---------|----------|--------------------|-------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| Sénégal | Ferlo 1 | 15.9437 / -15.9194 | p220 / r049 | Landsat 1 MSS | 57 m | 25/09/1973 |
| | Ferlo 2 | 15.9586 / -14.4858 | p219 / r049 | | | 24/09/1973 |
| | Ferlo 3 | 15.9170 / -13.0712 | p218 / r049 | | | 23/09/1973 |
| Mali | Gourma 1 | 15.9459 / -1.4882 | p210 / r49 | | | 21/10/1973 |
| | Gourma 2 | 14.5042 / -1.8379 | p210 / r50 | | | 21/10/1973 |
| Niger | Fakara 1 | 15.9411 / 2.7110 | p207 / r49 | | | 30/09/1973 |
| | Fakara 2 | 14.5064 / 2.3586 | p207 / r50 | | | 30/09/1973 |
| | Fakara 3 | 13.0387 / 2.0161 | p207 / r51 | | | 30/09/1973 |
| Pays | Scènes | Coordonnées X, Y | Path / Row | | | Satellites et capteurs |
| Sénégal | Ferlo 1 | 15.8997 / -16.3497 | p205 / r49 | Landsat 7 ETM+ | 30 m | 04/11/1999 |
| | Ferlo 2 | 15.8997 / -14.8166 | p204 / r49 | | | 13/11/1999 |
| | Ferlo 3 | 15.8999 / -13.2672 | p203 / r49 | | | 21/10/1999 |
| Mali | Gourma 1 | 15.9010 / -0.9244 | p195 / r49 | | | 29/10/1999 |
| | Gourma 2 | 14.4570 / -1.2461 | p195 / r50 | | | 29/10/1999 |
| Niger | Fakara 1 | 15.9010 / 3.6716 | p192 / r49 | | | 27/09/2001 |
| | Fakara 2 | 14.4535 / 3.4152 | p192 / r50 | | | 24/09/2000 |
| | Fakara 3 | 13.0130 / 3.0538 | p192 / r51 | | | 11/09/2001 |
| Pays | Scènes | Coordonnées X, Y | Path / Row | | | Satellites et capteurs |
| Sénégal | Ferlo 1 | 15.8958 / -16.3145 | p205 / r49 | Landsat 5 TM | 30 m | 26/11/2010 |
| | Ferlo 2 | 15.8990 / -14.7876 | p204 / r49 | | | 19/11/2010 |
| | Ferlo 3 | 15.9020 / -13.2437 | p203 / r49 | | | 28/11/2010 |
| Mali | Gourma 1 | 15.8965 / -0.8961 | p195 / r49 | | | 04/11/2010 |
| | Gourma 2 | 14.4479 / -1.2186 | p195 / r50 | | | 04/11/2010 |
| Niger | Fakara 1 | 15.9000 / 3.7540 | p192 / r49 | | | 01/12/2010 |
| | Fakara 2 | 14.4518 / 3.4306 | p192 / r50 | | | 01/12/2010 |
| | Fakara 3 | 13.0079 / 3.1221 | p192 / r51 | | | 08/12/2010 |

2) Méthode d'analyse des images Landsat : classification K-MEANS

Les deux principales méthodes utilisées en télédétection sont les classifications dirigée et non dirigée (F. BONN et G. ROCHON, 1993). La première demande d'avoir un nombre important de zones d'entraînement suffisamment représentatives de la zone d'étude (D.M. MUCHONEY et B.N. HAACK, 1994 ; J.F. MAS, 2000). Le caractère rigide de cette classification, qui requiert la construction préalable d'une série de zones témoins représentatives de chacune des classes à cartographier, ne facilite pas sa généralisation à d'autres régions. Enfin, cette méthode est très exigeante en données de terrain fiables. Pour toutes ces raisons, elle n'a pas été retenue.

La méthode de classification non dirigée (R.A. WEISMILLER *et al.*, 1977 ; M. EL RAEY *et al.*, 1995) validée par l'analyse et l'interprétation des signatures spectrales a été privilégiée. Cette méthode a été jugée efficace dans l'étude des écosystèmes sahéliens par télédétection (S. THIAM, 1997). La classification non supervisée permet un regroupement automatique des pixels d'une image sur la base des paramètres statistiques des classes radiométriques. M.A. SARR (2009) et A. FALL (2014) ont appliqué cette méthode dans le Ferlo pour cartographier l'occupation du sol. La grande souplesse et la reproductibilité de la méthode (G. ACKERMANN *et al.*, 2006 ; J. ANDRIEU, 2008) ont été les critères décisifs de notre choix. Bien que relativement autonome des données de terrain pour sa réalisation, elle en est toutefois dépendante pour l'évaluation de sa fiabilité (J. ANDRIEU, 2008).

Sur la base de l'algorithme K-MEANS, et dans la suite des travaux de J. ANDRIEU et C. MERING (2008) et de J. ANDRIEU (2017-a), la procédure a consisté à produire lors de la première étape le maximum de classes radiométriques, soit 16 au total (nombre maximum de catégories de légendes fixé par défaut dans le logiciel IDRISI Taiga). Ces classes obtenues et

analysées par les courbes radiométriques ont ensuite été réaffectées par regroupement pour mettre en évidence une première carte des principaux types d'occupation du sol en 6 classes (1/ végétation fermée ; 2/ végétation ouverte ; 3/ sols nus clairs ; 4/ sols nus sombres ; 5/ eau ; 6/ mélange de sol nu et de végétation). Ce procédé de regroupement permet de fusionner les classes qui sont radiométriquement similaires. Celles qui ont été nettement identifiées comme étant homogènes sont séparées de celles qui présentent un caractère hétérogène. Des masques ont ensuite été réalisés en logique booléenne pour chacune des 6 classes d'occupation du sol pour les analyser séparément classe par classe. Des analyses en composantes principales (ACP) ont été effectuées pour réduire les redondances et exacerber les contrastes radiométriques. Seules les trois premières composantes sont sélectionnées et soumises à une nouvelle classification K-MEANS (J. ANDRIEU *et al.*, 2018). Le seuil entre les sols nus et la végétation ouverte se situe à 5 % de taux de recouvrement de la végétation arborée, le seuil entre la végétation ouverte et la végétation dense se situe vers 30 %, conformément aux travaux de J. ANDRIEU (2008) et A. FALL (2014) dont la méthode est issue. La validation de ces classes est faite en procédant à l'interprétation des profils radiométriques. En complément, l'interprétation visuelle des compositions colorées et des images très haute résolution de Google Earth ont été utilisées. L'efficacité du recours à l'interprétation visuelle des images Google Earth en appui des classifications a été mise en évidence par C.A. MURAD et J. PEARSE (2018).

Une fois les cartes d'occupation du sol établies date par date (1973, 1999 ou 2000/01, 2010), leur croisement permet une cartographie diachronique qui montre directement les changements sur une carte (K. PAHARI et S. MURAI, 1999 ; L.M. KIAGE *et al.*, 2007 ; F. NUTINI *et al.*, 2013). La numérotation de chacune des catégories d'occupation du sol selon un ordre identique classe par classe et commun à chaque carte d'occupation permet, par superposition des cartes, de produire une matrice de détection des changements entre les différentes dates (1973, 1999 ou 2000/01 et 2010). L'évaluation des changements est faite en termes de gain (progression), de perte (régression) ou de persistance (stabilité) des catégories d'occupation du sol. Un tel croisement n'est possible qu'avec des images de mêmes dimensions et géo-référencées avec les mêmes systèmes de projection. En outre, faire des analyses diachroniques avec des images Landsat MSS, TM et ETM+ présente une contrainte liée au fait que ces images n'ont pas la même résolution spatiale. Dans cette situation, il est possible soit de ré-échantillonner les images MSS pour leur donner la résolution des images TM et ETM+, soit de ré-échantillonner les images TM et ETM+ pour leur donner la résolution des images MSS. La subdivision d'un pixel MSS présente le risque de créer une nouvelle information n'existant pas à l'origine. Pour sa part, l'agrégation des pixels TM ou ETM+ en vue d'obtenir la résolution spatiale du MSS, si elle présente l'inconvénient d'une dégradation de la résolution spatiale produit moins d'artefacts par rapport aux images d'origine et rend donc la cartographie des changements plus robuste (J. ANDRIEU, 2008). Pour cette raison, les images TM et ETM+ ont été ré-échantillonnées à la résolution des images MSS.

IV - DONNÉES ET MÉTHODE DE L'APPROCHE BASÉE SUR LES SÉRIES TEMPORELLES

1) Données GIMMS NDVI3g

Pour étudier l'évolution de la couverture végétale à l'échelle régionale, le NDVI a été utilisé. Parmi les bases de données NDVI existantes, la base GIMMS NDVI3g a été choisie. Le NDVI y est obtenu à partir du capteur AVHRR embarqué sur les satellites Landsat de la série NOAA. L'utilisation des données NDVI recueillies par ces satellites fournit des infor-

mations sur l'évolution temporelle du couvert végétal depuis 1981. La base GIMMS NDVI3g consiste en un jeu de synthèses temporelles bimensuelles à 8 km de résolution spatiale. La synthèse temporelle aide à réduire les effets atmosphériques et bidirectionnels. Les données sont calibrées et les variations de l'angle zénithal solaire sont corrigées. La base GIMMS NDVI3g a pour objectif de fournir un produit riche d'informations à l'échelle du globe et permettant une étude continue du couvert végétal sur une longue série temporelle. A. ANYAMBA *et al.* (2014) ont confirmé la pertinence de la base NDVI3g pour le suivi du couvert végétal en région sahélienne.

2) Données de précipitations

Pour croiser NDVI et précipitations, la base ARC 2.1 à 0.1° a été utilisée. Il s'agit d'une base de précipitations journalières disponible à partir de 1983. Elle combine les données de satellites géostationnaires et les mesures de stations pluviométriques. Elle est cohérente avec les bases GPCP et CMAP (N. NOVELLA et W.M. THIAW, 2013) et propose une résolution spatiale proche de celle du NDVI. Simultanément, la base de données GPCC à 0,25° (U. SCHNEIDER *et al.*, 2018) a été utilisée pour étudier l'évolution des précipitations avant les années 1980. Le cumul de pluies entre les mois de juillet et septembre a été calculé pour obtenir une estimation de la pluviométrie annuelle durant la saison humide. Ces données ont ensuite été utilisées pour calculer les anomalies de précipitations annuelles durant les périodes analysées et pour calculer l'évolution temporelle des résidus de la relation iNDVI-Précipitations.

3) Méthode d'analyse des séries temporelles : l'intégrale comme indicateur de la Productivité Primaire Nette (PPN) et son couplage avec la méthode RESTREND

L'intégrale du NDVI (iNDVI) pendant la période de croissance de la végétation (notamment la saison humide en région sahélienne) peut constituer un indicateur de la Productivité Primaire Nette (PPN). La relation entre NDVI et PPN étant linéaire (D. LO SEEN *et al.*, 1994 ; S.D. PRINCE *et al.*, 1998), il est généralement admis que l'intégrale du NDVI est un bon indicateur de la PPN. C. MBOW (2013) a remarqué l'importance d'utiliser la petite intégrale du NDVI pour réduire les possibles biais entre NDVI et PPN. La petite intégrale consiste à enlever la valeur de base du NDVI de l'intégrale pour ne prendre en considération que l'augmentation du NDVI liée à l'arrivée des pluies.

La petite intégrale a été calculée ici à partir de la valeur intégrée du NDVI entre juillet et octobre en faisant la soustraction de la base du NDVI estimée par la valeur intégrée entre janvier et avril :

$$iNDVI = \sum_{m=7-10} NDVI[m] - \sum_{m=1-4} NDVI[m] \quad (1)$$

où iNDVI est la petite intégrale NDVI et NDVI[m], la valeur du NDVI pour le mois "m" (m=7-10 : mois de juillet à octobre ; m=1-4 : mois de janvier à avril).

Pour intégrer la variabilité climatique à l'analyse de l'évolution du couvert végétal, la méthode RESTREND proposée par J. EVANS et R. GEERKEN (2004) a été appliquée. Elle consiste à étudier l'évolution temporelle des résidus de la relation iNDVI-Précipitations. Elle permet de nuancer les tendances décrites par l'analyse de l'évolution du NDVI (J.L. SAN EMETERIO, 2015).

V - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette étude, nous allons comparer les évolutions sur la période 1973-1999 à celles sur la période 1999-2010, en mettant l'accent sur les grands traits de l'évolution du couvert végétal spontané considéré globalement. Des approches complémentaires auraient été possibles, et notamment l'examen des modifications pour chaque type de couvert, mais nous les réservons pour une publication ultérieure.

En matière d'occupation du sol, les cartes des régions et des communes montrent des pixels stables (présence ou absence de couvert végétal aux deux dates), des pixels en évolution mais avec le même type de végétation (ouverture ou fermeture du tapis végétal) et des pixels présentant un changement de classe (soit le passage de la présence à l'absence de couvert végétal, ce qui constitue une régression, soit l'évolution inverse, donc une progression).

1) Comparaison des changements d'occupation du sol à l'échelle des régions du Ferlo, du Gourma et du Fakara sur la période 1973-2010.

À l'échelle du Ferlo, l'analyse spatiale des changements observés entre 1973 et 1999 (Fig. 2-A) met en évidence des contrastes entre, d'un côté, le centre du Ferlo, et de l'autre, le Nord-Nord-Est et le Sud-Ouest de la région. Dans le centre du Ferlo, entre les deux dates, la végétation spontanée qui était présente en 1973 s'est maintenue et sa surface a globalement progressé. On peut cependant noter une ouverture de cette végétation là où elle s'est maintenue. Dans les parties nord-nord-est et sud-ouest, au cours de cette même période, c'est la régression qui l'emporte très largement. Entre 1999 et 2010 (Fig. 2-B), l'évolution est plus homogène : à l'exception de quelques espaces de régression disséminés dans les parties sud et nord du Ferlo, il est constaté une stabilité de la végétation spontanée là où elle était présente en 1999 et une progression ailleurs.

À l'image des tendances observées dans le Ferlo, la végétation spontanée a subi dans le Gourma une forte régression entre 1973 et 1999 (Fig. 3-A) sous forme de grandes taches plus ou moins disséminées. La partie sud du Gourma malien a été particulièrement touchée. Sur la même période, quelques secteurs ont enregistré, à l'inverse, une légère extension du tapis végétal. Ils apparaissent notamment au centre et dans la partie nord du Gourma. Sur la période 1999-2010, la tendance s'est inversée, avec l'apparition de nouvelles surfaces couvertes par la végétation spontanée et une grande stabilité de celles qui l'étaient déjà (Fig. 3-B).

Dans la région du Fakara nigérien, les observations mettent en évidence, pour la période entre 1973 et 2000/01, une progression importante de la végétation spontanée au sud du secteur étudié, aux confins du Parc National du W au Niger (Fig. 4-A). En revanche, les surfaces végétalisées ont subi d'importantes régressions dans la partie nord de la région, sur le plateau du Fakara et notamment sur la commune de Dantiandou. Du début des années 2000 à l'année 2010 (Fig. 4-B), on observe que la tendance générale est à la progression, les zones concernées étant disséminées sur l'ensemble du secteur, avec d'importantes taches dans le nord du Parc National du W au Niger.

Le tableau II présente les superficies sous couverture végétale spontanée aux trois dates d'observation dans les secteurs étudiés. En 1973, la végétation spontanée couvrait de 53 % (Fakara) à 66 % (Ferlo) des superficies totales. Puis une nette diminution s'est produite : sur la période allant de 1973 à 1999 ou 2000/01, elle a représenté 29,9 % de la superficie initiale

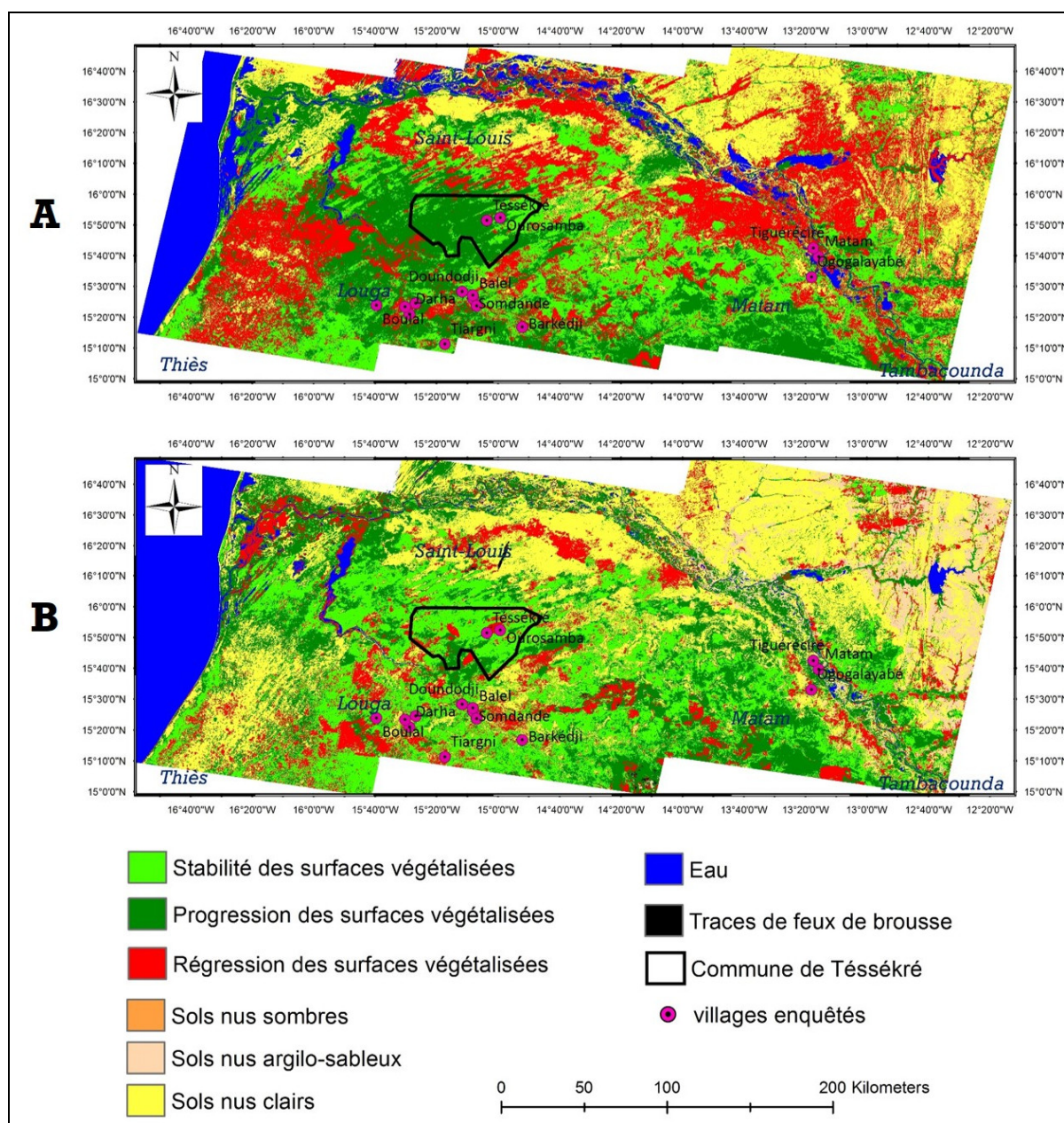


Figure 2 - Spatialisation des changements d'occupation du sol dans le secteur du Ferlo sur les périodes 1973-1999 (A) et 1999-2010 (B).

Les traces de feux de brousse ne concernent que quelques pixels.

Sur le plan radiométrique, les sols nus clairs (sols à horizon superficiel sableux et dunes) ont un double pic en TM3 et TM5 avec de très fortes valeurs de luminance. Les sols nus sombres (affleurements rocheux et surfaces latéritiques) ont une plus faible luminance dans les différents canaux et une réflectance dans les bandes spectrales du visible nettement moins forte. Les sols nus de couleur intermédiaire correspondent aux sols de type argilo-sableux.

dans le cas du Ferlo, 26,6 % dans celui du Gourma et 18,5 % dans celui du Fakara. Sur la dernière période, jusqu'en 2010, la végétation spontanée a manifesté une certaine reprise dans les secteurs du Gourma et du Fakara, mais sans retrouver les superficies de 1973, et elle est restée stable au Ferlo. À cette date, le secteur le plus végétalisé en 1973, celui du Ferlo, est devenu le moins végétalisé, tandis que l'évolution a été l'inverse pour le secteur du Fakara.

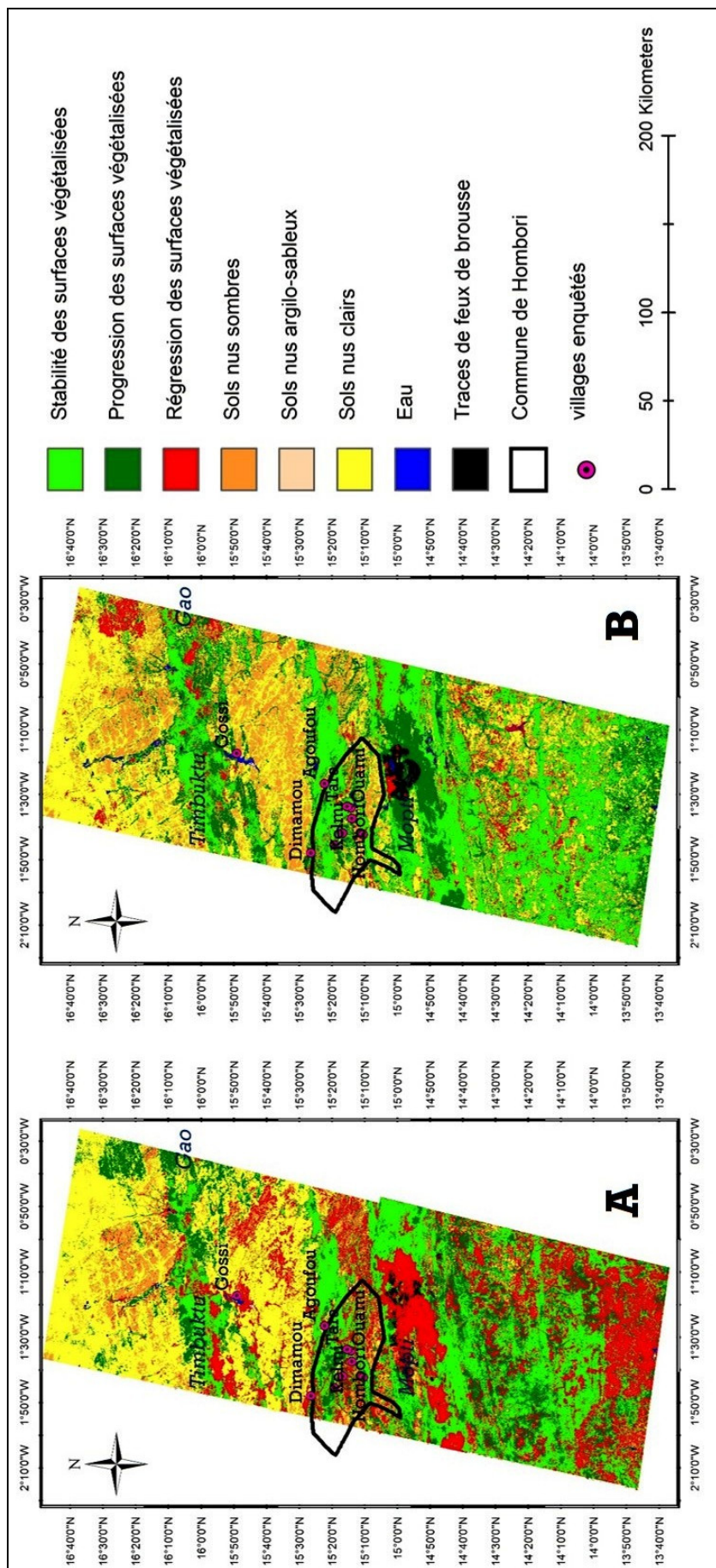


Figure 3 - Spatialisation des changements d'occupation du sol par la végétation dans le secteur du Gourma sur les périodes 1973-1999 (A) et 1999-2010(B).

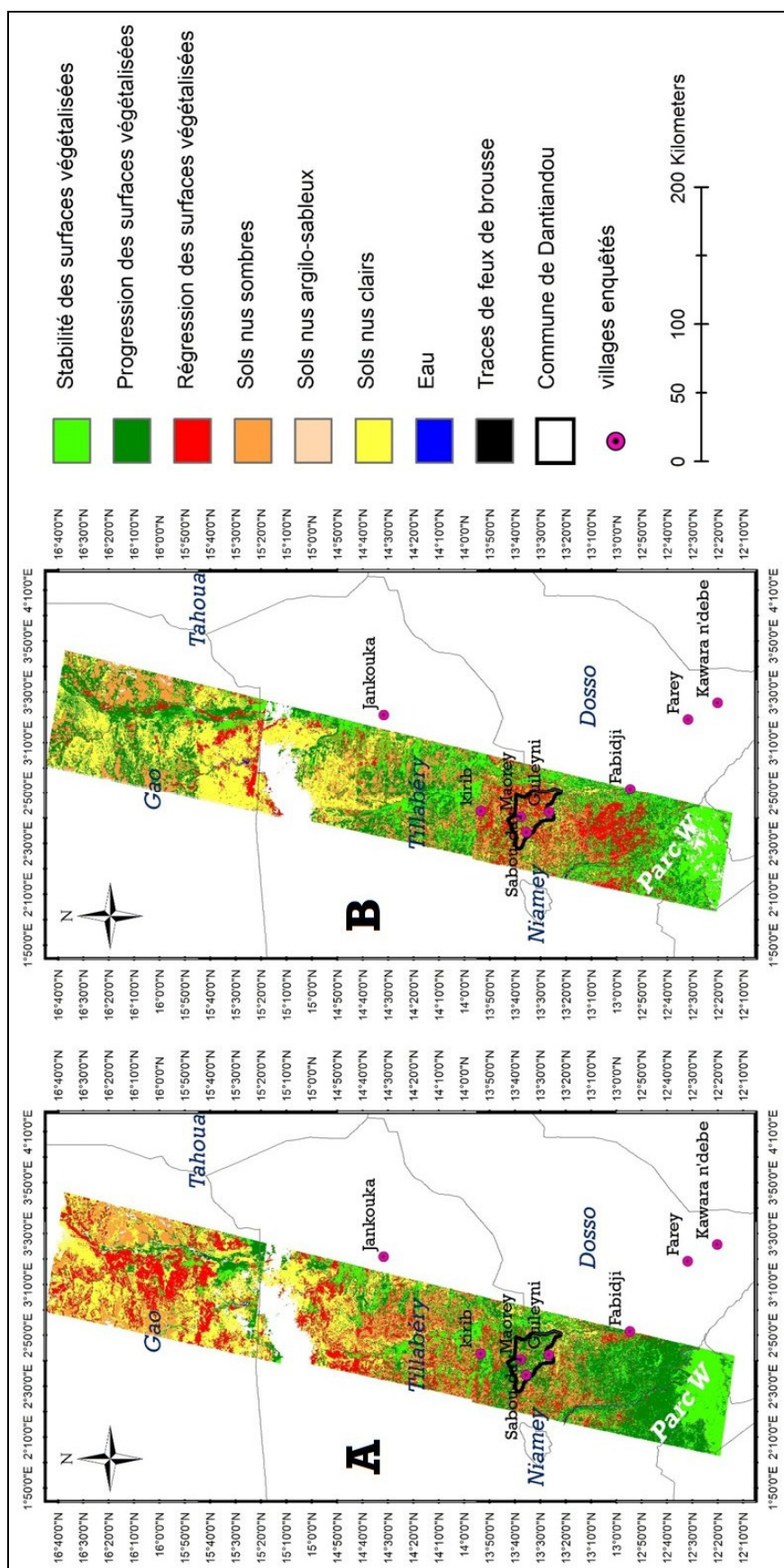


Figure 4 - Spatalisation des changements d'occupation du sol par la végétation dans le secteur du Fakara sur les périodes 1973-2000/01 (A) et 2000/2001-2010(B).

Tableau II - Couverture du sol par la végétation spontanée dans les secteurs étudiés, en 1973, en 1999 ou 2000/01 et en 2010.

| | Couverture du sol par la végétation spontanée, en km ² et en % de la superficie de la région considérée | | | | | |
|-----------------|--|----|-----------------|----|-----------------|----|
| Secteur | Ferlo (Sénégal) | | Gourma (Mali) | | Fakara (Niger) | |
| Année(s) | km ² | % | km ² | % | km ² | % |
| 1973 | 54791 | 66 | 24043 | 56 | 19164 | 53 |
| 1999 ou 2000/01 | 38395 | 46 | 17656 | 41 | 15618 | 43 |
| 2010 | 38753 | 47 | 20695 | 48 | 17923 | 50 |

Le tableau III précise les évolutions en distinguant les évolutions positives du couvert végétal spontané (extension et fermeture) des évolutions négatives (régression et ouverture).

Tableau III - Quantification des changements de la couverture du sol par la végétation spontanée : comparaison des tendances entre les trois régions sur la période 1973-2010.

| | Évaluation des changements en km ² et en % de la superficie de la région considérée | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|------|-----------------|-----|-----------------|----|-----------------|-----|-----------------|------|-----------------|-----|
| Secteur | Ferlo (Sénégal) | | | | Gourma (Mali) | | | | Fakara (Niger) | | | |
| Période | 1973-1999 | | 1999-2010 | | 1973-1999 | | 1999-2010 | | 1973-2000/01 | | 2000/01-2010 | |
| Changement observé | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % |
| Stabilité | 17828 | 21 | 19407 | 23 | 11189 | 26 | 12856 | 30 | 6157 | 17 | 7522 | 21 |
| Extension / fermeture | 19652 | 24 | 19924 | 24 | 6356 | 15 | 8100 | 19 | 9016 | 25 | 9740 | 27 |
| Régression / ouverture | 22077 | 27 | 9389 | 11 | 10243 | 24 | 3084 | 7 | 7637 | 21 | 5265 | 15 |
| Évolution nette | -2425 | -2,9 | +10535 | +13 | -3887 | -9 | +5016 | +12 | +1379 | +3,8 | +4475 | +12 |

De ce tableau, il ressort que la végétation spontanée a subi de profondes modifications au cours de la période allant de 1973 à 1999 ou 2000/01 : la superficie stable (demeurée inchangée) n'a représenté que 33 % de la superficie initiale en végétation spontanée pour le secteur du Ferlo, 47 % pour le secteur du Gourma et 32 % pour celui du Fakara. Ces pourcentages sont montés à 51 %, 73 % et 48 % respectivement sur la période suivante jusqu'en 2010.

En dépit des forts reculs de la végétation spontanée enregistrés entre 1973 et 1999 ou 2000/01 (soit 16396 km² pour le Ferlo, 6387 km² pour le Gourma et 3546 km² pour le Fakara), l'évolution nette sur cette période n'a été que légèrement négative dans le cas du Ferlo (-2425 km²) comme dans celui du Gourma (-3887 km²) et elle a même été positive dans celui du Fakara (+1379 km²). Ainsi, dans le cadre de cette approche, la rétraction de la couverture spontanée est-elle masquée par sa fermeture sur de larges surfaces.

Sur la période suivante, les évolutions nettes ont toutes été positives (10535 km² pour le Ferlo, 5016 km² pour le Gourma et 4475 km² pour le Fakara) et supérieures à l'augmentation de la superficie de la couverture végétale spontanée (358 km², 3039 km² et 2305 km² respectivement). La fermeture de la végétation spontanée a donc été un phénomène constant et très important sur la période d'étude, et tout particulièrement dans le secteur du Ferlo.

2) Comparaison des changements d'occupation du sol à l'échelle des communes de Téssékéré, Hombori et Dantiandou sur la période 1973-2010

Les figures 5 et 6 présentent l'évolution du couvert végétal spontané dans les communes de Téssékéré (2052 km²), Hombori (2280 km² couverts par les images Landsat) et Dantiandou (790 km²) entre 1973 et 2010. À cette échelle spatiale, il est plus facile qu'à l'échelle des secteurs, d'établir éventuellement un lien avec le relief, les roches et les sols. Mais surtout, cette échelle permet de mieux saisir sur les cartes la manière dont l'occupation du sol s'organise sur le terrain.

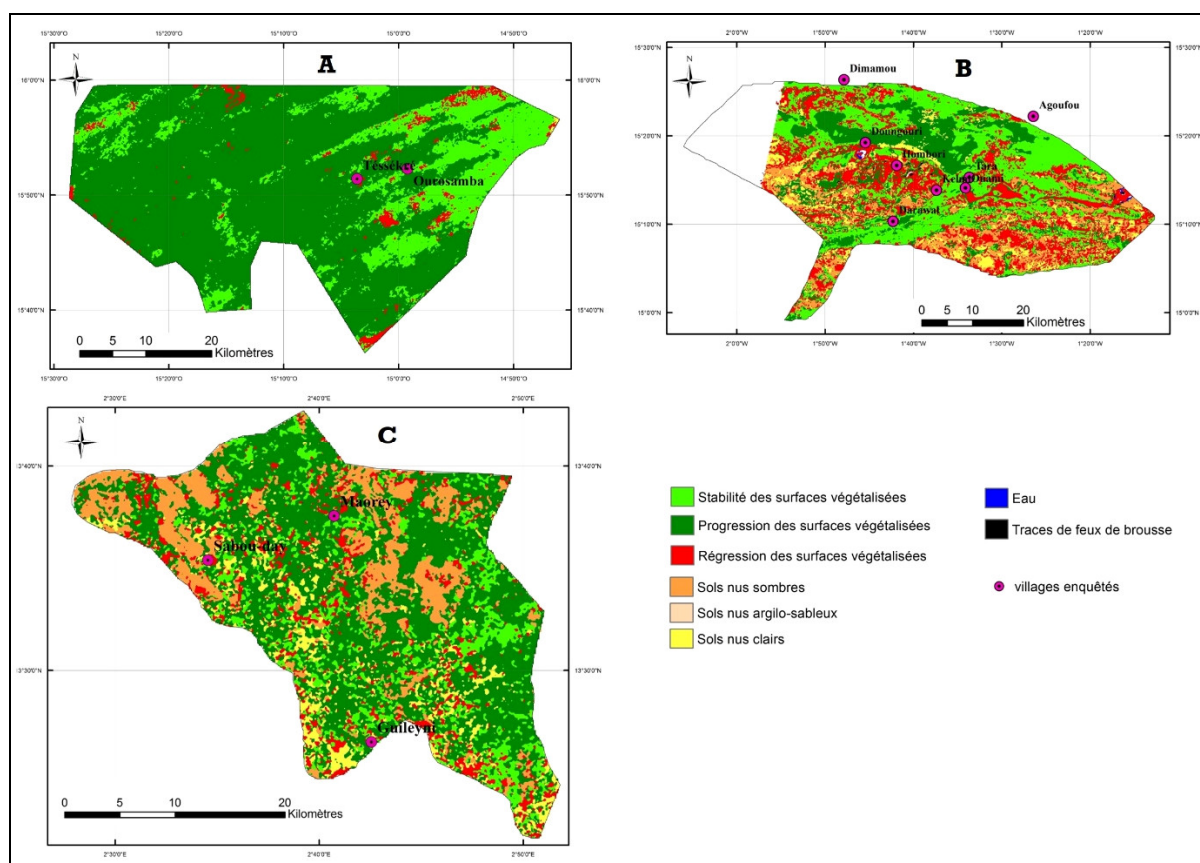


Figure 5 - Spatialisation des changements d'occupation du sol par la végétation spontanée entre 1973 et 1999 à Téssékéré (A) et Hombori (B) et entre 1973 et 2000/01 à Dantiandou (C).

La commune de Téssékéré montre, dans le premier temps (Fig. 5-A), une forte progression, quasi générale, accompagnée d'une bonne stabilité dans la partie orientale. Sur la période suivante (Fig. 6-A), la stabilité l'emporte très largement. On observe encore des zones de progression, surtout dans la partie sud, mais des plages de régression apparaissent également.

La situation est beaucoup plus complexe sur la commune de Hombori pour la période 1973-1999 (Fig. 5-B), avec une juxtaposition de zones en progression, en régression et stables, mais avec aussi beaucoup de sols nus de différents types. Le recul de la végétation spontanée concerne les bas-fonds et les cuirasses latéritiques au sud de Hombori, ainsi que les monts

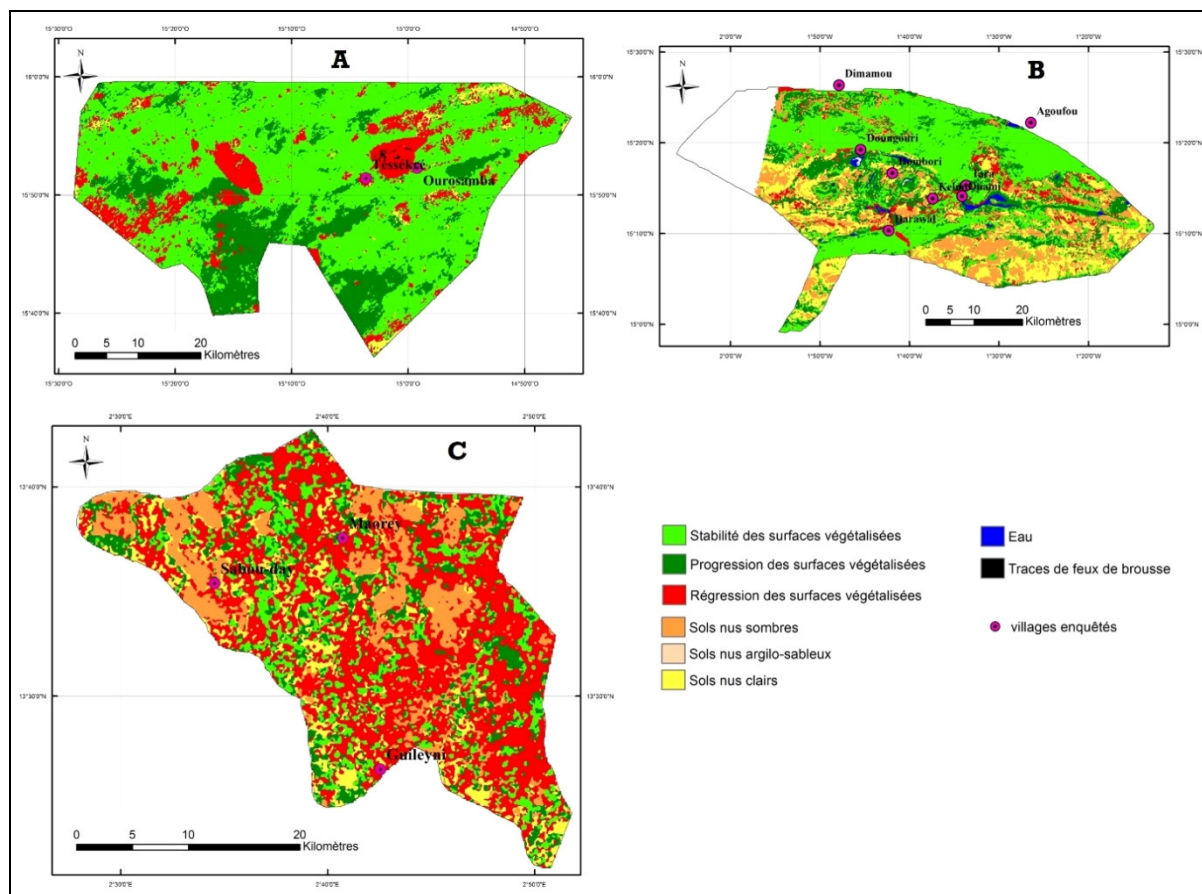


Figure 6 - Spatialisation des changements d'occupation du sol par la végétation sur la période 1999-2010 à Tessékéré (A) et Hombori (B) et sur la période 2000/01-2010 à Dantiandou (C).

au centre de la commune. Les zones où cette végétation a progressé sont essentiellement concentrées au nord de la commune. Sur la période 1999-2010 (Fig. 6-B), la stabilité l'emporte, les zones en progression ou en régression étant peu étendues. Les surfaces nues couvrent des superficies importantes.

Sur la période 1973-2000/01, la commune de Dantiandou juxtapose essentiellement des zones de stabilité, des zones en progression et des sols nus (Fig. 5-C). Progression et stabilité se concentrent dans les parties basses, alors que les zones de régression correspondent aux plateaux du Fakara. La période suivante (2000/01-2010) se distingue par une diminution spectaculaire des surfaces en végétation spontanée (Fig. 6-C).

Par rapport aux secteurs dans lesquels elles sont situées, les communes étudiées montrent des situations et des évolutions bien différentes (Tab. IV). Toutes les trois, et surtout celle de Tessékéré, étaient fortement végétalisées en 1973 (à 99 % pour Tessékéré, 73 % pour Hombori et 69 % pour Dantiandou), bien plus que les secteurs correspondants (66 % pour celui du Ferlo, 56 % pour celui du Gourma et 53 % pour celui du Fakara). Dans les communes de Tessékéré et de Hombori, la végétation spontanée n'a que faiblement régressé entre 1973 et 2013, respectivement de 15,9 % et de 9,8 %, contre 29,3 % et 13,9 % pour les secteurs correspondants. En revanche, la régression a été très forte sur la commune de Dantiandou (57,3 %), alors qu'elle n'a été que de 6,5 % dans le secteur du Fakara. Les communes étudiées ne sont donc pas

représentatives des secteurs et ne doivent être considérées que pour elles-mêmes. Elles permettent cependant de nuancer les tendances générales observées à l'échelle régionale.

Tableau IV - Couverture du sol par la végétation spontanée dans les communes étudiées, en 1973, en 1999 ou 2000/01 et en 2010.

| Secteur | Couverture du sol par la végétation spontanée, en km ² et en % de la superficie de la commune considérée | | | | | |
|-----------------|---|----|-----------------|----|--------------------|----|
| | Téssékré (Sénégal) | | Hombori (Mali) | | Dantiandou (Niger) | |
| Année(s) | km ² | % | km ² | % | km ² | % |
| 1973 | 2041 | 99 | 1675 | 73 | 546 | 69 |
| 1999 ou 2000/01 | 1974 | 96 | 1431 | 63 | 500 | 63 |
| 2010 | 1716 | 84 | 1511 | 66 | 233 | 29 |

En allant plus loin dans l'examen des tendances à l'échelle locale (Tab. V), on constate que dans la commune de Téssékré (2052 km²), sur la période 1973-1999, même si la végétation spontanée n'a que très peu régressé au total (de 3,3 % seulement), les évolutions ont été fortes dans le détail. Par rapport aux superficies stables (442 km²), celles en évolution positive (extension ou fermeture) sont 3,5 fois plus fortes et celles en évolution négative (régression ou ouverture) 7,5 fois plus faibles. La période suivante a été marquée par des superficies stables (1427 km²) largement supérieures à celles à évolutions positive (3,2 fois plus faibles) ou négative (4,9 fois plus faibles), mais cela dans un contexte de régression de la végétation spontanée.

Tableau V - Quantification des changements de la couverture du sol par la végétation spontanée : comparaison des tendances entre les trois communes sur la période 1973-2010.

| Commune | Évaluation des changements en km ² et en % de la commune considérée | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|-----|-----------------|------|------------------------|------|-----------------|-----|----------------------------|-----|-----------------|-----|
| | Téssékré (Ferlo, Sénégal) | | | | Hombori (Gourma, Mali) | | | | Dantiandou (Fakara, Niger) | | | |
| Période | 1973-1999 | | 1999-2010 | | 1973-1999 | | 1999-2010 | | 1973-2000/01 | | 2000/01-2010 | |
| Changement observé | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % | km ² | % |
| Stabilité | 442 | 22 | 1327 | 65 | 790 | 35 | 912 | 40 | 115 | 15 | 120 | 15 |
| Extension / fermeture | 1547 | 75 | 412 | 20 | 428 | 19 | 432 | 19 | 411 | 52 | 91 | 12 |
| Régression / ouverture | 59 | 2,9 | 270 | 13 | 611 | 27 | 152 | 6,7 | 74 | 9,4 | 370 | 47 |
| Évolution nette | +1488 | +73 | +142 | +6,9 | -183 | -8,0 | +280 | +12 | +337 | +43 | -279 | -35 |

Les écart entre superficies stables, à évolution positive et à évolution négative apparaissent moindres dans le cas de la commune de Hombori (2040 km²). Sur les deux périodes, les superficies stables l'emportent, surtout sur la période 1999-2010 (910 km²). Les superficies à évolution négative sont relativement étendues sur la période 1973-1999, mais beaucoup plus faibles ensuite (152 km²), ce qui est à relier à l'augmentation de la superficie totale du couvert végétal spontané notée pour la période 1999-2010 (Tab. IV).

La commune de Dantiandou (790 km²) se singularise par la modestie relative des superficies stables sur les deux périodes considérées, mais aussi par l'effondrement des

superficiés à évolution positive et l'augmentation forte des superficiés à évolution négative. On notera que pour la période 2000/01-2010, la différence entre les évolutions négative (370 km²) et positive (91 km²), soit 279 km², est très proche de la rétractation de la superficie couverte par la végétation spontanée (267 km²).

3) Évolution des précipitations et observations de terrain

L'interprétation des changements aux échelles locales a révélé des contrastes forts et des incertitudes sur les facteurs explicatifs. Pour avancer dans le raisonnement nous allons examiner, à travers les séries temporelles de NDVI, la relation entre les changements des précipitations et les changements de la végétation spontanée à l'échelle de tout le Sahel.

La figure 7 montre l'évolution des anomalies de précipitations pendant la période 1973-2010 pour les trois régions étudiées. Des tendances comme celles qui existent dans l'Ouest sahélien (Ferlo) et le centre sahélien (Gourma, Fakara), sont observées sur l'ensemble de la bande sahélienne : des années de déficit très marqué, correspondant à des sécheresses sévères (1973, 1984), suivies d'une reprise généralisée des précipitations dans les années 1990 (reprise qui commence plus tardivement dans la partie occidentale de la bande sahélienne). Entre 2000 et 2010, la confirmation de l'amélioration des conditions pluviométriques par rapport aux années de sécheresse antérieures peut expliquer en partie la progression (extension et fermeture) de la végétation spontanée à l'échelle régionale (S.E. NICHOLSON, 2005 ; T. LEBEL et A. ALI, 2009 ; S.E. NICHOLSON, 2013).

Pour ne considérer que les deux périodes que nous avons distinguées, les précipitations annuelles moyennes de 1973 à 1999 et de 2000 à 2010, s'établissent à 361 mm et 426 mm pour le secteur du Ferlo, 299 mm et 325 mm pour celui du Gourma; 420 et 419 mm pour celui du Fakara. Au sein de fluctuations interannuelles très fortes, on doit noter la longue succession d'années nettement déficitaires (surtout au Gourma et au Fakara) dans la décennie 1980. Cette situation de sécheresse s'est prolongée par de nombreuses années sèches jusqu'aux années 1990 au Gourma et jusqu'aux années 2000 au Ferlo. Dans ce secteur, la fin de la période d'étude a été marquée par des précipitations très abondantes en 2009 et plus encore en 2010.

Afin de coller aux dates d'acquisition des images satellitaires utilisées, nous considérons ci-dessous les précipitations en 1973, 1999 et 2010.

Dans le secteur du Ferlo, les précipitations ont été de 284 mm ($Z = -0,97$) en 1973, 463 mm ($Z = 0,86$) en 1999 et 653 mm ($Z = 2,84$ – année très humide) en 2010, pour une moyenne globale sur la période d'étude de 380 mm.

Entre 1973 et 1999, en raison de la poursuite d'années déficitaires jusque vers la fin de la décennie 1990, les changements de l'occupation du sol, spatialement hétérogènes, se sont traduits globalement par une régression du couvert végétal spontané et par des évolutions négatives supérieures aux évolutions positives. Dans la commune très végétalisée de Tésékéré, en opposition avec le cadre général du Ferlo, le couvert végétal spontané n'a que très faiblement régressé et les évolutions positives ont largement prévalu sur les négatives (26 fois plus fortes).

Entre 1999 et 2010, bien qu'une amélioration pluviométrique se soit affirmée, mais concentrée surtout sur les deux dernières années, la couverture végétale a continué de se rétracter légèrement à l'échelle du secteur. La perte de superficie s'élève à 258 km², valeur à peine inférieure à l'évolution négative totale (270 km²), l'ouverture du couvert ne représentant donc que peu de chose.

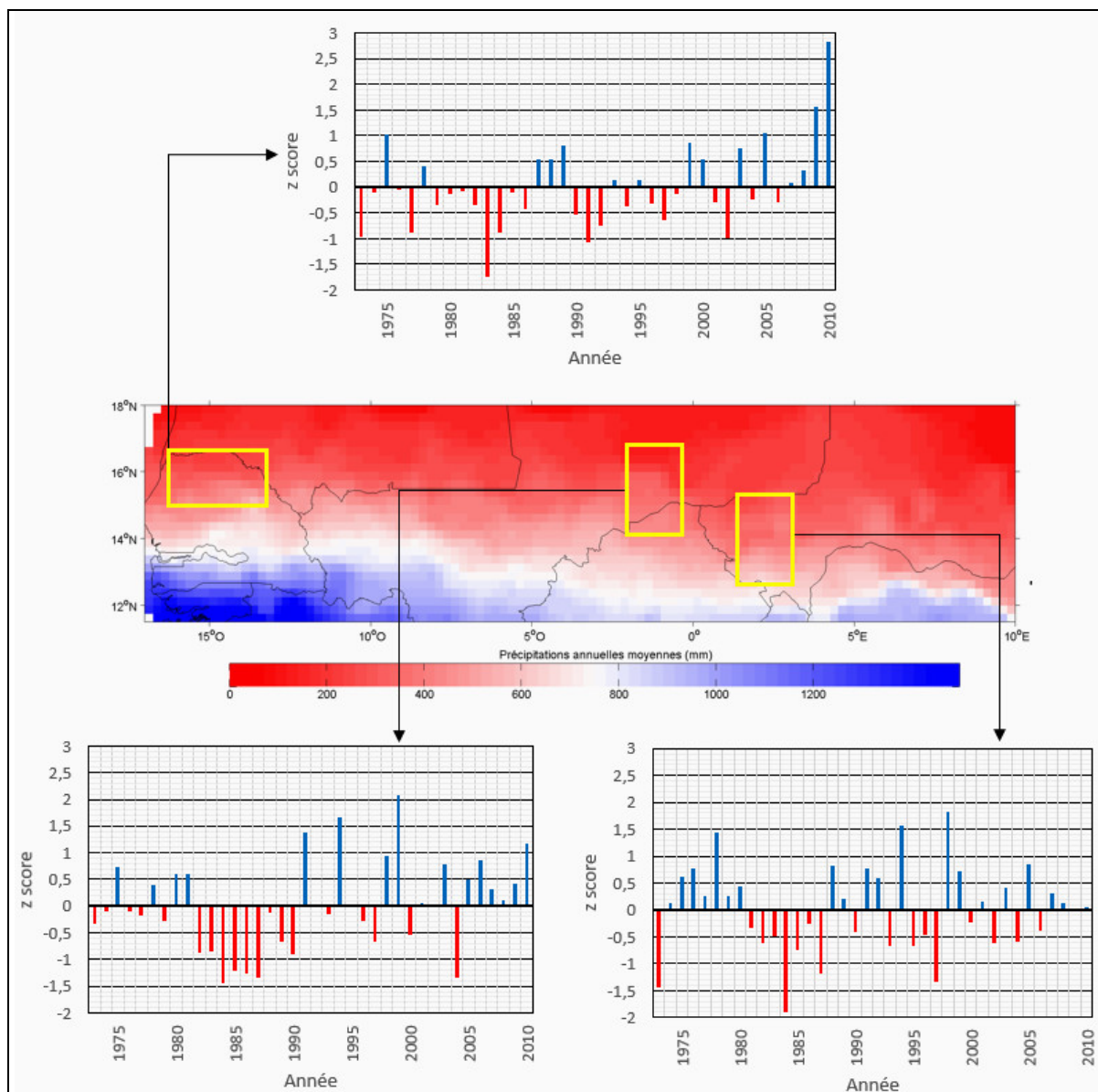


Figure 7 - Précipitations annuelles moyennes (mm) et évolution des anomalies sur la période 1973-2010. (base de données GPCC 0.25°).

La base GPCC fournit des grilles (ou rasters) qui rendent compte de la répartition spatiale des précipitations mensuelles.

Les graphiques font référence aux anomalies calculées en moyennant les valeurs de tous les pixels présents à l'intérieur de chaque rectangle jaune. En haut : secteur du Ferlo. En bas à gauche : secteur du Gourma. En bas à droite : secteur du Fakara.

$$Z \text{ score} = (\text{pluie annuelle} - \text{pluie annuelle moyenne}) / \text{écart-type de la série.}$$

Pour le secteur du Gourma, nous avons des précipitations de 282 mm ($Z = -0,32$) en 1973, 465 mm ($Z = 2,08$) en 1999 et 402 mm ($Z = 1,16$) en 2010, avec une moyenne de 306 mm sur l'ensemble de la période. Ces valeurs esquissent une situation pluviométrique identique à celle du Ferlo.

Sur la période 1973-1999, malgré quelques années humides dans la décennie 1990, dont la dernière très pluvieuse, la végétation spontanée a fortement régressé à l'échelle du secteur et

son évolution a été globalement négative. La commune d'Hombori, ne s'est pas distinguée de l'ensemble du secteur.

L'augmentation relative des précipitations durant la période 1999-2010 a favorisé la progression du couvert végétal, aussi bien à l'échelle du secteur (Gourma) que du site (Hombori). L'année 1999 ayant été plus arrosée que 2010, cette progression atteste que l'effet des précipitations cumulées sur plusieurs années (effet mémoire – T. WIEGAND *et al.*, 2002) l'emporte sur celui des fluctuations d'une année à l'autre.

Au Fakara, plus arrosé en moyenne (419 mm) que les secteurs du Ferlo et du Gourma, les précipitations des années références apparaissent relativement faibles : 295 mm ($Z = -0,14$) en 1973, 392 mm ($Z = -0,24$) en 2000 et 422 mm ($Z = 0,05$) en 2010.

La période jusqu'en 2000/01 voit une diminution de la superficie de la couverture végétale spontanée, mais avec une évolution globalement positive. Au cours de la période suivante (jusqu'en 2010), la végétation spontanée s'est étendue dans la partie sud, aux confins du Parc National du W. En revanche, sur les plateaux de la partie nord, elle a plutôt régressé. À Dantiandou, par exemple, cela peut s'expliquer par les activités humaines : les déboisements, pour mise en culture ou en réponse à l'accroissement de la demande de bois, et la réduction du temps de jachère (J.L. SAN EMETERIO *et al.*, 2013).

En définitive, le lien entre la végétation et les précipitations est difficile à vraiment cerner, les fluctuations interannuelles des pluies et la succession de périodes pluriannuelles sèches et humides s'accordant mal avec l'interprétation d'observations sur la végétation centrées sur des années très espacées. En outre, les pluies ne sont pas le seul facteur important ; le rôle des hommes peut être déterminant.

4) NDVI et climat : quels impacts de la variabilité pluviométrique sur les tendances observées ?

En région sahélienne, la Productivité Primaire Nette (PNN) de la végétation déduite du NDVI, est étroitement liée au volume de précipitations (S.E. NICHOLSON *et al.*, 1990). Ainsi l'interprétation des différentes tendances observées dans les séries temporelles de NDVI ne peut-elle être complète sans l'étude de l'évolution des précipitations pendant les périodes considérées.

En complément de l'analyse des images Landsat et des séries temporelles de pluie, l'examen des données de NDVI pour la période 1983-2010 fait ressortir le reverdissement récent du Sahel (Fig. 8), déjà souligné dans la littérature. La situation du Ferlo et du Gourma, marquée par un reverdissement significatif, se distingue cependant nettement de celle du Fakara, sans reverdissement significatif.

Or, même si les dates d'observation diffèrent selon les approches, on peut souligner que d'après les images satellitaires, le couvert végétal a évolué de manière sensiblement identique dans les trois secteurs au cours des périodes étudiées entre 1973 et 2010, et sans que rien ne puisse laisser supposer que le Fakara soit à l'écart du reverdissement (voir Tab. II et III).

À une échelle plus fine, la commune de Dantiandou, dans le Fakara, montre un meilleur accord entre l'évolution de la végétation spontanée et celle du NDVI.

Si le reverdissement est manifeste à partir de l'évolution du iNDVI, la prise en compte de la variabilité climatique à partir de l'évolution des résidus de la relation productivité végétale-précipitations (Fig. 9) amène à nuancer ce constat ; la tendance globale au reverdissement est

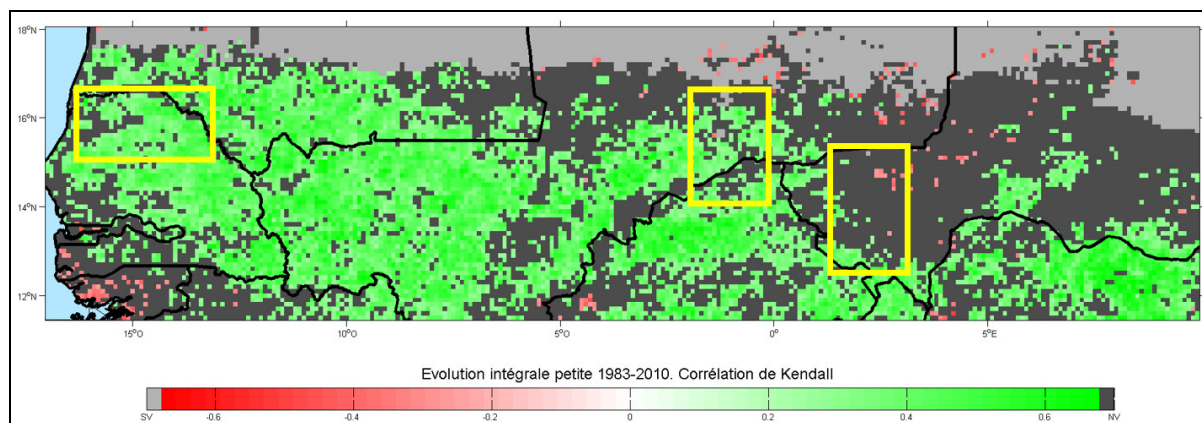


Figure 8 - Évolution du iNDVI sur la période 1983-2010.

Les précipitations cumulées entre juillet et septembre sont celles de la base ARC 2. En gris obscur, les pixels où l'évolution du NDVI n'est pas significative (95 % de confiance). En gris plus clair, l'écart-type du NDVI est inférieur à 0,020 ; sous ce seuil, on considère que la variation annuelle du couvert végétal n'est pas significative.

alors toujours présente, mais moins marquée. Au Sénégal, par exemple, les valeurs, hétérogènes mais proches de 0, permettent de distinguer que l'Est du pays s'est reverdi plus que le bassin arachidier, situé à l'ouest. On voit ici la marque d'une intensification des pratiques agricoles dans certains secteurs.

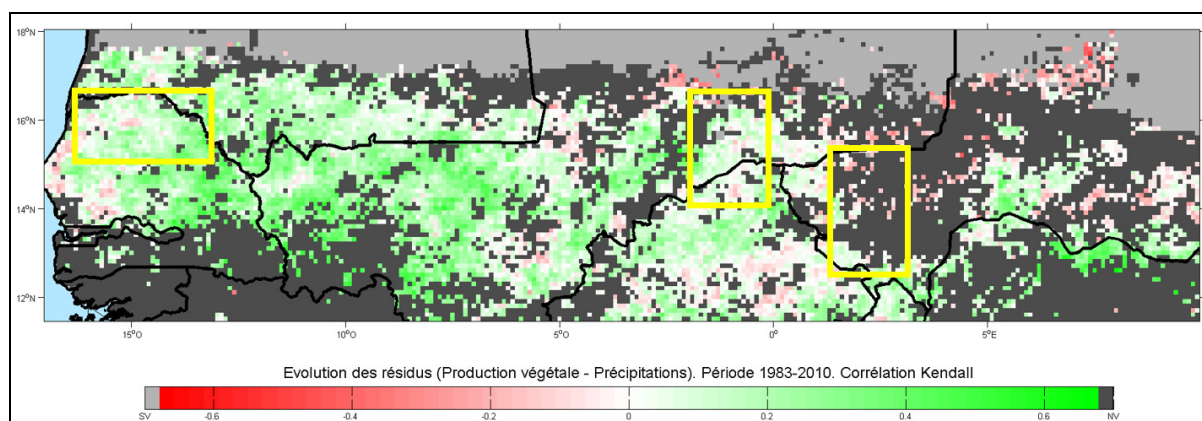


Figure 9 - Évolution des résidus de la relation *production végétale-précipitations* sur la période 1983-2010.

La production végétale est calculée à partir du iNDVI. Les précipitations cumulées entre juillet et septembre sont celles de la base ARC 2. En gris obscur : les pixels où la relation *production végétale-précipitations* n'est pas significative (à 95 % de confiance). En gris plus clair : l'écart type du NDVI est inférieur à 0,020 ; sous ce seuil on considère que la variation annuelle du couvert végétal n'est pas significative.

La figure 10 montre que sur l'ensemble de la région étudiée, les tendances générales de reverdissement observées sont principalement associées à la longueur de la série et aux valeurs des années de début et de fin de série.

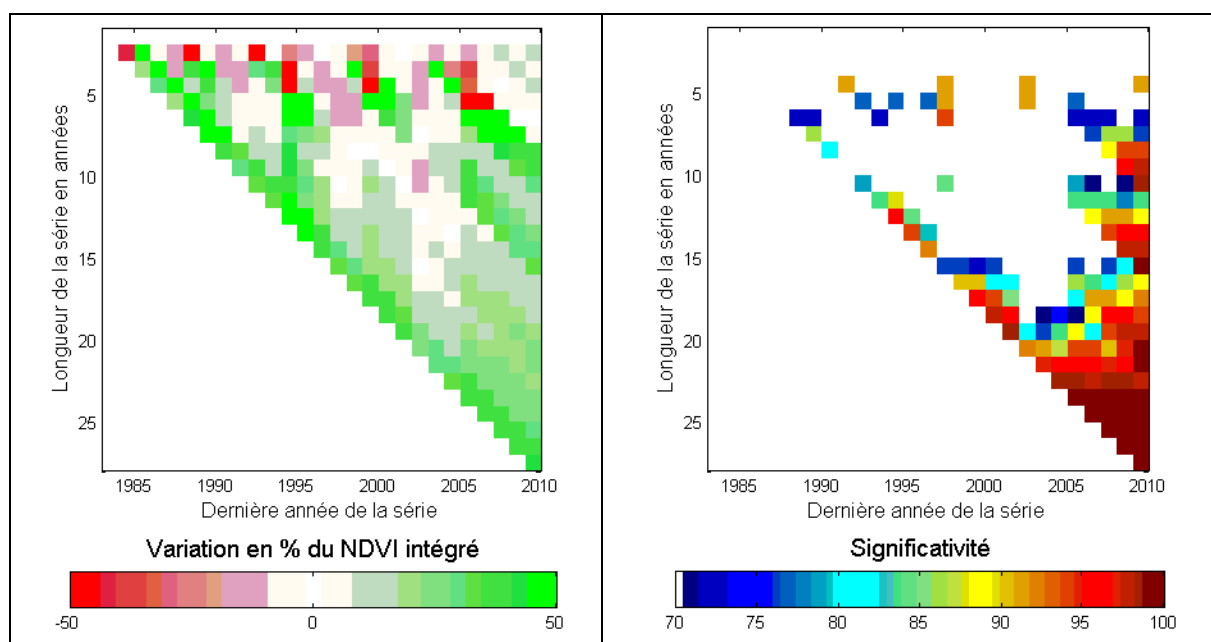


Figure 10 - Variation en % et significativité du iNDVI en fonction de l'année de début de la série pour l'ensemble de la région étudiée.

La variation du iNDVI est calculée à partir de la moyenne des pixels montrant une relation iNDVI-précipitations significative (95 % de confiance). Cette figure est basée sur la méthode et le graphique proposés par C. DARDEL *et al* (2014).

Si l'on prend en compte les premières années de la série 1983-2010, le reverdissement est statistiquement significatif sur la période, du fait de la présence d'années très sèches au début de la série. En revanche, dès que les années de sécheresse ne sont pas prises en compte, il devient rapidement non significatif ou inexistant.

La présence d'années humides en fin de série, en tout cas dans les secteurs du Ferlo (en particulier 2009 et 2010) et du Gourma, explique également en grande partie la tendance au reverdissement mise en évidence.

Les années de début et celles de fin étant écartées, c'est une tout autre tendance qui se fait jour.

Les tendances du NDVI sont globalement cohérentes avec les résultats obtenus à partir des images Landsat. Le reverdissement est mis particulièrement en évidence si l'on considère les dernières années (cas du Ferlo et du Gourma malien).

Toutefois cette amélioration ne concerne pas le site de Dantiandou. À son sujet, les analyses effectuées par d'autres auteurs dans le même secteur, aussi bien à l'échelle micro-locale (P. HIERNAUX *et al.*, 2009) qu'à l'échelle régionale (C DARDEL, 2014 ; J.L. SAN EMETERIO, 2015), montrent la même tendance négative. Située à 80 km environ de Niamey, Dantiandou a enregistré une forte augmentation de sa population depuis les années 1950, ce qui s'est traduit par la presque totale disparition de la végétation spontanée au profit des cultures et des jachères. Ce type d'évolution est largement documenté dans la littérature scientifique (C. LEDUC *et al.*, 2001 ; M. LEBLANC *et al.*, 2008 ; L. DESCROIX *et al.*, 2009 ; P. HIERNAUX *et al.*, 2009 ; INS, 2011 ; J.L. SAN EMETERIO *et al.*, 2013).

Ainsi, alors que des précipitations moins déficitaires au cours des dernières années se sont accompagnées, dans une large partie du Sahel d'une densification du couvert végétal, l'action des sociétés humaines peut mener localement à une diminution de la couverture végétale spontanée. Ces spécificités locales, qui ne doivent pas être négligées, ne peuvent que passer inaperçues dans une approche globale à l'échelle du Sahel et donnent tout son intérêt à une analyse multi-échelle (C. DARDEL *et al.*, 2014).

Le Sud-Ouest du Niger reste cependant une exception, les changements de l'occupation du sol sous l'effet des activités humaines ayant été rapides dans cette région au cours des dernières décennies (M. LEBLANC *et al.*, 2008). Ces changements brutaux expliquent l'absence de relation entre les précipitations et l'évolution du couvert végétal spontané dans cette région.

VI - CONCLUSION

L'étude diachronique réalisée à partir de cartes d'occupation du sol élaborées à deux échelles d'investigation (locale et régionale) a permis de faire ressortir l'évolution du couvert végétal spontané entre 1973 et 2010 dans plusieurs secteurs et sites du Sahel.

Les dynamiques observées dans le Ferlo et dans le Gourma indiquent une tendance à la progression des surfaces végétalisées durant la dernière décennie (1999-2010), quelle que soit l'échelle d'observation. Il existe cependant une opposition assez marquée entre le Nord du Gourma (faiblement végétalisé) et le Sud où le couvert est plus étendu. Dans le Ferlo, à l'opposition nord-sud s'ajoute un contraste ouest-est, la couverture végétale spontanée étant moindre dans la partie ouest. À l'échelle locale, la couverture végétale spontanée montre une tendance à la stabilité et à la progression dans la commune de Téssékéré (Ferlo). Dans la commune de Hombori (Gourma), l'hétérogénéité spatiale est plus forte en raison d'un relief associant des bas-fonds et des dunes sableuses où la végétation est relativement développée, et des cuirasses latéritiques très peu couvertes.

Dans la région du Fakara, les tendances observées montrent une progression importante des surfaces végétalisées de 1973 à 2000/01 puis 2010. Des disparités se font jour ici aussi. Les dynamiques régressives dominent sur les plateaux, tandis que les évolutions positives sont globalement plus fréquentes au nord du Parc National du W. Une exploration plus détaillée montre des exceptions à ce reverdissement, notamment sur la commune de Dantiandou où la tendance est plutôt à une forte régression de la végétation spontanée, notamment sur la période 2000/01-2010. Dans ce cas, la relation entre la pluviométrie et l'évolution du couvert végétal paraît peu significative.

Autrement dit, la forte variabilité interannuelle des précipitations, dont les effets sont perceptibles à l'échelle des secteurs, n'empêche pas qu'apparaissent localement des situations particulières, en lien avec les activités humaines, comme l'extension des zones cultivées et la satisfaction des besoins en bois à Dantiandou.

L'articulation des différentes échelles (du local au régional) et leur déclinaison sur le temps long permettent de mieux cerner les recompositions spatiales qui affectent l'environnement. Cette approche multi-échelle permet de questionner les facteurs qui conditionnent l'occupation des terres, qu'ils soient "naturels" – tels que le climat, comme dans cette étude, ou la disponibilité et l'accès à l'eau – ou qu'ils soient anthropiques.

Il ne nous a pas été possible de soupeser le rôle de chaque facteur pour chaque changement observé. Néanmoins cette étude a permis, à travers une approche multiscalaire appuyée sur une étude combinée des précipitations et des séries de NDVI, de dresser des cartes de l'occupation du sol et d'identifier des secteurs où la reprise récente des pluies, même toute relative et pas encore bien assurée, s'est accompagnée d'une augmentation du NDVI ainsi que d'une extension de la végétation spontanée (Ferlo, Gourma et périphérie du Parc du W au Niger) et d'autres qui ne répondent pas à cette trajectoire régionale (plateaux du Fakara), pour lesquels les changements sont liés aux activités humaines. Dans l'avenir, l'obligation de pourvoir aux besoins croissants de la population en produits alimentaires et en bois, génèrera partout une pression accrue sur la végétation spontanée, qui pourrait ainsi devenir, quelles que soient les conditions climatiques, le principal facteur d'évolution.

Remerciements : Les missions de terrain ayant permis cet article ont été financées par l'ANR ECLIS"

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKERMANN G., ALEXANDRE F., ANDRIEU J., MERING C. et OLLIVIER C. (2006) - Dynamique des paysages et perspectives de développement durable sur la petite côte et dans le delta du Sine-Saloum (Sénégal). *Vertigo*, vol. 7, n° 2, en ligne : <https://journals.openedition.org/vertigo/2206>.
- ANDRIEU J. (2008) - *Dynamique des paysages dans les régions septentrionales des Rivières-du-Sud (Sénégal, Gambie, Guinée - Bissau)*. Thèse de l'Université Paris-Diderot - Paris 7, 519 p.
- ANDRIEU J. (2017-a) - *Contribution méthodologique à l'analyse spatiale de la végétation terrestre De la biogéographie quantitative à une géographie appliquée à la lutte contre l'érosion de la biodiversité végétale*. Mémoire d'HDR, vol. 1, 209 p.
- ANDRIEU J. (2017-b) - Phenological analysis of the savanna-forest transition from 1981 to 2006 from Côte d'Ivoire to Benin with NDVI NOAA time series. *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, n° 1, p. 588-600.
- ANDRIEU J. (2018) - Land cover changes on the West-African coastline from the Saloum Delta (Senegal) to Rio Geba (Guinea-Bissau) between 1979 and 2015. *European Journal of Remote Sensing*, vol. 51, n° 1, p. 314-325.
- ANDRIEU J., et MERING C. (2008) - Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum au Rio Geba. *Télédétection*, vol. 8, n° 2, p. 93-118.
- ANYAMBA A. et TUCKER C.J. (2005) - Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, vol. 63, n° 3, p. 596-614.
- ANYAMBA A., SMALL J.L., TUCKER C.J. et PAK E.W. (2014) - Thirty-two years of sahelian zone growing season non-stationary NDVI3g Patterns and Trends. *Remote Sensing*, vol. 6, n° 4, p. 3101-3122.

-
- BANNARI A., MORIN D. et BONN F. (1995) - A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, n° 1, p. 95-120.
- BONN F. et ROCHON G. (1993) - *Précis de télédétection : principes et méthodes*. Édit. Presses de l'Université du Québec, 485 p.
- CASENAVE A. et VALENTIN C. (1989) - *Les états de surfaces de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration*. Édit. ORSTOM Éditions, coll. "Didactiques", Paris, 229 p.
- CASSE C. (2015) - *Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey. Étude à partir de données satellitaires et in-situ*. Thèse de l'Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 260 p.
- CHAVEZ P.S. et MACKINNON D.J. (1994) - Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States. *Remotely Sensed Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 5, p. 571-583.
- COUREL M.F., CUQ F. et TOUNSI I. (1988) - Suivi de l'évolution des pâturages du Sahel malien. *Mappemonde*, vol. 1988/2, p. 26-31.
- DARDEL C., KERGOAT L., HIERNAUX P., MOUGIN E., GRIPPA M. et TUCKER C.J. (2014) - Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, p. 350-364.
- DE JONG R., DE BRUIN S., DE WIT A., SCHAEPMAN M.E. et DENT D.L. (2011) - Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, p. 692-702.
- DESCROIX L., MAHÉ G., LEBEL T., FAVREAU G., GALLE S., GAUTIER E., OLIVRY J.C., ALBERGEL J., AMOGU O., CAPPELAERE B., DESSOUASSI R., DIEDHIOU A., LE BRETON E., MAMADOU I. et SIGHOMNOU D. (2009) - Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 1-2, numéro spécial : "Surface processes and water cycles in West Africa, studied from the AMMA-CATCH observing system", p. 90-102.
- DESCROIX L., DIONGUE NIANG A., PANTHOU G., BODIAN A., SANE Y., DACOSTA H., MALAM ABDU M., VANDERVAERE J.P. et QUANTIN G. (2015) - Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Sénégambie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, vol. 12, p. 25-43.
- DE WISPELAERE G. et WAKSMAN G. (1977) - Contribution du traitement des images-satellite à la cartographie des pâturages sahéliens. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, vol. 30, n° 4, p. 407-424.
- DURAND J.H. (1977) - À propos de la sécheresse et ses conséquences au Sahel. *Cahiers d'outre-mer*, n° 120, 30^{ème} année, p. 383-403.
- EL RAEY M., NASR S., EL-HATTAB M. et FRIHY O. (1995) - Change detection of Rosetta promontory over the last forty years. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, n° 5, p. 825-834.
- EVANS J. et GEERKEN R. (2004) - Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, vol. 57, n° 4, p. 535-554.
- FALL A. (2014) - *Le Ferlo sénégalais : approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens*. Thèse de l'Université Paris 13, 380 p.
- FALL A. (2017) - Du Ferlo au Bassin arachidier (Sénégal) : analyse de la composition floris-

- tique de la végétation envisagée comme ressource et comme indicatrice des changements socio-environnementaux. *Physio-Géo*, vol. 11, p. 65-91
- FENSHOLT R. et RASMUSSEN K. (2011) - Analysis of trends in the Sahelian "rain-use efficiency" GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n° 2, p. 438-451.
- HIERNAUX P. et AYANTUNDE A. (2004) - *The Fakara: a semi - arid agro-ecosystem under stress*. Report of research activities. Édit. International Livestock Research Institute (ILRI), rapport d'activités de recherche, première phase (juillet 2002 - juin 2004) du programme DMP-GEF (GEF/2711-02-4516), Nairobi, Kenya, 94 p.
- HIERNAUX P., AYANTUNDE A., KALILOU A., MOUGIN E., GERARD B., BAUP F., GRIPPA M. et DJABY B. (2009) - Resilience and productivity trends of crops, fallows and rangelands in Southwest Niger: impact of land use, management and climate changes. *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 1-2, numéro spécial : "Surface processes and water cycles in West Africa, studied from the AMMA-CATCH observing system", p. 65-77.
- HIERNAUX P., DIAWARA M. et GANGNERON F. (2014) - Quelle accessibilité aux ressources pastorales du Sahel ? L'élevage face aux variations climatiques et aux évolutions des sociétés sahéliennes. *Afrique contemporaine*, vol°249, n° 1, p. 21-35.
- HOUNTONDI Y.C. (2008) - *Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest. Analyse de l'évolution et évaluation de la dégradation du couvert végétal*. Thèse de doctorat, Université de Liège, 132 p.
- INS (2011) - *Le Niger en chiffres 2011*. Édit. Institut National de la Statistique, Niamey, Niger, 79 p., en ligne : <https://www.yumpu.com/fr/document/read/37669706/le-niger-en-chiffres-2011/27>.
- KIAGE L.M., LIU K.B., WALKER N.D., LAM N. et HUH O.K. (2007) - Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, n° 19, p. 4285-4309.
- LALOU R., SULTAN B., MULLER B. et NDONKY A. (2019) - Does climate opportunity facilitate smallholder farmers' adaptive capacity in the Sahel? *Palgrave Communications*, vol. 5, article 85, en ligne : <http://agritrop.cirad.fr/596129/>.
- LEBEL T. et ALI A. (2009) - Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 1-2, p. 52-64.
- LEBLANC M., FAVREAU G., MASSUEL S., TWEED S.O., LOIREAU M. et CAPPELAERE B. (2008) - Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, vol. 61, n° 3-4, p. 135-150.
- LEDUC C., FAVREAU G. et SHROETER P. (2001) - Long term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology*, vol. 243, n° 1-2, p. 43-54.
- LEROUX L. (2015) - *Suivi et caractérisation des dynamiques de la production agricole en Afrique de l'ouest par télédétection à moyenne résolution spatiale*. Thèse de doctorat, AgroParisTech- Montpellier, 285 p.
- LO SEEN D., MOUGIN E., RAMBAL S., GASTON A. et HIERNAUX P. (1995) - A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, n° 3, p. 194-206.

-
- MAREGA O. (2016) - *Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger)*. Thèse de l'Université Paris-Diderot - Paris 7, 700 p.
- MAS J.F. (2000) - Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n° 4, p. 349-362.
- MBOW C., FENSHOLT R., RASMUSSEN K. et DIOP D. (2013) - Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements. *Journal of Arid Environments*, vol. 97, p. 56-65.
- MERING C., ANDRIEU J., SAN EMETERIO J.L. et TOULOUSE B. (2010) - Analyse spatio-temporelle du couvert végétal au Sahel par télédétection : intérêt d'une approche multiscale. In : *Les échelles pour les géographes et les autres*, colloque "Géopoint 2010" (Avignon), P. MARTIN édit., Édit. UMR ESPACE - Groupe Dupont, Avignon, p. 261-267.
- MUCHONEY D.M. et HAACK B.N. (1994) - Change detection for monitoring forest defoliation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 10, p. 1243-1251.
- MURAD C.A. et PEARSE J. (2018) - Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 11, p. 161-171.
- NICHOLSON S.E. (2005) - On the question of "the recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, vol. 63, n° 3, p. 615-641.
- NICHOLSON S.E. (2013) - The West African Sahel: a review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *International Scholarly Research Notices*, article ID 453521, en ligne : <http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521>.
- NOVELLA N. et THIAW W.M. (2013) - African rainfall climatology version 2 for famine early warning systems. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52, n° 3, p. 588-606.
- NUTINI F., BOSCHETTI M., BRIVIO P.A., BARTHOLOMÉ É., HOSCILO A., STROPPIANA D. et BOCCHI S. (2010) - Analysis of vegetation pasture climate response on Sahel region through 10 years remote sensed data. In : *Remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology XII*, actes de colloque (Toulouse), C.M.U. NEALE et A. MALTESE, Édit. SPIE Press, Proceedings of SPIE, vol. 7824, texte 782404, Bellingham (USA), 9 p..
- PAHARI K. et MURAI S. (1999) - Modelling prediction of global deforestation based on the growth of human population. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, n° 5-6, p. 317-324.
- PRINCE S.D., BROWN DE COLSTOUN E. et KRAVITZ L.L. (1998) - Evidence from rain use efficiencies does not indicate extensive sahelian desertification. *Global Change Biology*, vol. 4, n° 4, p. 359-374.
- SAN EMETERIO J.L. (2015) - *Désertification ou reverdissement ? Étude multiscale de l'évolution du couvert végétal en Afrique sahélienne à partir de données de télédétection*. Thèse de l'Université Paris-Diderot - Paris 7, 280 p.
- SAN EMETERIO J.L. (2018) - Desertification or greening? Multi-scale study of vegetation cover evolution in African Sahel from remote sensing data. *Photo-Interprétation*, vol. 54, n° 2, p. 48-51.
- SAN EMETERIO J.L., ALEXANDRE F., ANDRIEU J., GENIN A. et MERING C. (2013) - Changements socio-environnementaux et dynamiques des paysages ruraux le long du

-
- gradient bioclimatique nord-sud dans le Sud-Ouest du Niger (régions de Tillabery et de Dosso). *Vertigo*, en ligne : <https://journals.openedition.org/vertigo/14456>.
- SARR M.A. (2009) - Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo*, en ligne : <https://journals.openedition.org/cybergeo/22707>.
- SCHNEIDER U., BECKER A., FINGER P., MEYER-CHRISTOFFER A. et ZIESE M. (2018) - *GPCC full data monthly product version 2018 at 0.25°: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data*. Édit. Global Precipitation Climatology Center, Francfort (Allemagne), en ligne : https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/fulldata-monthly_v2018_doi_download.html.
- SOLLY B., DIEYE E.H.B., MBALLO I., SY O., SANE T. et THIOR M. (2020) - Dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers dans le Sud du Sénégal : cas du département de Vélingara, *Physio-Géo*, vol. 15, p. 41-67.
- SOULEY YERO K. (2012) - *Évolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : influence sur le cycle de l'eau*. Thèse de l'Université de Grenoble, 221 p.
- THIAM S., (1997) - *Suivi des écosystèmes sahéliens à partir de la télédétection satellitale : application au delta intérieur du Niger (Mali) et à la région du lac de Guiers (Sénégal)*. Thèse de l'Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne, 187 p.
- TUCKER C.J. et SELLERS P.J. (1986) - Remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1395-1416.
- VISCHEL T., LEBEL T., PANTHOU G., QUANTIN G., ROSSI A. et MARTINET M. (2015) - Le retour d'une période humide au sahel ? Observations et perspectives. In : *Les Sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, B. SULTAN, R. LALOU, M.A. SANNI, A. OUMAROU et M.A. SOUMARÉ édit., Édit. IRD, collection "Synthèses", p. 43-60.
- WEISMILLER R.A., KRISTOFF S.J., SCHOLZ D.K., ANUTA P.E. et MOMIN S.A. (1977) - Change detection in coastal zone environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n° 12. p. 1533-1539.
- WIEGAND T., SNYMAN H.A., KELLNER K. et PARUELO J.M. (2004) - Do grasslands have a memory: modeling phytomass production of a semiarid south African grassland. *Ecosystems*, vol. 7, n° 3, p. 243-258.

Article soumis le 30 janvier 2020.

Texte rendu conforme aux demandes des réviseurs le 26 août 2020.

Mise en ligne après échanges avec la Direction de la revue le 2 janvier 2021.